

SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO Y SOLAR FOTOVOLTAICO EN MENDOZA, ARGENTINA

Andrés O. Benito^{1,2}, Nicolás Villanueva², Cristian Morillas², Alejandro Burlot², Alejandro P. Arena¹, Juan Carlos Luna³

¹Empresa Mendocina de Energía S.A.P.E.M. – Gerencia de Energías Renovables, Patricias Mendocinas 1285 – Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-5244693. E-mail: abenito@emesa.com.ar

²Grupo CLIOPE, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza. J. Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-5244693. E-mail: andresbenito@frm.utn.edu.ar

³Tecnología y Servicios Ambientales S.A. – Gerencia General de Mendoza, Necochea 183 – 1º Piso, Provincia de Mendoza, Argentina, C.P. 5500. Tel. +54-261-4251027.

RESUMEN: La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por el biogás de rellenos sanitarios causa graves problemas ambientales y sociales. La captación y uso eficiente del biogás puede reducir su impacto ambiental. En el área metropolitana de Mendoza, se generan alrededor de 1.300 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales el 65% van al relleno sanitario El Borbollón. Este estudio presenta los resultados de la implementación del primer sistema híbrido de generación de energía eléctrica a partir de biogás y energía solar en relleno sanitario. Esta solución alternativa permite una gestión responsable de los RSU y diversifica la matriz energética regional. Se analizan la producción de biogás, su captación, conducción, tratamiento y acondicionamiento para su combustión, así como aspectos de ingeniería eléctrica en el marco del conjunto tecnológico funcionando en régimen de generación distribuida conectado a la red. Los resultados muestran que con una generación anual media de 6.387 MWh/año y una reducción de emisiones de GEI de entre el 44,1% y el 70,5%, el uso de biogás de RSU en pequeñas ciudades también puede ser llevado a cabo en el marco de generación distribuida como estrategia de mitigación del cambio climático.

Palabras clave: biogás de relleno sanitario; fotovoltaico; generación distribuida; cambio climático.

INTRODUCCIÓN

En la República Argentina, la tasa de generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por habitante es de 1,15 kg/día y la fracción orgánica constituye entre el 40% y el 50% del total (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Sin embargo, los residuos orgánicos generados en mayor cantidad son los que menos se gestionan (ONU Medio Ambiente, 2018). Esto conduce a la existencia de problemas de diversa naturaleza, como la producción de gases de efecto invernadero (GEI) y lixiviados, la contaminación de cuerpos de agua, la proliferación de vectores de enfermedades humanas, y la pérdida del potencial energético contenido en los RSU. Por tanto, con el propósito de contribuir a resolver el problema de la gestión eficiente de los RSU generados en el Gran Mendoza (constituido por los departamentos de Ciudad de Mendoza, Godoy Cruz, Guaymallén, Maipú, Las Heras y Luján de Cuyo), la Empresa Mendocina de Energía S.A.P.E.M. (EMESA) y la empresa Tecnología y Servicios Ambientales S.A. (TySA) desarrollaron y construyeron el *Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico (SHGE)* sobre el que a continuación se describirán los trabajos realizados y resultados obtenidos.

En términos energéticos, el proyecto reporta la triple ventaja de disminuir el consumo energético en la gestión de RSU en Mendoza; obtener un producto principal de alto valor agregado con beneficios ambientales, económicos y desarrollo social, como lo es la energía eléctrica distribuida de origen renovable; y contribuir a la seguridad energética de la población de la provincia Mendoza, así como la diversificación de su matriz energética, contrastando con la situación actual, donde la electricidad generada en la provincia es mayoritariamente basada en fuentes fósiles, con 1.509 MW de potencia instalada y 4.521.394 MWh de generación eléctrica para el 2022, de los cuales el 69,52% correspondió a procesos que utilizan combustibles fósiles, el 29,89% a procesos hidráulicos y el 0,59% a renovable con tecnología solar fotovoltaica (FV); todo el proceso de generación implicó un consumo (medido en TeP - Toneladas equivalentes de Petróleo) de 542.677 TeP de gas natural y 4.065 TeP de fuel oil (CAMMESA, 2023).

En términos socio-ambientales se buscó ampliar la conciencia social sobre la problemática del vertido de RSU a cielo abierto, en contraposición a los beneficios y oportunidades que conlleva una gestión más eficiente y responsable en la disposición de estos, con el incentivo ambiental y económico que provoca la generación eléctrica renovable, mediante la captura de GEI, principalmente metano, reduciendo el impacto ambiental en el tratamiento y transformación de los RSU, los que en Mendoza se generan en promedio en 1.800 toneladas por día, de las cuales 1.300 corresponden al área metropolitana o Gran Mendoza, de los cuales el 65% se vierten en el relleno sanitario El Borbollón (Secretaría de Ambiente, 2018). Los volúmenes de generación mencionados se condicen con la tasa de generación de 1,15 kg/hab/día (kilogramos por habitante por día) promedio nacional (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2005). En base a lo antedicho, se resalta que este proyecto impulsa a cumplir con los objetivos 7, 8, 9, 11 y 13 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (United Nations, 2020).

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es presentar los resultados de la ejecución y puesta en servicio del caso de estudio SHGE, a partir de la valoración y aprovechamiento de los RSU del relleno sanitario El Borbollón, en la provincia de Mendoza, Argentina, como una solución alternativa para la gestión responsable de los RSU. A su vez, los objetivos particulares del trabajo se ajustan a sentar precedente sobre la hibridación de tecnologías de generación de energías renovables en un contexto de complejidad técnica, política, ambiental y social, sirviendo de modelo de un caso de éxito pionero en la región, contribuyendo con estrategias y soluciones en diversos aspectos tales como: la producción de biogás de RSU (con su modelo predictivo de producción potencial), el sistema de captación y conducción de biogás, el tratamiento y acondicionamiento de este para su posterior combustión y generación de energía eléctrica. Finalmente, se resalta que la metodología utilizada para este trabajo, en torno al proyecto de referencia, presenta una contribución a la ciencia aplicada en desarrollos a escala piloto a nivel regional, que apelan a la transferencia tecnológica y de conocimiento a la sociedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

A grandes rasgos, los vertederos de RSU se pueden clasificar en tres tipos: vertederos a cielo abierto, vertederos semi-controlados y rellenos sanitarios (Narayana, 2009). Los vertederos a cielo abierto son áreas donde los RSU se arrojan sin control, en un entorno abierto en contacto directo con el aire. Los vertederos semi-controlados son vertederos gestionados, en los que los residuos se descargan en celdas donde se trituran, nivelan y cubren con tierra. Aunque estos vertederos generan menos olores que los a cielo abierto debido a la cubierta de tierra vegetal, no están diseñados para capturar las emisiones de gases, ni la descarga de lixiviados (Narayana, 2009). Contrariamente, el relleno sanitario del presente caso de estudio (El Borbollón), es una versión mejorada de los vertederos semi-controlados, permitiendo la clasificación, segregación, reducción de tamaño y densificación de los RSU in situ. Además, cuenta con instalaciones diseñadas para capturar el biogás generado por la digestión anaeróbica natural de la descomposición de la Fracción Orgánica de los RSU (FORSU).

La producción de biogás de RSU o gas de vertedero (*Landfill gas*) se debe a condiciones térmicas, químicas y biológicas, que dan lugar al mecanismo de formación de este tipo de gas, a través de diversas reacciones como la hidrólisis, fermentación, oxidación anaeróbica, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Entre las diversas y prolíferas comunidades bacterianas implicadas en la digestión

anaeróbica de la FORSU en un vertedero (Demirel y Scherer, 2008), son principalmente las bacterias metanogénicas las encargadas de la formación de biogás, ya que este puede contener aproximadamente un 40% de metano (CH₄) y un 45% de dióxido de carbono (CO₂) (Ehrig et al., 2011), seguidos de trazas de monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N₂), compuestos orgánicos volátiles, benceno, tolueno, xileno, tetracloruro de carbono, hidrocarburos, compuestos órgano-azufrados (Narayana 2009) y compuestos orgánicos no metánicos (NMOC –Nonmethane Organic Compounds) (Norouzi et al., 2022; Calbry-Muzyka et al., 2022).

Modelo predictivo para la producción potencial de metano de relleno sanitario

El presente estudio emplea el modelo predictivo desarrollado por la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), denominado LandGEM (*Landfill Gas Emission Model*) (US EPA, 2005). Este modelo utiliza una ecuación de descomposición cinética de primer orden (Ec. 1), la que asume que la generación de metano es función de la cantidad de RSU vertidos y que el metano generado en un año determinado es el resultado de los RSU vertidos en el año bajo análisis más la generación de metano acumulada por los RSU vertidos en años anteriores con referencia al año bajo análisis (Panesso et al., 2011).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

donde, Q_{CH_4} es la generación anual de metano en (m³_{CH₄}/año); M_i es la cantidad promedio de residuos dispuestos en el relleno sanitario en el año i medida en (t/año); k es la constante del índice de generación de metano medida en (año⁻¹), que depende de las precipitaciones de la locación; L_0 es el potencial de generación de metano (m³_{CH₄}/t); i es el incremento temporal del año; j es un incremento temporal de 0,1 años; y t_{ij} es la edad de la j^a sección de residuos aceptada en el año i . A su vez, el modelo LandGEM contempla de forma intrínseca el factor f_{CH_4} , siendo la fracción de metano contenido en el biogás (%) (dicha fracción para nuestro caso de estudio se observa en la sección de resultados en la Tabla 1). Se consideró a su vez dentro del modelo, que el cierre del relleno sanitario será en el año 2040, momento en el cual la provincia de Mendoza alcanza una población proyectada de 2.328.963 habitantes, de los cuales 1.435.434 habitantes corresponderán al área del Gran Mendoza (DEIE, 2019). Para nuestro caso de estudio el factor k toma el valor 0,02 año⁻¹ y L_0 toma el valor 60 m³/t (García, 2003; US EPA, 2005), en consideración de la locación del relleno sanitario El Borbollón, donde las precipitaciones acumuladas promedio anual se mantienen en valores cercanos al promedio de los últimos 10 años (244,2 mm) (Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, 2018).

Sistema de captación, conducción, tratamiento y acondicionamiento de biogás de residuos sólidos urbanos para su combustión

Lo descripto a continuación se aprecia de forma infográfica en la Figura 1, dando lugar a las principales características del SHGE.

Así, a favor de realizar una adecuada captura del biogás generado, se diseñó un sistema de captación para tal fin, conformado por una serie de colectores verticales que van desde la base de cada celda hasta su coronación, conformados por estructuras circulares metálicas de gran diámetro que están en contacto directo con los residuos y tuberías plásticas concéntricas (una perforada interior y una camisa exterior) que permiten que el biogás fluya confinado desde la base de la celda hacia la superficie, llegando a diversos cabezales con válvula de corte y una antirretorno, que se conectan a una red de tuberías sobre la superficie que permiten conducir el biogás hacia la etapa de tratamiento y acondicionamiento.

El biogás procedente de las celdas y mediante la red de tuberías es aspirado hacia la sala de tratamiento y acondicionamiento, donde pasa por un deshidratador primario, quitándole parcial o totalmente el contenido de humedad. A partir de la salida de impulsión del soplane, el biogás podrá tomar dos caminos no excluyentes para su posterior incineración mediante un cuadro de válvulas mariposas para tal fin. Por un lado, el biogás puede quemarse en su totalidad en una antorcha de llama oculta. Y el otro camino para incineración controlada del biogás corresponde a las microturbinas constituyentes del sistema de generación de energía eléctrica detallado en el apartado 2.3. Sin

embargo, es condición necesaria para ingresar a este sistema acondicionar el biogás en cuanto al contenido de siloxanos en todas sus familias (máximo 5 ppb) y la presión del biogás en la brida de ingreso de las microturbinas (5,5 bar). Esto ocurre dentro del conjunto de compresión (Bio-Komp), confiriéndole al biogás un segundo acondicionamiento en términos de filtrado de contenido de partículas sólidas, agua y lubricantes (Amarai et al., 2022; Konkol et al., 2022).

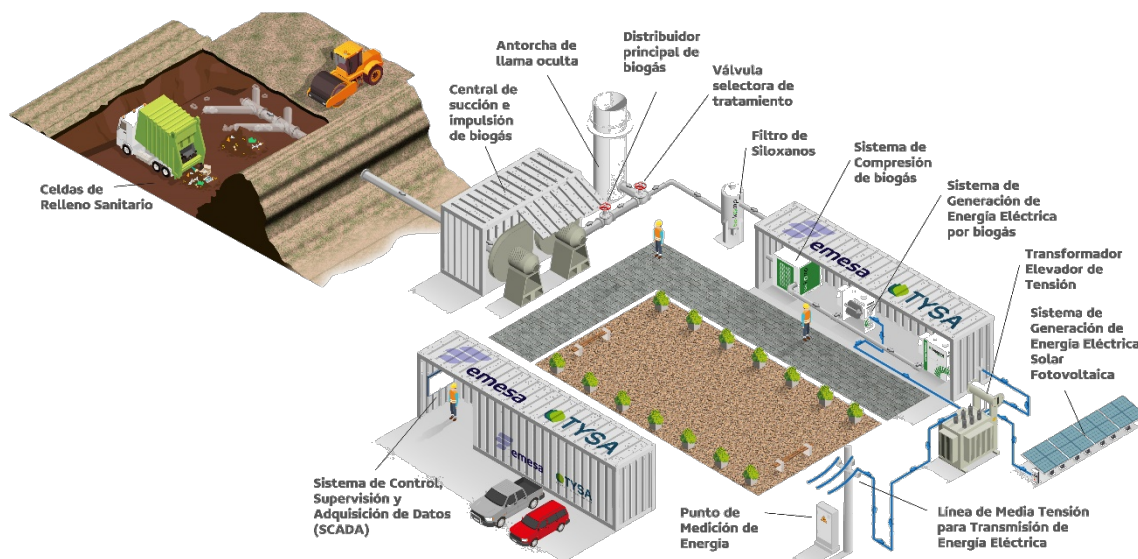


Figura 1. Infografía Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico – El Borbollón. Mendoza. Argentina. Elaboración propia.

Sistema híbrido de generación de energía eléctrica

Desde su concepción este proyecto fue conceptualizado para adherirse al régimen de Generación Distribuida que opera en la Provincia de Mendoza desde el año 2015, actualmente reglamentado por la Resolución 01/2022 (EPRE, 2022). Más aún, la resolución última mencionada permitió que el SHGE ostente las cualidades de ser el primer proyecto en Mendoza y en Argentina en formato de Punto de Sólo Inyección (PSI) y el primer proyecto en Argentina en hibridar generación de energía eléctrica distribuida a partir de biogás de RSU y solar. Con PSI nos referimos a un sistema de generación que se instala en un lugar distinto al punto de suministro del usuario, con al menos un suministro asociado para aplicar el Mecanismo de Compensación (monetización), el cual considera la tarifa eléctrica del o los suministros asociados en la proporción declarada para cada uno en el Contrato de Recursos de Energía Distribuida (EPRE, 2022).

En cuanto a la generación de energía eléctrica a partir de biogás procedente de RSU, podemos mencionar que existen diversas tecnologías de conversión biológica para su utilización (Bajić et al., 2015) y algunos estudios, en línea con nuestro trabajo, demuestran que el biogás de relleno sanitario en particular puede efectivamente usarse para generar electricidad (Kale et al., 2020; Buragohain et al., 2021). El aprovechamiento de este tipo de biogás suele ser una alternativa tecnológica que encuentra sentido técnico-económico en municipios de más de 200.000 habitantes, según Barros et al. (2014).

Para nuestro proyecto el potencial teórico de generación de electricidad por recuperación de biogás de RSU (ERP_{BG_RSU}), se calculó utilizando el siguiente modelo matemático, ecuación (2), (Alzate et al., 2019) (por facilidad de análisis, en este artículo se utilizan las unidades de energía en MWh):

$$ERP_{BG_RSU} = PCI_{BG_RSU} \cdot Q_{CH_4} \cdot \gamma \cdot \eta \quad (2)$$

$$PCI_{BG_RSU} = f_{CH_4} \cdot PCI_{Metano} \quad (3)$$

donde, ERP_{BG_RSU} es el potencial teórico de generación de electricidad por recuperación de biogás de RSU medido en (MWh/año); PCI_{BG_RSU} es el poder calorífico inferior del biogás en (MWh/m³); Q_{CH_4} es la generación anual de metano en (m³/año) dado por la ecuación (1); γ es la eficiencia del sistema de recuperación de biogás (%), la cual puede ser baja (50%), media (60%) o alta (80%); y η es la

eficiencia eléctrica de la tecnología utilizada para generar electricidad (%). En nuestro caso γ toma el valor 50% de acuerdo con Alzate et al. (2019) y η toma el valor 29% según información del fabricante de la tecnología utilizada (Capstone, 2021). Luego, el poder calorífico inferior del biogás de RSU se calcula con la ecuación (3), donde f_{CH_4} (%) es la fracción de metano contenida en el biogás de RSU y PCI_{Metano} es el poder calorífico inferior del metano, en nuestro caso se toma el valor reportado por el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS, 2019). Dado que f_{CH_4} y el poder calorífico inferior del biogás (PCI_{BG_RSU}), pueden variar según la antigüedad del vertedero y la calidad de los residuos sólidos urbanos, es recomendable tomar muestras periódicas del biogás generado para así verificar su calidad gas antes de la combustión. La metodología de análisis aplicada para realizar dicha verificación de calidad es por cromatografía de gases con detector de conductividad térmica por el sistema de áreas normalizadas utilizando patrón de calidad certificada para la determinación de los factores de respuestas, donde el equipamiento utilizado es un cromatógrafo de gases marca SHIMADZU GC-9A con detector de conductividad térmica y columna de 2 metros de Porapac Q. Considerando el valor máximo del porcentaje de metano (f_{CH_4}), indicado en la Tabla 1 de la sección de resultados y, reemplazando los valores obtenemos:

$$PCI_{BG_RSU} = 35,10\% \cdot 0,00913 \frac{MWh}{m^3} \quad \therefore \quad PCI_{BG_RSU} = 0,003204 \frac{MWh}{m^3}$$

La tecnología seleccionada para este proyecto se trató de microturbinas a gas capaces de funcionar con las particularidades de un biogás de relleno sanitario, referidas a su bajo poder calorífico y posibles contenidos de siloxanos (Pan et al., 2023; Osra et al., 2021). Se cuenta con dos microturbinas marca Capstone Green Energy, modelo C65, en configuración *Grid Connect* de 65 kW cada una (en condiciones ISO). Esta tecnología es pionera en la región, siendo las primeras microturbinas en Mendoza, en Argentina, y en América Latina funcionando con biogás de relleno sanitario; la empresa Capstone sólo registra 2 proyectos similares en otras latitudes, uno en Rubi, España y otro en La Ciotat, Francia.

En términos técnicos, cada microturbina es un sistema de generación de energía estacionario que proporciona energía eléctrica in situ. Cada microturbina puede generar energía en paralelo con la red de distribución de la compañía eléctrica (modo *Grid Connect*) o aislada de ella (modo autónomo o *Stand Alone*). Cada equipo consta de una turbina, un sistema de electrónica de potencia de estado sólido y un sistema de combustible. Debido al confinamiento de las microturbinas en un contenedor marítimo de 12m de longitud (40ft), a dicho recinto se lo dota de un ventilador externo que insufla aire en exceso al interior de manera que las microturbinas tengan la cantidad requerida de aire para la correcta combustión del biogás y refrigeración de la electrónica de potencia (26.300 slpm y 14.200 slpm, *standard liters per minute*, respectivamente). Los principales componentes de la turbina se observan en la Figura 2a en su corte transversal y en la Figura 2b en su diagrama funcional simplificado. El rodete del compresor, el rotor de la turbina y el rotor del generador están montados en un único eje (Capstone, 2021).

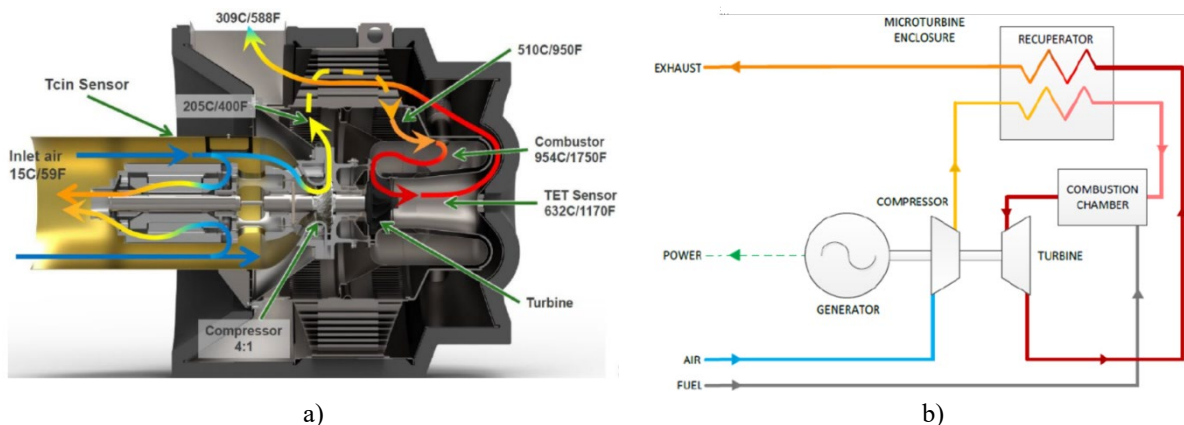


Figura 2. a) Corte transversal de la turbina con indicación de flujo de aire. b) Diagrama funcional simplificado. Microturbina Capstone Green Energy, modelo C65-GC. Fuente: Capstone (2021).

Por otra parte, la energía eléctrica a partir de tecnología solar FV se genera en un sistema fotovoltaico en modalidad *conectado a la red*, es decir tomando referencia de tensión y frecuencia de la red de distribución pública de energía eléctrica (Khan et al., 2022). Este sistema está compuesto por 16 módulos FV marca LV-Energy, modelo LVE72PSe de una potencia pico de 330 Wp (en condiciones STC), los que conformando 2 cadenas de 8 módulos cada una, se conectan a un inversor de corriente marca SMA, modelo Sunny Tripower 5000TL. Los módulos FV están dispuestos sobre una estructura metálica directamente hincada sobre la superficie de una celda del relleno sanitario ya clausurada, con una inclinación fija de 30°, lo que permite un aprovechamiento óptimo de la radiación solar incidente de lugar (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

Cada etapa o subsistema del conjunto tecnológico cuenta con sus protecciones eléctricas independientes y a su vez la totalidad del conjunto cuenta con sistemas de protecciones eléctricas de potencia que efectivizan la hibridación de las tecnologías de generación, al mismo tiempo que aportan la condición de operación segura, tanto del personal como de los equipos. A su vez, las protecciones eléctricas, sensores de campo, inversores de corriente, variadores de frecuencia, y paradas de emergencia, tanto del sistema de generación por biogás, como del sistema FV están vinculadas a un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), el cual es el encargado, a través de un Controlador Lógico Programable (PLC), de coordinar de forma automática todos los sistemas y elementos antes mencionados, como así también de gestionar los enclavamientos, permisivos de cierres de interruptores de potencia, indicar alarmas y sacar el sistema de funcionamiento en caso de falla o de manifestarse un ambiente con atmósfera explosiva por acumulación de metano.

Por otra parte, la energía eléctrica generada por ambas fuentes renovables se evacúa a través de un transformador de potencia elevador, que lleva la tensión de salida de la generación (0,4 kV) a los 13,2 kV requeridos para transportar dicha energía por una línea aérea de media tensión (LAMT) de una longitud de 1,2 km hacia el punto de medición fuera del predio del proyecto bajo análisis. Asimismo, para dar cumplimiento a los requerimientos exigidos por la empresa distribuidora eléctrica y a lo dispuesto en la Resolución 01/2022 del EPRE en materia técnica, se montaron en ambos extremos de la LAMT sendos reconectores automáticos de media tensión, marca Tavrida, modelo Rec15/25_A11_5p, uno a la salida del transformador (lado generación) y otro en la interconexión de la LAMT interna con la LAMT del servicio de distribución (lados distribuidora).

La parametrización de las funciones de protección del controlador electrónico del reconector requirió primeramente la realización de un Estudio, Cálculo y Ajuste de Protecciones (ECAP) que permitiera la operación coordinada entre las protecciones de ambos extremos de la LAMT y también entre las protecciones más cercanas de la red de distribuidora, verificando en ambos casos el comportamiento eléctrico y térmico de los componentes del sistema ante fallas trifásicas, bifásicas y monofásicas en los mismos (IEEE, 2001). Los cálculos de ajustes de ambos reconectores se realizaron para las siguientes funciones de protección (entre paréntesis la nomenclatura ANSI estándar C.37.2 de las mismas) (IEEE, 2008): Sobrecorriente direccional (67/67N); Sobrecorriente de Fase (50/51); Sobrecorriente de tierra (50N/51N); Sobretenensión (59); Sub-tensión (27); Potencia inversa (32); Protección Anti-isla o *Vector Shift* (78); Protección de Mínima y Máxima Frecuencia (81). Con los resultados de los ajustes se procede a realizar los ensayos en fábrica (FAT - *Factory Acceptance Test*) y luego con las protecciones electrónicas montadas en sus gabinetes se replican los ensayos en sitio (SAT - *Site Acceptance Test*).

Emisiones de gases de efecto invernadero

Adicionalmente, es posible establecer las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico, medidas en toneladas equivalentes de CO₂ (tCO_{2eq}), ecuación (6). Estas emisiones de GEI tienen dos componentes principales, las emisiones generadas por la producción de biogás de RSU a raíz de la disposición controlada de los RSU, las cuales se obtienen por la ecuación (4), y, por otro lado, las emisiones de GEI evitadas o reducidas por la captura de incineración del biogás del relleno sanitario y por la generación FV del Sistema Híbrido, las que se obtienen por medio de la expresión (5). De esta manera podemos cuantificar el aporte ambiental de un proyecto de este tipo. Entonces:

$$T_{CO_{2eq}BG_RSU} = T_{CO_{2eq}BG_RSU} + F_{CO_{2eq}CH_4} \cdot Q_{CH_4} \quad (4) \quad T_{CO_{2eq}EVITADAS} = \gamma \cdot F_{CO_{eq}CH_4} \cdot Q_{CH_4} + F_{CO_{eq}EEFV} \cdot E_{FV} \quad (5)$$

donde, para la ecuación (4) $T_{CO_{2eq}BG_RSU}$ son las toneladas de dióxido de carbono equivalente de la generación de biogás del relleno sanitario ($t_{CO_{2eq}}/\text{año}$); $T_{CO_{2eq}BG_RSU}$ es la cantidad de emisiones de dióxido de carbono generado por los RSU del relleno sanitario, es decir la cantidad de CO_2 contenido en el biogás producido ($t_{CO_{2eq}}/\text{año}$), este valor es obtenido de los resultados de la modelación en LandGEM para nuestro caso de estudio; $F_{CO_{2eq}CH_4}$ es el factor de caracterización del metano para llevarlo a dióxido de carbono equivalente ($t_{CO_{2eq}}/t_{CH_4}$) (Krey et al., 2014). En cuanto a las emisiones evitadas, ecuación (5), tenemos $T_{CO_{2eq}EVITADAS}$ son las emisiones de GEI evitadas totales del SHGE ($t_{CO_{2eq}}/\text{año}$); γ es la eficiencia del sistema de recuperación de biogás (%); $F_{CO_{eq}EEFV}$ es el factor de caracterización de la energía eléctrica del sistema FV inyectada la red, considerada como energía sustituida de la de nuestra matriz energética nacional ($t_{CO_{2eq}}/MWh_{EE}$) según el Inventario de GEI de la República Argentina, Años 2010 y 2012 (Moreira et al., 2019); y E_{FV} es la energía eléctrica generada por el sistema FV ($MWh/\text{año}$). Vale mencionar que se considera una combustión completa del metano que ingresa a la antorcha de llama oculta y a las microturbinas. Por lo tanto:

$$T_{CO_{2eq}NETAS} = T_{CO_{2eq}BG_RSU} - T_{CO_{2eq}EVITADAS} \quad (6)$$

donde, $T_{CO_{2eq}NETAS}$ son las emisiones de GEI evitadas netas del Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás y Solar Fotovoltaico ($t_{CO_{2eq}}/\text{año}$) (6), siendo las otras variables las descriptas anteriormente.

RESULTADOS

Resultados de cromatografías del relleno sanitario El Borbollón

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis por cromatografía de biogás del relleno sanitario El Borbollón, realizados en dos campañas de medición distanciadas dos años una de otra.

Tabla 1: Resultados de Análisis de biogás de RSU del relleno sanitario El Borbollón

Parámetro Analizado	Unidad	Valores Obtenido por Campaña de Medición		Método
		4/12/2020	26/12/2022	
Metano	% v/v	35,10	20,14	EPA 18
Nitrógeno + Oxígeno	% v/v	NA ⁽¹⁾	71,09	ASTM D 1945 y ASTM D 2597
Dióxido de Carbono	% v/v	34,20	8,76	EPA CTM-034
Sulfuro de Hidrógeno	mg/m ³	22,70	NA ⁽¹⁾	EPA 11
Dodecametilciclohexasiloxano	mg/m ³	1,20	NA ⁽¹⁾	EPA 0010/ 8260 D

⁽¹⁾ NA: No Analizado

Los resultados obtenidos se separan entre un 12,25% y un 49,65% del valor mínimo esperado para un biogás de RSU (40%) según Ehrig et al. (2011), respectivamente. Asimismo, las microturbinas requieren un mínimo de 35% de metano contenido en el biogás para funcionar, de lo contrario su sistema de control imposibilita la secuencia de encendido. Cabe destacar, que los valores de metano de los análisis cromatográficos resultantes difieren significativamente de los encontrados en ocasiones donde el sistema de conducción del biogás en superficie ha sido mantenido adecuadamente (i.e. conexionado de tuberías sueltas; purga de condensados en tuberías; ocurrencia de sifones en tuberías por asentamientos diferenciales del terreno, etc.).

Resultados del potencial teórico de producción de metano y generación de energía eléctrica a partir de biogás del relleno sanitario El Borbollón

Los resultados del potencial teórico de producción de metano del relleno sanitario se observan en la Figura 3, los cuales se obtuvieron a partir del modelo LandGEM introduciendo los valores correspondientes a nuestra situación de relleno sanitario. Luego, los resultados particulares en

condiciones de operatividad de planta, también se observan en la Figura 3, donde se ha sustraído al potencial teórico de producción de metano arrojado por la ecuación (1), los volúmenes de metano que se han incinerado en la antorcha de llama oculta durante el funcionamiento operativo a lo largo de los años de la instalación. En dicha figura también se observa la proyección de metano hacia el año 2040, alcanzando su valor máximo de $11,46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ en el año 2041, correspondientes a una cantidad acumulada de 7,07 MMt (millones de toneladas) de RSU entre el año 2022 y 2040.

Reducción de rendimiento del potencial de generación de energía eléctrica por recuperación de biogás de relleno sanitario

El rendimiento de las microturbinas, como el de todas las turbinas de gas, depende de la densidad másica del aire de admisión. Los valores de rendimiento indicados por el fabricante Capstone (2021) se refieren a la potencia a plena carga en condiciones ISO (International Organization for Standardization, 2018), definidas estas a 15°C , 60% de humedad relativa y una presión a nivel del mar de 101,3 kPa, por lo que puede producirse una reducción del rendimiento a temperatura ambiente y elevaciones superiores a las condiciones ISO (Capstone, 2021).

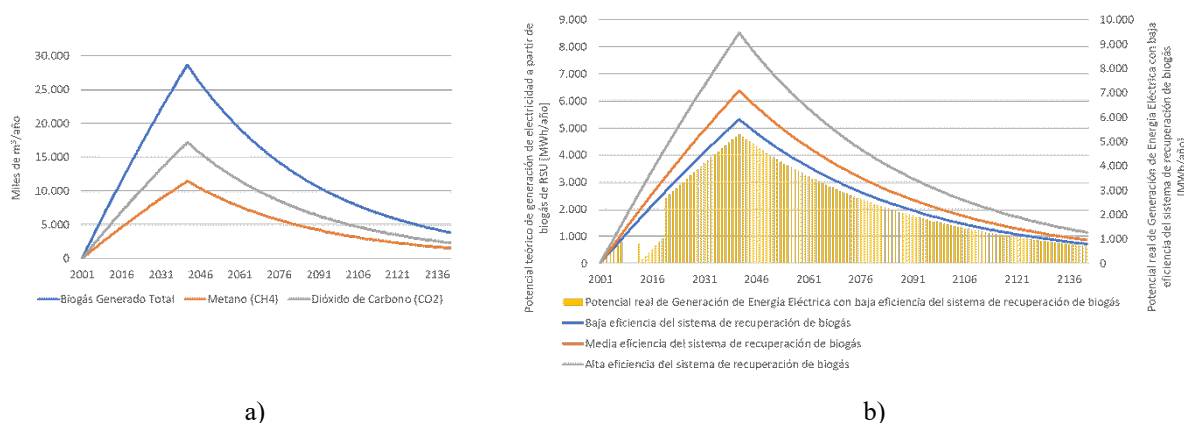


Figura 3. a) Comparación del potencial teórico de la producción de biogás con emsiones de CO_2 y CH_4 . b) Potencial teórico y real de generación de electricidad. Elaboración propia.

A partir de la información brindada por el fabricante sobre las curvas características de reducción de potencia y eficiencia de las microturbinas (Capstone, 2021) realizamos una regresión lineal simple para encontrar los parámetros de funcionamiento en condiciones de temperatura ambiente media diaria (Castillo et al., 2019) y así conocer la pérdida de rendimiento para nuestro caso de estudio (Figura 4).

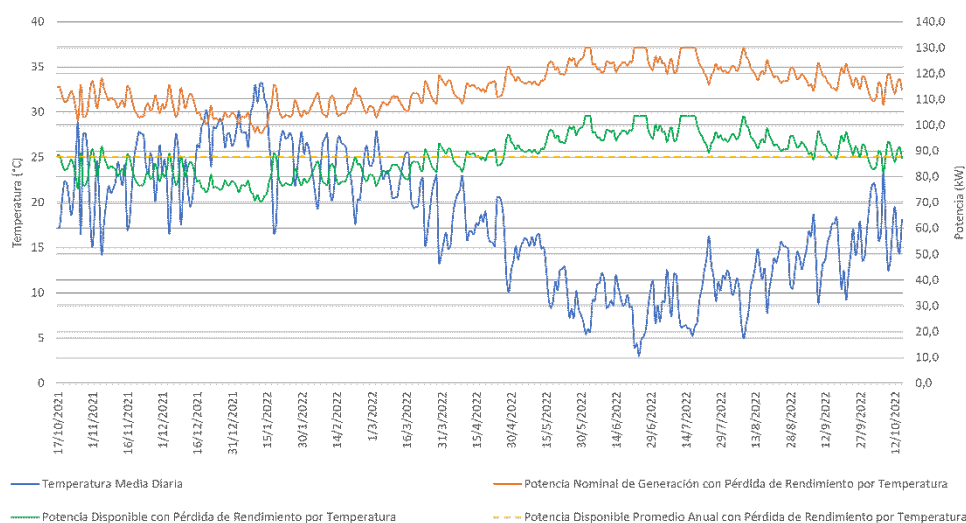


Figura 4. Variación de temperatura media anual. Potencia nominal, disponible y disponible promedio de generación con pérdida de rendimiento. Elaboración propia.

Los resultados muestran (Figura 4) cómo varía la potencia de nominal de generación en función de la temperatura ambiente media diaria. Adicionalmente se observa la potencia disponible de generación, obtenida al sustraer de la potencia nominal de generación, la sumatoria de las potencias de los sistemas periféricos, alcanzando entre las dos microturbinas una potencia mínima disponible de generación de 70,6 kW para una temperatura exterior media diaria de 33,2°C y una potencia máxima disponible de generación de 103,4 kW para una temperatura exterior media diaria de 4,0°C. También se aprecia la potencia disponible promedio anual (87,8 kW).

Resultados de la Generación Eléctrica a partir de tecnología solar fotovoltaica

La generación de energía eléctrica anual del sistema FV para el año 1 fue de 8.179 kWh_{ac}/año. Asimismo, otros indicadores energéticos resultantes fueron: i) Factor de Capacidad Lado Corriente Continua = 17,6%; ii) Relación de Calidad Energética = 1.542 kWh/kW; iii) Rendimiento = 74%; y iv) Relación DC/AC = 1,06. A partir del año 1 se estima una degradación anual del 0,5% de los módulos FV (Limmanee et al., 2016), implicando una reducción similar en magnitud a la obtenida por generación de energía eléctrica, alcanzando en el año número 25 de la instalación aproximadamente 7.252 kWh_{ac}/año.

Resultados sobre las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas

En la Figura 5 se observan las emisiones de GEI (medidas en miles de toneladas de dióxido de carbono equivalente, kt_{CO2eq}) relacionadas con la producción de biogás en sus componentes dióxido de carbono, metano y total.

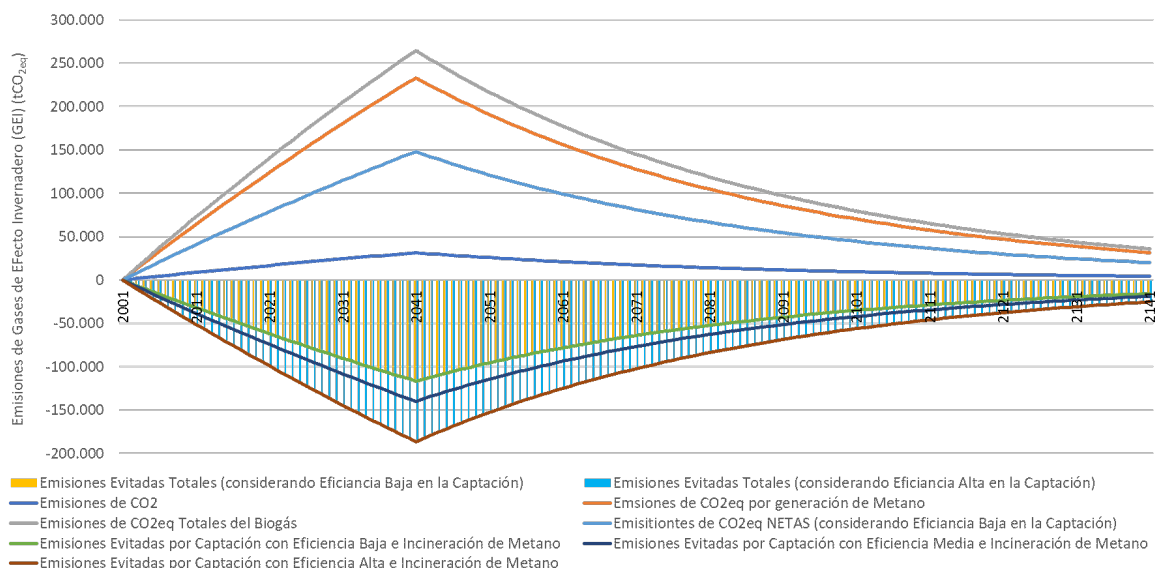


Figura 5. Resultados sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas, evitadas y netas. Elaboración propia.

En el año 2041 se alcanzan máximos de 31,4 kt_{CO2eq}/año; 233,1 kt_{CO2eq}/año; y 264,5 kt_{CO2eq}/año, respectivamente, con valores acumulados al 2041 de 671,5 kt_{CO2eq}; 4.976,4 kt_{CO2eq}; 5.648,0 kt_{CO2eq}, respectivamente. También se aprecian las emisiones de GEI evitadas acumuladas al año 2041 por la captación e incineración de biogás para los rangos de eficiencia de captación baja (-2.488,2 kt_{CO2eq}), media (-2.985,8 kt_{CO2eq}), y alta (-3.981,1 kt_{CO2eq}).

Asimismo, las emisiones de GEI evitadas acumuladas por la inyección de energía eléctrica a partir de tecnología FV a la red de distribución pública durante 25 años son -0,108 kt_{CO2eq}. Por lo tanto, las emisiones de GEI evitadas totales considerando un nivel de eficiencia de captación baja, son -2.487 kt_{CO2eq}, y considerando un nivel alto -3.981 kt_{CO2eq}, representando un 44,1% y un 70,5% de las emisiones totales sin proyecto de generación por biogás, respectivamente.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue presentar los aspectos metodológicos y técnicos del primer sistema híbrido del país y la región de generación distribuida de energía eléctrica a partir de biogás de RSU y solar FV, demostrando que a pesar de que la generación de energía eléctrica para este proyecto piloto no cobra relevancia respecto a la generación eléctrica por fuentes térmicas y renovables convencionales de la provincia de Mendoza, si lo hace respecto en materia de mitigación del cambio climático.

En términos porcentuales, de haber aprovechado en el 2022 el total del metano producido, la generación del SHGE hubiera representado apenas un 0,007% de la generación neta total y un 1,4% de la generación renovable de Mendoza para una condición de baja eficiencia del sistema de captación, y un 0,10% y un 2,2% respectivamente para una condición de alta eficiencia. Asimismo, manteniéndose al 2041 constante el parque de generación térmico y renovables de Mendoza, se esperaría que el SHGE aportara a la oferta de energía eléctrica total un 0,12% y un 2,5% a la generación renovable en baja eficiencia de captación, y un 0,19% y 4,0% respectivamente con una alta eficiencia.

Sin embargo, tal como se mencionó, el SHGE sí reviste real importancia en términos ambientales por las emisiones de GEI evitadas al ambiente. En valores, encontramos que las emisiones netas acumuladas del proyecto al año 2041 para una situación de baja eficiencia de captación, es decir el escenario más desfavorable, serían 3.160 ktCO_{2eq}, mientras que si consideramos el escenario más favorable (alta eficiencia) las emisiones netas acumuladas del SHGE serían 1.667 ktCO_{2eq}. En otras palabras, lo antedicho significa que, si no se hubiera realizado la captación y posterior combustión del metano contenido en el biogás de RSU, la gestión de RSU del Gran Mendoza hubiera liberado al ambiente en el año 2022 una cantidad de 0,147 ktCO_{2eq} y liberaría 5.648 ktCO_{2eq} acumuladas al 2041. Y en términos porcentuales se encontró que las emisiones evitadas totales, es decir las evitadas por la gestión controlada de los RSU y posterior combustión del metano generado, más las evitadas por la energía eléctrica de origen FV, representan un 4% y 6% de las emisiones de la generación eléctrica neta de Mendoza en el 2022, para baja y alta eficiencia de captación, respectivamente.

Dentro de la eficiencia tecnológica en la captación y aprovechamiento de biogás de RSU, se encuentran las actividades de mantenimiento de la red de recolección para prevenir fugas de este debido a asentamientos diferenciales de la cubierta de las celdas donde apoyan las tuberías. Las fugas se pueden detectar visualmente y luego confirmar por lectura de un bajo contenido de metano en el biogás. Cabe enfatizar que el control cromatográfico del biogás necesita ser mejorado en el futuro.

Concluimos que proyectos puramente tecnológicos como el aquí expuesto, más aún bajo su concepción de piloto con fines de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), no sólo deben velar por su éxito medido en términos técnico-económicos, sino que deben servir como herramienta de difusión y educación a la comunidad, de manera que permita construir un marco ético y moral ciudadano de gestión responsable de los residuos sólidos urbanos y de la urgente necesidad de cada vez más incorporar fuentes renovables de generación de energía eléctrica local, lo que implica reeducarnos y aprender a convivir sin perjudicar al prójimo y sin arruinar la naturaleza, si queremos legar un mundo vivible a nuestra posteridad.

REFERENCIAS

- Alzate S., Restrepo-Cuestas B., Jaramillo-Duque Á. (2019). Municipal solid waste as a source of electric power generation in Colombia: A techno-economic evaluation under different scenarios. *Resources* 8, 1, 51.
- Amaraihi R.J., Joseph B., Kuhn J.N. (2022). Techno-economic and sustainability analysis of siloxane removal from landfill gas used for electricity generation. *Journal of Environmental Management* 314, 115070.
- Bajić B.Ž., Dodić S.N., Vučurović D.G., Dodić J.M., Grahovac J.A. (2015). Waste-to-energy status in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1437-1444.
- Barros R.M., Tiago Filho G.L., Da Silva T.R. (2014). The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy* 65, 150-164.

- Buragohain S., Mohanty K., Mahanta P. (2021). Hybridization of solar photovoltaic and biogas system: Experimental, economic and environmental analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45, 101050.
- Calbry-Muzyka A., Madi H., Rüscher-Pfund F., Gandiglio M., Biollaz, S. (2022). Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy* 181, 1000-1007.
- CAMMESA [en línea] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima. Informe Anual 2022. Dirección URL: <<https://cammesaweb.cammesa.com/informe-anual/>> [consulta: 28 de julio de 2023].
- Capstone Green Energy Corporation (2021). Product Specification: Capstone C65 Microturbine 460044 Rev N.
- Castillo A., Correa E., Cantón M. (2019). Geomorfología y forma urbana. Comportamiento térmico de distintas tramas en áreas de piedemonte: el caso de Mendoza, Argentina. *EURE (Santiago)* 45, 136, 183-207.
- Demirel B. y Scherer P. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 7, 173-190.
- Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas, Gobierno de la Provincia de Mendoza (DEIE) (2019). Dinámica futura de la población Mendoza. Años 2001 – 2040. Proyección de la Población por sexo y grupos quinquenales de edad Mendoza. Período 2001-2040. Población total según departamento, proyectada al 30 de junio de cada año, ajustada a la proyección nacional y provincial Mendoza. Años 2001-2015.
- Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas, Gobierno de Mendoza (2018). Informe Año 2017 y Avance de temporada 2017/2018. Provincia de Mendoza.
- Ehrig H.J., Schneider H.J., Gossow V. (2011). Waste, 7. Deposition. ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry 38, 541–562. https://doi.org/10.1002/14356007.b08_559.pub2
- Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) (2019). NAG-602: Especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos.
- Ente Provincial Regulador Eléctrico – EPRE (2022). Resolución N° 01/2022: Reglamento de Modalidades, Condiciones Técnicas, Comerciales y Legales del Régimen de Recursos de Energía Distribuida (Ley 9084 – Dec. N° 404/2021).
- García F. (2003). Determinación cuantitativa y cualitativa de los contaminantes atmosféricos emitidos por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, estudio de caso: relleno sanitario curva de rodas. Tesis de Maestría. Universidad de Antioquia.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología. ISBN 978-987-9285-36-7.
- International Organization for Standardization (2018). ISO 20675:2018 Biogas production, conditioning, definitions and classification scheme 2018.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2001). IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book), in IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], pp.1-710, 17 Dec. 2001, doi: 10.1109/IEEESTD.2001.93369.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2008). Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations," in IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996), pp.1-48, 3 Oct. 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2008.4639522.
- Kale C. y Gökçek M. (2020). A techno-economic assessment of landfill gas emissions and energy recovery potential of different landfill areas in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122946.
- Khan M.A., Haque A., Kurukuru V.B., Saad M. (2022). Islanding detection techniques for grid-connected photovoltaic systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154, 111854.
- Konkol I., Cebula J., Świerczek L., Piechaczek-Wereszczyńska M., Cenian A. (2022). Biogas Pollution and Mineral Deposits Formed on the Elements of Landfill Gas Engines. *Materials* 2022, 15, 2408.
- Krey V., Masera O., Blanford G., Bruckner T., Cooke R., Fisher-Vanden K., Haberl H., Hertwich E., Kriegler E., Mueller D., Paltsev S., Price L., Schlömer S., Ürge-Vorsatz D., van Vuuren D., Zwickel T. (2014). Annex II: Metrics & Methodology. In: *Climate Change 2014: Mitigation of*

- Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von Stechow C., Zwickel T., Minx J.C. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Limmanee A., Udomdachanut N., Songtrai S., Kaewniyompanit S., Sato Y., Nakaishi M., Kittisontirak S., Sriprapha K., Sakamoto Y. (2016). Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand, *Renewable Energy* 89, Pages 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.088>.
- Ministerio de Salud y Ambiente, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2005). Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, ENGIRSU.
- Moreira M.M., Gaioli F., Galbusera S. (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Argentina-2019. 1ra Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Narayana, T. (2009). Municipal solid waste management in India: From waste disposal to recovery of resources?. *Waste Management* 29, 3, 1163-1166.
- Norouzi O. y Dutta A. (2022). The current status and future potential of biogas production from Canada's organic fraction municipal solid waste. *Energies* 15, 2, 475.
- ONU Medio Ambiente (2018). Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe. Ciudad de Panamá, Panamá.
- Osra, F. A., Ozcan, H. K., Alzahrani, J. S., Alsoufi, M. S. (2021). Municipal solid waste characterization and landfill gas generation in kakia landfill, makkah. *Sustainability*, 13(3), 1462.
- Pan, Q., Liu, Q. Y., Zheng, J., Li, Y. H., Xiang, S., Sun, X. J., & He, X. S. (2023). Volatile and semi-volatile organic compounds in landfill gas: Composition characteristics and health risks. *Environment International*, 107886.
- Panesso A.F., Cadena J.A., Mora Flórez J.J., Ordoñez M.D. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia Et Technica* XVII, 47, 23-28.
- Secretaría de Ambiente, Gobierno de la Provincia de Mendoza (2018). Resolución 597/2018: Centro Ambiental El Borbollón, Departamento de Las Heras, y evaluación general de remediación de basurales (en Campo Papa -Godoy Cruz-, Puente de Hierro -Guaymallén- y Campo Cacheuta -Luján de Cuyo) y Construcción de puntos verdes.
- United Nations (2020). 17 Goals to Transform Our World. Dirección URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [consulta: 28 de julio de 2023]
- US EPA, "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide," U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. 2005. Disponible en: <https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software>

HYBRID SYSTEM FOR DISTRIBUTED ELECTRICITY GENERATION THROUGH LANDFILL BIOGAS AND SOLAR PHOTOVOLTAIC IN MENDOZA, ARGENTINA

ABSTRACT: Greenhouse gas (GHG) emissions from landfill gas cause serious environmental and social problems. Capturing and using biogas efficiently can reduce its environmental impact. In Mendoza metropolitan area, around 1,300 tonnes of municipal solid waste (MSW) are generated daily, of which 65% goes to El Borbollón landfill. This study presents the results of the implementation of the first hybrid system for electricity generation from biogas and solar energy in a landfill. This alternative solution allows for responsible MSW management and diversifies the regional energy matrix. The production of biogas, its collection, conduction, treatment, and conditioning for combustion, as well as electrical engineering aspects, are analyzed in the framework of the technological setup operating in a distributed generation regime connected to the grid. The results show that with an average annual generation of 6,387 MWh/year and a reduction of GHG emissions between 44.1% and 70.5%, the use of MSW biogas in small cities can also be carried out in the framework of distributed generation as a climate change mitigation strategy.

Keywords: landfill gas; photovoltaic; distributed generation; climate change