

# Substation encapsulated in SF6 gas: an alternative to the evolution of energy demand

Rommel Javier Alarcón Moreno, Master<sup>1</sup> , Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad César Vallejo, Perú, ralarcom@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe

***Abstract**– Energy is of value for the inhabitants of a country and this is contemplated in the objectives of sustainable development. Considering the importance of this resource, it is necessary to choose the best alternatives in terms of equipment in energy substations. In this research, the GIS system was compared to the AIS, determining its advantages in technical and economic criteria: operation and maintenance, reliability within an energy system, implementation and installation costs. Considering a mixed approach and a concurrent nested design of several groups, three data collection techniques were applied, finding valuable information that allowed concluding that the SF6-encapsulated cell (GIS) presents greater advantages in space saving, reliability, space, and operation and maintenance.*

*Keywords*--Energy Resources, Comparative Advantage, Social Economic Development, Gases, SF6

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Subestación encapsulada en gas SF6: alternativa ante la evolución de la demanda energética

Rommel Javier Alarcón Moreno, Magíster<sup>1</sup>, Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad César Vallejo, Perú, ralarconm@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe

**Resumen—** La energía es de valor para los habitantes de un país y esto está contemplado en los objetivos de desarrollo sostenible. Teniendo en cuenta la importancia de este recurso es necesario elegir las mejores alternativas en cuanto a equipamientos en subestaciones energéticas. En esta investigación se comparó el sistema GIS frente al AIS, determinando sus ventajas en los criterios técnicos y económicos: operación y mantenimiento, confiabilidad dentro de un sistema energético, costos de implementación e instalación. Considerando un enfoque mixto y un diseño anidado concurrente de varios grupos, se aplicó tres técnicas de recolección de datos, encontrando información valiosa que permitió concluir la celda encapsulada en SF6 (GIS) presenta mayores ventajas en ahorro de espacio, confiabilidad, espacio, y operación y mantenimiento.

**Palabras clave—** Recursos energéticos, Ventaja comparativa, Desarrollo económico social, Gas, SF6

## I. INTRODUCCIÓN

La energía es muy importante para el desarrollo de los países y sus habitantes. Su presencia facilita las acciones para erradicar la pobreza, ayuda a mejorar la educación, disminuir la mortalidad y brindar una atención médica de calidad. La energía permite invertir en tecnología, trayendo consigo la innovación y la creación de nuevas industrias con las cuales se generan nuevos puestos de trabajo. Por estos motivos, es importante garantizar el acceso universal a servicios energéticos modernos, asequibles y fiables, tal como se propone en la meta 7.1 del objetivo de desarrollo sostenible (ODS) 7: “Energía asequible y no contaminante” [1].

Alrededor de 733 millones de personas en el planeta aún carecen de acceso a la electricidad. Considerando los índices de crecimiento, para el 2030 se espera que 670 millones de personas seguirán sin tener electricidad, lo que implica señalar que diez millones más de lo que se proyectó en el 2021. Estas cifras son preocupantes en cuanto a su impacto medio ambiental, más aún si se conoce que cerca de 2600 millones de personas aún cocinan y calientan sus hogares con combustibles contaminantes [2].

En todo país de América Latina (LATAM), como en el Perú, se tiene claro que el tener un suministro eléctrico continuo y seguro permite mitigar potenciales limitantes para el crecimiento sostenido. El Banco Central de Reserva del Perú, hace un seguimiento del balance de oferta-demanda (BOD) del sector eléctrico a fin de estimar si hay riesgo de insuficiente

generación eléctrica futura. Según valores históricos, en el 2020, la oferta disponible del parque generador del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) fue de 10867 MW, esta cifra estuvo por debajo de la potencia efectiva y la demanda máxima fue de 6960 MW. En base a esto se proyecta al 2023 un crecimiento de 0.9 por ciento promedio anual de la oferta disponible, lo que representa 408 MW. Del mismo modo, la máxima demanda en el sector eléctrico crecerá alrededor del 4.9 por ciento promedio anual, lo que representa un acumulado de 1467 MW, dado al crecimiento de la demanda de proyectos mineros y no mineros y de otros sectores de la economía [3].

El crecimiento de la demanda de energía tiene una relación histórica con el desarrollo económico de los países. Por lo que a pesar de que la eficiencia de energía mejore, se requiere de inversiones para alcanzar el desarrollo y mantener la infraestructura que permita asegurar el suministro de energía, tanto en cantidad como en calidad [4].

Esta creciente demanda, no es reciente, años atrás también se presentó esta tendencia, motivo por el cual la empresa ENEL inauguró a mediados del año 2016 la subestación eléctrica de transmisión (SET) Malvinas, con la finalidad de atender la creciente demanda para los distritos Magdalena del Mar, Cercado de Lima, Pueblo Libre y Jesús María. Para la construcción ENEL implementó una subestación aislada por gas (GIS) de 220KV, el cual le permitió reducir considerablemente los espacios ocupados.

Del mismo modo, la empresa concesionaria CTM (Consorcio Transmataro) ejecutó el proyecto MAMO “Línea de transmisión 500kV Mantaro – Marcona-Socabaya-Montalva”, en la subestación Colcabamba implementó una GIS de 550KV y en el año 2018 construyeron la nueva subestación Carapongo en donde también implementaron una GIS de 500KV.

Las SET son de valor para la producción, conversión, transformación, regulación y distribución de la energía. Esta facilita que el propósito de distribución se concrete y la electricidad pueda llegar a diversas zonas geográficas [5].

En las SET se tienen sistemas alternativos de equipamiento como las de aislamiento en aire (AIS), esta es valorada por su ahorro en costos al inicio del proyecto, pero requiere de mayor atención en el largo plazo. Por eso es importante su comparación con el sistema GIS, conocer sus ventajas y sus beneficios para su implementación dentro de una subestación energética.

Siempre que se desarrollen proyectos para el sector energético, se debe dar a conocer el análisis de factibilidad y

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

estudios prediales y ambientales para determinar el nivel de impacto que estos puedan ocasionar a algún terreno y el medio ambiente. El uso de subestaciones encapsuladas en gas (SF<sub>6</sub>) es la mejor opción ante las limitantes descritas anteriormente, verificación y mantenimiento, ya que este tipo de instalaciones por su diseño flexible permite un fácil acceso para su construcción. Además, por ser una instalación moderna se convierte en un sistema con mayor seguridad y confiabilidad.

Por lo antes mencionado se propuso como objetivo en la investigación realizar un análisis comparativo entre los sistemas GIS y AIS en cuanto a los criterios técnicos y económicos: operación y mantenimiento, confiabilidad dentro de un sistema energético, costos de implementación e instalación.

## II. MARCO TEÓRICO

En LATAM y Europa se han desarrollado algunos estudios donde se abordan la tecnología GIS y AIS, entre los aportes más destacables se encuentra la referencia [6], realizado en Ecuador, en este estudio se dio a comprender sobre la viabilidad de la implementación de celdas encapsuladas, realizando comparaciones entre las GIS y las AIS, y como ejemplo de ello se menciona el dimensionamiento de una celda GIS para un Transformador de Potencia de 2500kVA. En este estudio se concluyó que los equipos encapsulados en SF<sub>6</sub> son de alto rendimiento, fiabilidad y durabilidad, no necesitan mucho mantenimiento y permite optimizar espacios, a diferencia de los equipos AIS que requieren espacios mayores.

En la referencia [7], desarrollada en Uruguay, se realizó un estudio técnico-económico de la tecnología GIS basada en el gas SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre), a emplear en el diseño de estaciones de 60kV. Se analizaron los valores eléctricos de operación: corriente de cortocircuito, corriente de barras y corriente nominal; y aspectos como dimensiones y área ocupada, requerimientos de mantenimiento, costos de adquisición y montaje conforman la base del análisis de manera de obtener soluciones óptimas. En este estudio se concluyó que entre las ventajas de una GIS se encuentran: su reducida superficie necesaria para su instalación, bajo impacto visual, montaje rápido, mantenimiento reducido, alto nivel de seguridad, eficiencia y fiabilidad, mayor vida útil, flexibilidad, seguridad en su operación, cumplimiento de normas medioambientales.

En la referencia [8] se desarrolló en El Salvador y señaló que la GIS es la mejor alternativa, ya que este tipo de instalaciones por su diseño flexible permite un fácil acceso para su instalación, verificación y mantenimiento. También se mencionó que, para desarrollar proyectos en el sector eléctrico, se deben presentar estudios medioambientales y análisis de factibilidad para determinar el nivel de impacto que estos puedan ocasionar al medio ambiente.

En la referencia [9] se desarrolló en España y se concluyó que los transformadores y la aparatada son los factores que

más inciden en el análisis comparativo de tecnologías para SET, en el caso de la AIS la aparatada resalta por un 30 por ciento de más del coste final de las SET de un solo parque, en cambio para la tecnología GIS representa valores superiores del 50 por ciento. Así mismo, los transformadores aumentan los costos a un 40 por ciento el precio final de las SET.

En Chile, se desarrolló la referencia [10], en donde se detalla que el uso de SET encapsuladas en gas SF<sub>6</sub> es una interesante solución frente a la convencional AIS. Se debe tener en cuenta la creciente demanda energética en las metrópolis y el parque industrial y considerando el reducido espacio para la ubicación de SET, los elevados costos de los terrenos y la actitud negativa de las comunidades donde estas SET se instalan, el GIS se muestra como la mejor alternativa.

En el Perú también se realizaron estudios, tal es el caso de la referencia [11] en la cual se desarrolló la metodología basada en el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como modelo de evaluación técnico y económica para seleccionar la mejor alternativa para implementar una subestación 500/220kV entre tecnología GIS y AIS, se hizo un análisis de las alternativas y criterios para implementar la SE Carapongo 500/220kV y así se preparó la priorización entre estos elementos.

Así también, en la referencia [12] se menciona la importancia de diseñar la distribución de equipos e implementar una subestación encapsulada en gas (GIS) para la Central Hidroeléctrica San Miguel (Intihuaña – Cusco) con el propósito de optimizar el estrecho espacio que se tiene y minimizar los daños y riesgos.

Dada a la información obtenida en estudios previos, invita a reflexionar si la concesionaria CTM como organización responsable de la expansión y mantenimiento del sistema de transmisión eléctrica del Perú, debe utilizar los avances en la tecnología para desarrollar proyectos eléctricos que tengan como finalidad presentar un alto grado de confiabilidad, disminuir los costos por mantenimiento, utilizar el menor espacio físico posible y seleccionar la mejor alternativa económica para su construcción e implementación.

A fin de conocer sobre la tecnología GIS y AIS, se procedió a buscar información en páginas especializadas, encontrando que las SET se encargan de modificar los diferentes parámetros de la potencia eléctrica a fin de transmitir, regular y distribuir la energía en el sistema eléctrico a través de sus líneas. Estas subestaciones se clasifican de diferentes maneras, siendo las más comunes por su aislamiento, consumo, emplazamiento y función.

En cuanto a su clasificación por aislamiento se tiene a las subestaciones aisladas por gas o *Gas Insulated Switchgear* (GIS), que es una alternativa cuando se requiere de ahorro de espacio en comparación de las clásicas instalaciones aisladas por aire. La primera GIS de 110KV fue fabricada en Europa en el año 1965, tuvo 48 años de operación. *ABB Group* desde el año 1967 fue pionera y líder de tecnología en subestaciones encapsuladas fabricando GIS desde 66KV a 1200KV. Entre los beneficios de esta tecnología se destaca el poco espacio para su

instalación, bajos costos de impacto ambiental y contribuyen al cuidado del medio ambiente, tiempos cortos de mantenimiento, resistencia confiable contra fenómenos sísmicos, inmune contra impactos de rayos, resistente a temperaturas  $-55^{\circ}/+55^{\circ}\text{C}$  [13].

Independiente a las configuraciones de las subestaciones eléctricas encapsuladas GIS, las características técnicas más importantes a tenerse en cuenta para la selección de la tecnología GIS son: la tensión nominal (kV), tensión nominal soportada a frecuencia industrial (kV), tensión nominal soportada al impulso tipo rayo (kV), intensidad nominal (A) y corriente de corte, 3s (kA).

TABLA I  
DATOS TÉCNICOS DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS ENCAPSULADAS DE GAS SF6

Tipo	Sub-transmisión 52-170 kV		Transmisión 245-1100 kV			
	ELK-04	ELK-04	ELK-14	ELK-3	ELK-4	ELK-5
Encapsulado	Trifásico		Tri-monofásico	Monofásico		
Tensión nominal (kV)	72,5	145/170	245/252/300	420/550	800	1100
Tensión nominal soportada a frecuencia industrial (kV)	140	275/325	460	650/740	960	1100
Tensión nominal soportada al impulso tipo rayo (kV)	325	650/750	1050	1425/1550	2100	2400
Intensidad nominal (A)	2500	2500/4000	3150/4000	4000/5000	4000/5000	5000
Corriente de corte, 3S (kA)	40	40/50/63	40/50/63	63	50	50

\* Fuente: Referencia [14]

Los componentes típicos de una bahía encapsulada trifásica GIS son los siguientes: (a) barra con seccionador/seccionador de puesta a tierra, (b) interruptor de potencia, (c) transformador de corriente, (d) transformador de tensión, (e) seccionador de línea/seccionador de puesta a tierra combinados, (f) seccionador de puesta a tierra de cierre rápido, (g) caja terminal de cable y (h) armario de control. Estos se detallan en la siguiente figura:

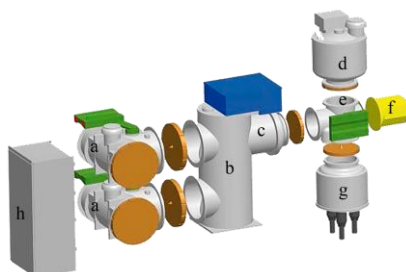


Fig. 1 Componentes típicos de una bahía encapsulada trifásica GIS  
Fuente: Referencia [15]

Otra alternativa en la clasificación por aislamiento se tiene a las subestaciones con aislamiento en aire o *Air Insulated*

*Switchgear* (AIS) las cuales son las de mayor uso, estas utilizan el aire como aislante natural, tienen una envoltura externa conectada a tierra que encierra el conductor interno de alta tensión, a diferencia de los equipos convencionales cuya base más cercana es la superficie de la tierra. Dado a esto cada equipo se presenta de forma individual y distante respecto a otros, esta distancia de seguridad incrementa el espacio en su implementación [16].



Fig. 2 Subestación aislada en aire y zona de puesta a tierra con superficie de grava  
Fuente: Referencia [17]

## II. MÉTODO

Esta es una investigación de enfoque mixto, con diseño anidado concurrente de varios grupos [18] pues se realizó el análisis técnico y económico de las diversas GIS implementadas en el Perú en alta y extra alta tensión para 220kV y 500kV, a partir de la opinión de especialistas y técnicos, así como un estudio detallado de sus procesos.

El diseño en aplicación se grafica a continuación:

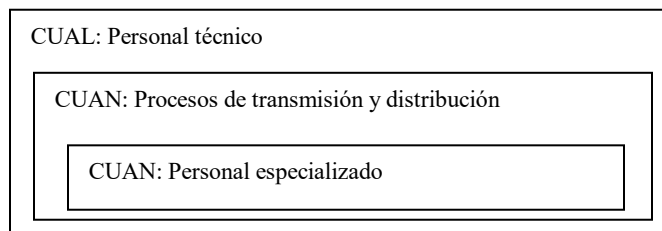


Fig. 3 Diseño anidado concurrente de varios grupos.

El análisis comparativo se realizó en base a dos dimensiones: el *análisis técnico de un sistema GIS*, el cual se orientó a evaluar los principios técnicos del sistema de acuerdo a la recolección de información adicional sobre la confiabilidad, rendimiento, espacio, características de mantenimiento de una GIS frente a una AIS. Esta dimensión se operacionalizó considerando como indicadores a la disponibilidad, capacidad, adaptabilidad, ampliaciones y utilidad.

La segunda dimensión fue el *análisis económico de un sistema GIS*, el cual se orientó a evaluar los costos – beneficios que se obtendrá en la implementación de un sistema GIS frente a un sistema convencional. Esta dimensión se operacionalizó considerando como indicadores al mantenimiento, espacio y adquisición del equipo y capacitación.

Como población de estudio se consideró al personal técnico y especialista y procedimientos de las subestaciones de AT y extra alta tensión en el Perú, y se estudió una muestra por conveniencia, la cual estuvo conformada por tres subestaciones aisladas de gas (GIS) en AT y extra alta tensión del sistema eléctrico interconectado (SEIN) y de estos se abordó el personal técnico, procesos de transmisión y distribución de energía eléctrica y personal especializado.

Como técnicas de recolección de datos se utilizaron tres, a fin de realizar un análisis holístico. Considerando las técnicas: entrevista, encuesta y análisis documental, se diseñaron instrumentos y fueron validados por juicio de expertos, con esto se pudo recopilar la información necesaria que permita alcanzar los propósitos descritos.

En la tabla II se detallan los objetivos de cada instrumento elegido para la presente investigación:

TABLA II  
OBJETIVOS DE LOS INSTRUMENTOS APLICADOS

Nro.	Técnica	Instrumento	Público objetivo	Objetivos del instrumento
1	Entrevistas	Guía de entrevista	Personal técnico	Determinar la confiabilidad y priorización de los equipos y sistemas a analizar.
2	Análisis documental	Ficha de registro	Procesos de transmisión y distribución de energía eléctrica	Conocer los parámetros del equipo y las variables que definen su potencia y calidad.
3	Encuestas	Cuestionario	Personal especializado	Analizar las necesidades del uso de este tipo de tecnología.

Se solicitó la autorización de uso de información en las subestaciones seleccionadas para poder aplicar los instrumentos diseñados, las cuales fueron concedidas, así mismo, se obtuvo el consentimiento informado de los participantes del estudio, a quienes se mantuvo en anonimato por criterios de confidencialidad. Cada instrumento fue aplicado con asistencia de parte de los investigadores, a fin de que las preguntas formuladas puedan ser respondidas en su totalidad.

### III. RESULTADOS

#### A. Operación y mantenimiento

Luego de recopilar la información a través de la entrevista al personal técnico y al comparar el sistema GIS frente al AIS en lo concerniente a su operación y mantenimiento, se encontraron las siguientes ventajas y desventajas:

TABLA III  
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS GIS Y AIS EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Ítem	Subestación Encapsuladas en gas SF6 (GIS)	Subestación convencional (AIS)
1	Rápidos restablecimiento del suministro eléctrico en condiciones climáticas severas.	Demora para restablecimiento del suministro eléctrico.
2	Protección frente a recintos metálicos aterrizados.	No cuenta con ese tipo de protección
3	Requiere de comprobación de las presiones de SF6 (densidad) según módulo.	No requiere monitoreo de gas SF6
4	Ocupa menor espacio para su implementación.	Usa mayor espacio para su aplicación.
5	Fácil la interfaz entre máquina y hombre.	Es manual la relación máquina y hombre.
6	Costos anuales de mantenimiento son menores	Costos anuales mayores
7	Menor y mayor altitud son menor y bajo costo de mantenimiento	A diferentes altitudes el costo de mantenimiento es mayor
8	Ahorro en espacios físicos	Mayor costo por espacios físicos
9	Costo de interrupciones programadas es mucho menor	Costos por interrupciones es similar a la GIS
10	Costo alto para su adquisición como equipo	Costo mucho menor por ser equipos individuales
11	Menor tiempo para su montaje	Mayor tiempo para su montaje

En principio el que presenta mayor operación y mantenimiento es la subestación AIS, porque los componentes de la bahía se encuentran expuestos al medio ambiente donde se encuentran ubicados. Esto fue corroborado con la referencia [19]. De acuerdo a esto, se evidencia que la GIS genera menor operación y mantenimiento.

#### B. Confiabilidad

A continuación, se detallan las ventajas y desventajas del sistema GIS o AIS en cuanto a su confiabilidad para una subestación energética, esto a partir de un análisis documental.

TABLA IV  
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS GIS Y AIS EN CONFIABILIDAD

Ítem	Subestación Encapsuladas en gas SF6 (GIS)	Subestación convencional (AIS)
1	Mayor confiabilidad por interrupciones en el sistema eléctrico	Menor confiabilidad por interrupciones en el sistema eléctrico
2	Confiabilidad mayor en sistema de aislamiento	Confiabilidad menor en sistema de aislamiento
3	Mayor confiabilidad frente a vandalismo	Menor confiabilidad frente a vandalismo
4	Confiable en interfaz entre máquina y hombre	Sistema manual, puede generar accidente

5	Mayor confiabilidad frente a arcos eléctricos	Mayor posibilidad de accidentes por arcos eléctricos
6	Mayor vida útil	Menor vida útil
7	Es confiable frente a comportamiento sísmicos por tener un centro de gravedad más bajo	No es confiable frente a sismos, porque los equipos tienen un centro de gravedad más alto
8	Mayor confiabilidad frente a vandalismo	Menor confiabilidad frente a vandalismo
9	Confiabilidad para ser transportado a sitio	Requiere de supervisión constante
10	Confiabilidad frente a condiciones ambientales	Baja confiabilidad

La comparación entre los sistemas AIS y GIS, por la gran mayoría de ventajas que tiene este último, se impone como favorito para considerarse en futuras implementaciones de proyectos en el sector eléctrico en nivel de AT y extra AT. Se determina que la GIS presenta mayor confiabilidad frente a un sistema AIS.

### C. Costos de implementación

En la siguiente tabla se mencionan las ventajas y desventajas de los costos de implementación de una celda GIS frente a una celda AIS, para una subestación energética, esto a partir de la encuesta realizada.

TABLA V  
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS GIS Y AIS EN COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Ítem	Subestación Encapsuladas en gas SF6 (GIS)	Subestación convencional (AIS)
1	Menor costo por mantenimiento	Mayor costo por mantenimiento
2	Menor costo por vigilancia	Mayor costo por vigilancia
3	Mayor costo por compra de repuestos	Menor costo por repuestos
4	Mayor costo por llenado de gas anual	No requiere
5	Menor costo para su montaje e instalación	Mayor costo para su montaje e instalación
6	Menor costo por transporte	Mayor costo por transporte
7	Menor costo por embalaje	Mayor costo por embalaje
8	Menor costo por seguro	Mayor costo por seguro.
9	Menor costo por pruebas eléctricas	Mayor costo por pruebas eléctricas.
10	Menor costo para el diseño de las protecciones eléctricas	Mayor costo para el diseño de las protecciones eléctricas

Considerando los indicadores obtenidos, y tras comparar los sistemas en estudio, se evidencia una gran ventaja elegir celda encapsulada en SF6 (GIS) para la construcción de subestación energética.

La tecnología AIS suele ser la tecnología que tiene los análisis económicos más favorables, pero la tecnología GIS es la mejor opción en los casos donde hay cuestiones medioambientales o técnicas que afecten a la subestación (zonas urbanas o industriales).

### D. Instalación

En la siguiente tabla se mencionan las ventajas y desventajas de construir una celda GIS o AIS dentro de una instalación de espacios a terceros, esto a partir de una serie de encuestas realizadas a los operadores de las subestaciones GIS, AIS e híbrido.

TABLA VI  
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS GIS Y AIS EN INSTALACIÓN EN ESPACIOS

Ítem	Subestación Encapsuladas en gas SF6 (GIS)	Subestación convencional (AIS)
1	Ocupa menor espacio	Ocupa mayor espacio
2	Requiere menor cableado eléctrico	Requiere mayor cableado eléctrico
3	Menor espacio de caseta de control	Mayor espacio de caseta de control.
4	Menor mantenimiento	Mayor mantenimiento.
5	Menor costo para su instalación	Mayor costo para su instalación
6	Menor compromiso de conexión	Mayor compromiso por convenio de conexión
7	No necesita varias grúas para su instalación y montaje	Necesita de dos grúas para su instalación y montaje
8	Requiere menor obras civiles	Mayores obras civiles
9	Mínimo tiempo para la puesta en servicio	Mayor tiempo para la puesta en servicio
10	Menor costo por servicios auxiliares	Mayor costo por servicios auxiliares

Tomando en cuenta los indicadores de los sistemas GIS y AIS, a fin de determinar la de mejor instalación, se determinó que la celda encapsulada en SF6 (GIS) presenta mayor ventaja frente a la AIS en cuanto a su ocupación de espacio. Así mismo entre 20% y 40% es la estimación de ahorro en tiempo y uso de horas-hombre para el montaje eléctrico que tiene la tecnología GIS a la hora de instalar subestaciones eléctricas.

## IV. DISCUSIÓN

En la actualidad la demanda de energía ha comenzado a incrementarse, se ha convertido en una necesidad fundamental, por lo cual se requiere reforzar el sistema de transmisión en la zona centro del país, así como la evacuación de generación excedente de la zona de Mantaro hacia Lima, prevista de los nuevos proyectos de generación que ingresarán a operar en dicha zona.



Al analizar comparativamente entre los sistemas GIS y AIS en cuanto a los criterios de operación y mantenimiento, se define como los aspectos a considerar en el conjunto de operaciones y actividades que se asocian al mantenimiento de un sistema GIS o AIS. Se encontró que la GIS genera menor operación y mantenimiento, siendo esto coincidente con la referencia [7], en la que se concluyó que las GIS tiene como ventaja su alta vida esperada (superior de 30 años) y su bajo mantenimiento en base a inspecciones de chequeo de datos y visuales, dada a su diseño estándar, robusto y por su protección ante inclemencias severas. Por lo que se evidencia que el sistema AIS presenta mayor operación y mantenimiento, y la GIS es la más idónea en este criterio.

En cuanto a los criterios de confiabilidad, el cual es definida como la probabilidad de que una subestación pueda suministrar energía durante un periodo de tiempo dado, bajo la condición de que al menos un componente de la subestación no pueda recuperarse durante la operación [19], se encontró que el sistema GIS presenta mayores ventajas que el sistema AIS, y esto puede considerarse en futuras implementaciones de proyectos en el sector eléctrico en nivel de AT y extra AT. Lo que es coincidente con los aportes de la referencia [11] que utilizó la metodología basada en AHP como modelo de evaluación técnica y económica, seleccionado a la tecnología GIS como la más adecuada para implementar en subestaciones 500/220kV. Motivo por el cual se determina que la GIS presenta mayor confiabilidad frente a un sistema AIS.

Los costos de implementación son definidos como gastos, inversiones para la ejecución de un proyecto [20]. En la presente investigación se determinó que una celda encapsulada en SF6 (GIS) para la construcción de subestación energética tiene mayores ventajas que un sistema convencional. Esto es coincidente con los aportes de la referencia [6], quien buscó comprender la viabilidad de la implementación de celdas encapsuladas, realizando comparaciones entre las GIS y las AIS, encontrando que los equipos encapsulados en SF6 son de alto rendimiento, fiabilidad y durabilidad, lo que deduce un bajo nivel de costos de mantenimiento pues no la necesitan con frecuencia. Así mismo, en la referencia [7] se determinó que el costo de una SET en la etapa inicial favorece más a la opción AIS, pero en otras etapas la GIS es más ventajosa. En la referencia [9] la inversión de una AIS resulta ser menor que en la tecnología GIS, lo que muestra una ventaja de una SET con sistemas alternativos de equipamiento como las de aislamiento en aire (AIS). Considerando estas coincidencias y diferencias, puede indicarse que una celda del tipo GIS es más viable para la implementación dentro de una subestación energética ya sea en alta tensión o extra alta tensión.

Para la instalación, la cual se define como un conjunto de elementos y equipos de un lugar de trabajo mediante los que se genera, convierte, transforma, distribuye o utiliza la energía eléctrica y al espacio que dispone para futuras ampliaciones [21]. La presente se determinó que la celda encapsulada en SF6 (GIS) presenta mayor ventaja frente a la AIS en cuanto a

su ocupación de espacio y los costos que genera. Esto es coincidente con los aportes de la referencia [12] en la cual se diseñó la distribución de equipos e implementación de una subestación encapsulada en gas (GIS) dado al estrecho espacio para la instalación, su bajo nivel de riesgos y daños, resaltando el uso de catálogo de fabricantes, uso de libro de diseños, entre otros criterios. También es coincidente con los hallazgos de la referencia [8], en la que se indica que el sistema GIS es la mejor alternativa, ya que este tipo de instalaciones por su diseño flexible permite un fácil acceso para su instalación, verificación y mantenimiento; así como en la referencia [7] en la que se indicó que la GIS se destaca por su flexibilidad, fiabilidad y seguridad, porque su diseño permite protegerse de inclemencias. Existen coincidencias con la referencia [10], en donde se detalló que las SET con GIS son ventajosas por el uso de espacio reducido para ser instalado, y que esto permite ir acorde a las expectativas de las comunidades que se consideran vulnerables ante las estaciones energéticas. Considerando estas coincidencias, se evidencia que una SET con celdas encapsuladas en SF6 presenta una mayor ventaja para su instalación.

## V. CONCLUSIONES

Para un diseño de una subestación aislada en gas SF6, se deben tener en cuenta que el sistema GIS destaca por ahorro de espacio, entre 15% a 25% de una subestación AIS equivalente, si se dispone de poco espacio en terrenos de terceros es recomendable continuar con las expansiones con esta alternativa. Asimismo, las subestaciones encapsuladas en gas SF6 (GIS), ofrecen mayor confiabilidad por tener una mejor respuesta sísmica, un mantenimiento reducido, al ser más compactas son más confiables debido a ocurrencia de fallas, inmunes contra condiciones climáticas extremas y agresivas (hielo, arena, polvo, viento).

Se sugiere que futuros investigadores puedan abordar el impacto medio ambiental y social de la implementación de subestaciones encapsuladas en gas SF6 en LATAM, esto permitiría conocer si las inversiones en estos servicios energéticos por el crecimiento de la demanda de energía se realizan de manera responsable y no entorpecen los esfuerzos orientados a alcanzar las metas de la ODS 7.

## REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, "Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.", diciembre 2022, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [2] Banco Mundial, "Energía. Panorama general", 2022, <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- [3] Banco Central de Reserva del Perú. "Estimaciones del balance oferta-demanda en el sector eléctrico 2021-2024", 2022, <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Reporte-Inflacion/2021/junio/ri-junio-2021-recuadro-1.pdf>
- [4] Banco Interamericano de Desarrollo, "Transición energética y desarrollo económico, ¿un desafío o una oportunidad para Brasil?, *Energía para el futuro*, 2019, <https://blogs.iadb.org/energia/es/transicion-energetica-y-desarrollo-economico-un-desafio-o-una-oportunidad-para-brasil/>

- [5] Repsol, “¿Qué es una subestación eléctrica? Transformación, transmisión y distribución de la electricidad”, enero 2023, <https://www.repsol.com/es/energia-innovacion/energia-futuro/transicion-energetica/subestacion-electrica/index.cshtml>
- [6] F. Molina, “Selección de un equipo de protección y seccionamiento en SF6 (GIS) para un transformador de potencia de 2.5MVA - 69/13.8KV.”, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil – Ecuador, 2017, <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7741>
- [7] R. Filipiak, B. Rodríguez, M. Wiebe. “Análisis técnico-económico para celdas aisladas en SF6 de 60KV (GIS)”, *Universidad de la República de Uruguay*, 2016, <https://hdl.handle.net/20.500.12008/20125>
- [8] F. Cruz, R. Osorio, y I. Paula, “Propuesta de diseño de una subestación aislada en gas sf6”, *Universidad de El Salvador*, 2017, <https://core.ac.uk/download/pdf/84351427.pdf>
- [9] S. Freire, “Análisis comparativo de costes de subestaciones eléctricas de muy alta tensión entre diferentes tecnologías: AIS, GIS, HIS y otras tecnologías de compactación y aprovechamiento del espacio.”, *Repositorio Comillas*, 2018, <http://hdl.handle.net/11531/22778>
- [10] A. Flores, “Reemplazo de Subestaciones Convencionales Aisladas en Aire por Tecnología Gis (SF6). Análisis Técnico – Económico”, *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*, 2010, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103759>
- [11] J. Carhuamaca, “Evaluación técnico-económica para seleccionar la implementación de una subestación 500 KV/220 KV entre tecnología tipo GIS y AIS”, *Repositorio Universidad Nacional de Ingeniería - Perú*, 2017, <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/13281>
- [12] E. Lima, “Diseño de la distribución de equipos y propuesta de implementación de la subestación encapsulada en gas (SF6), para la Central Hidroeléctrica San Miguel - Intihuatana - Urubamba – Cusco”, *Repositorio Universidad San Antonio Abad del Cusco – Perú*, 2017, <http://hdl.handle.net/20.500.12918/2247>
- [13] ABB, “Historia de ABB.”, agosto 2017, <https://new.abb.com/south-america/sobre-nosotros/quienes-somos/historia>
- [14] ABB, “Gas-insulated Switchgear ELK-04”, *Product Brochure*, 2009
- [15] Región Central, “Caracterización de las Subestaciones Eléctricas de Transmisión y Distribución que Hagan Parte del SIN, del STR o del SDL Dentro de la Región Central (Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Meta y Bogotá DC), Como Parte del Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional 064 de 2018”, *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2020, <http://hdl.handle.net/11349/23828>
- [16] R. Kumar, K. Bansal, D. Saini, y I. Paul, “Development of Empirical Formulas and Computer Program with MATLAB GUI for Designing of Grounding System in Two Layer Soil Resistivity Model for High Voltage Air Insulated and Gas Insulated Substations”, *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, doi: 9.10.17485/ijst/2016/v9i28/96515
- [17] A. Granero, “Subestaciones aisladas con gas SF6 (GIS) (Parte 1ª)”, *IMSE*, 2017
- [18] R. Hernández y C. Mendoza, “Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta”, *Mc Graw Hill Education*, 2018.
- [19] J. Trashorras, “Subestaciones eléctricas”. Ediciones Paraninfo SA., 2015
- [20] Herrera, L., & García, E. (2012). “Sistemas de información: principales costos de implementación”, *SSRN*, 2013, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2598988>
- [21] P. Comesañas, “Montaje e instalación de accesorios, elementos y equipos auxiliares”, *Editorial Ideas Propias*, 2005.