

**INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA
(SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA
DEMANDA**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA
(SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA
DEMANDA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ANDRÉS STALIN CHAUSÁ OROZCO
TUTOR: ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

Quito -Ecuador
2023

Andrés Stalin Chausá Orozco

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Andrés Stalin Chausá Orozco (Y'1991-M'11). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio “Instituto Tecnológico Superior Central Técnico” de la ciudad de Quito, donde obtuvo el título de Bachiller en Mecánica Industrial. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo propone la formulación de un modelo de optimización para determinar la integración y asignación horaria de potencia de los Sistemas Concentradores de Energía (SCE), para satisfacer la demanda de energía eléctrica. achausa@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila Téllez (Y'1981 – M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. En 2019 Recibió el título de Magíster en Ingeniería y 2021 el título de Doctor en Ingeniería (Magna Cum Laude), ambos, en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín. Es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables, la confiabilidad y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador. aaguila@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

©2023 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Andrés Stalin Chausá Orozco con documento de identificación N° 1721396560 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de marzo del año 2023

Atentamente,



Andrés Stalin Chausá Orozco
1721396560

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Andrés Stalin Chausá Orozco con documento de identificación No. 1721396560, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Integración óptima de Sistemas Concentradores de Energía (SCE) para garantizar el abastecimiento eficiente de la demanda”, el cual 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 concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de marzo del año 2023

Atentamente,



Andrés Stalin Chausá Orozco

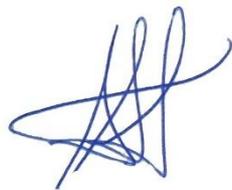
1721396560

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alexander Águila Téllez con documento de identificación N° 1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA, realizado por Andrés Stalin Chausá Orozco con documento de identificación N° 1721396560, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de marzo del año 2023

Atentamente,



Ing. Alexander Águila Téllez, Ph.D.
1755983184

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Concentración de estructuras energéticas o sistemas de energía múltiple ..	4
2.1.1	Tipos de sistemas concentradores de energía.....	5
2.1.2	Beneficios de los sistemas de energía integrada.....	6
2.1.3	Aplicaciones de los sistemas concentradores de energía.....	7
2.1.4	Componentes de los centros de energía.....	8
2.2	Optimización de los sistemas concentradores de energía	11
3	Integración óptima de Sistemas Concentradores de Energía (SCE).....	12
3.1	Costos asociados a los recursos primarios.....	12
3.2	Abastecimiento de la demanda eléctrica.....	13
3.3	Balance horario para el uso de gas como recurso energético.....	13
3.4	Abastecimiento de la demanda usada para calentamiento.....	14
3.5	Balance horario para el uso de gas en la caldera.....	14
3.6	Abastecimiento de la demanda usada para enfriamiento.....	14
3.7	Algoritmo de solución.....	14
4	Aspectos a considerar para evaluar el modelo.....	15
4.1	Demanda.....	15
4.2	Parámetros de los elementos para modelar el HUB	16
4.3	Casos de estudio	17
5	Análisis de resultados	18
5.1	Sistema Concentrador de Energía sin integración de estructuras energéticas	18
5.2	Sistema Concentrador de Energía con integración de estructuras energéticas	21
5.3	Análisis comparativo	25
6	Conclusiones.....	25
6.1	Trabajos futuros	26
7	Referencias.....	26
7.1	Matriz de Estado del Arte	31
7.2	Resumen de Indicadores	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de los sistemas concentradores de energía	3
Figura 2. Esquemmatización general de un HUB energético	5
Figura 3. Tipos de HUB energético	6
Figura 4. Recursos de entrada de los centros de energía.....	8
Figura 5. Convertidores en los sistemas concentradores de energía	9
Figura 6. Sistemas de almacenamiento en los sistemas concentradores de energía	10
Figura 7. Salidas de consumo de los centros de energía	11
Figura 8. Configuración del SCE o HUB energético para modelado.	12
Figura 9. Curvas de carga por tipo de demanda.....	16
Figura 10. Esquema del Cogenerador.	16
Figura 11. Esquema Sistema de calefacción y enfriamiento.....	17
Figura 12. SCE sin integración de estructuras energéticas	17
Figura 13. SCE con integración de estructuras energéticas	17
Figura 14. Despacho horario de electricidad y gas por el SCE – Caso de estudio 1	18
Figura 15. Abastecimiento horario de la demanda de electricidad – Caso de estudio 1	18
Figura 16. Energía producida por recurso primario electricidad y gas – Caso de estudio 1	18
Figura 17. Abastecimiento horario de la demanda de calentamiento – Caso de estudio 1	19
Figura 18. Abastecimiento horario de la demanda de enfriamiento – Caso de estudio 1	19
Figura 19. Evaluación energética para la electricidad – Caso de estudio 1	19
Figura 20. Evaluación energética para el gas: caso de estudio 1	20
Figura 21. Esquema con variables resueltas – Caso de estudio 1	21
Figura 22. Despacho horario de electricidad y gas por el SCE – caso de estudio 2.	21
Figura 23. Energía producida por recurso primario electricidad y gas – Caso de estudio 2....	21
Figura 25. Abastecimiento horario de la demanda de calentamiento – Caso de estudio 2	22
Figura 24. Abastecimiento horario de la demanda de electricidad – Caso de estudio 2.....	22
Figura 26. Abastecimiento horario de la demanda de enfriamiento – Caso de estudio 2	23
Figura 27. Evaluación energética para la electricidad – Caso de estudio 2	23
Figura 28. Evaluación energética para el gas– Caso de estudio 2.....	24
Figura 29. Esquema con variables resueltas – Caso de estudio 2	25
Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	35
Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	35
Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas de las plantas concentradoras de energía	7
Tabla 2. Pseudocódigo.	15
Tabla 3. Datos de la demanda por cada tipo.	15
Tabla 4. Precios horarios de electricidad.	16
Tabla 5. Parámetros del cogenerador.	16
Tabla 6. Parámetros del sistema de calefacción y enfriamiento	17
Tabla 7. Resultados energéticos – Electricidad- Caso 1.	20
Tabla 8. Resultados energéticos Gas - Caso 1.	20
Tabla 9. Evaluación económica – Caso 1.	20
Tabla 10. Resultados energéticos – Electricidad- Caso 2.	23
Tabla 11. Resultados energéticos Gas - Caso 2.	24
Tabla 12. Evaluación económica – Caso 2.	24
Tabla 13. Evaluación energética comparativa.....	25
Tabla 14. Evaluación económica comparativa.....	25
Tabla 15: Matriz de estado del arte.	31

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA

Resumen

Este trabajo se centra en el análisis de los concentradores de energía como elementos activos e inteligentes de los sistemas donde se concentran diversos generadores de energía. Por tanto, la presente investigación ha desarrollado un modelo de optimización, basado en la programación lineal, que permite establecer la asignación horaria de potencia de los Sistemas Concentradores de Energía (SCE) o HUB de energía, usando como insumos de energía el gas natural y la energía eléctrica. Con el propósito de satisfacer la demanda de energía eléctrica y el consumo energético asociado a sistemas de acondicionamiento de temperatura, y minimizar los costos de la producción de energía eléctrica o la generada por el uso del gas. Para la valoración técnica y económica del modelo de optimización, se ha usado una configuración para el concentrador de energía que consiste en un sistema de conversión de energía eléctrica, un sistema de cogeneración, una caldera y un sistema de enfriamiento. El resultado del modelo brinda el aprovechamiento e interacción de los recursos, logrando la asignación energética óptima del recurso para un periodo de 24 horas reduciendo los costos relacionados.

Palabras Clave: Conversión de energía, Concentradores de energía, Industria de gas natural, Cogeneración, Fuentes de energía renovables, Métodos de optimización, Operación de sistemas.

Abstract

The work focuses on the analysis of power concentrators as active and intelligent elements of systems where several power generators are concentrated. Therefore, the present research has developed an optimization model, based on linear programming, that allows establishing the hourly power allocation of Energy Concentrator Systems (ECS) or energy HUB, using natural gas and electric energy as energy inputs. With the purpose of satisfying the demand of electric energy and the energy consumption associated to temperature conditioning systems, and minimizing the costs of electric energy production or the one generated by the use of gas. For the technical and economic assessment of the optimization model, an energy concentrator configuration consisting of an electrical energy conversion system, a cogeneration system, a boiler and a cooling system has been used. The result of the model provides the utilization and interaction of the resources, achieving the optimal energy allocation of the resource for a period of 24 hours reducing the related costs.

Keywords: Energy conversion, Energy HUB, Natural gas industry, Cogeneration, Renewable energy sources, Optimization methods, Systems operation.

1 Introducción

El uso óptimo de la energía a través de diferentes mecanismos es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en este siglo. Estos retos surgen en distintos ámbitos como el suministro, el intercambio y el consumo de energía. Debido al crecimiento de la población, el aumento de la demanda mundial de energía, la escasez de combustibles fósiles y las preocupaciones ambientales, la seguridad energética se ha convertido en un tema importante para los países de todo el mundo [1].

La relación entre energía y aspectos económicos, sociales, ambientales y de seguridad duplica la importancia de los temas energéticos. La seguridad energética conlleva a la prestación justa de servicios energéticos accesibles, asequibles, fiables, eficientes, respetuosos con el ambiente, gestionados de forma activa y socialmente aceptables a los usuarios finales [2].

De hecho, la seguridad energética proporciona un concepto integrado del desarrollo sostenible, seguridad y derechos humanos [3]. Por tanto, conseguir un sistema energético sostenible en el futuro se ha convertido en uno de los mayores retos a los que se enfrentan los países de todo el mundo.

Durante las últimas décadas, las grandes centrales eléctricas de tipo térmico han sido la principal fuente de energía en la mayoría de países. Los combustibles fósiles han sido el combustible primario de las centrales eléctricas, los cuales se convierten en otra forma de energía (principalmente electricidad) con una eficiencia muy baja. Esta energía generada se transporta a largas distancias desde el punto de producción hasta el punto de consumo a través de un sistema de transporte, y después se distribuye a los usuarios finales en el punto de consumo mediante un complejo sistema de distribución [4].

Estos sistemas se enfrentan ahora a serios problemas desde el consumo hasta la producción. Los problemas de consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero han provocado un aumento de los problemas ambientales y el calentamiento global. Dada la escasez de combustibles fósiles, no parece razonable utilizarlos más aún cuando existe una eficiencia muy baja en las centrales térmicas [5].

Por otro lado, el elevado costo de inversión de las infraestructuras de transporte y distribución, sus importantes pérdidas, junto con los problemas de protección y control de estas infraestructuras, han provocado un aumento significativo del costo marginal de este tipo de sistemas energéticos. Por ello, estos sistemas no son una opción viable para los futuros sistemas energéticos. Los demás sistemas energéticos, como el gas natural y las redes de calefacción urbana, también se enfrentan a estos problemas [6]. Por otro lado, los sistemas energéticos descritos se han gestionado y programado por separado.

Sin embargo, la entrada de nuevas tecnologías, como la Producción Combinada de Calor y Electricidad (PCCE), las bombas de calor eléctricas, los vehículos eléctricos, etc., conducen a la inevitable integración e interacción entre los distintos sistemas energéticos [7].

Por lo tanto, los sistemas energéticos deben abordar todos los sectores energéticos y no sólo la electricidad. En este sentido, un elemento clave para lograr sistemas energéticos sostenibles es prestar atención al papel de los sistemas multi energéticos (SME) y su interacción de forma óptima y a diferentes niveles [8].

El rendimiento óptimo de los SME puede conllevar ventajas técnicas, económicas y medioambientales, como el aumento de la fiabilidad del sistema, la reducción de los costos de funcionamiento,

del consumo de combustible y de las emisiones del sistema. Sin embargo, para que el rendimiento de estos sistemas sea satisfactorio, se necesita un marco de gestión integrado que pueda gestionar de forma óptima los distintos componentes del sistema [9].

El desarrollo del concepto de los Sistemas Concentradores de Energía (SCE) o Energy HUB (EH) por sus siglas en inglés, es una opción prometedora para la gestión óptima de los SME y la consecución de un modelo integral a partir de sistemas energéticos sostenibles [10].

El objetivo principal de la introducción del concepto de los SCE ha sido avanzar en la operación óptima de los SME, con el fin de beneficiarse de la sinergia de varios vectores energéticos, la estructura no jerárquica y la gestión integrada de diferentes infraestructuras energéticas [11].

Un SCE recibe, convierte y almacena distintas formas de energía y satisface de forma óptima diversas demandas energéticas [12]. La aparición de nuevas tecnologías, ha hecho más práctico el concepto de concentrador energético. Entre los diversos componentes utilizados en el centro se incluyen tecnologías de generación distribuida como paneles

solares fotovoltaicos (FV) y turbinas eólicas, unidades de cogeneración y microturbinas [13]. Además, se utilizan calderas, calentadores eléctricos, bombas de calor eléctricas, enfriadoras de absorción y otros componentes para alimentar simultáneamente las demandas de tipo eléctrico, de calefacción y de refrigeración, aspecto que se ilustra en la Figura 1.

Hasta ahora, se han realizado muchos tipos de investigación sobre el uso de SCE, por ejemplo, en [14], [15] han propuesto un nuevo modelo de optimización para gestionar la demanda de energía de los hogares en un concentrador de energía residencial compuesto por cogeneración de calor y electricidad (CHP), vehículos eléctricos híbridos enchufables, paneles solares y sistemas de almacenamiento eléctrico. El modelo propuesto pretende minimizar los pagos totales de energía de los clientes. En [14], [15], se propone una optimización multiobjetivo con el fin de mejorar la relación costo-emisión para un sistema de concentrador de energía. En [3], [16], se ha presentado un modelo de optimización multiobjetivo para la operación costo-agua de concentradores de energía en red en presencia de una unidad

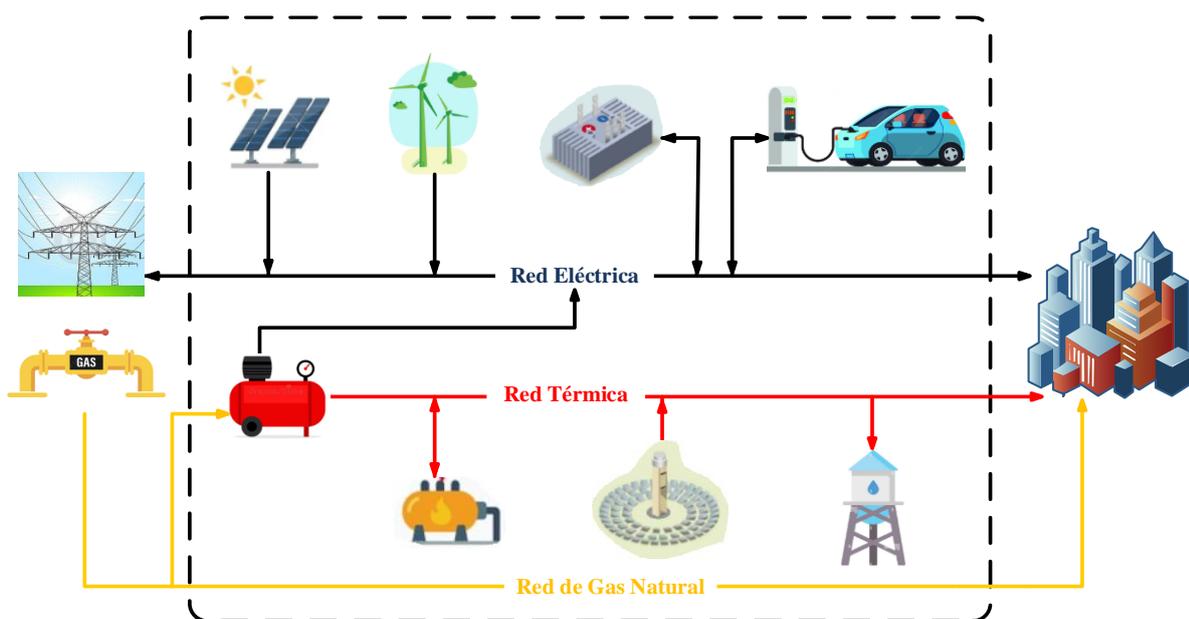


Figura 1 Esquema de los sistemas concentradores de energía [autor].

de desalinización de agua, cuyo objetivo es minimizar el costo energético y la cantidad de agua extraída del pozo. En [3], [16] se ha propuesto un enfoque de optimización robusto para la gestión energética óptima de múltiples concentradores de energía con demandas de energía eléctrica y térmica, con el objetivo de minimizar los costos energéticos y el costo de las emisiones de CO₂.

Bajo lo descrito, el presente trabajo de investigación tiene por finalidad el desarrollo de un modelo de optimización, basado en la programación lineal, que permite establecer la asignación horaria de potencia de los Sistemas Concentradores de Energía (SCE) o HUB de energía, usando como insumos de energía el gas natural y la energía eléctrica. El modelo permitirá satisfacer la demanda de energía eléctrica, el consumo energético asociado a sistemas de acondicionamiento de temperatura, y minimizar los costos de la producción de energía eléctrica o la generada mediante el uso de gas. En este contexto, la investigación se ha organizado por secciones que comprenden temas clave para el desarrollo. Estas secciones son: 1° Sección detalla la introducción al trabajo de investigación; la 2° Sección trata el marco referencial relacionado a los sistemas de concentración energética junto con la estrategia de optimización; en la 3° Sección se formula un modelo de optimización para determinar la asignación óptima del recurso de un SCE energético; el modelo es aplicado en la 4° Sección estableciendo casos que permitan la evaluación del modelo; en la 5° Sección se analizan los datos resultantes de los casos y se realiza una comparativa y por último para la 6° Sección se llega a establecer conclusiones, trabajos innovadores que pueden hacerse a futuro y las respectivas referencias de la investigación.

2 Marco teórico

Para determinar la integración y asignación de potencia de los sistemas concentradores de energía para satisfacer una demanda energética, se requiere de conocer a detalle el concepto de HUB energético que es un elemento clave que ha revolucionado la visión de las redes energéticas. Por esta razón en esta sección se trata de las generalidades de este sistema, características, categorización, estructura y estrategias para alcanzar una óptima operación.

2.1 Concentración de estructuras energéticas o sistemas de energía múltiple

Cada consumidor ya sea industrial, comercial y residencial es suministrado de diferentes tipos de servicios energéticos provenientes de distintas infraestructuras. Comúnmente debido a que el mundo está industrializado se usa el carbón, derivados del petróleo, biomasa y se enlazan a servicios de energía centralizados, como la electricidad, gas natural, calefacción y refrigeración. Y hasta el momento estos servicios se han propuesto y gestionado de forma independiente en diferentes infraestructuras, aunque la combinación de estos sistemas puede traer muchos beneficios [17].

Esto significa que diferentes portadores de energía pueden tener sus propias ventajas y tener un efecto sinérgico, al reunir las infraestructuras acoplándolas, de tal manera que sea posible un intercambio de energía entre ellas, dicha conexión se realiza a través de transductores que convierten cierta energía en otras formas. Para el diseño del sistema propuesto y tema del presente estudio, se desarrollan modelos y métodos para hallar el acoplamiento y la distribución óptima de energía entre variados proveedores de energía de acuerdo con varios parámetros como el costo, las emisiones, la eficiencia

energética, la disponibilidad, la seguridad y entre otros criterios [18].

Los sistemas concentradores de energía (Energy HUB o HUB energético) es un concepto que se propuso y formó parte de un proyecto llamado Vision of Future Energy Networks (VOFEN) [19], donde objetivo es crear una imagen a largo plazo del sistema energético del futuro.

El elemento clave del proyecto evoluciono para tomar una definición más completa de Energy HUB o centro de energía [20], como una unidad de entrada y salida con la capacidad de poder transformar, procesar y almacenar directamente o mediante equipos de conversión múltiples portadores de energía. El término energía híbrida también se usa para el centro de energía, donde la palabra híbrido describe a la coordinación de diversos vectores energéticos en el centro de energía. Basados en esta conceptualización la puede considerarse una estructura de centro de energía común [21].

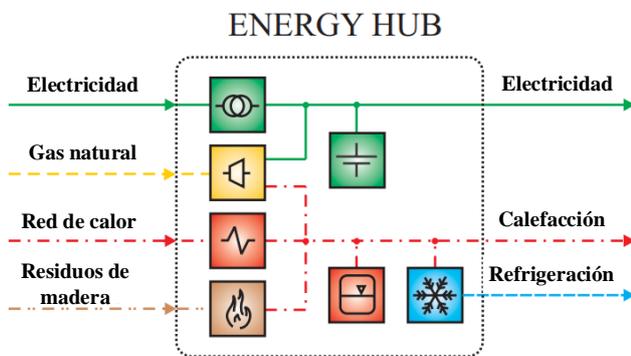


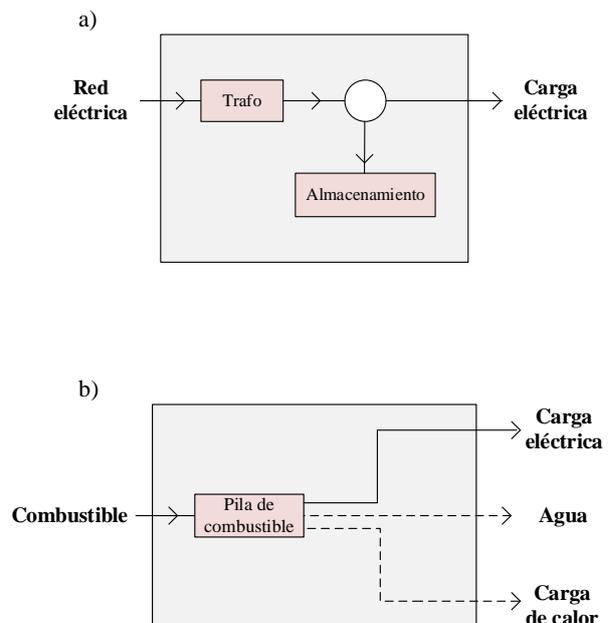
Figura 2. Esquematización general de un HUB energético [22].

Interpretando la configuración, indica que cada requerimiento de energía o en otras palabras la demanda puede ser satisfecha por varios vectores de energía. Esto se traduce en una mayor seguridad de suministro y una mayor libertad para satisfacer la demanda. Desde la perspectiva de las operaciones del sistema, la concentración de sistemas energéticos

puede reducir los costos operativos porque tienen la capacidad de cambiar entre proveedores de energía y tecnologías según su rentabilidad para satisfacer las necesidades energéticas. Además, estos sistemas pueden aumentar la eficiencia del sistema y al mismo tiempo da un mayor grado de flexibilidad en la oferta y la demanda. Los componentes de un centro de energía se pueden describir en términos de costo, emisiones, disponibilidad y otros criterios que permitan la optimización y despacho entre ellos. Por tanto, el uso eficiente de sistemas de generación múltiples combinados constituye una de las principales ventajas de los centros de energía para optimizar el uso de los distintos recursos energéticos, acrecentar la eficiencia, minimizando emisiones y costos [23].

2.1.1 Tipos de sistemas concentradores de energía

Según los conceptos planteados al HUB energético se pueden considerar diferentes clases de estructuras como se presentan en la Figura 3 [24].



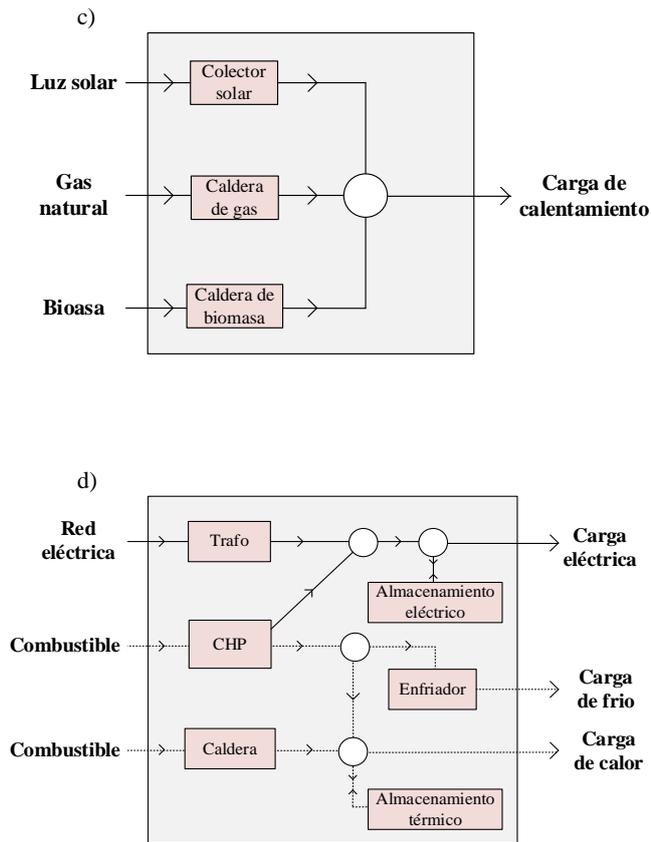


Figura 3. Tipos de HUB energético [24].

El sistema de suministro de energía tradicional tiene una distribución jerárquica, para la red eléctrica principalmente es la generación, transmisión, distribución y gestión correspondiente. Esto lo muestra el ítem a) de la Figura 3 que según la definición de centro de carga se considera como la categoría más básica debido a la relación entre consumidores y productores de energía a través de los sistemas de generación, transmisión y almacenamiento para posterior suministro. Sin embargo, el surgimiento de la generación distribuida, fuentes renovables, nuevas tecnologías, calidad energética, confiabilidad y problemas ambientales son latentes desafíos de estos sistemas [25].

Por lo tanto, un componente clave es la transición a múltiples sistemas de energía esto significa la implementación del concepto de centro de energía híbrida.

Como se mencionó estos centros de energía tienen diferentes vectores de energía en su estructura [25], en la Figura 3 literal b) el HUB extiende el suministro a distintas demandas, pero depende de una sola fuente, en cambio c) muestra una estructura del HUB contraria donde varios recursos energéticos se combinan para un solo tipo de suministro, ambas son complejas, pero pueden considerarse como plantas híbridas de reducida accesibilidad.

Por lo tanto, para resolver estos problemas se puede pensar en un sistema de entrada-salida múltiple. Esto significa usar portadores de energía con la capacidad de cumplir con múltiples requisitos de múltiples cargas. Esta estructura aumenta la eficiencia integral, el consumo disminuye y se minimizan los costos de las fuentes primarias de energía primaria. Como ejemplo el caso más conocido y aplicado de estos sistemas es la cogeneración que es la combinación de calor y electricidad, tal sistema se puede ver en la Figura 3 literal d). En esta estructura, las necesidades específicas de una demanda se pueden ver cubierta de diferentes maneras. Esto se traduce en una mayor seguridad de suministro, flexibilidad y mayor libertad para el consumidor; el sistema puede operar de diversas maneras con más confiabilidad, como en la ejecución de los programas de mantenimiento [26].

Por otro lado, la optimización del sistema se puede lograr considerando que el suministro a diferentes cargas está a disposición de diferentes portadores de energía dentro del centro de energía y se despacha óptimamente en función de costos, emisiones, disponibilidad del recurso y otros factores para la asignación de recursos energéticos.

2.1.2 Beneficios de los sistemas de energía integrada

Considerando los crecientes problemas globales económicos, técnicos,

ambientales, entre otros; se ha optado a nivel energético por la integración de diversos portadores de electricidad, gas natural, calefacción, etc. Esto ha llamado la atención para el estudio y desarrollo en los últimos años, y se ha introducido el nuevo concepto de Energy HUB o sistemas concentradores de energía acompañado de todas las ventajas relacionadas [27]. La siguiente Tabla 1 muestra los beneficios de los sistemas integrados de energía:

Tabla 1. Ventajas de las plantas concentradoras de energía [27]

Principales ventajas del HUB energético	
Globales	<ul style="list-style-type: none"> • El concepto del sistema concentrador de energía conduce a un superior rendimiento de la operación general del sistema sin la necesidad de la interconexión con los sistemas circundantes. • El tamaño de las centrales de concentración energética no tiene límite se pueden escalar desde el nivel residencial (casa o edificio) hasta el nivel urbano (ciudad o región). • Alta confiabilidad del sistema integrado. • Elevada flexibilidad de carga • El suministro de servicios del sistema aumenta a los sistemas vecinos, como servicios complementarios y de compensación.
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Minimización de los costos operativos. • Reducción de la congestión de las redes de transporte.
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la eficiencia energética. • Reducción de contaminación por emisiones de gases de efecto invernadero. • Descenso del uso de combustibles fósiles por penetración de nuevas energías renovables.

Así, una de las principales ventajas en la conexión óptima y operación de diferentes empresas portadoras de energía es maximizar el uso de los recursos locales y lograr el objetivo de incrementar la eficiencia del sistema de la manera más económicamente posible. Además, la participación de los sistemas de almacenamiento energético en las plantas

de concentración de energía ayuda en el aumento de la flexibilidad del suministro de energía al permitir el intercambio entre portadores de energía [28].

2.1.3 Aplicaciones de los sistemas concentradores de energía

Los centros de concentración de energía sirven para muchos propósitos diferentes, y se pueden considerar diferentes estructuras de sistemas de energía como centros de energía. La aplicación de centros integrados de energía es posible en [29]:

- Edificios residenciales hasta pueden cubrir el suministro a grandes conjuntos residenciales.
- A nivel comercial, como edificios dedicados al comercio, instituciones o centros de negocios, oficinas, unidades médicas, hoteles.
- En el área industrial abarca a centros de producción de grandes consumos como: industria de acero, papel o refinerías de petróleo.
- En el sector agrícola.
- Adicionalmente, su uso se extiende a áreas geográficas urbanas, rurales o ciudades.

Por lo tanto, la aplicación de los sistemas concentradores de energía no tiene margen de tamaño, puede ser un sistema de energía doméstico como un sistema que abastece a una ciudad. Es decir que los centros de energía en función del consumo se pueden considerar como residenciales, comerciales, industriales y agrícolas. En cada uno de estos sectores se pueden implementar pequeños centros de energía [30]. En cualquier área de consumo que se aplique el sistema de concentración energética el objetivo es reducir los costos de energía para el usuario, mientras que, para las empresas a parte del costo, también se preocupa por la curva de carga, cargas máximas y calidad energética, por lo tanto, los centros de energía pretenden

optimizar el consumo de energía de todo el sistema [31].

2.1.4 Componentes de los centros de energía

Como se mencionó anteriormente el concepto del sistema concentrador de energía, se resume en cuatro primordiales funciones y características que son: entrada, transformación, almacenamiento y salida. A continuación, se analiza cada componente de la estructura del eje energético de los sistemas múltiples de energía [32].

a) Recursos (entrada)

Los sistemas concentradores de energía tienen la capacidad de utilizar varios recursos como electricidad, sistemas de energía renovable, gas natural y red de calefacción para satisfacer los diferentes tipos de demanda de los usuarios [33], [34]. Para las entradas de los modelos del centro de energía se pueden utilizar diferentes tipos de fuentes de energía y tecnologías energéticas. Gran parte de la energía primaria en estas estructuras de suministro de energía convencionales se desperdicia debido a pérdidas ineficientes de generación, transmisión y distribución de energía en los arreglos jerárquicos. Se puede plantear un ejemplo en una típica central termoeléctrica que usa carbón, donde llega a los clientes finales únicamente 28% de energía primaria [35].

Los centros de energía múltiples utilizan las diferentes fuentes de energía renovable como, la energía del sol, del viento, la geotérmica y las pilas de combustible como entradas que pueden producir electricidad, calor y agua. Otro ejemplo es el de la biomasa se puede utilizar para obtener electricidad, calor y combustibles para el transporte (hidrogeno y etanol) [36].

A pesar de la presencia de diversos portadores de energía, cabe mencionar que la implementación del sistema concentrador de energía requiere enlazar sus elementos. Estos vínculos se realizan a través de redes de energía para el transporte los recursos de entrada (gas, calefacción, electricidad, etc.). En primera instancia, las interconexiones permiten una gestión óptima de los recursos, pero existe la posibilidad de aumentar la complejidad del sistema [37]. En la Figura 4 se ubica los estudios de las fuentes más comunes de entrada a los concentradores de energía.

Se puede observar la dependencia de los sistemas concentradores de energía de la red eléctrica debido a la mayor participación en las entradas. El gas natural después representa la mayor proporción, esto se debe a la aparición de tecnologías de calefacción y energía altamente eficientes que utilizan gas natural como combustible principal a parte que es menos

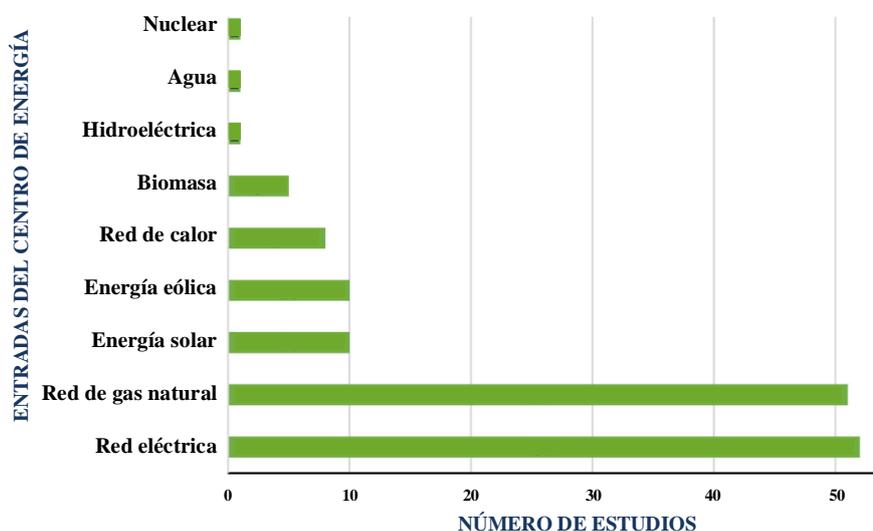


Figura 4. Recursos de entrada de los centros de energía [20].

contaminante que otros combustibles fósiles como el carbón. Estos factores llevaron a la principal consideración de estas dos fuentes de energía electricidad y gas en el modelo para la generación combinada (cogeneración), aunque construir y desarrollar estas redes es costoso y problemático [38].

b) Transformación y transmisión

Los centros de energía relacionan a los productores y consumidores. Y pueden ser alimentados por variadas fuentes energéticas, algunas de estas entradas se pueden trasladar a la salida sin ninguna transformación o cambio en la calidad, y otras deber convertirse en función de las necesidades de la demanda. Entonces las conexiones principales para la entrada y salida de los centros de energía son de forma directa y por transiciones. Para el enlace con los convertidores que cambian las cantidad, calidad y estado de los portadores de energía en otros tipos para el consumo en la salida son las turbinas de gas, transformadores, motores y celdas de

combustión, convertidores, bombas, inversores, e intercambiadores [39].

En la Figura 5 se ubica los estudios de las fuentes más comunes de convertidores en los sistemas concentradores de energía.

La mayoría de los componentes de transición enumerados anteriormente se utilizan para convertir solo un portador de energía, pero los centros de energía se fundamentan en el uso de diversos vectores de energía para cumplir con diferentes requisitos de demanda [21]. Un ejemplo común es un sistema de cogeneración que produce simultáneamente electricidad y calor a partir de una sola fuente de energía, generalmente tiene la ocupación de suministrar la demanda de electricidad y calefacción además de la red eléctrica centralizada; para este evento una programación óptima de las fuentes de calor y energía es requerido para obtener un despacho económico óptimo. En estos sistemas crece la eficiencia y reducen el consumo primario de energía y costos [40].

Algunos de los sistemas que se

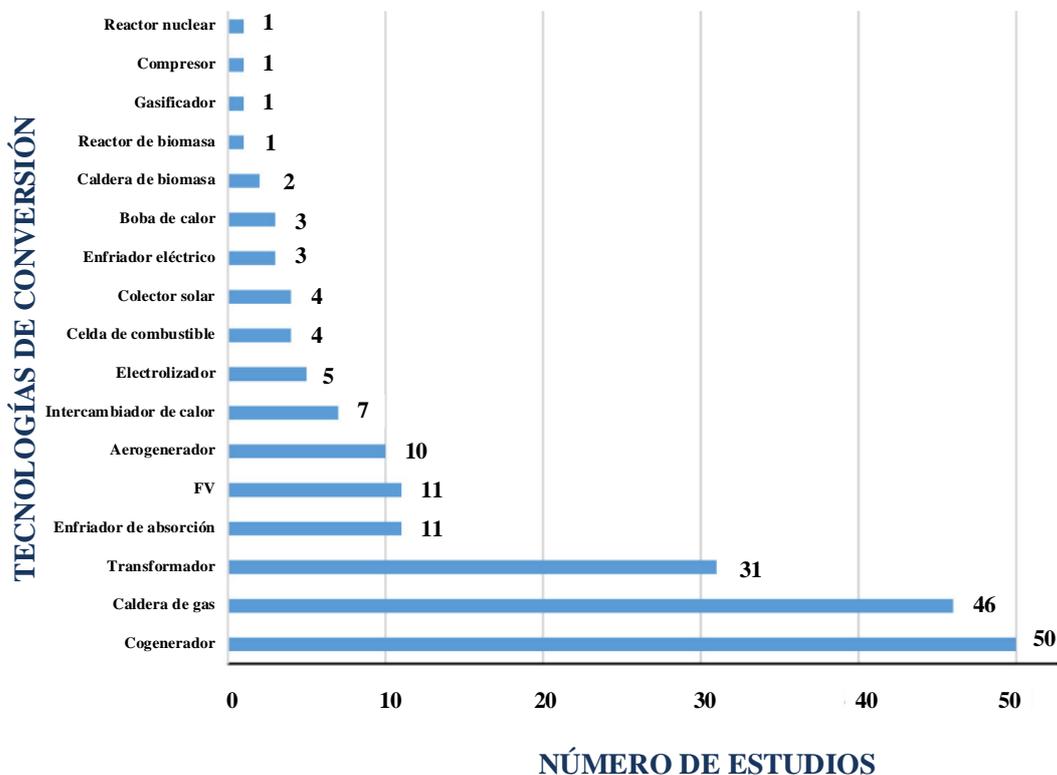


Figura 5. Convertidores en los sistemas concentradores de energía [20].

muestran en la figura, son sistemas combinados que se usan ampliamente en los sistemas concentradores de energía de multi generación. En un sistema de energía real, a menudo hay más necesidades además de electricidad y calor, como refrigeración, agua, combustible y aire comprimido que requiere la demanda. Es por esta razón que es necesario proporcionar un modelo de sistema de energía realista que se centre en el suministro integrado de diferentes demandas cubiertas por múltiples tecnologías de generación para lograr un sistema energético sostenible con los futuros modelos de concentración energética [12].

c) Sistemas de almacenamiento de energía

Los recursos energéticos, la multi-generación y ahora junto con los sistemas de almacenamiento constituyen soluciones muy atractivas y promisorias para los futuros sistemas de energía sostenibles. Como se conoce los sistemas de acumulación de energía capta energía en exceso o en el momento oportuno de bajo consumo cuando no se necesita para poder

disponer de ella cuando se necesita. El uso de estos sistemas tiene ventajas, como más eficiencia al sistema, menor contaminación, disminución del uso combustibles de origen fósil y aplaza la expansión de las instalaciones de generación y transporte [41]. En la Figura 6 se muestra los estudios de los sistemas de almacenamiento más comunes de convertidores en los sistemas concentradores de energía.

El sistema más usado es el almacenamiento térmico, por su menor costo y mayor eficiencia comparado con el eléctrico. Sin embargo, las demás formas de almacenamiento también son excelentes opciones de almacenamiento para los centros de multi energía dependiendo de los parámetros de diseño y objetivos de aplicación donde se considera costos, capacidad, eficiencia, madurez tecnológica, respuesta, carga, entre otras. Los sistemas de almacenamiento en los sistemas de concentración de energía se utilizan para los siguientes propósitos [42]:

- Mejoran la confiabilidad y proporcionan mejor participación

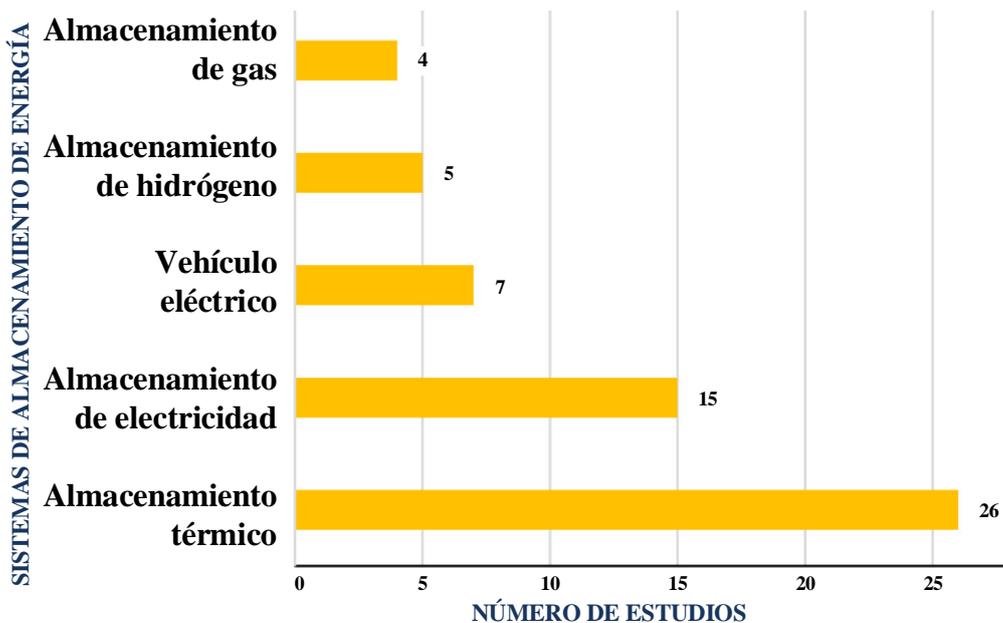


Figura 6. Sistemas de almacenamiento en los sistemas concentradores de energía [41].

de energías limpias.

- Mejora la flexibilidad y rendimiento del sistema.
- Permiten provechar los beneficios y objetivos de los sistemas energéticos concentrados.

Los estudios del efecto y la optimización de los centros energéticos con almacenamiento son pocos. Pero en función a las investigaciones existentes se resume que el tamaño, la disposición y la estrategia de control son los parámetros clave que se determinan en el modelo de los concentradores de energía [42]. En los sistemas de concentración energética los sistemas de almacenamiento más usados son de electricidad, gas natural y térmico. Y en la estructura del centro de energía los medios de almacenaje se pueden localizar en las entradas y, oportunamente enviarse a los módulos de conmutación y consumirse, o almacenarse en la salida [43].

d) *Demanda o salida de consumo*

Las entradas se combinan para brindar múltiples servicios y estos servicios incluyen variadas formas de energía absorbida por los consumidores. Mayormente de los modelos de centros de energía se enfocan en energía eléctrica y calefacción, con menos énfasis en otras

clases de demanda. En la Figura 7 se muestra los estudios de las varadas salidas de consumo en los sistemas concentradores de energía [44].

La mayor parte de actividades de planeamiento y operación del sistema energético tienen como objetivo coordinar patrones entre generación y suministro confiable a la demanda. Dada la incertidumbre de la demanda y comportamiento dinámico se requiere de recursos para pronosticar su comportamiento a lo largo del tiempo lo más certero posible, y como de la etapa de consumo dependen todas las etapas y estudios ha sido uno de los principales desafíos que enfrentan todos los sistemas energéticos incluido los sistemas concentradores de energía [45].

2.2 Optimización de los sistemas concentradores de energía

En función de lo anteriormente planteado se pueden identificar problemas como: la coordinación y programación conjunta entre proveedores y usuarios, el comportamiento impredecible de la demanda o los factores económicos involucrados que necesitan ser normalizados. Por lo tanto, se requiere de la participación de la optimización al tratar

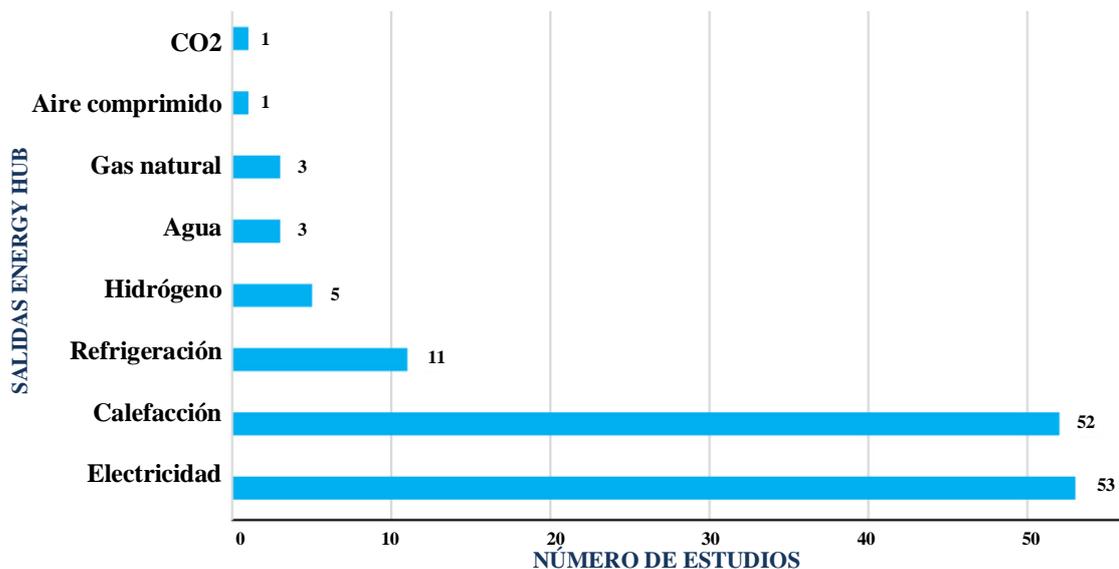


Figura 7. Salidas de consumo de los centros de energía [44].

la definición de un sistema de concentración energética. La problemática clave es dar solución a un balance en el flujo de energía óptimo lo que significa cuánta energía deben tomar los concentradores y cómo deben transformarse para abastecer la carga según sus diferentes requerimientos. En base a la consideración de varios parámetros como costos, emisiones, pérdidas, seguridad, confiabilidad y calidad, se generan y analizan diferentes problemas de optimización simple o múltiple [46]. Para este estudio la función objetivo es encontrar la técnica de operación más económica viendo la perspectiva de operación de la planta de concentración de energía.

Un análisis rápido de este método óptimo es encontrar la combinación de calor y energía es más eficiente en el proceso de generación de energía, al utilizar el calor residual del proceso de cogeneración para producir más productos energéticos. Pero este centro de energía puede ser extendido, en sistemas de generación múltiples (más de dos entradas y salidas), esto llamado multi generación es la producción simultánea de distintos productos energéticos en un solo proceso integrado para un suministro energético también variado. Este planteamiento que constituye un paso importante para reducir las transacciones energéticas, mejorar el uso de los recursos, brindar mayor sostenibilidad e integrar las ventajas mencionadas en la sección anterior [47].

Para lograr un centro de energía concentrado sostenible, se debe considerar la complejidad de la multi-generación en cuanto a las interconexiones y los diferentes comportamientos de los portadores de energía. Por eso contar con estrategias como la optimización para la gestión y control en estos sistemas es muy importante. En los sistemas de concentración energética utilizar la herramienta de optimización es una de las

mejores opciones para programación de la multi-generación y la toma de decisiones [48].

3 Integración óptima de Sistemas Concentradores de Energía (SCE)

Con el afán de integrar de forma óptima los SCE considerando las fuentes primarias de energía, que para el caso de estudio se usan la electricidad y el gas, es necesario tomar en cuenta las peculiaridades de ámbito económico y técnico, en este sentido, a continuación, se exhibe el modelo de optimización utilizado para evaluar lo mencionado, tomando en consideración la configuración mostrada en la Figura 8.

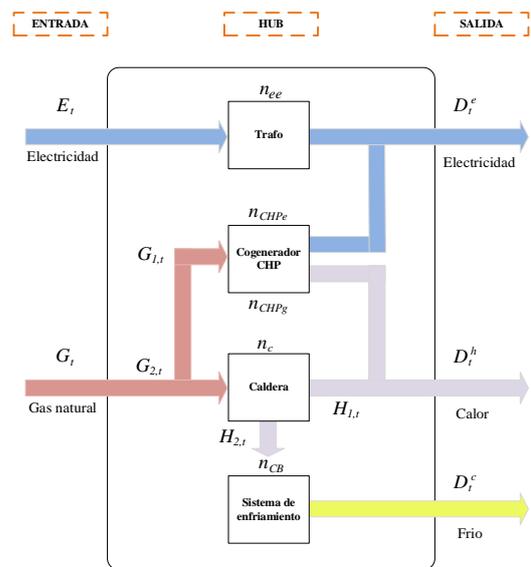


Figura 8. Configuración del SCE o HUB energético para modelado.

3.1 Costos asociados a los recursos primarios

Los costos a ser considerados en el modelado se subdividen en dos segmentos asociados al uso de la energía primaria. Por tanto, el primer segmento se enfoca a la valorización del costo referente al uso de energía eléctrica; y, el segundo monetiza el uso del gas. La formulación de dichos

costos se presenta en las funciones siguientes:

$$\text{Costo Tot} = C_e + C_g \quad (1)$$

$$C_e = \sum_t \gamma_t^e \cdot Ee_t \quad (2)$$

$$C_g = \sum_t \gamma_t^g \cdot Eg_t \quad (3)$$

Donde:

<i>Costo Tot</i>	Costo acumulado que se origina del uso de las energías primarias siendo éstas electricidad y gas;
C_e	Costo acumulado que se origina del uso de la electricidad;
C_g	Costo acumulado que se origina por el uso del gas;
γ_t^e	Precio asociado al uso de la electricidad por cada hora t ;
γ_t^g	Precio asociado al uso del gas por cada hora t ;
Ee_t	Potencia eléctrica despachada por cada hora t ;
Eg_t	Potencia despachada por el gas como recurso primario en cada hora t ;
t	Hora de análisis que corresponde a un total de 24 horas.

A fin de lograr el funcionamiento adecuado del SCE, éste debe estar sujeto a restricciones en relación a la integración de los elementos contenidos dentro del HUB, en tal sentido, en los siguientes numerales se muestra el detalle de las restricciones correspondientes.

3.2 Abastecimiento de la demanda eléctrica.

Conforme a la configuración del SCE, esta restricción considera que la energía eléctrica producida o transferida por elementos eléctricos incluyendo la energía producida por el cogenerador comúnmente denominado en terminología inglesa

(Combined Heat and Power - CHP), tomando en consideración las eficiencias de los elementos, abastezcan la demanda eléctrica. La restricción descrita de forma matemática concierne a la que se presenta:

$$E_t \cdot n_{ee} + G_{1,t} \cdot n_{CHPe} = D_t^e \quad (4)$$

Donde:

E_t	Potencia eléctrica entregada por el sistema por cada hora t ;
n_{ee}	Eficiencia de los elementos eléctricos para transferir energía eléctrica;
$G_{1,t}$	Porción de potencia producida por el Gas a ser ocupada por el Cogenerador (CHP) por cada hora t ;
n_{CHPe}	Eficiencia del Cogenerador para transformar la potencia entregada por el gas a potencia eléctrica;
D_t^e	Demanda de potencia eléctrica por cada hora t .

3.3 Balance horario para el uso de gas como recurso energético.

Esta restricción permite obtener un balance de potencia horaria entre la producción del gas y el uso del mismo que es destinado para el Cogenerador (CHP) y el caldero, su formulación matemática es la siguiente:

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t} \quad (5)$$

Donde:

G_t	Potencia producida por el Gas en cada hora t ,
$G_{1,t}$	Porción de potencia producida por el Gas a ser ocupada por el Cogenerador (CHP) por cada hora t ;
$G_{2,t}$	Porción de potencia producida por el Gas a ser ocupada por la Caldera por cada hora t ;

3.4 Abastecimiento de la demanda usada para calentamiento

Esta restricción garantiza el balance de potencia por cada hora para abastecer la demanda de calentamiento, tomando en cuenta la potencia entregada por el (CHP) y la caldera, tomando en cuenta las eficiencias de estos elementos, su expresión matemática es la siguiente:

$$G_{1,t} \cdot n_{CHPg} + H_{1,t} = D_t^h \quad (6)$$

Donde:

- $G_{1,t}$ Porción de potencia producida por el Gas a ser ocupada por el Cogenerador (CHP) por cada hora t ;
- D_t^h Demanda de potencia para calentamiento por cada hora t ;
- n_{CHPg} Eficiencia del Cogenerador para transformar la potencia entregada por el gas a potencia para calentamiento;
- $H_{1,t}$ Porción de potencia entregada por la Caldera a ser ocupada para satisfacer la demanda de calentamiento en cada hora t .

3.5 Balance horario para el uso de gas en la caldera

Este balance de potencia garantiza que la porción del gas destinado a la caldera permita entregar la potencia horaria necesaria para abastecer la demanda de calentamiento y la potencia al sistema de enfriamiento, la forma matemática corresponde:

$$G_{2,t} \cdot n_c = H_{1,t} + H_{2,t} \quad (7)$$

Donde:

- $G_{2,t}$ Porción de potencia producida por el Gas a ser ocupada por la caldera por cada hora t ;
- $H_{1,t}$ Porción de potencia entregada por la Caldera a

ser ocupada para satisfacer la demanda de calentamiento en cada hora t ;

$H_{2,t}$ Porción de potencia entregada por la Caldera a ser ocupada por el sistema de enfriamiento en cada hora t ;

n_c Eficiencia de la Caldera para transformar la potencia entregada por el gas.

3.6 Abastecimiento de la demanda usada para enfriamiento

Esta restricción garantiza el balance de potencia por cada hora para abastecer la demanda de enfriamiento, tomando en cuenta la potencia entregada por la caldera afectada por su eficiencia, para el efecto la expresión matemática corresponde a la siguiente:

$$H_{2,t} \cdot n_{CB} = D_t^c \quad (8)$$

Donde:

- $H_{2,t}$ Porción de potencia entregada por la Caldera a ser ocupada por el sistema de enfriamiento en cada hora t ;
- D_t^c Demanda de potencia para enfriamiento por cada hora t ;
- n_{CB} Eficiencia del sistema de enfriamiento para transformar la potencia entregada por la caldera.

3.7 Algoritmo de solución

Para determinar la integración y asignación horaria de potencia de los Sistemas Concentradores de Energía (SCE), denominados internacionalmente como Concentradores o HUB de energía, usando como insumos de energía el gas natural y la energía eléctrica, para satisfacer la demanda de energía eléctrica y el consumo energético asociado a sistemas de

acondicionamiento de temperatura, se procede a realizar las actividades que se presentan en el pseudocódigo que se exhibe en la Tabla 2.

Tabla 2. Pseudocódigo.

Integración óptima de Sistemas Concentradores de Energía (SCE)

Inicio

Paso 1: Determinación de las demandas horarias para el abastecimiento de electricidad, el sistema de calefacción y el sistema de enfriamiento.

Paso 2: Establecimiento de los precios horarios para la producción de electricidad y gas.

Paso 3: Determinación de las características de los siguientes parámetros:

- a) Elementos eléctricos
- b) Cogenerador - CHP
- c) Caldera
- d) Sistema de Enfriamiento

Paso 4: Aplicación del Modelo de Optimización

- a) Determinación de variables:
 $E_t, G_t, G_{1,t}, G_{2,t}, H_{1,t}, H_{2,t}$

- b) Función Objetivo

$$Func. Obj = Min Costos$$

$$Costo Tot = C_e + C_g$$

$$C_e = \sum_t \gamma_t^e \cdot Ee_t$$

$$C_g = \sum_t \gamma_t^g \cdot Eg_t$$

- c) Restricciones

$$E_t \cdot n_{ee} + G_{1,t} \cdot n_{CHPe} = D_t^e$$

$$G_t = G_{1,t} + G_{2,t}$$

$$G_{1,t} \cdot n_{CHPg} + H_{1,t} = D_t^h$$

$$G_{2,t} \cdot n_C = H_{1,t} + H_{2,t}$$

$$H_{2,t} \cdot n_{CB} = D_t^c$$

Paso 5: Resolución del modelo de optimización que corresponde a una programación lineal, mediante el uso del software GAMS, usando el solver COINCPLEX.

Paso 6: Valoración de cada caso de estudio.

Paso 7: Evaluación de los efectos

Fin

4 Aspectos a considerar para evaluar el modelo

Los parámetros técnicos y económicos que servirán para valorar el modelo y sus resultados se establecen en los apartados

siguientes tomando en consideración los datos obtenidos de [49]–[51].

4.1 Demanda

De conformidad a la configuración del SCE o HUB, las demandas a ser abastecidas corresponderán a tres tipos la primera asociada a la electricidad, la segunda relacionada con el calentamiento y la tercera enfocada al enfriamiento, los valores de los datos consideran lo indicado en [51] y su tabulación se presenta en la Tabla 3, mientras que las curvas de carga se presentan en la Figura 9.

Tabla 3. Datos de la demanda por cada tipo.

Demanda (MW)				
Hora	Eléctrica MW	Calentamiento MW	Enfriamiento MW	Total MW
t1	52.1	21.4	11.5	85
t2	66.7	23.2	13.7	103.6
t3	72.2	26.1	16	114.3
t4	78.4	26.7	21.4	126.5
t5	120.2	25.6	22	167.8
t6	83.5	26.4	30.8	140.7
t7	110.4	39.5	38.9	188.8
t8	124.3	47.3	46.8	218.4
t9	143.6	52.1	51	246.7
t10	149.3	49.1	48.9	247.3
t11	154.2	69.3	34.8	258.3
t12	147.3	62	32.7	242
t13	200.7	68	27.8	296.5
t14	174.4	68.6	32	275
t15	176.5	56.4	33.2	266.1
t16	136.1	41.3	34.1	211.5
t17	108.7	37.4	40.8	186.9
t18	96.9	25.4	43.6	165.9
t19	89.1	25.7	51.5	166.3
t20	82.5	21.9	43.1	147.5

t21	76.9	22.4	36.5	135.8
t22	66.8	24.6	27.7	119.1
t23	47.2	22.7	19.1	89
t24	64.7	22.6	11	98.3
Total	2622.7	905.7	768.9	4297.3

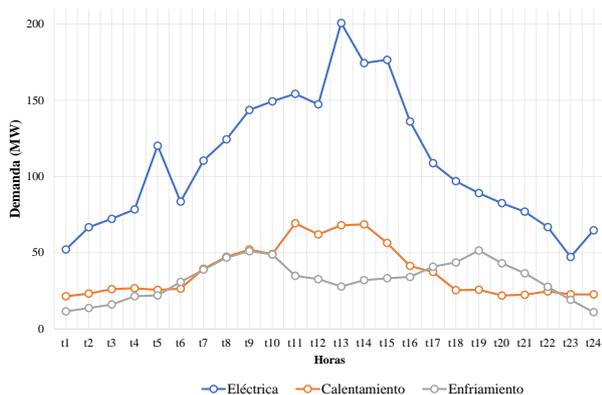


Figura 9. Curvas de carga por tipo de demanda

De forma complementaria, de acuerdo con [52] se establece los precios horarios de energía eléctrica los cuales se presentan en la Tabla 4, mientras que el precio para la producción de gas equivale a 12 USD/MWh conforme lo indicado en [50].

Tabla 4. Precios horarios de electricidad.

Hora	Precio (USD/MWh)	Hora	Precio (USD/MWh)
t1	36.7	t13	63.2
t2	40.4	t14	70.8
t3	38.5	t15	63.1
t4	38	t16	52.5
t5	40.2	t17	57
t6	38.6	t18	49.2
t7	52.3	t19	47.5
t8	67.3	t20	49.5
t9	70.5	t21	53.1
t10	66.2	t22	51.6
t11	73.3	t23	50.5
t12	60.8	t24	36.4

4.2 Parámetros de los elementos para modelar el HUB

Dada la configuración establecida de SCE, se procede a establecer los parámetros técnicos de cada elemento, para el caso de electricidad se usará un transformador de electricidad cuya eficiencia (n_{ee}) es del 98%.

Adicional para la integración de elementos en el SCE, se usará un cogenerador que requiere del gas como energía primaria para producir electricidad y gas residual (calor útil). Para el efecto, a nivel energético, de conformidad a lo establecido en [49], [53], se establece los datos establecidos en la Tabla 5, el esquema del cogenerador se presenta en la Figura 10.

Tabla 5. Parámetros del cogenerador.

Eficiencia para producción de electricidad	0.35
Eficiencia para producción de calor útil	0.45
Capacidad del Cogenerador	250 MW

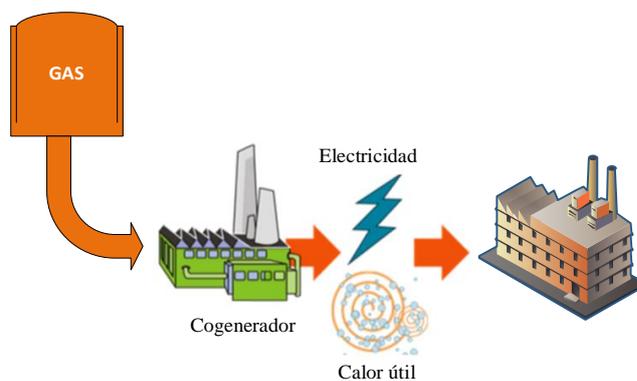


Figura 10. Esquema del Cogenerador.

Finalmente, los elementos complementarios para satisfacer la demanda que se asocia a la climatización de temperatura, son una caldera y un sistema de enfriamiento, cuya ilustración esquemática se muestra en la Figura 11, y

los datos usados para su modelación, de conformidad a [53], se presentan en la Tabla 6.

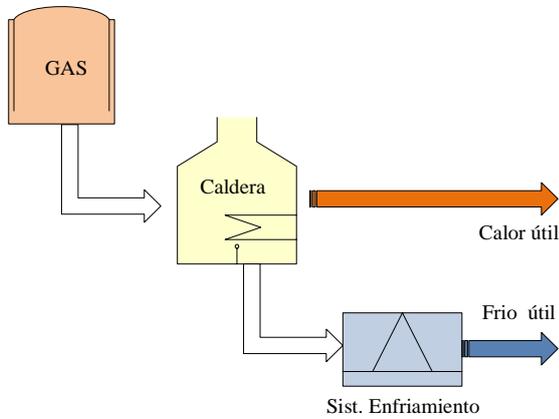


Figura 11. Esquema Sistema de calefacción y enfriamiento

Tabla 6. Parámetros del sistema de calefacción y enfriamiento

Eficiencia de la caldera	0.90
Eficiencia del sistema de enfriamiento	0.95
Capacidad la caldera	600 MW
Capacidad del sistema de enfriamiento	500 MW

4.3 Casos de estudio

Para evaluar el modelo de optimización planteado se usarán dos casos de estudio que se describen a continuación:

- *SCE sin integración de estructuras energéticas:* En este caso de estudio las estructuras energéticas se encuentran en un sistema concentrado de energía, pero no se encuentran interconectadas dentro del proceso global, el esquema para este caso de estudio se presenta en la Figura 12. Bajo esta premisa, se obtendrá la asignación de energía primaria, resultado de la cual se evaluará el abastecimiento energético y los costos asociados.

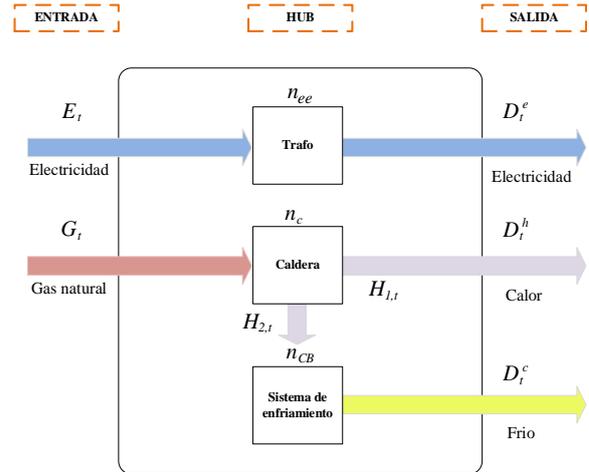


Figura 12. SCE sin integración de estructuras energéticas

- *SCE con integración de estructuras energéticas:* En este caso de estudio las estructuras energéticas se encuentran en un sistema concentrado de energía de forma interconectada dentro del proceso global, usando para ele el efecto un Cogenerador - CHP, el esquema para este caso de estudio se presenta en la Figura 13. Bajo este concepto, se obtendrá la asignación de energía primaria, resultado de la cual se evaluará el abastecimiento energético y los costos asociados.

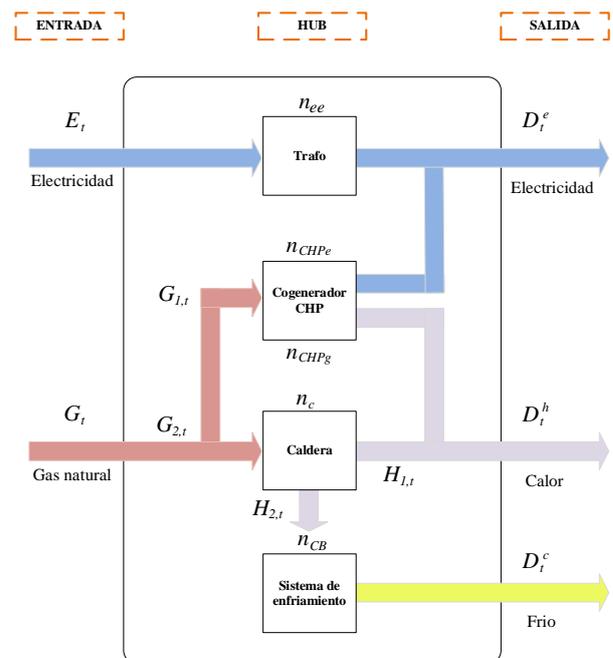


Figura 13. SCE con integración de estructuras energéticas

5 Análisis de resultados

En esta sección se realiza el análisis de resultados de los parámetros económicos y técnicos por cada caso de estudio.

5.1 Sistema Concentrador de Energía sin integración de estructuras energéticas

El análisis de los resultados para este caso de estudio empieza en el despacho horario de las fuentes primarias de energía sean estas la electricidad y gas, cuyo resultado se presenta en la Figura 14, mientras que en la Figura 16 se muestra el valor de energía producida por el tipo de recurso.

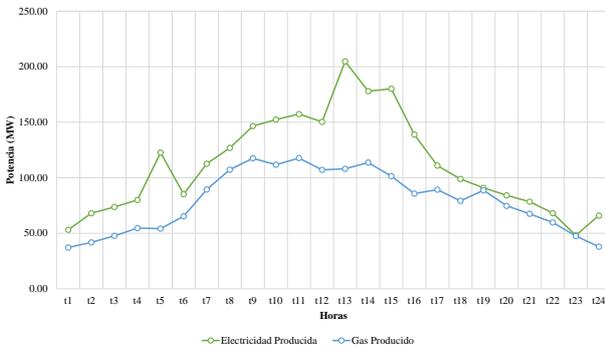


Figura 14. Despacho horario de electricidad y gas producidos por el SCE – Caso de estudio 1

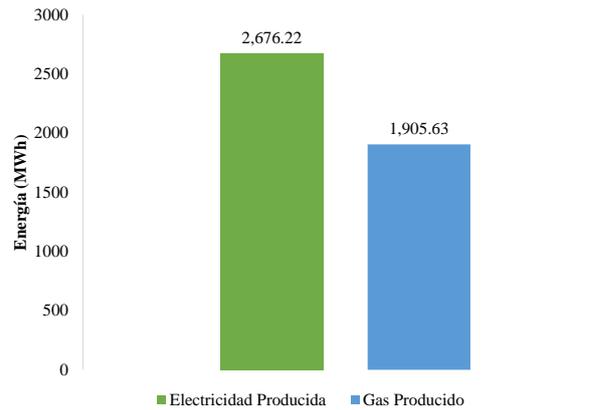


Figura 16. Energía producida por tipo de recurso primario electricidad y gas – Caso de estudio 1

De la Figura 14, se obtiene que la energía producida en las 24 horas por la electricidad asciende a un valor de 2,676.22 MWh, mientras que el gas produjo 1,905.63 MWh, dando un total de 4,581.86 MWh, en tal sentido, el recurso primario asignado con respecto al total producido conlleva a que la electricidad participe con un 58%, mientras que el gas ascienda al 42%.

Por otra parte, y de conformidad al modelo planteado, en la Figura 15, Figura 17, Figura 18 se valida el abastecimiento de la demanda por cada uno de los tipos.

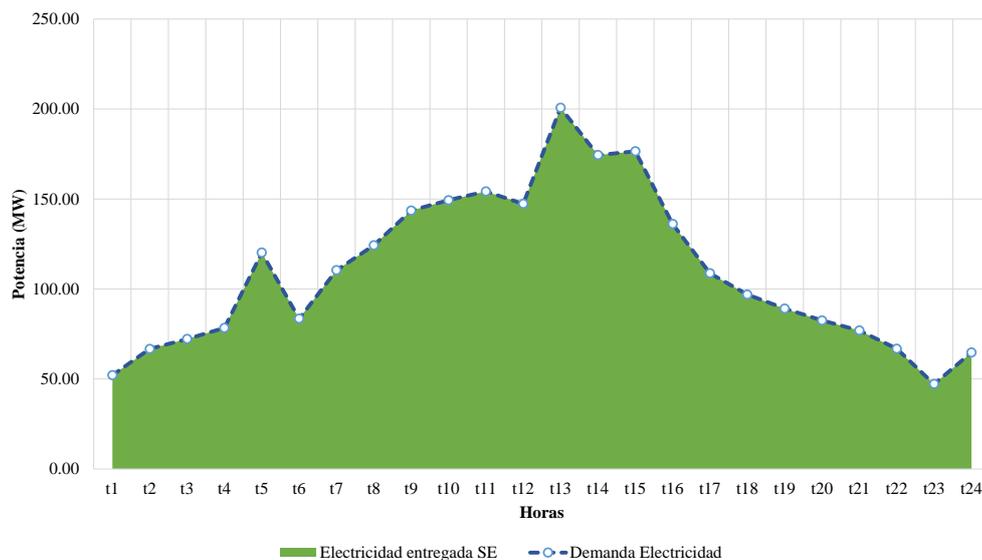


Figura 15. Abastecimiento horario de la demanda de electricidad – Caso de estudio 1

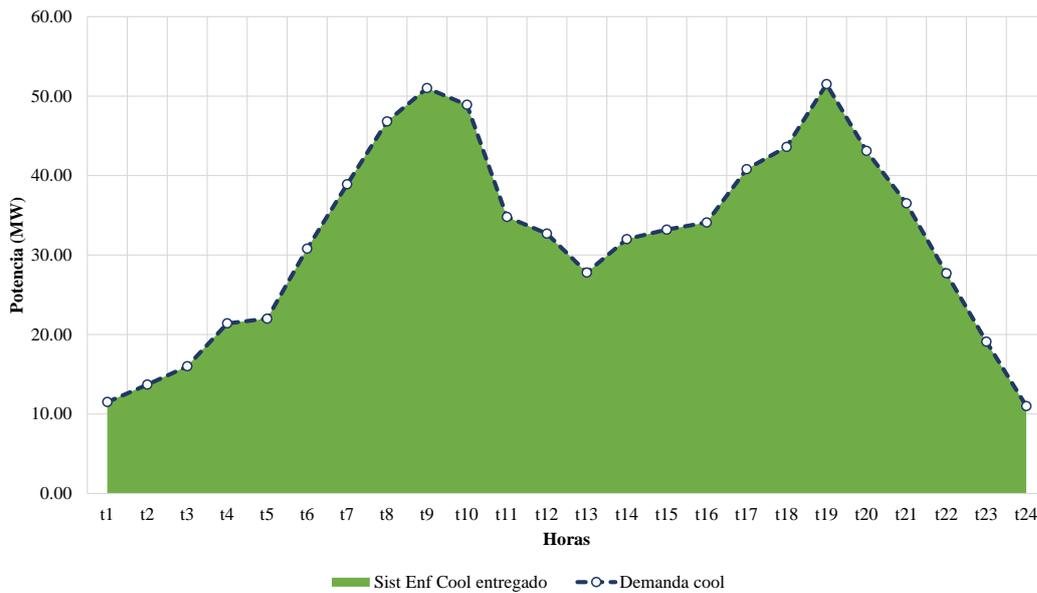


Figura 17. Abastecimiento horario de la demanda de calentamiento – Caso de estudio 1

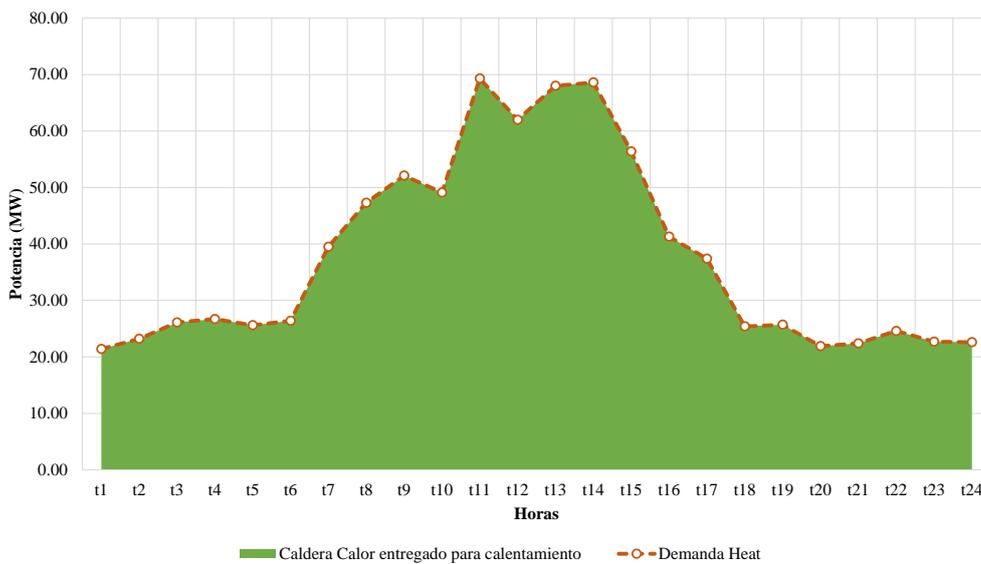


Figura 18. Abastecimiento horario de la demanda de enfriamiento – Caso de estudio 1

De las ilustraciones mostradas se observa que el SCE abastece la demanda por cada uno de los tipos sea esta eléctrica, de calentamiento y enfriamiento; de los resultados horarios, se ha procedido a realizar el consolidado energético evaluándose la energía entregada y consumida, cuyos resultados se presentan en la Figura 19 y Tabla 7.

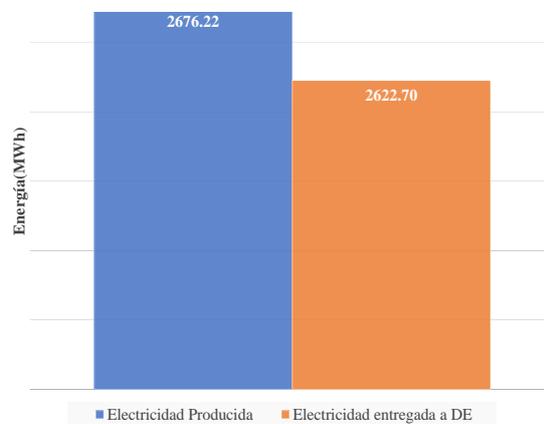


Figura 19. Evaluación energética para la electricidad – Caso de estudio 1

Tabla 7. Resultados energéticos – Electricidad- Caso de estudio 1.

Evaluación energética - Electricidad	
Electricidad Producida (MWh)	2,676.22
Electricidad entregada (MWh)	2,622.70
Pérdidas (MWh)	53.52
Pérdidas	2.0%

Al analizar los resultados para el recurso de la electricidad, si bien la energía producida al realizar el proceso de conversión abastece la demanda eléctrica, también se observa que existe pérdidas en tal proceso, las cuales ascienden al 2%.

De forma complementaria, se procede con el análisis energético con respecto al gas, tomando en cuenta que el recurso producido sufre dos procesos el primero para satisfacer la demanda de calentamiento y el segundo, corresponde al proceso de enfriamiento usando el calor residual de la caldera, dichos resultados se presentan en la Figura 20 y se tabulan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados energéticos Gas - Caso de estudio 1.

Evaluación energética - Gas	
Gas Producido (MWh)	1905.63
Caldera Calor entregado para calentamiento (MWh)	905.70
Caldera Calor entregado para enfriamiento (MWh)	809.37
Pérdidas proceso Gas - Calentamiento (MWh)	190.56
Pérdidas proceso Gas - Calentamiento	10%
Enfriamiento Cool entregado (MWh)	768.90
Pérdidas proceso Calentamiento - S. Enfriamiento (MWh)	40.47
Pérdidas proceso Calentamiento - S. Enfriamiento	5%
Pérdidas totales del Proceso (MWh)	231.03
Pérdidas totales del Proceso	15%

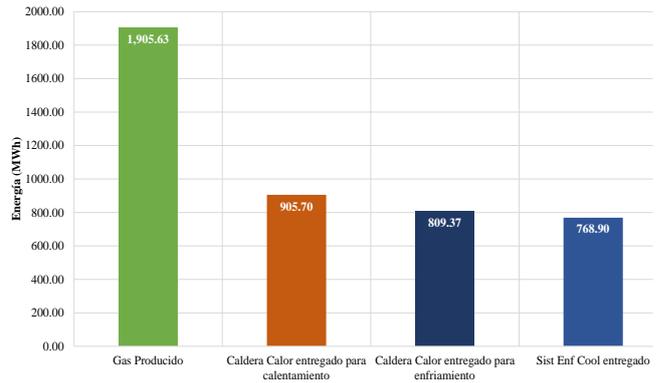


Figura 20. Evaluación energética para el gas: caso de estudio 1

De los resultados se cita que, la producción de Gas es repartida para satisfacer la demanda de calentamiento y enfriamiento, resultado de lo cual se obtiene en el proceso una pérdida que asciende a 231.03 MWh lo que corresponde al 15%, adicional, las pérdidas en la transformación del gas a calor útil para satisfacer la demanda de calentamiento asciende a 190.56 MWh que corresponde al 10%, mientras que en el proceso de enfriamiento se obtiene una pérdida del 5% que equivale a 40.47 MWh, deduciéndose que el proceso donde mayor pérdida existe es que permite tener calor útil para satisfacer la demanda de calentamiento.

A nivel energético global la energía producida por el recurso de gas y electricidad asciende a 4,581.86 MWh mientras que la demanda global a ser abastecida corresponde a 4,297.3 MWh, por tanto, las pérdidas ascienden a 284.56 MWh que equivale a 6.6%.

Finalmente, en base a la producción de energía, se determinan los costos asociados los cuales se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Evaluación económica – Caso de estudio 1.

	Costo (USD)	%
Electricidad	150,702.81	87%
Gas	22,867.58	13%
Costo Total	173,570.39	

De los resultados se observa que el costo total asciende a 173,570.39 USD, del cual la mayor porción es la componente de la electricidad con un 87%, mientras que el valor restante corresponde al costo incurrido por la producción de gas, el cual asciende a 22,867.58 USD. El diagrama esquemático con los valores obtenidos de la resolución del modelo para este primer caso de estudio se presenta en la Figura 21.

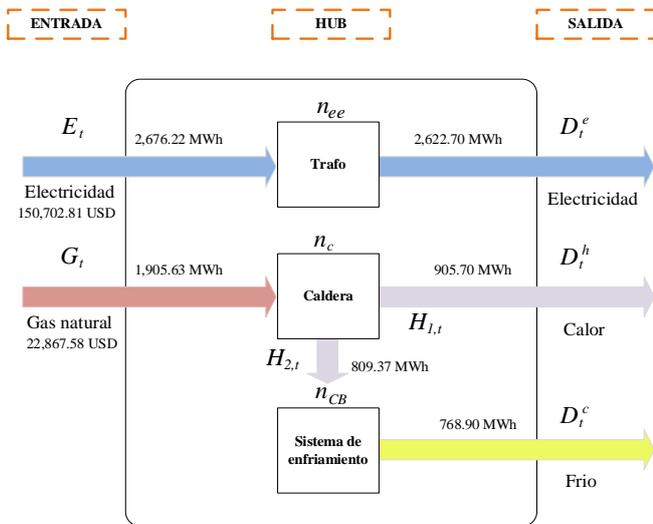


Figura 21. Esquema con variables resueltas – Caso de estudio 1

5.2 Sistema Concentrador de Energía con integración de estructuras energéticas

De forma similar al caso anterior, el análisis de los resultados empieza en el despacho horario de las fuentes primarias de energía sean estas la electricidad y gas, cuyo resultado se presenta en la Figura 22, mientras que en la Figura 23 se muestra el valor de energía producida por el tipo de recurso.

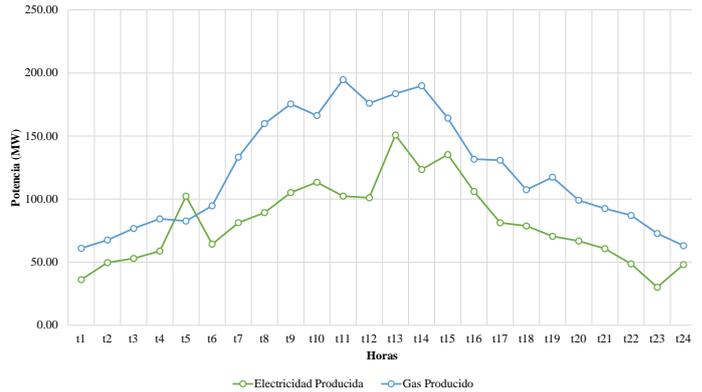


Figura 22. Despacho horario de electricidad y gas producidos por el SCE – caso de estudio 2.

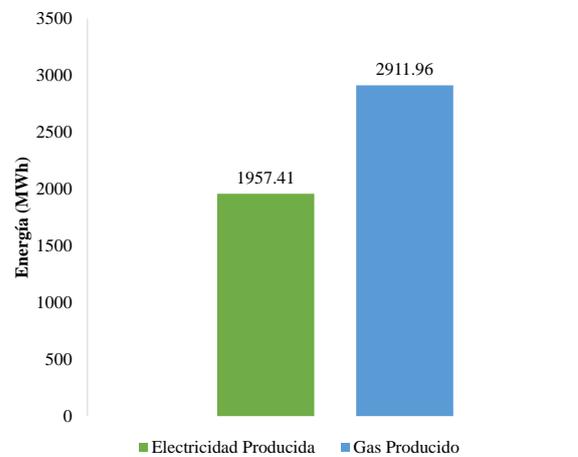


Figura 23. Energía producida por tipo de recurso primario electricidad y gas – Caso de estudio 2

De la Figura 22, se obtiene que la energía producida en las 24 horas por la electricidad asciende a un valor de 1,957,41 MWh, mientras que el gas produjo 2,911.96 MWh, dando un total de 4,869.38 MWh, en tal sentido, el recurso primario asignado con respecto al total producido conlleva a que la electricidad participe con un 40%, mientras que el gas ascienda al 60%.

Por otra parte, y de conformidad al modelo planteado, en la Figura 24 y Figura 26 se valida el abastecimiento de la demanda por cada uno de los tipos.

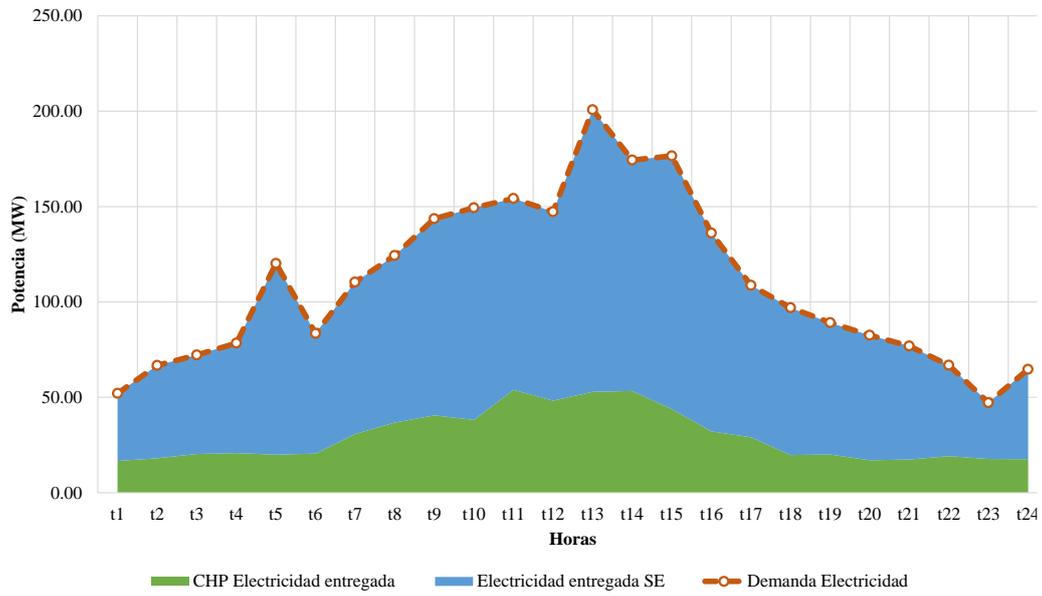


Figura 25. Abastecimiento horario de la demanda de electricidad – Caso de estudio 2

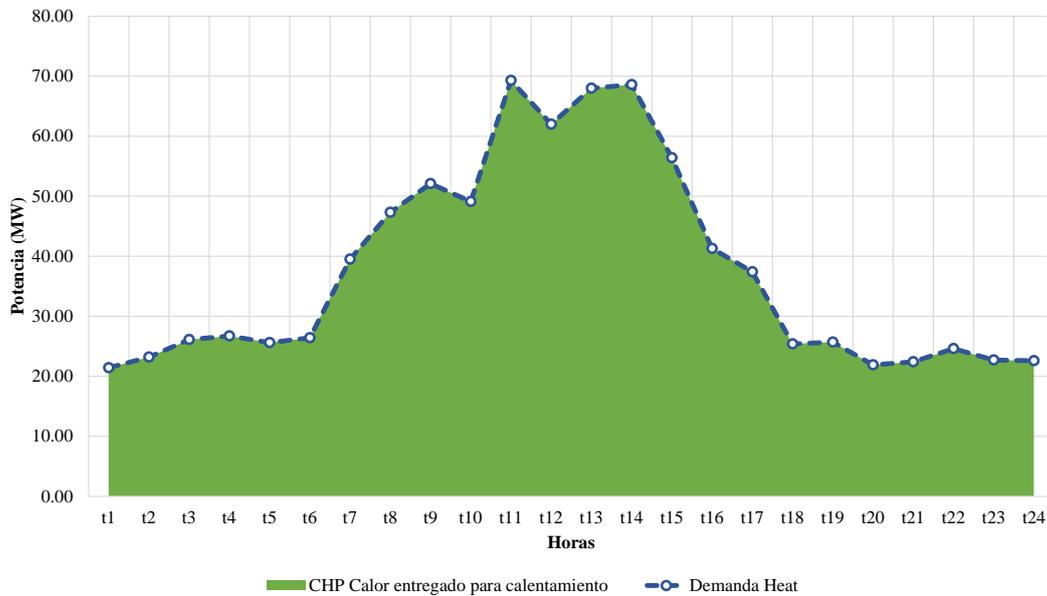


Figura 24. Abastecimiento horario de la demanda de calentamiento – Caso de estudio 2

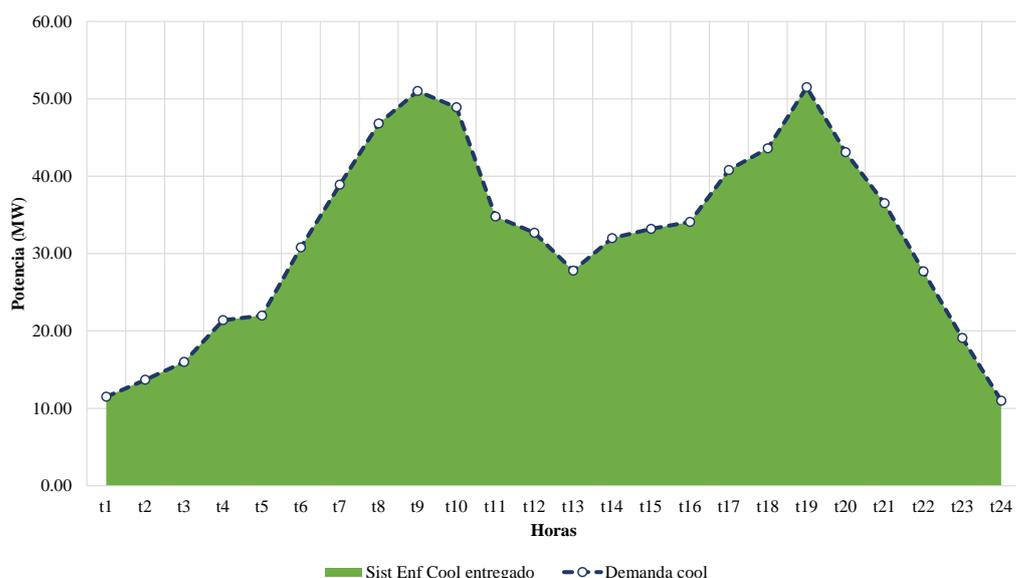


Figura 26. Abastecimiento horario de la demanda de enfriamiento – Caso de estudio 2

En las ilustraciones se observa que el SCE abastece la demanda por cada uno de los tipos sea esta eléctrica, de calentamiento o enfriamiento. En este sentido, se demuestra que la interacción de las infraestructuras tecnológicas del SCE, permite que la energía proveniente del gas ingrese dentro del proceso del Cogenerador, éste produzca energía eléctrica y calor útil, lo que reasigna el despacho y optimiza el abastecimiento de las demandas de forma horaria. Con estos resultados, se procede a realizar el consolidado energético evaluándose la energía entregada y consumida, los resultados se muestra Figura 27 y Tabla 10

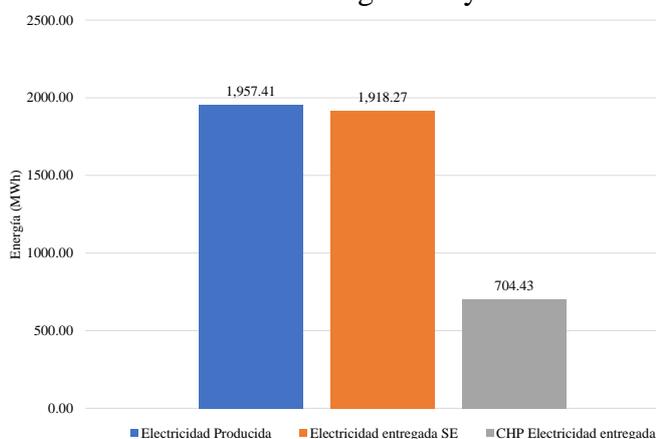


Figura 27. Evaluación energética para la electricidad – Caso de estudio 2

Tabla 10. Resultados energéticos – Electricidad- Caso de estudio 2.

Evaluación energética - Electricidad	
Electricidad Producida (MWh)	1,957.41
Electricidad entregada (MWh)	1,918.27
Pérdidas (MWh)	39.14
Pérdidas	2.04%
CHP electricidad entregada (MWh)	704.43
Demanda eléctrica (MWh)	2,622.7

Al analizar los resultados para el recurso de la electricidad, la demanda eléctrica es abastecida tanto por la energía eléctrica producida y la energía eléctrica entregada por el Cogenerador CHP, de esta forma el Cogenerador aporta con el 27% de la energía para la demanda. Adicional, al evaluar el proceso de conversión de energía través de sus propios componentes, también se observa que existe pérdidas en tal proceso, las cuales ascienden al 2,04%.

De forma complementaria, se procede con el análisis energético con respecto al gas, tomando en cuenta que el recurso producido sufre los siguientes procesos. El primero para satisfacer la demanda de calentamiento usando una caldera y un

cogenerador; y, el segundo, corresponde al proceso de enfriamiento usando el calor residual de la caldera, dichos resultados se presentan en la Figura 28 y se tabulan en la Tabla 11.

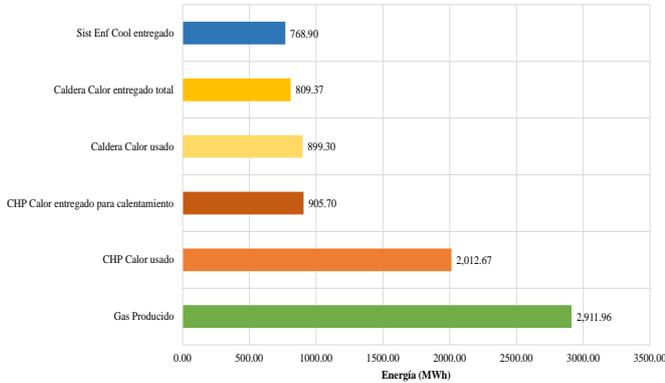


Figura 28. Evaluación energética para el gas– Caso de estudio 2

Tabla 11. Resultados energéticos Gas - Caso de estudio 2.

Evaluación energética - Gas	
Gas Producido (MWh)	2,911.96
CHP Calor usado (MWh)	2,012.67
CHP Calor entregado para calentamiento (MWh)	905.70
CHP Electricidad entregada (MWh)	704.43
Pérdidas proceso Gas - CHP (MWh)	402.53
Pérdidas proceso Gas - CHP	20%
Caldera Calor usado (MWh)	899.30
Caldera Calor entregado total (MWh)	809.37
Pérdidas proceso Gas - Caldera (MWh)	89.93
Pérdidas proceso Gas - Caldera	10%
Sist Enf Cool entregado (MWh)	768.90
Pérdidas proceso Caldera - Sist Enfriamiento (MWh)	40.47
Pérdidas proceso Caldera - Sist Enfriamiento	5%

De los resultados se cita que, la producción de Gas es repartida para satisfacer la demanda de calentamiento y enfriamiento a través de las estructuras energéticas, sean estas el Cogenerador, Caldera y el Sistema de Enfriamiento. De lo cual se obtiene: i) Pérdidas proceso Gas – CHP que ascienden a 402.53 MWh que equivalen al 20%; ii) Pérdidas proceso Gas – Caldera que ascienden a 89.93 MWh que equivalen al 10%; y, iii) Pérdidas proceso Caldera – Sistema de Enfriamiento que ascienden a 40.47 MWh que corresponde al 5%.

A nivel energético global la energía producida por el recurso de gas y electricidad asciende a 4,869.38 MWh mientras que la demanda global a ser abastecida corresponde a 4,297.3 MWh, por tanto, las pérdidas ascienden a 572.08 MWh que equivale a 13.3%.

Finalmente, en base a la producción de energía, se determinan los costos asociados los cuales se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Evaluación económica – Caso de estudio 2.

	Costo (USD)	%
Electricidad	109,585.50	76%
Gas	34,943.58	24%
Costo Total	144,529.08	

De los resultados se observa que el costo total asciende a 144,529.08 USD, del cual la mayor porción es la componente de la electricidad con un 76%, mientras que el valor restante corresponde al costo incurrido por la producción de gas, el cual asciende a 34,943.58USD. El diagrama esquemático con los valores obtenidos de la resolución del modelo para este primer caso de estudio se presenta en la Figura 29.

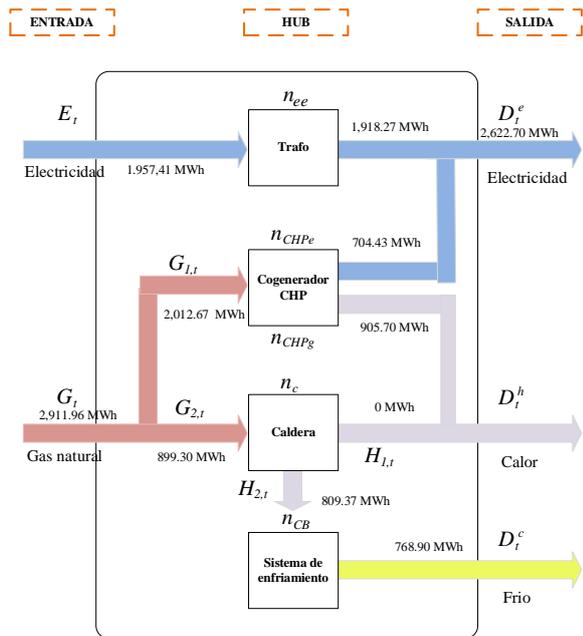


Figura 29. Esquema con variables resueltas – Caso de estudio 2

5.3 Análisis comparativo

En este numeral se evaluará de manera comparativa desde el punto de vista energético y económico los casos de estudio. Para el análisis energético se analizará la producción de energía por tipo de recurso y se contrastará con la demanda abastecida, los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Evaluación energética comparativa

	Caso de Estudio 1	Caso de Estudio 2	Diferencia
Electricidad (MWh)	2,676.22	1957.41	-718.81
Gas (MWh)	1,905.63	2911.96	1,006.33
Total E. Prod (MWh)	4,581.86	4,869.38	287.52
Demanda (MWh)	4,297.30	4,297.30	
Pérdidas (MWh)	284.56	572.08	287.52
% Pérdidas	6.6%	13.3%	

Del análisis comparativo de tipo energético se obtiene que, el SCE integrado optimiza los recursos de tal forma que la producción de electricidad es reducida en 718.81 MWh. Esto se debe a

que su costo de producción es superior al del gas, aspecto por el cual se incrementa la producción del gas en 1,006.33 MWh. Esto permite que el Cogenerador - CHP produzca la energía eléctrica complementaria que abastece la demanda eléctrica y adicional el calor útil de dicha estructura energética abastece de forma directa la demanda de calentamiento. Bajo esta premisa y dado que el SCE integrado requiere de más energía se incrementan las pérdidas del 6.6% a un 13.3%. Para evaluar el beneficio económico se presenta la Tabla 14.

Tabla 14. Evaluación económica comparativa

	Caso de Estudio 1	Caso de Estudio 2	Diferencia
Electricidad (USD)	150,702.81	109,585.50	-41,117.31
Gas (USD)	22,867.58	34,943.58	12,076.00
Total (USD)	173,570.39	144,529.08	-29,041.31

Como se citó en el análisis energético, el SCE integrado hace que se reduzca el costo de la producción de energía eléctrica en 41,117.31 USD, pero a su vez hace que se incremente la producción de gas lo que equivale a un incremento de 12,076.00 USD a comparación del caso de estudio 1. Sin embargo, y dada la optimización del recurso que realiza el modelo y tomando en cuenta la interacción de las estructuras energéticas integradas, el modelo en el caso de estudio 2 obtiene un ahorro de 29,041.31 USD a comparación del caso inicial. Estos planteamientos conllevan a indicar que el modelo matemático formulado minimiza los costos y optimiza el recurso para garantizar el abastecimiento de la demanda.

6 Conclusiones

El modelo de optimización lineal desarrollado en el presente trabajo determina la integración y asignación horaria de potencia de los SCE o HUB de

energía. Para para satisfacer la demanda de energía eléctrica y el consumo energético asociado a sistemas de acondicionamiento de temperatura, el sistema se basa en la integración de recursos energéticos como el gas natural y la energía eléctrica despachados óptimamente.

Bajo esta premisa, al evaluar un SCE sin la integración de las estructuras energéticas, la producción de electricidad asciende a un valor de 2,676.22 MWh, mientras que el gas produjo 1,905.63 MWh, dando un total de 4,581.86 MWh. En tal sentido, el recurso primario asignado con respecto al total producido conlleva a que la electricidad participe con un 58%, mientras que el gas ascienda al 42%.

Al analizar los SCE integrando las estructuras energéticas, se obtiene que la producción de energía asciende a un valor de 1,957,41 MWh, mientras que el gas produjo 2,911.96 MWh, dando un total de 4,869.38 MWh. En tal sentido, el recurso primario asignado con respecto al total producido conlleva a que la electricidad participe con un 40%, mientras que el gas ascienda al 60%.

Al comparar ambos casos de estudio, se concluye que, el SCE integrado optimiza los recursos de tal forma que la producción de electricidad es reducida en 718.81 MWh ya que su costo de producción es superior al del gas, aspecto por el cual se incrementa la producción del gas en 1,006.33 MWh. Esto permite que el Cogenerador - CHP produzca la energía eléctrica complementaria que abastece la demanda eléctrica y adicional con el calor útil de dicha estructura energética abastece de forma directa la demanda de calentamiento.

Considerando lo analizado energéticamente, se evalúan los aspectos económicos, de lo cual se señala que el SCE integrado hace que se reduzca el costo de la producción de energía eléctrica en 41,117.31 USD, en concordancia con lo indicado. Gracias a la optimización del

recurso que realiza el modelo propuesto se obtiene un ahorro de 29,041.31 USD, a comparación del caso inicial, lo que conlleva a indicar que el modelo matemático formulado minimiza los costos y optimiza el recurso. De esta forma, el modelo propuesto permite garantizar el abastecimiento de la demanda, ratificando que el modelo es una herramienta que puede servir para modelar los denominados HUB energéticos.

6.1 Trabajos futuros

Para la línea de investigación y tomando en cuenta el marco teórico, se pueden sugerir la realización de las siguientes investigaciones futuras:

- Planificación energética integrada para microrredes considerando los sistemas concentradores de energía y los programas de respuesta a la demanda.
- Planificación multiobjetivo de los sistemas concentradores de energía tomando en cuenta la energía no suministrada y la incorporación de sistemas de almacenamiento.
- Modelado de los sistemas concentradores de energía basado en un sistema combinado de calor, hidrógeno y electricidad (CHHP).
- Diseño óptimo de un HUB energético basado en sistemas de almacenamiento de energía a aplicarse con diversos tipos de generación renovable.

7 Referencias

- [1] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Home load management in a residential energy hub," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 322–328, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.011>.
- [2] G. Abdunnasser, A. Ali, M. F. Shaaban, and E. E. M. Mohamed, "Stochastic multi-objectives optimal scheduling of energy hubs with

- responsive demands in smart microgrids,” *J Energy Storage*, vol. 55, p. 105536, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105536>.
- [3] M. H. Shams *et al.*, “Optimal operation of electrical and thermal resources in microgrids with energy hubs considering uncertainties,” *Energy*, vol. 187, p. 115949, 2019.
- [4] M. Rastegar and M. Fotuhi-Firuzabad, “Load management in a residential energy hub with renewable distributed energy resources,” *Energy Build*, vol. 107, pp. 234–242, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.028>.
- [5] T. Ma, J. Wu, and L. Hao, “Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub,” *Energy Convers Manag*, vol. 133, pp. 292–306, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.011>.
- [6] H. Wang, H. Zhang, C. Gu, and F. Li, “Optimal design and operation of CHPs and energy hub with multi objectives for a local energy system,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1615–1621, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.539>.
- [7] A. Sheikhi, S. Bahrami, and A. M. Ranjbar, “An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs,” *Energy*, vol. 89, pp. 490–499, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.109>.
- [8] Q. Lu, W. Zeng, Q. Guo, and S. Lü, “Optimal operation scheduling of household energy hub: A multi-objective optimization model considering integrated demand response,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 15173–15188, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.047>.
- [9] M. Mostafavi Sani, H. Mostafavi Sani, M. Fowler, A. Elkamel, A. Noorpoor, and A. Ghasemi, “Optimal energy hub development to supply heating, cooling, electricity and freshwater for a coastal urban area taking into account economic and environmental factors,” *Energy*, vol. 238, p. 121743, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121743>.
- [10] T. Liu, D. Zhang, S. Wang, and T. Wu, “Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response,” *Energy Convers Manag*, vol. 182, pp. 126–142, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.073>.
- [11] F. Brahman, M. Honarmand, and S. Jadid, “Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system,” *Energy Build*, vol. 90, pp. 65–75, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.039>.
- [12] V. Davatgaran, M. Saniei, and S. S. Mortazavi, “Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market,” *Energy*, vol. 148, pp. 482–493, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.174>.
- [13] L. Carradore and F. Bignucolo, “Distributed multi-generation and application of the energy hub concept in future networks,” in *2008 43rd International Universities Power Engineering Conference*, 2008, pp. 1–5.

- [14] S. Moazeni, A. H. Miragha, and B. Defourny, "A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy hub optimal dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2169–2178, 2018.
- [15] B. Talebjedi and A. Behbahaninia, "Availability analysis of an Energy Hub with CCHP system for economical design in terms of Energy Hub operator," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101564, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101564>.
- [16] D. Qiu, Z. Dong, X. Zhang, Y. Wang, and G. Strbac, "Safe reinforcement learning for real-time automatic control in a smart energy-hub," *Appl Energy*, vol. 309, p. 118403, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118403>.
- [17] F. Kienzle and G. Andersson, "A greenfield approach to the future supply of multiple energy carriers," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–8.
- [18] M. Geidl, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, and G. Koepfel, "A greenfield approach for future power systems," *Proc. of Cigre General Session*, vol. 41, p. 136, 2006.
- [19] F. Kienzle and G. Andersson, "A greenfield approach to the future supply of multiple energy carriers," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–8.
- [20] M. Geidl, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, and K. Frohlich, "Energy hubs for the future," *IEEE power and energy magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 24–30, 2006.
- [21] K. Hemmes, J. L. Zachariah-Wolf, M. Geidl, and G. Andersson, "Towards multi-source multi-product energy systems," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 10, pp. 1332–1338, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.013>.
- [22] M. Geidl and G. Andersson, "A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow," in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, pp. 1–7.
- [23] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 1, pp. 145–155, 2007.
- [24] K. Hemmes, J. L. Zachariah-Wolf, M. Geidl, and G. Andersson, "Towards multi-source multi-product energy systems," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 10–11, pp. 1332–1338, 2007.
- [25] M. Schulze, L. Friedrich, and M. Gautschi, "Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach," in *2008 IEEE international conference on sustainable energy technologies*, 2008, pp. 83–88.
- [26] E. Fabrizio, V. Corrado, and M. Filippi, "A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage," *Renew Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 644–655, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.012>.
- [27] M. Geidl and G. Andersson, "A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow," in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, pp. 1–7.
- [28] X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy

- infrastructures,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2302–2311, 2015.
- [29] M. C. Bozchalui, S. A. Hashmi, H. Hassen, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Optimal operation of residential energy hubs in smart grids,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1755–1766, 2012.
- [30] I. G. Moghaddam, M. Saniei, and E. Mashhour, “A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building,” *Energy*, vol. 94, pp. 157–170, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.137>.
- [31] S. Pazouki and M.-R. Haghifam, “Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 80, pp. 219–239, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.044>.
- [32] E. S. Barbieri, P. R. Spina, and M. Venturini, “Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands,” *Appl Energy*, vol. 97, pp. 723–733, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.081>.
- [33] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” in *PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention*, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378. [Online]. Available: www.proceedings.com
- [34] E. M. García Torres, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, “Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlo algorithms and Markov Chains (MCMC),” in *Power Engineering Conference (UPEC), 2016 51st International Universities*, 2016, no. Mcmc, pp. 1–6. doi: [10.1109/UPEC.2016.8114092](https://doi.org/10.1109/UPEC.2016.8114092).
- [35] A. D. Ondeck, T. F. Edgar, and M. Baldea, “Optimal operation of a residential district-level combined photovoltaic/natural gas power and cooling system,” *Appl Energy*, vol. 156, pp. 593–606, 2015.
- [36] Y. Woo, S. Cho, J. Kim, and B. S. Kim, “Optimization-based approach for strategic design and operation of a biomass-to-hydrogen supply chain,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 12, pp. 5405–5418, 2016.
- [37] H. Lund, B. Möller, B. V. Mathiesen, and A. Dyrelund, “The role of district heating in future renewable energy systems,” *Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1381–1390, 2010.
- [38] O. A. Shaneb, G. Coates, and P. C. Taylor, “Sizing of residential μ CHP systems,” *Energy Build*, vol. 43, no. 8, pp. 1991–2001, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.005>.
- [39] M. Geidl, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, and K. Fröhlich, “The energy hub—a powerful concept for future energy systems,” in *Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry*, 2007, vol. 13, p. 14.
- [40] A. Haghrah, M. Nazari-Heris, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Solving combined heat and power economic dispatch problem using real coded genetic algorithm with improved Mühlenbein mutation,” *Appl Therm Eng*, vol. 99, pp. 465–475, 2016.
- [41] S. Barberis, M. Rivarolo, A. Traverso, and A. F. Massardo,

- “Thermo-economic analysis of the energy storage role in a real polygenerative district,” *J Energy Storage*, vol. 5, pp. 187–202, 2016.
- [42] O. Palizban and K. Kauhaniemi, “Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications,” *J Energy Storage*, vol. 6, pp. 248–259, 2016.
- [43] P. Mancarella, “MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models,” *Energy*, vol. 65, pp. 1–17, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>.
- [44] M.-H. Shariatkhah, M.-R. Haghifam, M. Parsa-Moghaddam, and P. Siano, “Modeling the reliability of multi-carrier energy systems considering dynamic behavior of thermal loads,” *Energy Build*, vol. 103, pp. 375–383, 2015.
- [45] L. Suganthi and A. A. Samuel, “Energy models for demand forecasting—A review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1223–1240, 2012.
- [46] M. Li, H. Mu, N. Li, and B. Ma, “Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling heating and power) system,” *Energy*, vol. 99, pp. 202–220, 2016.
- [47] M. Geidl and G. Andersson, “Optimal power flow of multiple energy carriers,” *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 1, pp. 145–155, 2007.
- [48] D. Lee and C.-C. Cheng, “Energy savings by energy management systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 760–777, 2016.
- [49] P. Capaldi, A. del Pizzo, R. Rizzo, and I. Spina, “An off-grid single utility micro-cogenerator fed with biogas,” in *3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, 2014, pp. 1–5. doi: 10.1049/cp.2014.0922.
- [50] Y. Xiong, “Multi-energy Energy Hub Configuration Method Containing New Energy Consumption,” in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2020, pp. 1717–1722. doi: 10.1109/EI250167.2020.9346715.
- [51] N. Voropai, E. Ukolova, D. Gerasimov, K. Suslov, P. Lombardi, and P. Komarnicki, “Simulation Approach to Integrated Energy Systems Study Based on Energy Hub Concept,” in *2019 IEEE Milan PowerTech*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/PTC.2019.8810666.
- [52] M. Daneshvar, B. M. Ivatloo, K. Zare, S. Asadi, and A. Anvari-Moghaddam, “A Stochastic Transactive Energy Model for Optimal Dispatch of Integrated Low-Carbon Energy Hubs in the Incorporated Electricity and Gas Networks,” in *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, 2020, pp. 568–573. doi: 10.1109/SGES51519.2020.00106.
- [53] M. A. Lasemi, A. Arabkoohsar, and A. Hajizadeh, “Optimal Design of Green Energy Hub considering Multi-Generation Energy Storage System,” in *2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/POWERCON53406.2022.9929923.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 15: Matriz de estado del arte.

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA																									
DATOS				TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Abastecimiento de la demanda	Sistemas Concentradores de Energía	Modelo de Optimización Lineal	Estructuras Energéticas	Costos de producción de energía	Modelación de la configuración de Concentrador de Energía	Determinación de los parámetros para las estructuras energéticas	Modelo de optimización Lineal	Aplicación en configuraciones de Sistemas de Concentradores de Energía	Restricciones de abastecimiento de demanda eléctrica	Restricción de balance energético de recursos primarios	Restricciones de abastecimiento de demanda para calefacción	Restricciones de abastecimiento de demanda para enfriamiento	Determinación técnica y económica de la demanda a ser suplida	Determinación de la configuración y los parámetros del concentrador de energía	Aplicación del modelo de optimización	Evaluación de las variables técnicas y económicas	Asignación de la potencia horaria por tipo de recurso primario	Determinación de la energía por tipo de estructura energética del SCE	Pérdidas energéticas dentro de cada estructura energética por sus procesos de conversión	Evaluación entre el costo de producción de energía	
1	2015	Home load management in a residential energy HUB	171	✗	✗				✗	✗								✗			✗				
2	2022	Stochastic multi-objectives optimal scheduling of energy HUBs with responsive demands in smart microgrids	2			✗									✗							✗			✗
3	2019	Optimal operation of electrical and thermal resources in microgrids with energy HUBs considering uncertainties	61	✗			✗	✗					✗			✗	✗		✗						
4	2015	Load management in a residential energy HUB with renewable distributed energy resources	143	✗					✗				✗									✗	✗		
5	2017	Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy HUB	279			✗	✗																		
6	2017	Optimal design and operation of CHPs and energy HUB with multi objectives for a local energy system	32		✗			✗			✗								✗	✗					
7	2015	An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy HUBs	210	✗		✗			✗												✗				✗
8	2022	energy HUB: A multi-objective optimization model considering integrated demand response	1								✗	✗					✗		✗	✗					
9	2022	Optimal energy HUB development to supply heating, cooling, electricity and freshwater for a coastal urban area taking into account economic and environmental factors	37							✗											✗				
10	2019	Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response	89	✗						✗		✗			✗										
11	2015	Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy HUB, integrating demand response and energy storage system	456	✗		✗		✗			✗													✗	

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Abastecimiento de la demanda	Sistemas Concentradores de Energía	Modelo de Optimización Lineal	Estructuras Energéticas	Costos de producción de energía	Modelación de la configuración de Concentrador de Energía	Determinación de los parámetros para las estructuras energéticas	Modelo de optimización Lineal	Aplicación en configuraciones de Sistemas de Concentradores de Energía	Restricciones de abastecimiento de demanda eléctrica	Restricción de balance energético de recursos primarios	Restricciones de abastecimiento de demanda para calefacción	Restricciones de abastecimiento de demanda para enfriamiento	Determinación técnica y económica de la demanda a ser suplida	Determinación de la configuración y los parámetros del concentrador de energía	Aplicación del modelo de optimización	Evaluación de las variables técnicas y económicas	Asignación de la potencia horaria por tipo de recurso primario	Determinación de la energía por tipo de estructura energética del SCE	Pérdidas energéticas dentro de cada estructura energética por sus procesos de conversión	Evaluación entre el costo de producción de energía
12	2018	Optimal bidding strategy for an energy HUB in energy market	114					❖			❖		❖						❖					
13	2018	Distributed multi-generation and application of the energy HUB concept in future networks	43		❖										❖									
14	2018	A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy HUB optimal dispatch	50				❖				❖			❖				❖				❖		
15	2021	Availability analysis of an Energy HUB with CCHP system for economical design in terms of Energy HUB operator	28									❖												
16	2022	Safe reinforcement learning for real-time automatic control in a smart energy-HUB	18		❖		❖		❖		❖				❖			❖		❖				❖
17	2019	A greenfield approach to the future supply of multiple energy carriers	24	❖				❖	❖				❖											
18	2016	A greenfield approach for future power systems	53				❖		❖			❖							❖		❖			
19	2019	A greenfield approach to the future supply of multiple energy carriers	24	❖					❖											❖		❖		
20	2018	Energy HUBs for the future	1185		❖			❖										❖			❖			❖
21	2017	Towards multi-source multi-product energy systems	168	❖																				
22	2015	A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow	277	❖						❖														❖
23	2017	Optimal power flow of multiple energy carriers	1208		❖				❖								❖			❖				
24	2017	Towards multi-source multi-product energy systems	168						❖											❖				

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Abastecimiento de la demanda	Sistemas Concentradores de Energía	Modelo de Optimización Lineal	Estructuras Energéticas	Costos de producción de energía	Modelación de la configuración de Concentrador de Energía	Determinación de los parámetros para las estructuras energéticas	Modelo de optimización Lineal	Aplicación en configuraciones de Sistemas de Concentradores de Energía	Restricciones de abastecimiento de demanda eléctrica	Restricción de balance energético de recursos primarios	Restricciones de abastecimiento de demanda para calefacción	Restricciones de abastecimiento de demanda para enfriamiento	Determinación técnica y económica de la demanda a ser suplida	Determinación de la configuración y los parámetros del concentrador de energía	Aplicación del modelo de optimización	Evaluación de las variables técnicas y económicas	Asignación de la potencia horaria por tipo de recurso primario	Determinación de la energía por tipo de estructura energética del SCE	Pérdidas energéticas dentro de cada estructura energética por sus procesos de conversión	Evaluación entre el costo de producción de energía
25	2018	Modeling and optimization of renewables: applying the energy HUB approach	124	☒										☒								☒		
26	2010	A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage	198	☒		☒				☒													☒	
27	2015	A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow	277								☒		☒							☒				
28	2015	Optimal expansion planning of energy HUB with multiple energy infrastructures	472			☒									☒									
29	2012	Optimal operation of residential energy HUBs in smart grids	548				☒																☒	
30	2016	A comprehensive model for self-scheduling an energy HUB to supply cooling, heating and electrical demands of a building	176																				☒	
31	2016	Optimal planning and scheduling of energy HUB in presence of wind, storage and demand response under uncertainty	285		☒		☒								☒			☒		☒				☒
32	2012	Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands	204	☒			☒		☒		☒													
33	2015	Optimal operation of a residential district-level combined photovoltaic/natural gas power and cooling system	78							☒												☒	☒	
34	2016	Optimization-based approach for strategic design and operation of a biomass-to-hydrogen supply chain	72				☒							☒										
35	2010	The role of district heating in future renewable energy systems	954					☒							☒		☒							
36	2011	Sizing of residential µCHP systems	149		☒			☒	☒										☒	☒				
37	2017	The energy HUB—a powerful concept for future energy systems	181				☒															☒		

INTEGRACIÓN ÓPTIMA DE SISTEMAS CONCENTRADORES DE ENERGÍA (SCE) PARA GARANTIZAR EL ABASTECIMIENTO EFICIENTE DE LA DEMANDA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA					
				Abastecimiento de la demanda	Sistemas Concentradores de Energía	Modelo de Optimización Lineal	Estructuras Energéticas	Costos de producción de energía	Modelación de la configuración de Concentrador de Energía	Determinación de los parámetros para las estructuras energéticas	Modelo de optimización Lineal	Aplicación en configuraciones de Sistemas de Concentradores de Energía	Restricciones de abastecimiento de demanda eléctrica	Restricción de balance energético de recursos primarios	Restricciones de abastecimiento de demanda para calefacción	Restricciones de abastecimiento de demanda para enfriamiento	Determinación técnica y económica de la demanda a ser suplida	Determinación de la configuración y los parámetros del concentrador de energía	Aplicación del modelo de optimización	Evaluación de las variables técnicas y económicas	Asignación de la potencia horaria por tipo de recurso primario	Determinación de la energía por tipo de estructura energética del SCE	Pérdidas energéticas dentro de cada estructura energética por sus procesos de conversión	Evaluación entre el costo de producción de energía
38	2016	Solving combined heat and power economic dispatch problem using real coded genetic algorithm with improved Mühlenbein mutation	140				☒											☒						
39	2016	Thermo-economic analysis of the energy storage role in a real polygenerative district	35						☒										☒					
40	2016	Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications	335	☒	☒														☒		☒			
41	2014	MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models	1211							☒										☒	☒		☒	
42	2015	Modeling the reliability of multi-carrier energy systems considering dynamic behavior of thermal loads	83											☒			☒							
43	2012	Energy models for demand forecasting—A review	1328				☒	☒															☒	
44	2016	Optimal design and operation strategy for integrated evaluation of CCHP (combined cooling heating and power) system	181		☒	☒		☒												☒				
45	2007	Optimal power flow of multiple energy carriers," IEEE Transactions on power systems	1208		☒			☒														☒		
46	2016	Energy savings by energy management systems: A review	282			☒				☒		☒											☒	
47	2014	An off-grid single utility micro-cogenerator fed with biogas	0				☒				☒											☒		
48	2020	Multi-energy Energy HUB Configuration Method Containing New Energy Consumption	0																☒			☒	☒	
49	2019	Simulation Approach to Integrated Energy Systems Study Based on Energy HUB Concept	40				☒		☒												☒	☒		
50	2020	A Stochastic Transactive Energy Model for Optimal Dispatch of Integrated Low-Carbon Energy HUBs in the Incorporated Electricity and Gas Networks	5	☒																			☒	
51	2022	Optimal Design of Green Energy HUB considering Multi-Generation Energy Storage System	0				☒	☒														☒	☒	
CANTIDAD:				15	9	10	14	11	9	11	7	9	5	4	6	7	4	4	9	9	12	13	10	9

7.2 Resumen de Indicadores

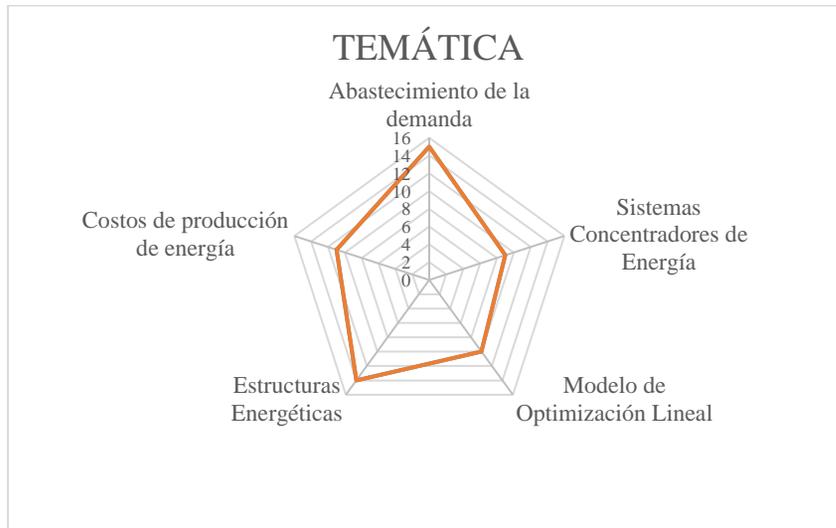


Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

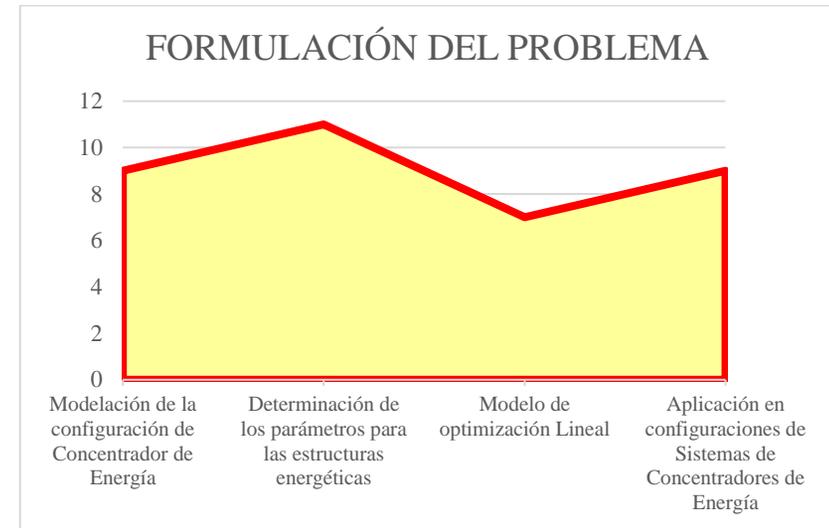


Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

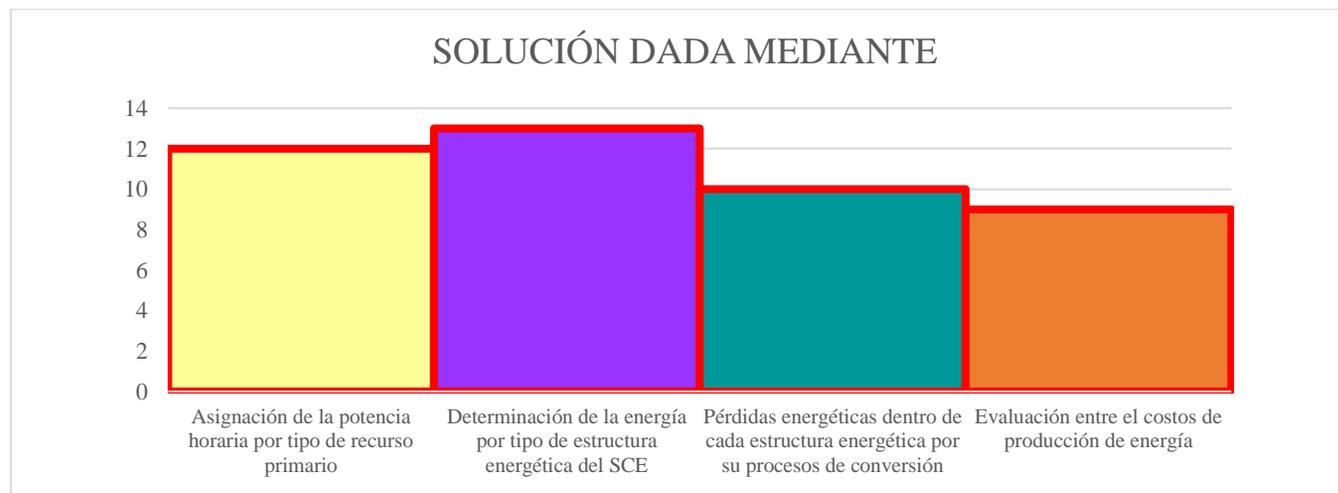


Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.