

**ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE
LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE
UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE
LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO**

**AUTOR:
EDISON ALBERTO AGREDA CUENCA**

**DIRECTOR:
EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES**

Quito, julio 2021

Nombre del autor

Edison Alberto Agreda Cuenca

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Edison Alberto Agreda Cuenca (Y'1991 – M'10). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Industrial “Miguel de Santiago” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el estudio de la estimación del costo de venta de energía eléctrica de una planta de energía virtual, basado en la elasticidad de la demanda aplicando política de pico crítico. eagrada@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Edwin Marcelo García Torres (Y'1978 -SM10). Se graduó en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana y de Máster en Gestión de Energía. Actualmente se encuentra trabajando para su doctorado en Ingeniería con la Universidad Pontificia Bolivariana. Área de interés: respuesta a la demanda, sistemas de automatización. Actualmente es miembro del GIREI (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group). egarcia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Edwin Marcelo García Torres declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO* realizado por Edison Alberto Agreda Cuenca, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., julio de 2021



Edwin Marcelo García Torres

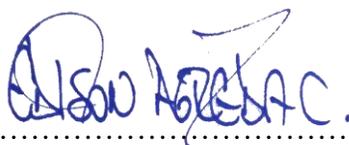
C.C.: 180308740-0

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Edison Alberto Agreda Cuenca, con documento de identificación N° 0604114280, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., julio de 2021



.....

Edison Alberto Agreda Cuenca

C.C.: 060411428-0

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	4
2	MARCO TEÓRICO	5
2.1	Gestión de una planta de energía virtual	5
2.1.1	Generación Distribuida	5
2.1.2	Respuesta a la Demanda.....	5
2.1.3	Planta de Energía Virtual	5
2.1.4	Sistema de Gestión de una Planta Virtual de Energía.....	5
3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA CÁLCULO DE COSTOS.....	6
3.1	Costos fijos de generación.....	6
3.2	Costos variables de generación	6
3.3	Costo total de generación	7
3.4	Planteamiento del problema	7
3.5	Caso de Estudio.....	7
3.6	Demanda Eléctrica	7
3.7	Pseudocódigo	8
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	8
5.	CONCLUSIONES	10
5.1	Trabajos Futuros.....	11
6.	REFERENCIAS	11
6.1	Matriz de Estado del Arte.....	14
6.2	Resumen de Indicadores.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema IEEE de 9 barras.....	7
Figura 2. Curva de demanda de potencia.	8
Figura 3. Costo de energía eléctrica.	9
Figura 4. Demandas baja, media y alta en el día.	9
Figura 5. Costo de energía eléctrica, con criterio de pico crítico.	9
Figura 6. Costo de generación hidráulica y térmica.	9
Figura 8. Comparativa de despachos económicos.....	10
Figura 9. Resumen e indicador de la temática – Estado del Arte.....	17
Figura 10. Indicador de formulación del problema – Estado del Arte.	17
Figura 11. Indicador de solución – Estado del Arte.	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de costos de una planta hidráulica	6
Tabla 2. Variables de costo de una planta térmica.....	6
Tabla 3. Costos variables de generación hidráulica	7
Tabla 4. Costos variables de generación térmica	7
Tabla 5. Algoritmo para despacho económico.....	8
Tabla 6. Matriz del Estado del Arte	14

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DEL PICO CRÍTICO

Resumen

En el presente documento se desarrolla un análisis de costos de energía eléctrica, considerando factores importantes como excedentes y generación de electricidad; se incluyen los parámetros de costos fijos y costos variables que servirán para encontrar los costos totales de generación de electricidad; por otro lado, se detallan modelos matemáticos de diferentes tecnologías de generación eléctrica y definiciones que engloban la metodología implementada. La gestión de las fuentes de generación se realiza por medio de una planta de energía virtual, ya que esta tiene la capacidad de administrar eficientemente los recursos; para el análisis se estudiará dos escenarios de fuentes de generación hidráulica y térmica.

Adicionalmente, se obtendrá la estimación de costos de electricidad de las fuentes de generación empleadas, tomando en cuenta los parámetros de costos de generación. Para mejorar la eficiencia se implementa un programa de respuesta a la demanda y comparaciones de costos de generación de las fuentes analizadas.

Palabras Clave: Despacho de Generación de Energía, Demanda de Energía, Gestión de la Energía, Planta Virtual de Energía, Recursos Energéticos.

Abstract

In this document an analysis of electrical energy costs is developed, considering important factors such as surpluses and electricity generation; The parameters of fixed costs and variable costs are included that will serve to find the total costs of electricity generation; on the other hand, mathematical models of different electricity generation technologies and definitions that encompass the implemented methodology are detailed. The management of generation sources is carried out by means of a virtual power plant, since it can efficiently manage resources; For the analysis, two scenarios of hydraulic and thermal generation sources will be studied.

Additionally, the estimate of electricity costs of the generation sources used will be obtained, considering the generation cost parameters. To improve efficiency, a demand response program is implemented, and generation cost comparisons of the sources analyzed are implemented.

Key Words: Energy Management, Energy Resources, Power Generation Dispatch, Power Demand, Virtual Power Plant.

1 Introducción

La inserción de energías renovables ha ido creciendo a un alto nivel; muchos sectores preocupados por el medio ambiente buscan reducir la generación de electricidad mediante sistemas de generación a base de combustibles; estos reducen continuamente costos, aumentando la eficiencia y de esta manera disminuir la contaminación y preservar el medio ambiente[1][2].

La integración de los recursos renovables ha sido de manera general en centrales eléctricas de transmisión o por todo el sistema de distribución como generación distribuida, estos pueden ubicarse en redes de bajo y alto voltaje; la integración de estos recursos en las centrales eléctricas ha sido un problema que se lo puede resolver con el concepto de una planta de energía virtual[3] [4] [5].

En una planta de energía virtual típica se añaden diferentes tipos de recursos de energía distribuida, como generación de energía renovable, turbina de gas y cargas flexibles; que a través de software y comunicaciones avanzadas pueden ser controladas; esta brinda información en tiempo real a sus usuarios y es un medio de comunicación entre los recursos de generación distribuida, conectados al mercado mayorista de energía eléctrica; ya que son demasiados pequeños para mostrarse directamente. La planta de energía virtual tiene las mismas características operativas de una central de energía convencional, incluidos los aspectos de costos operativos, límites de generación y estructuras de oferta [4]- [6].

La integración de edificios comerciales, residenciales, plantas industriales y estacionamientos de vehículos eléctricos como una planta de energía virtual que es controlada por un operador, ya que estas consiguen satisfacer la demanda de energía requerida por las cargas locales durante las

horas pico, con altos costos de electricidad; la alta intermitencia de los recursos de energías renovables en la licitación de una planta de energía virtual conlleva altos riesgos, para mitigar este impacto se han sugerido mecanismos de precios para el comercio [7]–[10].

Las diferentes zonas industriales y comerciales suman un gran porcentaje en el consumo de energía eléctrica, esta es usada para satisfacer la demanda de producción de cada una de estas; el consumo es variado en las diferentes horas del día, por lo cual se genera un excedente de energía, que al no ser gestionado no permite la reutilización de estos recursos; al presentarse este inconveniente y por medio de la integración de los recursos a una planta virtual de energía, se pretende administrar de mejor manera los excedentes de energía. Al tener una gestión de los recursos, se puede implementar la venta de energía eléctrica por medio de un programa de respuesta a la demanda, que servirá para mejorar la confiabilidad del servicio eléctrico y como punto importante, el manejo eficiente del recurso, generando un beneficio económico entre las partes involucradas dentro de la planta virtual de energía [11]–[16].

Al tener un programa de respuesta a la demanda, se puede definir los costos de comercialización de la energía eléctrica, pero para llegar a definirlos se tiene que realizar un análisis del pico crítico que se encuentre en la demanda de las zonas, donde se integrará la planta virtual de energía, al tener los datos recopilados y por medio de la programación mixta de enteros, se establece la elasticidad de la demanda para obtener los costos económicos de acuerdo a los parámetros y variables que beneficiará a los usuarios finales [12]–[15].

En este artículo se analiza los costos totales de generación en dos escenarios de estudio: generación hidráulica y generación térmica, en cada caso intervienen diferentes

variables que permitirán evaluar el costo de generación de una planta virtual al usuario final, es importante mencionar que los resultados están expresados en dólares por kWh (USD/kWh).

A partir de esta sección, la estructura del presente documento incluye: Modelos matemáticos de las diferentes tecnologías de generación en la sección 2; definición de los costos variables, fijos y totales se detallan en la sección 3 al igual que el planteamiento del problema, caso de estudio, entre otros; la sección 4 comprende el análisis de resultados, la sección 5 contempla las conclusiones y trabajos futuros.

2 Marco teórico

2.1 Gestión de una planta de energía virtual

Es necesario tener claro qué tipos de fuentes de generación de energía van a estar gestionados por medio de la planta de energía virtual VPP, ya que en esta etapa se obtiene todos los datos de las generadoras.

2.1.1 Generación Distribuida

La generación distribuida tiene como objetivo poseer fuentes de generación cercanas a los lugares de consumo, esto debido al crecimiento de las ciudades a la no existencia de una red pública que pueda solventar la demanda energética, para ello la generación distribuida, emplea energías primarias para facilitar la generación de electricidad en dichos lugares, obteniendo eficiencia y el continuo abastecimiento de electricidad, hasta llegar al usuario final [16].

Las nano y micro redes eléctricas que generan pequeñas potencias, en rangos que van desde 1 [W] a 5[kW] respectivamente, pueden conectarse a los sistemas de transmisión o distribución, teniendo la ventaja de recibir o entregar energía

eléctrica; es decir, su sistema es bidireccional [17].

2.1.2 Respuesta a la Demanda

La respuesta a la demanda se aplica cuando existe un crecimiento de usuarios, aumentando también la demanda de energía eléctrica; esta se clasifica en dos tipos, el primero implica un fortalecimiento de todas las etapas de un sistema eléctrico de potencia, construyendo nuevas centrales de generación, líneas de transmisión y distribución; mientras que la segunda tiene como objetivo reducir el consumo de energía eléctrica por medio de incentivos dirigidos al usuario para que este no consuma una gran cantidad de energía eléctrica durante las consideradas horas pico, donde existe una alta demanda [18] [19].

2.1.3 Planta de Energía Virtual

En una planta de energía virtual se pueden encontrar fuentes de generación renovables no convencionales, sistemas de almacenamiento de electricidad y plantas de generación con capacidad de inercia; un sistema de gestión interno es importante en una planta de energía virtual; ya que esta deberá administrar los recursos cuando se encuentre en el mercado eléctrico. En la actualidad una planta de energía virtual se la define como un controlador y agregador de la generación distribuida [20].

2.1.4 Sistema de Gestión de una Planta Virtual de Energía

Un sistema de gestión de una planta de energía virtual tiene como función principal, coordinar la dirección de la energía eléctrica en el sistema y la comunicación entre todas las fuentes de energía que la componen; ya que estas estarán conectadas de forma bidireccional; el sistema de gestión también tiene la obligación de restringir y controlar

el funcionamiento de la planta de energía virtual de acuerdo a los límites de las generadoras, de igual manera debe garantizar la seguridad y costos de cada generadora que se encuentre conectada y proteger toda la información que se genera para evitar ataques físicos o cibernéticos al sistema [20].

3 Implementación del modelo para cálculo de costos

El análisis del modelo implementado se basa en las ecuaciones siguientes; estas contemplan diferentes variables como: costo de inversión, tasa de retorno, vida útil, costos de operación y mantenimiento y costo unitario de energía primaria.

3.1 Costos fijos de generación

El costo fijo de generación hace referencia a los costos iniciales de implementación de una central de generación eléctrica; este se basa en la inversión principal de la planta generadora; tomando en cuenta su vida útil y de acuerdo con la tecnología utilizada se puede especificar su tasa de retorno.

Otros parámetros por considerar para la obtención de estos costos son los de operación y mantenimiento, que se basan el tipo de generación.

Para obtener los costos fijos de generación, se realizó el análisis bajo dos escenarios: generación hidráulica y generación térmica.

Los datos utilizados para definir los costos fijos de generación de una planta hidráulica se detallan en la tabla 1, mientras que en la tabla 2 se detallan los datos de una planta térmica; en las cuales el costo de inversión unitario y vida útil representan los valores de implementación de una planta de generación, la tasa de retorno es el porcentaje de recuperación de la inversión, el factor de anualidad, ecuación 39, permite

determinar el tiempo en el que retorna la inversión realizada, los costos de operación y mantenimiento se definen a partir de la inversión inicial que varía de acuerdo con la tecnología utilizada.

Tabla 1. Variables de costos de una planta hidráulica.

Variable	Descripción
Costo de inversión	1.250.00 (USD/kW)
Vida Útil	40 años
Tasa de Retorno	0.12
Factor de Anualidad	0.12
Operación y mantenimiento	0.02%

Tabla 2. Variables de costo de una planta térmica.

Variable	Descripción
Costo de inversión	350.00 (USD/kW)
Vida Útil	25 años
Tasa de Retorno	0.12
Factor de Anualidad	0.13
Operación y mantenimiento	0,03 (%)

$$FA = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^T}} \quad (1)$$

Donde:

FA: Factor de anualidad, r: tasa de retorno, T: vida útil de la planta.

3.2 Costos variables de generación

El costo variable depende directamente de la tecnología implementada.

En la tabla 2, se detalla los parámetros a considerar para obtener los costos variables de generación hidráulica, mientras que en la tabla 3 se detallan los parámetros de generación térmica en donde: el costo unitario de energía primaria se refiere al costo en dólares por unidad de consumo, el costo específico viene dado en unidades de consumo por kWh, el costo variable de combustible se representa en dólares por kWh y los costos variables no combustibles

especifica los elementos necesarios para el óptimo desempeño de las máquinas de generación [21].

Tabla 3. Costos variables de generación hidráulica.

Variable	Descripción
Costo unitario de energía primaria	0.0002 (USD/UC)
Costo específico	0.0003 (UC/kWh)
Costo variable de combustible	6×10^{-8}
Costo variable no combustibles	0.0008

Tabla 4. Costos variables de generación térmica.

Variable	Descripción
Costo unitario de energía primaria	0.34 (USD/kW)
Costo específico	0.002
Costo variable de combustible	0.00007
Costo variable no combustibles	0.007

3.3 Costo total de generación

El costo total de generación es la suma del costo fijo y el costo variable de generación.

3.4 Planteamiento del problema

El presente estudio, analiza la estimación de los costos de energía eléctrica, esta será generada y obtenida por los excedentes de energía eléctrica.

Al no tener una estación física se gestionará los recursos eléctricos por medio de una planta de energía virtual, la cual tendrá diferentes centrales de generación; los casos de estudio se basarán en dos sistemas de generación como son: térmicas e hidráulicas; las cuales estarán conectadas y funcionarán como un generador eléctrico; las cargas serán usuarios residenciales y comerciales.

Los análisis se van a realizar en un tiempo de 24 horas y bajo esta consideración, se obtendrá comparaciones de la fuente de energía que ofrece precios bajos y alta eficiencia.

3.5 Caso de Estudio

Para el caso de estudio, se estimará el costo de electricidad que gestiona una planta de energía virtual, esta contará con una potencia total de 30MW, obtenidos de fuentes de generación hidráulica y térmica; cada fuente aportará con 15 MW a la potencia total de la planta.

Para el desarrollo del análisis se aplica el modelo IEEE de 9 barras, este contará con fuentes de generación en cada una de ellas, como se observa en la figura 1.

El escenario de referencia para el análisis es de 24 horas de un día laborable en Ecuador.

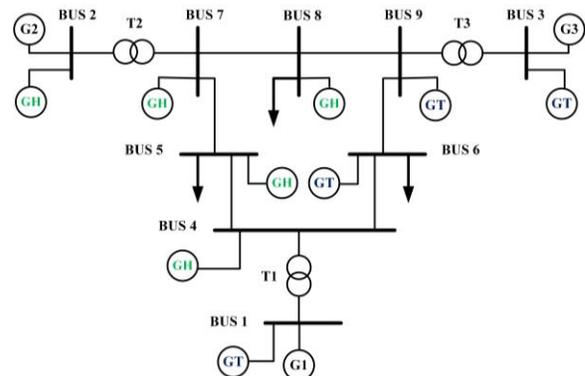


Figura 1. Esquema IEEE de 9 barras.

Los generados conectados a las 9 barras del esquema IEEE, se clasifican en GH y GT; estos representan a las dos fuentes de generación hidráulica y térmica, respectivamente.

3.6 Demanda Eléctrica

La curva de demanda, tomada para los análisis de costos de generación de electricidad, es la demanda eléctrica ecuatoriana.

La curva es obtenida de un día de jornada laborable en el país; en la figura 1, se puede observar la fluctuación de la demanda de acuerdo con las diferentes horas del día.

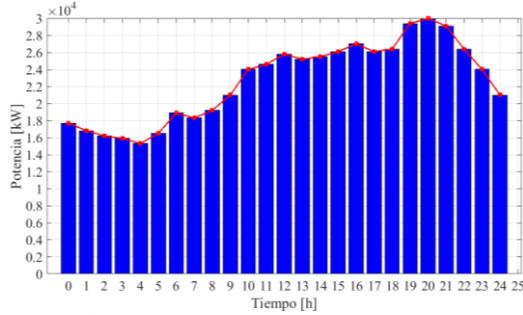


Figura 2. Curva de demanda de potencia.

3.7 Pseudocódigo

En la tabla 5 se aprecia el pseudocódigo en el cual se detalla el despacho económico realizado.

Tabla 5. Algoritmo para despacho económico.

Algoritmo para el despacho económico	
Paso 1:	Declaración de variables
	<i>P1: Potencia generador 1</i>
	<i>P2: Potencia generador 2</i>
	<i>P3: Potencia generador 3</i>
	<i>Pvpp: Potencia planta virtual de energía</i>
	<i>Cg1: Costo generador 1</i>
	<i>Cg2: Costo generador 2</i>
	<i>Cg3: Costo generador 3</i>
	<i>Cvpp: Costo planta de energía virtual</i>
	<i>Pd: Potencia de demanda</i>
Paso 2:	Asignación de Pmin, Pmax y costos de generación para las fuentes y planta de energía virtual.
	<i>P1 Max</i>
	<i>P2 Max</i>
	<i>P3 Max</i>
	<i>Pvpp Max</i>
	<i>P1 Min</i>
	<i>P2 Min</i>
	<i>P3 Min</i>
	<i>Pvpp Min</i>
	<i>Cg1 USD/kW</i>
	<i>Cg2 USD/kW</i>
	<i>Cg3 USD/kW</i>
	<i>Cvpp USD/kW</i>
	<i>PdkW</i>
Paso 3:	Ecuaciones para el despacho económico.
	$eqOF$
	eqO
	$eqOF = e = \sum P1 \times Cg1 + P2 \times Cg2 + P3 \times Cg3 + Vpp \times Cvpp$

$$eqO = Pd = \sum P1 + P2 + P3 + Vpp$$

Paso 4: Asignación de restricciones

$$P1.lo = P1Min$$

$$P2.lo = P2Min$$

$$P3.lo = P3Min$$

$$Vpp.lo = VppMin$$

$$P1.up = P1Max$$

$$P2.up = P2Max$$

$$P3.up = P3Max$$

$$Vpp.up = VppMax$$

4. Análisis de resultados

De acuerdo con el análisis realizado para la estimación de costos de electricidad, se tomó en primera instancia un modelo de curva de demanda eléctrica (figura 2); a partir del cual se desarrolló un despacho económico.

En el despacho económico realizado, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para aplicar los criterios propuestos en el documento.

La potencia implementada para el análisis fue de 30MW; esta fue aplicada en la curva de demanda de potencia, para así obtener un escenario de análisis y realizar el despacho económico se incorporó fuentes de generación externa en conjunto con la planta de energía virtual.

Al tener los resultados del despacho económico, evaluando cada hora del día, se obtuvo: para las 04H00 existe un consumo de alrededor de 15,300k, siendo este el consumo más bajo del día, mientras que para las 20H00 presenta un existe un mayor consumo de alrededor de 30,000kW.

Con estos valores de consumo a modo de referencia, se determina que: el precio de despacho a las 04H00 es de 2.21cUSD/kW y de 6,76cUSD/kW para las 20H00; siendo este último el costo más elevado de acuerdo con la curva de demanda de potencia.

En la figura 2 se puede apreciar los costos de energía, en el resultado del despacho económico realizado, se observa que la

demanda a las 04H00 es menor comparada con la de las 20H00, ya que esta es la más alta que existe durante las 24 horas del día.

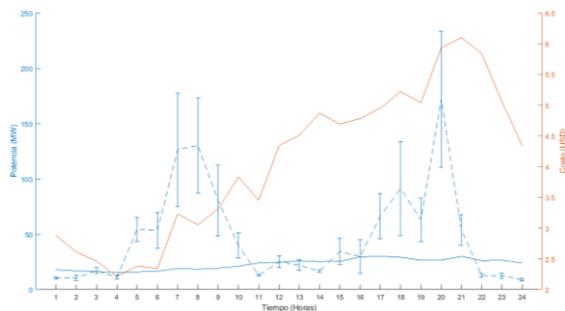


Figura 3. Costo de energía eléctrica.

En la figura 4 se observa las demandas: baja, media y alta, obtenidas al realizar el despacho económico, con los siguientes valores: el costo promedio de la demanda baja es de alrededor de 2,43cUSD/kW: mientras que la demanda media encontrada tiene en promedio, un costo de 4,67cUSD/kW; finalmente, para la demanda alta en el día, se obtiene un costo promedio aproximado de 6,58cUSD/kW.

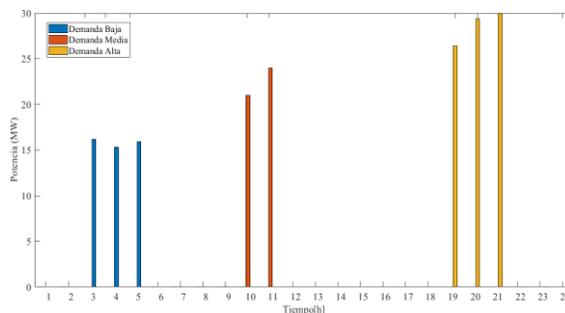


Figura 4. Demandas baja, media y alta en el día.

Al aplicar el criterio del pico crítico a las máximas demandas de la curva de potencia; se realizó el despacho económico, tomando como referencia 3 horarios distintos: a las 19H00 con una demanda de alrededor de 26,460kW se obtiene que el precio es de 5,48cUSD/kW, esto es 16% menos que el costo en el despacho sin aplicar el criterio de pico crítico; para las 20H00 con una demanda de alrededor de 27,000kW el

precio de despacho es de 5,7cUSD/kW, en este caso se tiene un 19% menos que el costo anterior; para las 21H00, donde también se registra una demanda alta de consumo, al aplicar el criterio de pico crítico y realizando el despacho económico se obtiene una demanda de alrededor de 26,190kW con un costo de energía de 5,4cUSD/kW, esto representa un 19% menos en el costo inicial.

En la figura 5 se aprecia los costos de energía, aplicando el criterio del pico crítico; las horas analizadas con alta demanda fueron las 19H00, 20H00 y 21H00.

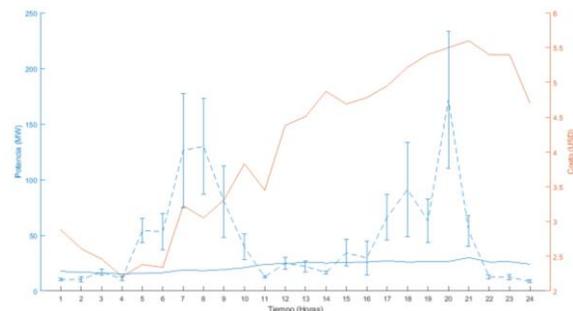


Figura 5. Costo de energía eléctrica, con criterio de pico crítico.

La figura 6, indica la comparación de costos de electricidad, entre la generación hidráulica y la térmica.

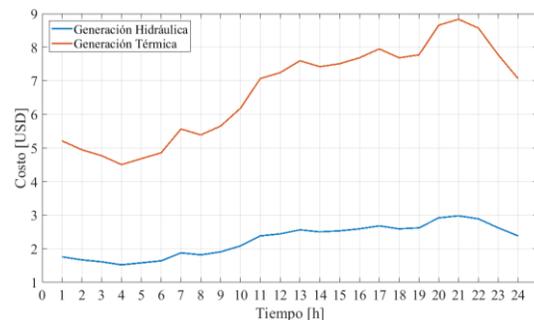


Figura 6. Costo de generación hidráulica y térmica.

Como se observa en la figura anterior; la curva de demanda correspondiente a la generación térmica (naranja), llega alrededor de un costo máximo de 8,83cUSD/kW en la demanda alta del día; mientras que la curva de demanda de

generación hidráulica (azul) en su demanda máxima tiene un costo de alrededor de 2,97cUSD/kW.

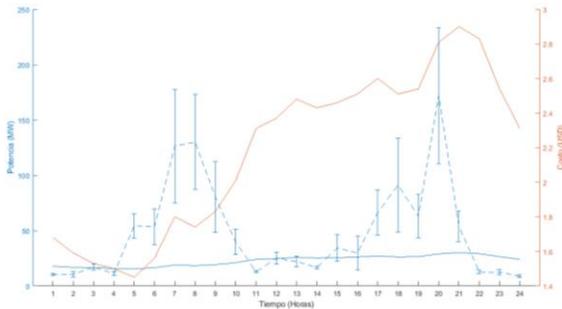


Figura 7. Despacho económico con generación de la planta de energía virtual.

La figura 7, muestra el resultado del despacho económico, obtenido de la generación de electricidad que es gestionada por la planta de energía virtual; este es realizado bajo el mismo escenario de análisis especificado en este documento, el cual comprende 24 horas de un día laborable.

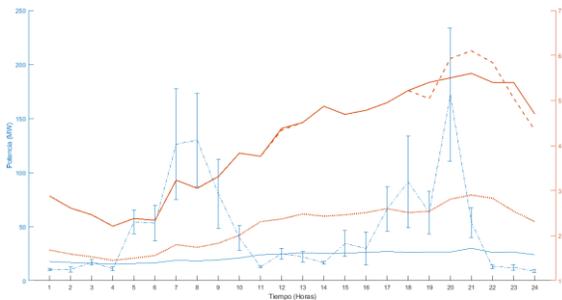


Figura 7. Comparativa de despachos económicos.

En la figura 8 se puede observar la comparativa entre los despachos económicos desarrollados en el presente documento. La curva del despacho económico realizado solamente con datos de la planta de energía virtual se presenta en línea punteada de color rojo, la curva del despacho económico aplicando la política del pico crítico se presenta en la línea de color rojo, finalmente la curva de línea roja entrecortada presenta el despacho económico normal realizado en conjunto con la planta de energía virtual y generación

externa, esta misma combinación se realizó para obtener los datos al aplicar la política del pico crítico.

5. Conclusiones

Este documento analiza el costo de generación de energía eléctrica bajo un escenario de programa de respuesta a la demanda con la política del pico crítico, integrados a una planta de energía virtual, este procedimiento realizado por medio de una heurística representa el análisis de rentabilidad de generación desde los puntos de vista del tipo de tecnología que se implementan.

Mediante la aplicación del modelo planteado para el análisis de costos de electricidad, se ha logrado obtener el costo de generación con el cual trabajará la planta de energía virtual que será alrededor de 5,37cUSD/kW, en comparación a la red pública es un costo bajo de generación de electricidad.

Al aplicar la política del pico crítico en las demandas máximas encontradas en la curva de demanda, se obtiene que el promedio de reducción del costo de energía es de alrededor del 18%, este valor se obtuvo de la reducción en un 10% de las demandas máximas encontradas al momento del análisis.

Por otro lado, los resultados obtenidos indican que en los escenarios analizados se puede aprovechar al máximo los recursos de generación distribuida con una alta eficiencia en la operación, tomando en cuenta los límites técnicos y precios de energías primarias de acuerdo con la tecnología en uso.

Los excedentes de electricidad de las diferentes fuentes podrían ser almacenadas en bancos de baterías de acuerdo con la capacidad que estas registren, esta energía almacenada se podrá utilizar cuando las generadoras no dispongan de los recursos

para generar a la potencia requerida y de esta manera optimizar la generación de electricidad.

Al comparar los costos de energía eléctrica entre la generación hidráulica y térmica, se determina que el costo de la primera es de 66,36% menos, en comparación al costo de la generación térmica; durante la hora de demanda máxima que es a las 21H00.

5.1 Trabajos Futuros

Al finalizar con el análisis de los resultados, se plantean futuras investigaciones que se pueden desarrollar a partir de este documento; se mencionan los siguientes:

Implementación de más fuentes de generación de energía renovable a la planta de energía virtual, para que esta gestione sus recursos.

Aumentar la potencia que entregan las fuentes de generación, comprobando su aplicabilidad en los sistemas de IEEE.

Considerar el criterio de pico crítico con un porcentaje mayor al presentado en este documento.

Realizar un análisis comparativo de desplazamiento de cargas, para identificar la política más eficiente para el programa de respuesta a la demanda.

6. Referencias

- [1] D. Jigoria-Oprea, G. Vuc, and M. Litcanu, "Optimal management of a virtual power plant," *EEEIC 2016 - Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 9, pp. 0–4, 2016, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555616.
- [2] M. Hanan, X. Ai, S. Salman, W. Yousaf, E. Asghar, and M. Y. Javed, "Multi-operating Modes Based Energy Management Strategy of Virtual Power Plant," *2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr. EI2 2018 - Proc.*, pp. 3–8, 2018, doi: 10.1109/EI2.2018.8582406.
- [3] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2078843.
- [4] Z. Liu, B. Zou, J. Huang, X. Zhang, L. Wang, and F. Wen, "Optimal Planning of a Virtual Power Plant with Demand Side Management," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2018-October, no. October, pp. 859–864, 2019, doi: 10.1109/TENCON.2018.8650125.
- [5] F. Luo, Z. Y. Dong, K. Meng, J. Qiu, J. Yang, and K. P. Wong, "Short-term operational planning framework for virtual power plants with high renewable penetrations," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 5, pp. 623–633, 2016, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0358.
- [6] R. Caldon, a R. Patria, and R. Turri, "Optimal control of a distribution system with a virtual power plant," *Bulk Power Syst. Dyn. Control*, vol. 6, no. January, pp. 278–284, 2004.
- [7] M. Peikherfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market," *3rd Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2011*, pp. 204–210, 2011, doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036275.
- [8] N. D. Hatziaargyriou *et al.*, "Evaluation of Virtual Power Plant (VPP) operation based on actual measurements," *IET Conf. Publ.*, vol. 2010, no. 572 CP, pp. 1–8, 2010, doi: 10.1049/cp.2010.0876.
- [9] A. Zahedmanesh, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Consecutive Energy

- Management Approach for a VPP Comprising Commercial Loads and Electric Vehicle Parking Lots Integrated with Solar PV Units and Energy Storage Systems,” *Proc. - 2019 IEEE 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf. GPECOM 2019*, no. ii, pp. 242–247, 2019, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778609.
- [10] A. Lesniak, “Optimization of the flexible virtual power plant operation in modern power system,” *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, vol. 2018-June, pp. 4–8, 2018, doi: 10.1109/EEM.2018.8469830.
- [11] W. Tang and H. T. Yang, “Optimal Operation and Bidding Strategy of a Virtual Power Plant Integrated with Energy Storage Systems and Elasticity Demand Response,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 79798–79809, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2922700.
- [12] C. L. Su, H. M. Chung, C. Y. Wei, and C. K. Wen, “Optimal VPP operation strategy in liberalized electricity markets,” *2015 IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2015 - Conf. Proc.*, pp. 478–481, 2015, doi: 10.1109/IEEEIC.2015.7165209.
- [13] F. S. Gazijahani and J. Salehi, “IGDT-Based Complementarity Approach for Dealing with Strategic Decision Making of Price-Maker VPP Considering Demand Flexibility,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2212–2220, 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2932107.
- [14] S. R. Dabbagh and M. K. Sheikh-El-Eslami, “Participation of demand response resources through virtual power plant: A decision framework under uncertainty,” *2015 IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2015 - Conf. Proc.*, pp. 2045–2049, 2015, doi: 10.1109/IEEEIC.2015.7165490.
- [15] H. T. Nguyen, L. B. Le, and Z. Wang, “A Bidding Strategy for Virtual Power Plants with the Intraday Demand Response Exchange Market Using the Stochastic Programming,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3044–3055, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2828379.
- [16] D. Carrión and L. Ortiz, “Generación distribuida a partir de bicicletas estáticas y sistemas híbridos,” *Ingenius*, no. 10, pp. 44–48, 2013, doi: 10.17163/ings.n10.2013.05.
- [17] A. Riofrio, D. Carrión, and D. Vaca, “Propuesta de Modelo de Operación Aplicado a Micro Redes Fotovoltaicas en Generación Distribuida,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 12, no. 1, pp. 216–229, 2016, doi: 10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.47.
- [18] D. Jarrín and M. Garcia, “Gestión energética para una óptima respuesta a la demanda en micro redes inteligentes,” *2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 14–20, 2017.
- [19] M. García, I. Isaac, J. Gonzales, and G. Lopez, “Efficient scheme model for electric power tariffs with distributed generation, based on demand response,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conf. - Living Energy Transition, FISE/CIGRE 2019*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8985003.
- [20] D. Canacuán and D. Carrión, “Estado del arte despacho óptimo de energía en plantas virtuales de generación basado en flujos dinámicos de potencia,” *I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, p. 104, 2021.

[21] Flores Alberto, “Generación Eléctrica,” pp. 86-90, 2012.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 6. Matriz del Estado del Arte.

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO																														
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
				Gestión de la planta virtual de energía	Análisis del pico crítico	Programa de Respuesta a la Demanda	Estimación de costos	Optimización de modelo	Generación Distribuida	Excedente de energía comercial	Excedente de energía industrial	Pérdidas de energía	Precios altos en diferentes zonas	Integración de la Planta virtual en el	Heurísticas	Fuentes de generación	Nivel de Voltaje	Zonas Especificas	Capacidad de Reserva	Generación para formar la planta virtual de	Modelos de optimización	Árbol de Decisiones	Programación Mixtos Enteros	Algoritmos	Programa de Respuesta a la Demanda	Elasticidad de la Demanda	Programación Lineal Mixtos Enteros	Simulaciones de plantas de energía virtual	Programas de respuesta a la demanda	Política del pico crítico
1	2016	Optimal management of a virtual power plant	17	■		■					■						■						■	■			■			
2	2018	Multi-operating Modes Based Energy Management Strategy of Virtual Power Plant	0												■															
3	2010	Real-Time Demand Response Model	971																			■								
4	2018	Optimal Planning of a Virtual Power Plant with Demand Side Management	0	■		■																								
5	2016	Short-term operational planning framework for virtual power plants with high renewable penetrations	57	■																										

6.2 Resumen de Indicadores

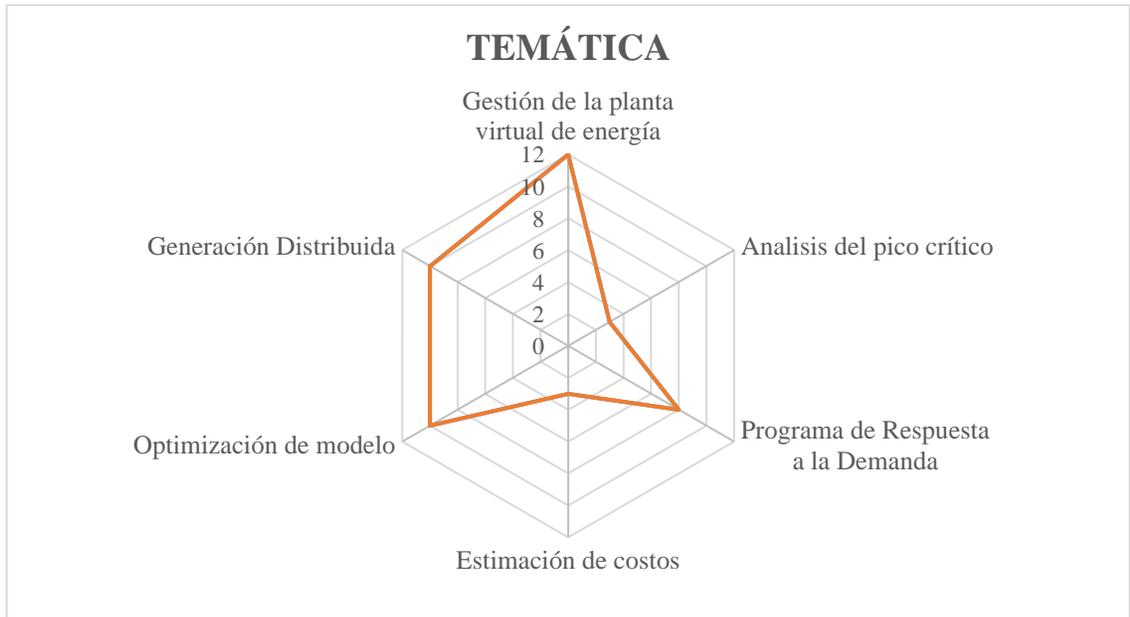


Figura 8. Resumen e indicador de la temática – Estado del Arte.

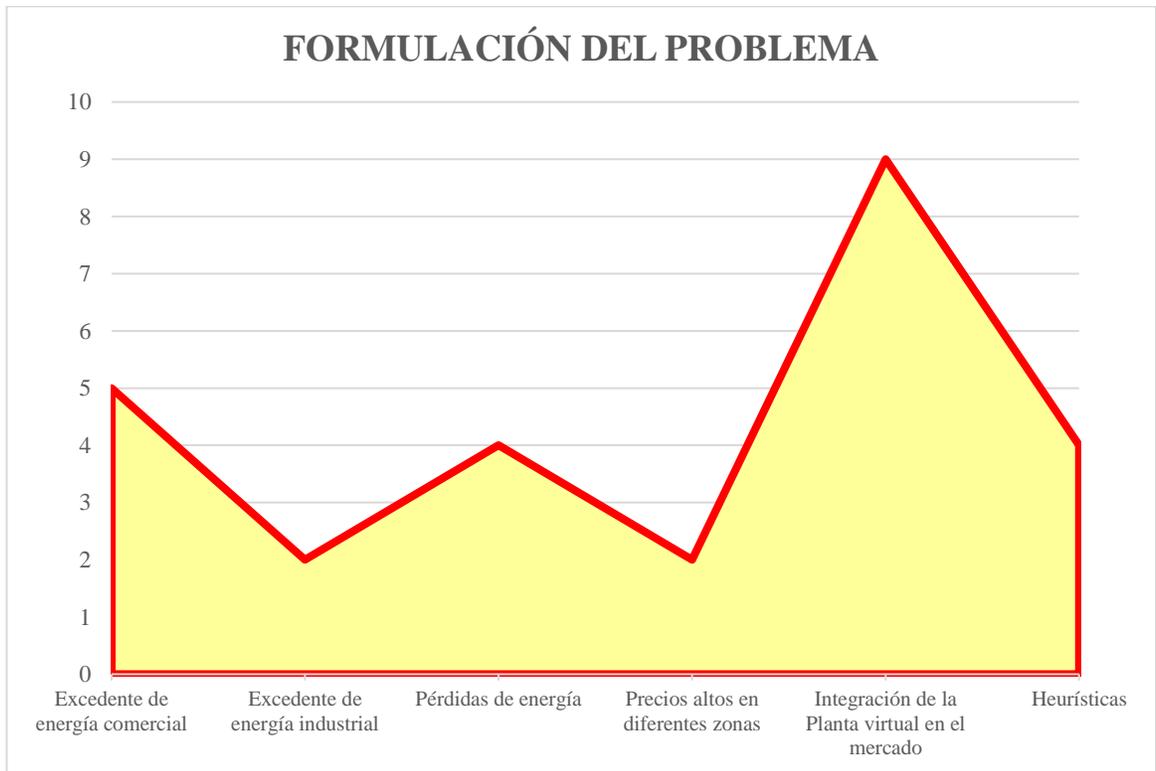


Figura 9. Indicador de formulación del problema – Estado del Arte.

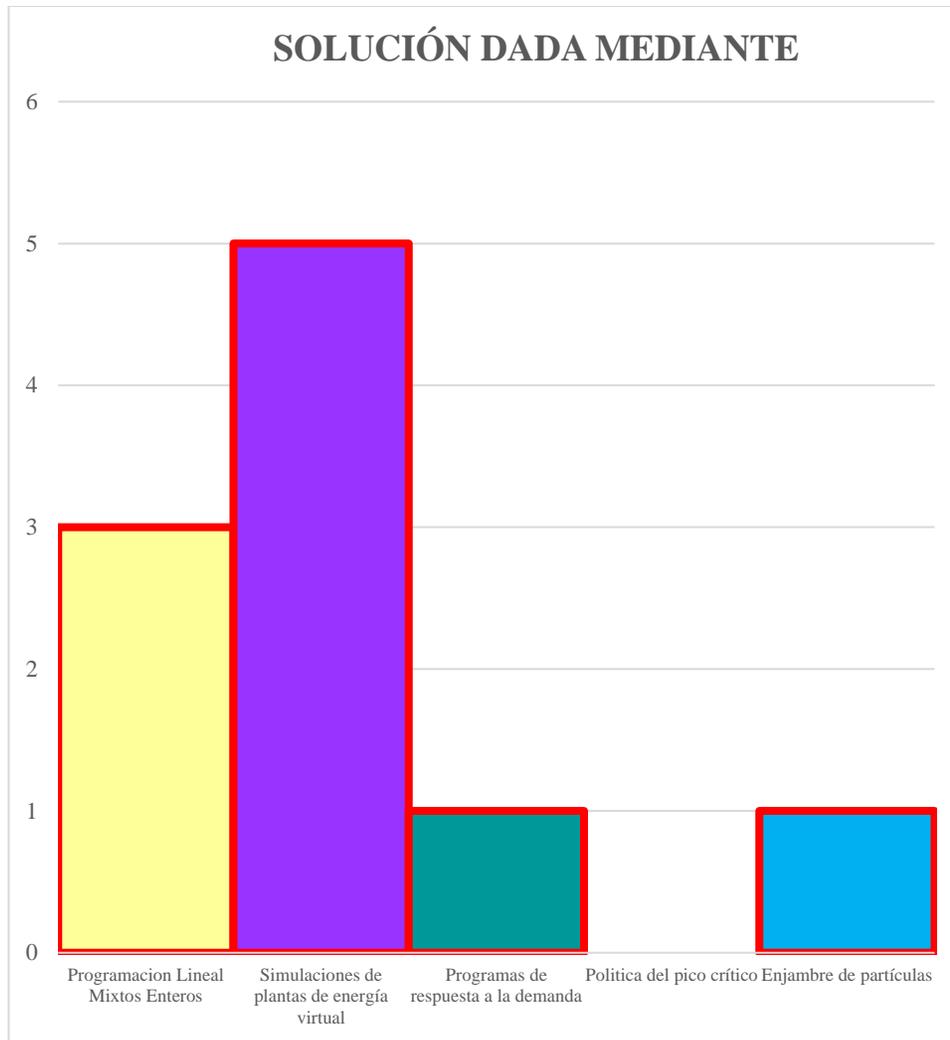


Figura 10. Indicador de solución – Estado del Arte.