

Análisis de viabilidad estructural de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica en un relleno sanitario

Structural feasibility analysis of a photovoltaic solar energy generation system in a sanitary landfill

Brayan Gutiérrez Vega  David Cotes Prieto 

Alvaro Viviescas  Oscar Mendoza Rojas 

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Carlos Alberto Riveros Jerez 

Universidad de Antioquia, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 06/02/2023

Aceptado: 25/04/2023

Publicado: 24/05/2023

Correspondencia de autores:

carlos.riveros@udea.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Analizar la viabilidad estructural de configuraciones para soporte de paneles solares en rellenos sanitarios clausurados para un mejor aprovechamiento de estos espacios contribuyendo a aumentar la capacidad del país de generación de energía renovable en espacios donde la afectación de ecosistemas es baja o nula. **Metodología:** Con base en los parámetros de análisis identificados como relevantes, se ejecutó una revisión bibliográfica que permitió identificar seis tipologías estructurales y con base en modelado numérico realizar un análisis para los componentes de seguridad estructural, afectaciones por asentamientos diferenciales y costos. **Resultados:** Se analizaron las diferentes alternativas de estructuras de soporte con base en los parámetros planteados en la metodología. Adicionalmente en el análisis de cargas se logró identificar que la carga crítica de diseño corresponde a la carga de viento. Con base en un análisis comparativo se recomendó el uso de la normativa japonesa JIS C 8955 para el diseño de este tipo de estructuras de soporte. **Conclusiones:** Se identifica la opción de estructura de soporte con elementos de arriostamiento lateral, apoyos articulados y zapatas aisladas como la más recomendada para este tipo de implementaciones.

Palabras clave: relleno sanitario clausurado, estructura de soporte de paneles solares, carga de viento, cimentación superficial, asentamiento diferencial.

Abstract

Objective: To analyze the structural feasibility of solar panel support configurations in closed sanitary landfills for better use of these spaces, thus increasing the country's capacity to generate renewable energy in areas where the affectation of ecosystems is low or null. **Methodology:** Based on the analysis parameters identified as relevant, a bibliographic review was carried out to identify six structural typologies. Based on numerical modeling, an analysis was carried out for structural safety components, affectations due to differential settlements, and costs. **Results:** The different alternatives of support structures were analyzed based on the parameters proposed in the methodology. Additionally, in the load analysis, it was possible to identify that the critical design load corresponds to the wind load. Based on a comparative study, it is recommended to use the Japanese standard JIS C 8955 for this design type of support structure. **Conclusions:** The support structure option with lateral bracing elements, articulated supports, and isolated footings is identified as the most recommended for this type of implementation.

Keywords: closed sanitary landfill, solar panel support structure, wind load, shallow foundation, differential settlement.

Introducción

Los efectos del cambio climático se hacen cada vez más relevantes en el contexto mundial por las alteraciones que se están presentando en el comportamiento de la naturaleza y sus efectos devastadores en diferentes obras de infraestructura. Por lo tanto, se requieren de enfoques complementarios donde se disminuyan los diferentes agentes generadores del cambio climático y a la vez se aprovechen al máximo los recursos disponibles para aumentar de forma sostenible la producción energética. En este contexto, los potenciales usos de rellenos sanitarios clausurados han sido subestimados en el contexto nacional, donde es posible encontrar una clara tendencia a minimizar su uso después de su clausura, situación causada en parte por falta de visión de las agencias encargadas de su manejo. Sin embargo, este enfoque ha sido resaltado recientemente como inadecuado porque estos rellenos sanitarios clausurados requieren de planes de manejo en el largo plazo por el potencial riesgo ambiental que representan. Por tal motivo, la generación de electricidad con base en fuentes renovables, como la energía solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos, ha sido implementada con éxito en rellenos sanitarios clausurados [1]. En este sentido, entidades como la organización de naciones unidas han planteado ciertos objetivos mediante los que se busca garantizar el acceso a la electricidad de manera segura, sostenible y moderna para la población [2]. En Colombia se ha estimado que para los próximos años la capacidad instalada mediante proyectos de tecnologías con fuentes renovables no convencionales, tenga un crecimiento relevante según lo reportado por [3] en línea con experiencias de proyectos de ingeniería afines a nivel internacional [1, 4, 5, 6].

El manejo de residuos en las grandes ciudades colombianas se ha resuelto parcialmente con la adecuación de rellenos sanitarios ubicados en zonas cercanas a estas para su disposición final. Estos amplios terrenos tienen un gran potencial para la instalación de paneles fotovoltaicos dado que son terrenos de extensión considerable donde no existe afectación de actividades agrícolas ni ecosistemas aledaños, por tal motivo los rellenos sanitarios clausurados se presentan en el contexto nacional como un escenario favorable en donde no solo se aprovechan los suelos en desuso [1, 7], sino que también se obtienen ventajas y oportunidades en aspectos sociales, ambientales y hasta económicos [8, 9]. Sin embargo, la capacidad portante disponible en las capas más superficiales de rellenos sanitarios clausurados es comparativamente baja en comparación con suelos presentes en otras zonas de desarrollo urbano, por este motivo una de las mayores limitaciones en cuanto a la instalación de paneles fotovoltaicos en el contexto de la presente investigación radica en lograr una adecuada transferencia de cargas de todo el sistema mediante el uso de estructuras livianas para de esta forma minimizar los efectos de la baja capacidad portante de las capas superficiales de rellenos sanitarios clausurados. Sin importar la baja capacidad portante de estas capas, en el diseño de las estructuras de soporte para los sistemas fotovoltaicos se debe realizar una caracterización mecánica de suelos que garantice el correcto funcionamiento de una estructura de soporte desde el momento de su puesta en funcionamiento y durante su operación permitiendo que labores de mantenimiento y reparación puedan efectuarse de forma segura. Otro aspecto importante, es que los efectos del cambio climático han acentuado algunos fenómenos climáticos por lo que es de gran importancia analizar diferentes enfoques internacionales que permitan una mejor aproximación de los valores de cargas máximas a las cuales se van a ver sometidas estas estructuras durante su vida útil. Esto en parte se requiere porque los procesos de actualización normativa en contexto nacional son demorados en comparación con otros países.

En vista de la creciente necesidad de aprovechar los espacios disponibles por los rellenos sanitarios clausurados, en la literatura existente se recomiendan principalmente dos tipos de configuraciones estructurales en donde predomina el uso de instalaciones fijas [10], las cuales utilizan marcos estructurales para ensamblar los paneles solares en un ángulo de inclinación determinado y así, lograr la mejor posición con relación a la exposición solar [5, 11]. Por otra parte, se tienen las instalaciones de seguimiento, que se

diferencian porque la inclinación de los paneles solares cambia a lo largo del día conforme a la ubicación del sol [5]. En cualquier caso, las estructuras de soporte deben tener una altura apropiada que permita realizar actividades de mantenimiento sobre la superficie para disminuir los efectos negativos causados por la presencia de sombras o vegetación [4]. Adicionalmente, sin importar el sistema estructural seleccionado, es importante garantizar una adecuada transferencia de cargas entre las estructuras de soporte y la capa final del relleno sanitario, por tal motivo la elección del tipo de cimentación es un aspecto fundamental y aunque existen múltiples tipos de cimentaciones, que varían principalmente por su geometría y requisitos específicos de diseño, es importante resaltar que las actuales especificaciones técnicas de lleno de la capa final en un relleno sanitario no involucran un análisis de cargas para una futura instalación de infraestructura civil, por lo que cimentar sobre esta es un reto. Es importante también mencionar que las cimentaciones con pilotes se usan con frecuencia en proyectos fotovoltaicos convencionales, pero su implementación en suelos de rellenos sanitarios no se considera viable por lo que pueden afectar sus propiedades fisicoquímicas derivando en problemas ambientales [11]. Por esta razón, es más común el uso de zapatas aisladas de hormigón que pueden ser construidas en campo o prefabricadas, así como los sistemas lastrados, los cuales están compuestos por una bandeja plana o un bloque de hormigón [5].

El enfoque más adecuado corresponde a estructuras de soporte livianas donde se busca garantizar aspectos de seguridad estructural minimizando los efectos de cargas gravitacionales debido la baja capacidad portante de las capas más superficiales de rellenos sanitarios clausurados, como resultado se tiene una instalación liviana lo que también minimiza el efecto de la carga sísmica. Sin embargo, la carga de viento se convierte en un desafío llegando a ser la carga crítica de diseño ya que las ráfagas inducen presiones sobre la estructura, incrementando la tensión aplicada en los elementos de soporte [5] y, además al ser estructuras abiertas y ligeras se pueden presentar importantes efectos de levantamiento sobre la cimentación [12]. Adicionalmente, por la falta de uniformidad de las propiedades mecánicas de las capas superficiales del relleno sanitario se deben considerar los efectos asentamientos diferenciales como parte de las sollicitaciones que pueden afectar la estabilidad de estas estructuras de soporte [13, 14].

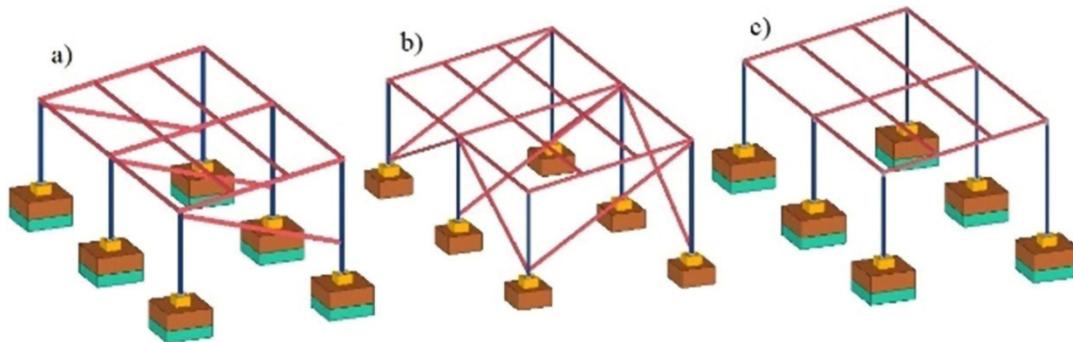
El relleno sanitario “el carrasco” se ubica en el barrio “el porvenir” de la ciudad de Bucaramanga, dentro de depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga en la cual 16 municipios disponen sus residuos depositando más de 350 toneladas anualmente. Sin embargo, en los últimos años distintos organismos han adelantado esfuerzos para su cierre definitivo, lo que finalmente dejaría 80 hectáreas de terreno con uso de suelo limitado. La zona de estudio corresponde a la celda 1, ubicada en la denominada cárcava 1, que fue utilizada para disponer residuos a partir de 1985 hasta 2011 pero debido a una emergencia sanitaria continuó recibiendo residuos hasta el año 2016 [15]. Es importante resaltar que el relleno sanitario “el carrasco” dispone actualmente de sectores clausurados que podrían aprovecharse para la construcción de parques solares [16]. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación es realizar un análisis de viabilidad estructural de la mejor alternativa de estructura de soporte para paneles solares en la celda 1 a partir de seis modelos numéricos, que varían según el tipo de apoyo y la geometría del marco y de sus cimentaciones. Para evaluar la estabilidad de las estructuras a ubicar en la cárcava 1 se realiza un análisis preliminar de la carga de viento como carga crítica de diseño utilizando recomendaciones internacionales, adicionalmente se incluye el impacto del suelo de cimentación sobre las estructuras de soporte mediante análisis comparativos de asentamientos diferenciales y costos de construcción.

Metodología

Análisis de alternativas para estructuras de soporte

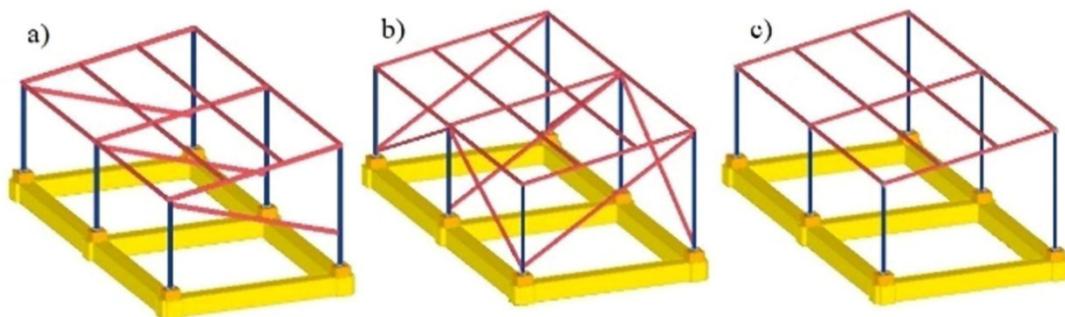
Teniendo en cuenta algunas configuraciones típicas en casos de estudio similares que recomiendan estructuras en acero para sistemas de soporte de paneles solares, se encontraron parámetros que las diferencian a nivel de arriostramientos laterales, tipo de conexión entre elementos estructurales y condiciones de apoyo [13, 17, 18]. Así, para los marcos de soporte a estudiar en el caso del relleno sanitario “el carrasco” se definieron tres configuraciones, donde la primera se idealizó arriostrada en una sola dirección con apoyos empotrados, la segunda arriostrada lateralmente en dos direcciones con apoyos articulados y la tercera con conexiones rígidas, sin arriostramiento lateral y con apoyos empotrados. Para seleccionar las dimensiones apropiadas de los elementos estructurales se tuvo en cuenta la referencia del panel solar seleccionado por el proyecto titulado “Estudio de prefactibilidad para la implementación de un parque solar fotovoltaico en la cárcava 1 del sitio de disposición final de residuos sólidos el Carrasco” que corresponde al modelo ZXP6-LD72 de la marca ZNSHINESOLAR [19]. La distribución seleccionada corresponde a dos filas de tres paneles para cada marco. Así mismo, se consideró la longitud en que se comercializan los perfiles de acero en Colombia para evitar desperdicios al momento de su fabricación y transporte. Por otra parte, se plantearon dos tipos de cimentaciones superficiales para cada configuración que corresponden a zapatas aisladas y vigas de cimentación, para un total de seis alternativas de estudio según se observa en las figuras 1 y 2. Los elementos estructurales corresponden a columnas, vigas, correas y riostras de sección transversal rectangular y cuadrada en tubería de acero estructural.

Figura 1. estructuras de soporte con zapatas aisladas a) alternativa 1: arriostrada empotrada, b) alternativa 2: arriostrada articulada, c) alternativa 3: empotrada.



Fuente: elaboración propia

Figura 2. estructuras de soporte con vigas de cimentación a) alternativa 4: arriostrada empotrada, b) alternativa 5: arriostrada articulada, c) alternativa 6: empotrada.



Fuente: elaboración propia

Para los miembros estructurales se escogieron perfiles tubulares estructurales (PTE) en acero A500 grado C con límite de fluencia (f_y) de 345 MPa y resistencia a la tracción (f_u) de 425 MPa, según las especificaciones del catálogo de la empresa steckerl aceros [20] ya que todos sus elementos son atiesados. Para las placas base el material seleccionado fue acero ASTM A36 según recomendación de la guía 1 del AISC con espesor mínimo de media pulgada [21]. De igual forma, las barras de anclaje roscadas se diseñaron utilizando acero F1554 Grado 105. Las conexiones soldadas tanto en obra como en taller se propusieron con electrodo E70XX con resistencia última (f_{nw}) de 482 MPa y límite de fluencia (f_y) de 390 MPa, ampliamente utilizado para conexiones entre perfiles PTE. Todas las perforaciones se consideraron agrandadas, para facilitar labores de obra y garantizar cierta holgura durante el montaje. Para la cimentación se asumió concreto estructural con resistencia a la compresión de 28 MPa, acero de refuerzo con barras corrugadas con límite de fluencia (f_y) equivalente a 420 MPa y los contrapesos en concreto pobre con resistencia a la compresión de 17.5 MPa.

Análisis de cargas

Para desarrollar correctamente el cálculo estructural de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica, es fundamental estudiar, analizar y comprender las diferentes acciones eventuales que afecten directamente la estabilidad estructural [22]. En este caso se tuvo en cuenta como principal solicitación la carga de viento, considerada como la solicitación crítica para estos diseños, así como las cargas de tipo gravitacional y sísmicas. En vista de la importancia de la carga de viento y teniendo como precedente que en Colombia los efectos del cambio climático han mostrado que los valores de diseño vigentes en los códigos requieren de revisión periódica, se consideraron además de las especificaciones proporcionadas por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, las recomendaciones del código ASCE 7-16 [23] que sirven de base para la elaboración del NSR-10 y recomendaciones del código JIS C 8955 [24]. Este último, corresponde a una guía específica que varias investigaciones han utilizado para el diseño de estructuras de soporte para conjuntos fotovoltaicos [14, 25, 26].

El análisis de cargas gravitacionales incluye cargas muertas y vivas. Dentro de los parámetros seleccionados para determinar la carga muerta, el principal corresponde al peso de los paneles solares que se recomendaron en el estudio adelantado por [19]. Se tiene entonces que el peso del panel solar ZXP6-LD72 corresponde a 247.60 N, con dimensiones de largo, ancho y espesor de 1980 mm, 990 mm y 3 mm, respectivamente. La carga viva utilizada en el diseño se determinó según lo establecido en la tabla B.4.2.1-2 del reglamento NSR-10, considerando que las configuraciones establecidas para las diferentes alternativas cuentan con una inclinación de 10° , valor seleccionado con el objetivo de aprovechar la mayor cantidad de radiación solar en la zona del relleno sanitario. Según las condiciones de esta pendiente, se clasificó como cubierta inclinada con pendiente de 15° o menos en estructura metálica y de esta forma se obtuvo un valor de 0.50 kN/m^2 .

El sismo de diseño para las alternativas de estructura de soporte se calculó teniendo en cuenta los requisitos establecidos en el reglamento NSR-10, los cuales dependen principalmente de la localización del proyecto. En este sentido, se tomaron los valores correspondientes a la ciudad de Bucaramanga donde, tanto el coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva como el coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva equivalen a 0.25. De acuerdo con el reglamento NSR-10 también se estableció la zona de amenaza sísmica alta. En cuanto a la definición del tipo de perfil de suelo, se clasificó como tipo E de acuerdo con las condiciones conocidas de la superficie de la cárcava 1 del relleno sanitario. Posteriormente, mediante interpolación se determinaron los valores de 1.45 y 3.00 correspondientes a los coeficientes de amplificación tanto en la zona de periodos cortos, como en la zona de periodos intermedios respectivamente. En la determinación del coeficiente de importancia primero se debe asignar el grupo de uso en función del tipo de estructura. En consecuencia, las diferentes alternativas de estructura de soporte propuestas clasificaron en el grupo de uso 1 y, por lo tanto, les correspondió un valor de 1.00 para dicho coeficiente.

Como se mencionó anteriormente, la carga de viento corresponde a la carga crítica en el diseño de estructuras livianas como es el caso de los marcos de soporte para paneles solares, ya que, al inducir presiones de succión, se pueden producir levantamientos en la cimentación generando problemas estructurales de inestabilidad. El reglamento NSR-10 es la normativa colombiana vigente para el diseño de edificaciones. Aunque dentro de su alcance no se encuentra explícitamente otros tipos de estructuras, sirve como base para poder comparar los resultados con otros procedimientos. Como este reglamento tiene al ASCE 7-05 como documento base, la metodología para el cálculo de fuerza de viento es similar. No obstante, se excluye el análisis del factor de elevación y tiene en cuenta un factor de importancia que depende del uso que se le dará a la estructura. Para el caso de ocupación normal, se definió $I=0.87$. De esta forma se obtuvo una carga de diseño (q_z), de 186.49 N/m^2 , calculada mediante la ecuación 1. Sin embargo, el Reglamento NSR-10 especifica que no se debe tomar una carga menor a 400 N/m^2 .

$$q_z = 0.613 \cdot k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot V^2 \cdot I = 186.49 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

La ASCE 7-16 es una norma creada por la sociedad estadounidense de ingenieros civiles en la cual se incluyen los apartados referentes al análisis de solicitaciones y acciones que afectan a las distintas estructuras [23]. En los capítulos 26 a 31 se especifican las consideraciones para tener en cuenta por la acción del viento mediante una serie de coeficientes y procedimientos específicos para cada caso de estudio. Como se trata de una normativa estadounidense su alcance se limita para otros países, por lo tanto, la velocidad básica del viento se obtuvo con las magnitudes presentadas en el título B del reglamento NSR-10 con un valor de 22 m/s para el relleno sanitario “el carrasco”. Esta velocidad correspondió a un 15% de probabilidad de excedencia para un periodo de retorno de 50 años. El factor de direccionalidad del viento (k_d) tiene en cuenta el tipo de estructura y el uso que se le dará. Dentro del conjunto de tipos de estructuras propuestos en la normativa, los paneles solares se acercaron a la tipología “arched roofs” con un valor equivalente a 0.85 . La categoría de exposición está basada en la rugosidad que se presenta en las dos direcciones principales de la estructura, su altura media y la distancia en la que prevalece esta rugosidad. Para este caso correspondió al grupo C que involucra estructuras ubicadas en un terreno abierto con obstrucciones dispersas en ambas direcciones. El factor topográfico (k_{zt}) considera las irregularidades del terreno y al no cumplir con las condiciones especificadas en la ASCE 7-16, se concluyó que equivale a 1.0 . El factor de elevación del terreno (k_z) tiene en cuenta un descenso de la densidad del aire a medida que aumenta la cota donde se ubica la estructura. La densidad del aire y la presión son directamente proporcionales según los factores propuestos en la norma. Este factor se tomó conservadoramente como 1.0 . El factor de efecto de ráfagas considera los aumentos súbitos en la velocidad del viento por periodos cortos de tiempo. Estas inducen diferentes comportamientos dependiendo de la flexibilidad de la estructura y en este caso se tomó un valor de 0.85 . El coeficiente de presión interna representa la oposición que se ejerce al flujo de viento dentro de la estructura y las clasifica según el cerramiento que tienen configurado. Para la geometría planteada correspondió a una estructura abierta, la cual presenta únicamente presiones externas.

Para el cálculo de las fuerzas distribuidas en la estructura, se tienen en cuenta factores como el coeficiente de presión de exposición y el coeficiente de presión externa. El primero se refiere al cambio en las presiones ejercidas sobre la pared a barlovento de la estructura, a medida que aumenta la altura libre desde el nivel del terreno. El coeficiente de presión externa (c_p) contempla las formas de configuración geométrica de una estructura y los efectos de las presiones externas que llegan a sus elementos. Definidos estos factores, se establecieron las presiones por velocidad (q_z) en los elementos de la estructura y de esta manera, se calcularon las fuerzas distribuidas en la estructura. Con base en la ecuación 2 se obtuvo un valor de 214.36 N/m^2 . Sin embargo, la norma establece también una carga mínima de diseño correspondiente a 400 N/m^2 .

$$q_z = 0.613 \cdot k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot k_e \cdot V^2 = 214.36 \frac{N}{m^2} \quad (2)$$

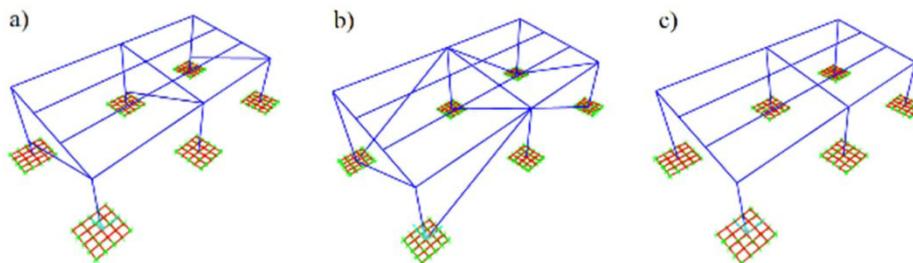
La guía en diseño de estructuras para sistemas fotovoltaicos (JIS C 8955) [24, 27] es un documento japonés en el cual se describen las especificaciones de cargas, conexiones, materiales, protecciones y demás consideraciones referentes al diseño de elementos pertenecientes a sistemas de soporte para paneles solares. Para el cálculo de las presiones de viento, se parte de una velocidad de referencia que se modifica con ciertos coeficientes tabulados según las condiciones de la estructura. De nuevo, al tratarse de una normativa internacional su alcance se limita para Colombia, por lo tanto, la velocidad de referencia (V_o) se estimó mediante el procedimiento establecido en el reglamento NSR-10 con una magnitud de 22 m/s y los coeficientes se establecieron con parámetros análogos a los definidos por la guía. El coeficiente ambiental depende de la rugosidad del terreno, ráfagas, altura promedio y distribución de obstáculos alrededor de la estructura. Para este caso $E=1.19$. Para el coeficiente de aplicación se consideró un sistema normal de generación de energía fotovoltaica, por lo que corresponde a un valor de $I=1.0$. Por otro lado, el coeficiente de presión de viento tiene en cuenta la sección transversal y dirección del viento para calcularse, para un PTE rectangular $C_w=2.0$. Finalmente, la presión inducida por el viento (q_z), se calculó mediante la ecuación 3. Teniendo en cuenta que esta guía no plantea una carga mínima de diseño con la cual realizar una comparación con el resultado obtenido, se conserva el valor de 693.70 N/m².

$$q_z = C_w \cdot 0.6 \cdot V_o^2 \cdot E \cdot I = 693.70 \frac{N}{m^2} \quad (3)$$

Modelado estructural

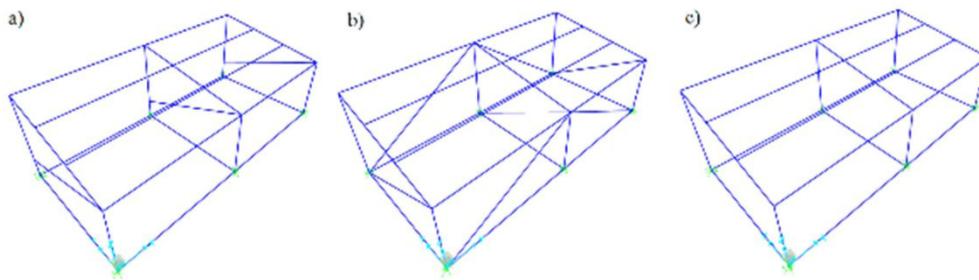
El modelado de las 6 alternativas propuestas se llevó a cabo mediante el uso del software SAP2000. Para el análisis del efecto sísmico se seleccionó el método de fuerza horizontal equivalente (FHE), para el cual se tiene un coeficiente de capacidad de disipación de energía básico para estructuras de péndulo invertido equivalente a $R=2.5$. El valor de este coeficiente se asumió de manera conservadora, aunque el sistema en algunos casos se pudiese considerar arriostrado. Finalmente, se establecieron las combinaciones de carga para el análisis estructural de los modelos correspondientes a las características de cada alternativa. Las zapatas se simularon con un elemento finito tipo placa gruesa y las vigas de cimentación con elementos tipo barra en concreto. En cada caso se tuvieron en cuenta las dimensiones resultantes del análisis de cargas. Los esquemas con zapatas y vigas de cimentación se presentan en las Figuras 3 y 4 respectivamente.

Figura 3. modelos estructurales con zapatas a) alternativa 4: arriostrada empotrada, b) alternativa 5: arriostrada Articulada, c) alternativa 6: empotrada.



Fuente: elaboración propia

Figura 4. Modelos estructurales con vigas de cimentación a) alternativa 4: arriostrada empotrada, b) alternativa 5: arriostrada articulada, c) alternativa 6: empotrada.



Fuente: elaboración propia

En el proceso de análisis estructural de la cimentación, tanto para las zapatas como para las vigas, se asignaron condiciones de apoyo mediante a resortes de área para simular las propiedades del suelo del relleno sanitario “el carrasco”. Debido a la falta de valores específicos del módulo de reacción (K_s) de este suelo, su estimación se aproximó con valores de asentamientos máximos (δ_{max}) y mínimos (δ_{min}), así como las cargas utilizadas en el estudio *Caracterización geotécnica de la cárcava I, antigua celda I del sitio de disposición final de residuos sólidos “El Carrasco”* [28]. El procedimiento que permitió la aproximación del valor máximo y mínimo de este parámetro se realizó mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$K_{s \min} = \frac{\left(\frac{P}{A}\right)}{\delta_{max}} = 55172.40 \frac{kN}{m^2} / m \quad (4)$$

$$K_{s \max} = \frac{\left(\frac{P}{A}\right)}{\delta_{min}} = 500000.00 \frac{kN}{m^2} / m \quad (5)$$

Los datos suministrados del estudio preliminar corresponden a una carga estimada (P) en 0.20 kN, equivalente al peso de los paneles solares utilizados, el área (A) de una zapata de dimensiones 0.5x0.5 m² y los asentamientos establecidos. En el software, se configuró la información del módulo de reacción calculado y de esta manera se determinaron los desplazamientos máximos de cada alternativa asociados a las diferentes solicitaciones a las que estarían sometidas las estructuras de soporte para paneles solares. El diseño de la cimentación para cada alternativa de estructura de soporte incluyó el análisis con zapatas aisladas y vigas de cimentación en concreto reforzado. Teniendo en cuenta las condiciones del suelo de soporte en el relleno sanitario “El Carrasco”, se estableció la capacidad admisible con un valor de 34.65 kN/m², peso específico 17.20 kN/m³ y una profundidad máxima de cimentación de 0.80 m. En cada caso se consideró la capacidad neta del suelo que se estimó de acuerdo con la ecuación 6.

$$\sigma_{neto} = \sigma_{adm} - (h_t \cdot \gamma_s) = 20.89 \frac{kN}{m^2} \quad (6)$$

Donde σ_{adm} es la capacidad admisible del suelo de cimentación, h_t es la profundidad de cimentación y γ_s es el peso específico del suelo de cimentación. Con base en las cargas verticales máximas resultantes del modelamiento estructural, se aproximó el área en planta de las zapatas aisladas como la relación entre estas cargas y la capacidad neta del suelo. Además, se realizaron los chequeos de los estados límite en donde se incluyó la comprobación del punzonamiento del concreto con respecto a la altura de las zapatas aisladas.

Resultados y discusión

Diseño estructural

Los resultados obtenidos de los diseños estructurales en cuanto a los perfiles en acero se resumen en la tabla 1. De acuerdo con los elementos estructurales obtenidos para cada caso, se apreció que tanto las alternativas de las estructuras de soporte modeladas con apoyos articulados y arriostramiento lateral, así como la estructuras con apoyos empotrados, cuentan con los mismos perfiles en acero principalmente con secciones transversales cuadradas y rectangulares. Adicionalmente, se buscó que, con la geometría de las estructuras de soporte sea aprovechada la longitud comercial de los perfiles y se evite en lo posible el desperdicio durante el proceso constructivo utilizando longitudes que permitan utilizar la totalidad de la longitud comercial de los perfiles. En cuanto al diseño de la soldadura se calculó la carga última que resiste el cordón utilizado en las conexiones entre los perfiles tubulares estructurales (PTE). Los resultados de la tabla 2 para la soldadura empleada en las conexiones entre elementos estructurales se obtuvieron utilizando su longitud efectiva, una garganta de 2.12 mm y un cordón mínimo de 3.00 mm, sugerido por el reglamento NSR-10.

Tabla 1. elementos estructurales seleccionados para cada alternativa.

	Elemento	L (m)	Perfil
Articulado con riostras	Columnas	10.50	PTE 50x50x2.5
	Vigas	21.12	PTE 90x50x2.0
	Correas	12.00	PTE 60x40x2.0
	Riostras	37.90	PTE 40x40x1.5
	Placa base	-	PL 125x90x1/2"
Empotrado	Columnas	10.50	PTE 50x50x2.5
	Vigas	21.12	PTE 90x50x2.0
	Correas	12.00	PTE 60x40x2.0
	Placa base	-	PL 125x90x1/2"
Empotrado con riostras	Columnas	10.50	PTE 76x38x2.5
	Vigas	21.20	PTE 76x38x2.5
	Correas	12.00	PTE 76x38x2.5
	Riostras	9.49	PTE 76x38x2.5
	Placa base	-	PL 160x80x1/2"

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. especificaciones de la soldadura diseñada.

Dimensiones (PTE)	Longitud efectiva (mm)	Resistencia (MPa)
76x38x2.5 mm	210	161
40x40x1.5 mm	157	120

Fuente: elaboración propia

Según el análisis de cargas se tiene que las dimensiones de las zapatas aisladas para las alternativas 1 y 3 corresponden a un área de 800 mm x 800 mm y una altura de 300 mm. En el caso de la alternativa 2 se tiene un área de 600 mm x 600 mm y una altura de 300 mm. Sin embargo, el análisis de la carga de viento indica que se requieren de contrapesos para contrarrestar los efectos de levantamiento. Un aspecto importante por resaltar de los efectos del análisis realizado para la carga de viento es la necesidad de adicionar peso en la cimentación en las alternativas 1 y 3 aumentando en un valor de 200 mm la altura, de tal forma que se tiene una altura final de zapata para las alternativas 1 y 3 de 500 mm. Finalmente, el refuerzo para estos elementos se definió como una parrilla de varillas de acero corrugado No. 3 espaciadas 150 mm en ambas direcciones. En el caso de las alternativas 4, 5 y 6, en análisis de cargas da como resultado un elemento de concreto reforzado con una base de 250 mm y una altura de 300 mm, el refuerzo para este elemento corresponde a 2 varillas de refuerzo corrugado No. 3 en la parte superior de la viga y 3 varillas de refuerzo corrugado No. 3 en la parte inferior con estribos de varillas corrugadas No. 3 espaciados cada 50 mm en zona confinada y 100 mm en zona no confinada.

Análisis de deflexiones máximas

Para evitar daño en los paneles solares es necesario controlar las deflexiones en las vigas y correas para condiciones de cargas gravitacional de servicio. Debido a esto, se calcularon las deflexiones máximas de cada una de las alternativas propuestas. Cabe resaltar que el tipo de cimentación sobre la deflexión de los perfiles de acero horizontales resultó mínimo. La deflexión para las alternativas resultó máxima y fue de 1 y 4 fue de 13.79 mm. En el caso de las alternativas 2, 3, 5 y 6 se la deflexión fue de 9.41 mm. Finalmente, se aclara que en todos los casos se garantiza un adecuado control de deflexión pues las deflexiones calculadas están por debajo del margen admisible considerado de 15 mm.

Análisis de asentamientos diferenciales

Es importante resaltar la importancia de realizar un análisis de asentamientos diferenciales para cada una de las alternativas presentadas en la presente investigación. Esto debido a la incertidumbre y a la poca uniformidad que se tiene en las capas de un relleno sanitario clausurado, en especial en el contexto nacional, donde por lo general, no se tienen proyecciones de construcción de infraestructura una vez son clausurados los rellenos sanitarios. La principal motivación radica en verificar si efectivamente los asentamientos diferenciales juegan un papel importante dado que en el proceso de análisis de cargas se encontró que la carga dominante corresponde a la carga de viento. Si bien las alternativas propuestas en esta investigación son estructuras livianas, se debe determinar si las condiciones máximas para este efecto son o no relevantes en la selección de la alternativa estructural más favorable. Es posible prever, sin ningún tipo de análisis, que la opción de cimentación con vigas controla mejor los asentamientos diferenciales porque las vigas de cimentación generan un diafragma a nivel de cimentación que limita la capacidad de la estructura para generar concentración de esfuerzos en los elementos que se conectan al elemento vertical donde se presente un asentamiento diferencial [29]. Por tal motivo, se determinan los asentamientos diferenciales máximos para las alternativas 1, 2 y 3, los cuales son obtenidos con el menor módulo de reacción calculado en esta investigación. Los resultados muestran que la alternativa 2 presenta el mayor valor de asentamiento diferencial con un valor de 0.069 mm, seguida de las alternativas 3 y 1 con valores de 0.059 mm y 0.058 mm, respectivamente. Con el objetivo de realizar un análisis comparativo con las alternativas 4, 5 y 6 se encuentra que para estas alternativas el asentamiento diferencial máximo es 6.9 veces menor por lo que se valida que efectivamente las vigas de cimentación minimizan en gran forma este fenómeno. Con base en lo anteriormente expuesto, es posible concluir que la consideración de ocurrencia de asentamientos diferenciales no corresponde a la condición crítica de selección de la alternativa estructural.

Análisis de costos

Los costos de las alternativas estructurales presentadas en esta investigación se realizaron teniendo en cuenta una cotización comercial con vigencia 2022 en una empresa local reconocida de la ciudad de Bucaramanga. Las cotizaciones incluyeron el costo de materiales y mano de obra como parte del proceso constructivo para una unidad de estructura de soporte para paneles solares. Los marcos de las vigas se propusieron fabricados en taller para llevarlos armados a obra y conectarlos por medio de las correas. En este proceso se presentaron los planos de ingeniería de detalle desarrollados para cada alternativa junto con las cantidades de los materiales especificados. Como parte de la comparación de costos entre las estructuras de soporte, se tomó el valor de la alternativa más económica entre las 6 opciones planteadas, el cual funcionó como punto de referencia para realizar un análisis en cuanto al aumento en porcentaje que representa el costo de las demás alternativas. Los resultados en pesos colombianos (COP) se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. especificaciones de la soldadura diseñada.

Alternativa	Costo total en COP	Aumento en el costo [%]
1	\$ 6.021.416	30.0
2	\$ 4.630.890	-
3	\$ 4.973.614	7.4
4	\$ 6.122.809	32.2
5	\$ 5.745.029	24.1
6	\$ 5.055.769	9.2

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Dado que la carga de viento representa la solicitud de diseño más crítica para las estructuras de soporte para paneles solares, se analizó y evaluó implementando tres normativas diferentes. De esta manera, con los criterios y requisitos establecidos tanto en el reglamento NSR-10, como en las normas internacionales ASCE 7-16 y JIS C 8955 se estimó el valor de esta carga para cada caso. Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos y así, se seleccionó el mayor valor que correspondió al calculado mediante el procedimiento de la norma japonesa JIS C 8955. En este sentido, se considera que debido a que esta guía japonesa se enfoca específicamente en el diseño de las estructuras de soporte para paneles solares, el resultado de la carga de viento representa mejor el escenario más desfavorable para la estructura de soporte. Por otro lado, una de las mayores preocupaciones en la posibilidad de construcción de infraestructura en rellenos sanitarios clausurados radica en la poca fiabilidad que se tiene con respecto a la capacidad de las capas más superficiales para soportar carga proveniente de nueva infraestructura y que por la falta de control en la colocación de las capas finales se tengan asentamientos diferenciales.

En la presente investigación fue posible evidenciar que este fenómeno no corresponde a una condición crítica y por tal motivo no se justifica la selección de vigas de cimentación con el objeto de controlar posibles afectaciones estructurales por asentamientos diferenciales. Finalmente, el análisis de los costos de construcción de las configuraciones propuestas en esta investigación muestra que la alternativa 2 con apoyos articulados y arriostramiento lateral, es la más favorable. Por lo tanto, se recomienda su

implementación en futuras fases del macroproyecto para el sistema de generación de energía solar fotovoltaica en el relleno sanitario “el carrasco” del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga.

Recomendaciones

Como paso siguiente de la investigación se recomienda realizar futuras investigaciones que permitan determinar la variación que se puede obtener en los cálculos de capacidad portante y el módulo de reacción del suelo, esto es importante porque permitirá realizar análisis más precisos de asentamientos diferenciales y sus efectos en estructuras de soporte de paneles solares. Adicionalmente, permitirá tener soportes técnicos que ayuden a la elaboración de especificaciones de lleno de las capas más superficiales en rellenos sanitarios en el ámbito nacional para que estos sean mejor aprovechados con nueva infraestructura. Otro aspecto importante a resaltar tiene que ver con los costos de mantenimiento de estas estructuras de soporte por posibles deterioros prematuros de los elementos estructurales al entrar en contacto con sustancias liberadas por estos rellenos sanitarios clausurados, para lograr este objetivo, es importante clasificar e identificar los componentes que son agresivos con esta tipología de estructura y los efectos que se pueden tener en la mejora de las labores de mantenimiento con sus costos asociados.

Referencias Bibliográficas

1. Szabó, S., Bódis, K., Kougias, I., Moner-Girona, M., Jäger-Waldau, A., Barton, G., & Szabó, L. A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 76, pp 1291-1300, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.117>.
2. Energía. Desarrollo sostenible, “Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna,” [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
3. UPME, “Plan de Expansión de Referencia Generación - Transmisión 2015 - 2029,” Ministerio de minas y energía, 2016.
4. D. D. López Juvinao, L. M. . Torres Ustate, y F. O. Moya Camacho, "Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 2, pp. 20–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.3857>.
5. G. Sampson, "Solar Power Installations on Closed Landfills: Technical and Regulatory Considerations," U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
6. T. P. Murray, D. L. Patrick, and R. K. Sullivan Jr, "The Guide To Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills," Department of Energy Resources.
7. Szabó et al., "A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. January, pp. 1291–1300, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.117.
8. A. Nochian, O. M. Tahir, S. Maulan, and A. R. Mikaeili, "A review of systematic approach for sustainable redevelopment of a closed landfill site," *J. Teknol.*, vol. 78, no. 5, pp. 299–307, 2016, doi: 10.11113/jt.v78.8318.
9. R. Ciriminna, L. Albanese, M. Pecoraino, F. Meneguzzo, and M. Pagliaro, "Solar Landfills: Economic, Environmental, and Social Benefits," *Energy Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 597–604, 2018, doi: 10.1002/ente.201700620.
10. A. A. Mccready, "Permitting Solar Power Facilities On Closed Landfills," SCS Engineers, 2015.

11. US EPA and NREL, "Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills," 2013, [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-03/documents/best_practices_siting_solar_photovoltaic_final.pdf.
12. A. Agarwal, H. Irtaza, and M. A. Khan, "Experimental Study of Pulling-Out Capacity of Foundation for Solar Array Mounting Frames," *Indian Geotech. J.*, vol. 51, no. 2, pp. 414–420, 2021. DOI: 10.1007/s40098-020-00456-w.
13. A. Mihailidis, K. Panagiotidis, and K. Agouridas, "Analysis of solar panel support structures," 3rd ANSA & META International Conference, 2009, [En línea]. Disponible en: <https://www.beta-cae.com/events/c3pdf/312-2-agouridas.pdf>.
14. X. Wang et al., "Research and Design of Fixed Photovoltaic Support Structure Based on SAP2000," MATEC Web of Conferences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201816603002.
15. Vanguardia, "Se iniciará el cierre de El Carrasco, pero seguirán llevando basuras," 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/se-iniciara-el-cierre-de-el-carrasco-pero-seguiran-llevando-basuras-FF403043>.
16. "¿Qué hacemos con el cierre del Carrasco?," Geotecnología S.A.S, 2021, [Video en línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=WbRk_LZvMc&ab_channel=Geotecnolog%C3%ADaS.A.S.
17. C. Avci - Karatas, "Design and Analysis of Steel Support Structures Used in Photovoltaic (PV) Solar Panels (SPs): A Case Study in Turkey," Department of Transportation Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, 2020.
18. A. M. Preciado Garcés, "Diseño y cálculo de estructura soporte para paneles solares," Trabajo de investigación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2017.
19. ZNSHINE SOLAR, "Znshinesolar 5BB Light-Weight Double Glass Polycrystalline PV Module," 2022, [En línea]. Disponible en: https://znshinesolar.com/wp-content/uploads/2021/02/ZXP6-LD72-156.75_1978%C3%9799230%C3%9720_325-350W_350mm_20201230_E_compressed.pdf.
20. STECKERL ACEROS, "Tubería de acero estructural," 2022, [En línea]. Disponible en: https://steckerlacers.com/wp-content/uploads/2021/03/SteckerlAceros_datos_tuberia_re_cu_rec.pdf.
21. J. M. Fisher, L. A. Kloiber, "Base Plate and Anchor Rod Design," American Institute of Steel Construction (AISC), pp. 1-64, 2006.
22. E-CONSTRUIR (s.f), "Las cargas estructurales," [En línea]. Disponible en: <http://e-construir.com/estructuras/cargas.html>.
23. A. S. of C. E. ASCE, ASCE STANDARD ASCE/SEI 7-16, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," 2016.
24. Japanese Standards Association, "JIS C 8955 (JEMA) Design Guide on Structures for Photovoltaic Array," Japanese Industrial Standards Committee, 2012.
25. J. Cao, A. Yoshida, P. K. Saha, and Y. Tamura, "Wind loading characteristics of solar arrays mounted on flat roofs," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 123, pp. 214–225, 2013. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.08.014.
26. J. Wang, Q. Yang, and Y. Hui, "Comparisons of design wind pressures on roof-mounted solar arrays between wind tunnel tests and codes and standards," *Advances in Structural Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 653–666, Mar. 2021. DOI: 10.1177/1369433220965274.
27. C. Thurston, Renewable Energy World, "Ensuring Your Solar Array Doesn't Get Caught in the Wind," 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/ensuring-your-solar-array-doesn-t-get-caught-in-the-wind/#gref>.

28. B. B. J. Guerra Pabón, "Caracterización geotécnica de la carcava I, antigua celda I del sitio de disposición final de residuos sólidos "El Carrasco"," Tesis privada, Universidad Industrial de Santander, 2020.
29. V. Pane, D. Bellavita, G. Castori, A. Vecchietti, and M. Cecconi, "On the interaction between spread foundations and tie-beams under eccentric loading", *Engineering Structures*, vol. 204, 2 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109907.