TRANSICIÓN DE WTE A VALORIZACIÓN INTEGRAL: EL SISTEMA SITGER DE REMOX

Ricardo Antonio Berdugo Páez

Ingeniero Civil
gerencia.general@remoxenergy.com

Resumen. En este artículo, SITGER se define como un "Sistema Integral de Tratamiento de Residuos y Generación de Energía Renovable" que integra separación mecánica automatizada, estabilización biológica de residuos orgánicos, disociación molecular térmica mediante gasificación por plasma directo de fracciones inorgánicas de rechazo con contenido calórico, logística inteligente y energía solar fotovoltaica. En conjunto, se plantea como una alternativa técnica y económicamente viable frente al colapso progresivo de los rellenos sanitarios.

La gestión de residuos sólidos urbanos en Latinoamérica atraviesa una crisis estructural que compromete la viabilidad ambiental y la competitividad industrial. El agotamiento del modelo de enterramiento —marcado por la colmatación de rellenos, saturación predial, aumento en los costos de lixiviados y deterioro del flujo de caja municipal— se agrava por la alta humedad del residuo y la baja segregación en la fuente. Aunque la región observa con interés las soluciones Waste-to-Energy (WtE), tecnologías como la incineración masiva y la pirólisis enfrentan barreras críticas: tarifas de disposición incompatibles con el contexto local, ausencia de subsidios y bajo perfil calórico del flujo residual.

Superar este escenario exige un cambio de paradigma: avanzar hacia sistemas integrados que reduzcan la dependencia de rellenos sanitarios y fortalezcan la I+D+i mediante la evaluación comparativa de tecnologías avanzadas, validadas internacionalmente y mejor adaptadas a las condiciones regionales. En Colombia, esta orientación está respaldada por el CONPES 3874, que promueve la transición de la disposición final hacia centros de aprovechamiento, tratamiento y valorización, con mejor desempeño ambiental y menor emisión de GEI. [1]

En este contexto se propone en este artículo el Sistema Integrado de Tratamiento de Residuos y Generación de Energía Renovable (SITGER), identificado internacionalmente como *INTERWASTE by REMOX*. Desarrollado por Remox Ingeniería Latam (COL) y Remox Renewable Energy Co. (USA), el sistema articula separación mecánica de precisión, biometanización de la FORSU y gasificación por plasma directo de la fracción remanente, con un TRL 9 en sus componentes centrales. Esta integración permite generar electricidad a partir de gases combustibles acondicionados y recuperar materiales con destino a la economía circular.

El artículo examina la ingeniería del SITGER a partir de estudios de viabilidad, investigaciones académicas, auditorías de sostenibilidad, vigilancia tecnológica, pruebas de

gasificación en Minnesota y visitas técnicas a plantas WtE de referencia en Tallin (Estonia) [2] y Copenhague (Dinamarca) [3]; Se analiza cómo la combinación de plasma térmico, biometanización, separación mecánica y apoyo fotovoltaico contribuye a limitar la formación de contaminantes, controlar lixiviados y diversificar los ingresos del sistema. Además, incorpora a los recicladores de oficio como actores del aprovechamiento manual previo a los procesos automatizados y desplaza la dependencia exclusiva de la tarifa de recolección hacia múltiples flujos de monetización: energía o combustibles, créditos de carbono, reciclables, biofertilizantes y escoria vitrificada.

Palabras claves: Tratamiento de Residuos, RSM, RSU, RESPEL, Tratamiento integral, Reciclaje, Economía circular, Gasificación por plasma, Biometanización, Orgánicos.

1. INTRODUCCIÓN: LA CRISIS DEL MODELO LINEAL Y EL IMPERATIVO DE LA VALORIZACIÓN EN LATAM

El contexto industrial, energético y municipal latinoamericano atraviesa una transición crítica en materia de saneamiento básico. Durante décadas ha predominado un modelo lineal de extraer, consumir y desechar, en el que la disposición final en rellenos sanitarios —o incluso en vertederos abiertos y cuerpos de agua— constituye el último eslabón de una cadena ambiental y financieramente deficitaria.

La crisis regional de los residuos es evidente. Los rellenos sanitarios enfrentan cierres inminentes que amenazan con desencadenar emergencias sanitarias, como ocurre en Quebrada Honda, Arequipa (Perú) [4], cuyo agotamiento proyectado para el periodo 2025-2026 ha detonado una urgencia socioambiental sin precedentes. situación que se repite en diversas ciudades de México, Colombia, Chile, Ecuador, Panamá y el Caribe.

Factores críticos como el fenómeno NIMBY —Not In My Back Yard—, entendido como la oposición de comunidades que, aun reconociendo la necesidad de cierta infraestructura, rechazan su ubicación cercana por riesgos percibidos para su calidad de vida, restringen la disponibilidad de nuevos terrenos social y ambientalmente licenciables. Entre los factores percibidos se cuentan los permanentes olores, metano fugitivo, vectores infecciosos, bioaerosoles, lixiviados y otros riesgos sanitarios. En conjunto, estas condiciones refuerzan la necesidad de avanzar hacia la economía circular y la valorización energética de los RSU.
No obstante, la transición hacia el Waste-to-Energy (WtE) enfrenta barreras estructurales en Latinoamérica. persisten brechas de transferencia de conocimiento e insuficiente inversión en I+D+i para adaptar soluciones globales al contexto local. La incineración masiva, predominante en Europa y Japón, requiere residuos de baja humedad, alta separación en fuente y tipping fees de US$ 60–120/t, condiciones poco frecuentes en la región.

Para los actores estratégicos en el desarrollo de infraestructura —alcaldes, gerentes de empresas de servicios públicos responsables del aseo público, estructuradores de proyectos, fondos de inversión y firmas consultoras de ingeniería— el requerimiento es inequívoco: se demanda una disrupción tecnológica capaz de procesar residuos heterogéneos a escala

industrial. Esta solución debe garantizar viabilidad financiera sin dependencia de subsidios estatales, mitigando la generación de pasivos ambientales a largo plazo.

En esta intersección técnica y financiera, y en lugar de intentar adaptar la incineración convencional al complejo residuo latinoamericano, el SITGER ejecuta la disociación molecular de las fracciones de difícil tratamiento mediante plasma térmico. Esta capacidad se complementa con tratamientos mecánicos y biológicos avanzados (TMB) para optimizar la carga térmica (WtE) y maximizar el rendimiento energético del sistema.

2. EL SISTEMA SITGER: ARQUITECTURA TECNOLÓGICA Y OPERACIONAL

El Sistema SITGER [5], consolida una arquitectura de integración que sinergiza reconocidos y experimentados proveedores globales de la industria. Su diseño operacional persigue la máxima eficiencia exergética en el co-procesamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos Peligrosos (RESPEL), abarcando fracciones hospitalarias, industriales complejas (plásticos de un solo uso, llantas, fármacos) y pasivos petroleros.



Figura 1. Planta de Valorización Integral de Residuos Cali, 2026. – 500 t/d.
Elaboración: propia

Bajo este modelo, el residuo deja de ser un problema sanitario que eliminar, para transformarse en un portafolio de recursos materiales y energéticos. Su despliegue, estructurado financieramente en módulos escalables que van desde las 300 hasta las 1.000 toneladas por día (t/d), garantiza que los componentes críticos operen bajo una secuencia logística automatizada, fluida e interconectada. [6]

Tratamiento Mecánico y Clasificación Avanzada

El primer eslabón de la arquitectura SITGER tiene como propósito estandarizar la complejidad fisicoquímica del residuo. Todo RSU que ingresa al parque tecnológico atraviesa un tren de pretratamiento integral, estructurado secuencialmente en dos etapas que combinan impacto socioeconómico y alta tecnología.

Recuperación Manual y Economía Circular Inclusiva: Bajo la premisa de jerarquización del residuo (reusar, reparar y reciclar), el flujo inicial bruto recibido en un foso de almacenamiento, pasa a una estación de triaje manual enfocada en la recuperación de materias primas y elementos susceptibles de valorización directa. Este componente se ejecuta en alianza estratégica con asociaciones locales de recicladores, formalizando su labor dentro de un esquema de cogestión.

Para garantizar la eficiencia operativa y condiciones laborales dignas, el SITGER les dota de una infraestructura industrial dedicada —bodegas de consolidación, zonas de pesaje y bahías de carga independientes—, así como de facilidades de bienestar humano (áreas de descanso, comedores y servicios sanitarios). Este modelo asegura la independencia organizativa del aliado local y garantiza sus beneficios mediante la administración conjunta del área de economía circular de la planta.

Clasificación Mecánica Automatizada: Una vez extraída la máxima fracción aprovechable de forma manual, el flujo remanente ingresa al tren de pretratamiento mecánico intensivo. Esta segunda fase es desarrollada por un aliado tecnológico europeo que respalda su operación con más de tres décadas de experiencia y un portafolio superior a las 200 plantas operativas a nivel global. [7]

Mediante la integración de equipos de alta precisión —abrebolsas electromecánicos de alto torque, trómeles de clasificación granulométrica, separadores balísticos, sensores ópticos NIR (Infrarrojo Cercano) y sistemas electromagnéticos (overbands y corrientes de Foucault)—, el sistema alcanza tres objetivos operativos críticos:

- **Recuperación comercial inmediata**: Extracción automatizada de metales férricos y no férricos, plásticos rígidos (PET, PEAD), cartón y vidrio para su reintegro directo al mercado secundario. La adaptabilidad de esta ingeniería a la alta heterogeneidad del residuo latinoamericano esta validada a escala industrial en Querétaro, México. Dicha instalación, con una capacidad de procesamiento de 400.000 toneladas anuales, marcó un hito al incorporar la primera línea de separación balística de alta gama en la región, consolidando una tecnología con presencia operativa en los cinco continentes.
- **Segregación de humedad**: Se aísla la fracción orgánica putrescible bajo condiciones higrométricas específicas según requerimientos. Este paso es fundamental, ya que el exceso de agua residual penaliza el balance termodinámico y degrada la eficiencia de los procesos de valorización térmica (producción y calidad de biogás) posteriores.
- **Acondicionamiento del rechazo calórico (Formulación de CDR)**: Procesamiento

del material seco de alto poder calorífico no susceptible de reciclaje mecánico, tales como plásticos multicapa, PVC, textiles sintéticos, celulosas contaminadas (pañales) o maderas. Este flujo de rechazo se separa para transformarlo en un Combustible Derivado de Residuos (CDR) estrictamente homogenizado en granulometría y humedad, garantizando el sustrato térmico ideal para las siguientes fases del sistema.

Tratamiento Biológico y Estabilización

La fracción orgánica separada en la etapa mecánica — generalmente del 50% y que en muchos municipios andinos puede superar el 60% del peso total de los residuos — presenta un alto contenido de humedad y un significativo potencial biológico. Esta fracción se direcciona hacia los sistemas de biometanización desarrollados por el fabricante aliado de Remox para este componente, líder mundial con más de 1.200 proyectos implementados y referencias en plantas de gran escala en California, Texas (USA), Canadá, Italia, España y otras ubicaciones en el resto del mundo. [8]

Mediante robustas prensas de extrusión de alta presión que separan los inertes residuales (microplásticos y arenas) de la biomasa pura, el material orgánico ingresa a reactores (digestores) anaeróbicos de mezcla completa y flujo continuo, lo que permite un tratamiento eficiente, estable y sin interrupciones y de hasta 200 toneladas diarias por cada unidad (reactor) de proceso.

El resultado de este tratamiento biometanogénico controlado, que ocurre en paralelo a la línea principal, es dual:

- Producción masiva de Biogás rico en metano (CH_4) el cual es desulfurado, deshumidificado y preparado para ser inyectado en el anillo de energía.
- Generación de un digestato estabilizado mediante deshidratación y maduración acelerada, se comercializa como compost o biofertilizante agrícola de alto grado.

Tratamiento Térmico mediante Plasma Directo (Phoenix Solutions Co. - PSC)

El eje tecnológico del modelo SITGER se fundamenta en la valorización termoquímica avanzada de la fracción de rechazo, previamente acondicionada como Combustible Derivado de Residuos (CDR), así como corrientes de residuos peligrosos e industriales de alta complejidad (incluyendo neumáticos, borras petroleras y desechos hospitalarios). Esta fase implementa reactores de gasificación asistida por plasma, proporcionados por Phoenix Solutions Co. (PSC), con más de 56 años de trayectoria en investigación, desarrollo e innovación; su tecnología de calentamiento por plasma se originó en desarrollos de su antecesor corporativo, *FluiDyne Engineering* que diseñó la National Transonic Facility del Langley Research Center y otras instalaciones para la NASA, vinculadas al desarrollo de ensayos para simular el calor de la reentrada hipersónica en túneles de viento. **[9]**

PSC cuenta con más de 35 plantas de gran escala a nivel global. Según su récord, ha desplegado esta tecnología en aplicaciones críticas en aplicaciones de fusión de cenizas,

gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU), CDR, residuos orgánicos y biomasas, residuos peligrosos, residuos médicos y procesos industriales y metalúrgicos, así como en el suministro de antorchas de plasma para proyectos desarrollados en Canadá, China, Rumania, Bélgica, España, Japón, Puerto Rico y Estados Unidos, entre otros, para desarrollos realizados por empresas y entidades como Kobe Steel, Kawasaki Steel/Kawasaki Heavy Industries, Baosteel, Kobelco Eco Solutions, Plasco Energy, Enersol, Bellwether, Sound Environmental Resources Beijing, U.S. Navy, U.S. Army y U.S. Air Force; lo que evidencia una trayectoria tecnológica diversificada y una presencia internacional relevante en soluciones basadas en plasma aplicadas al tratamiento de residuos y a procesos térmicos especializados.

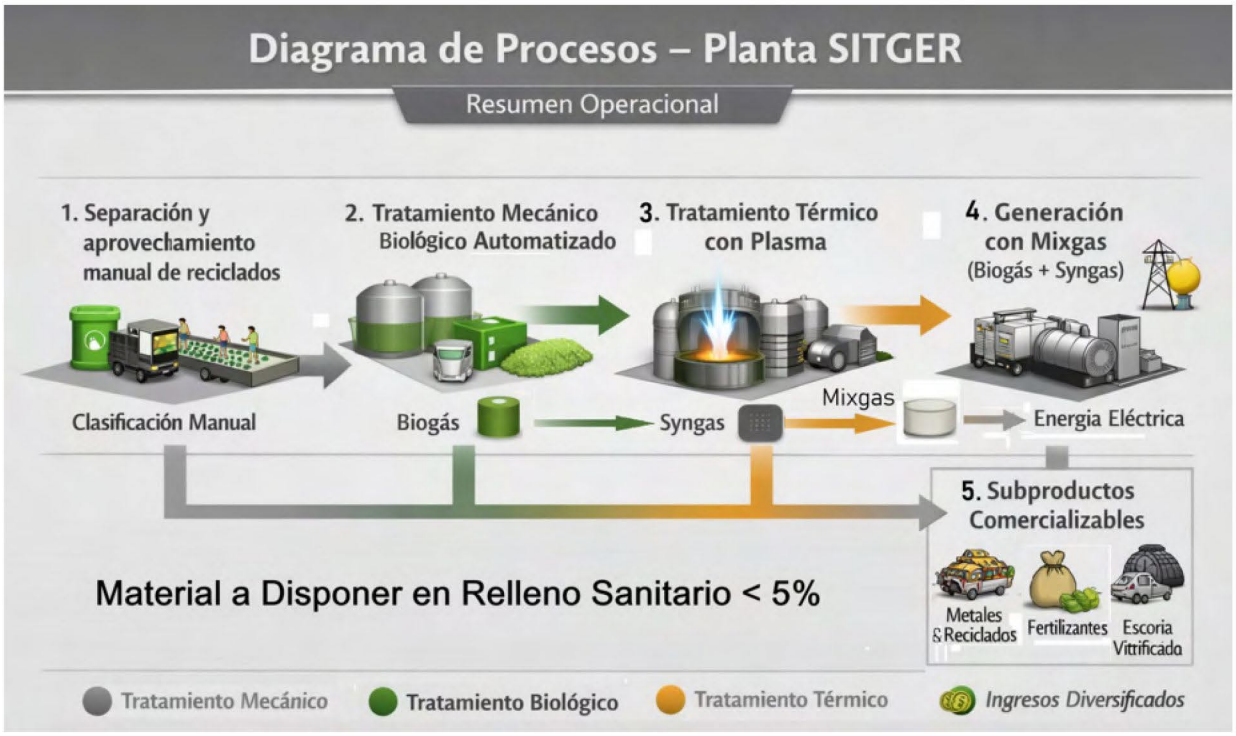


Figura 2. Flujo de Procesos - Planta de Valorización SITGER de REMOX
Elaboración propia.

Termodinámica del proceso. Dentro del reactor hermético, antorchas de arco transferido generan una pluma de plasma que supera los 10.000 °C en su núcleo, permitiendo mantener el lecho térmico de la vasija a temperaturas operativas continuas por encima de los 3.500°C. Sometidos a este estrés térmico en condiciones estequiométricas rigurosamente controladas (ambiente suboxigenado), los residuos no experimentan combustión. En su lugar, el calor extremo induce procesos secuenciales y ultrarrápidos de secado, pirólisis, termólisis y gasificación. Esta alta densidad energética provoca el craqueo térmico y la disociación molecular de los compuestos orgánicos complejos, impidiendo de plano la formación primaria y la síntesis de novo (del latín de novo = *de nuevo* o *desde cero*) se refiere al proceso de construir moléculas complejas a partir de moléculas simples, sin partir de compuestos

preexistentes. Ello ocurre también mediante la reconformación de contaminantes orgánicos persistentes (COP), como dioxinas y furanos (PCDD/F).

En la gasificación por plasma, se utiliza el gas de síntesis (syngas) producido por la planta como materia prima básica para generar energía eléctrica o fabricar nuevos productos químicos o combustibles.

El resultado inmediato de esta fase es:

- Un Gas de Síntesis (Syngas) limpio y de alto valor energético, compuesto mayoritariamente por Hidrógeno (H_2) y Monóxido de Carbono (CO).
- Una pequeña fracción inorgánica (metales pesados, tierras, vidrio remanente, arenas) que se funde instantáneamente en el fondo del crisol y, al enfriarse bruscamente (quenching) y ser extraída, se transforma en una escoria vitrificada inerte, libre de alquitranes o de materiales contaminantes. A diferencia de las cenizas volantes de la incineración, este material no es lixiviable, permitiendo su comercialización directa como agregado de alta resistencia para obras civiles y mezclas asfálticas.

Dificultades para implementación. No obstante, la existencia de referencias industriales y de proveedores especializados no elimina las incertidumbres de implementación de los sistemas de plasma de última generación. Su despliegue comercial sigue enfrentando barreras asociadas a madurez del mercado, altos costos de capital y operación, así como exigencias elevadas de ingeniería para su comisionamiento y operación; por lo que la evaluación tecnológica debe centrarse no solo en el proveedor, sino en la robustez del diseño integral, la calidad del residuo de alimentación, la estrategia de limpieza del gas, la demanda de energía parasitaria o de autoconsumo y la estructura contractual y de garantías del proyecto.

Generación Híbrida de Energía y Ciclo Combinado

La fase culminante de la arquitectura SITGER radica en la consolidación de sus vectores energéticos. El biogás (sintetizado en la etapa biológica) y el gas de síntesis o syngas (producido en el reactor térmico) son sometidos a un riguroso acondicionamiento y filtrado. Posteriormente, convergen en una mezcla gaseosa estabilizada (Mixgas), la cual se inyecta como combustible limpio hacia el bloque de generación eléctrica. [10]

La configuración de este bloque de potencia se parametriza en función de la escala del proyecto y su estructuración:

- **Módulos de escala media (de 200 a 300 t/d)**: Para proyectos moderados de 10-15 MW, la generación se confía a motogeneradores de combustión interna especializados (tipo Genset). Estos equipos cuentan con sistemas de control avanzado capaces de admitir, sincronizar y operar eficientemente con mezclas variables de gases.
- **Proyectos de gran escala (de 500 a 1.000+ t/d)**: Para despliegues mayores, la ingeniería del SITGER transita hacia un esquema de poligeneración bajo el modelo de Ciclo Combinado de Gasificación Integrada (IGCC) [10]. En esta configuración se emplean turbinas de gas de alta eficiencia y el calor remanente en los gases de escape

de estas turbinas alimenta calderas recuperadoras de calor (HRSG), que generan vapor de alta presión que accionan turbinas secundarias.

Esta configuración termodinámica maximiza el rendimiento eléctrico global de la instalación, extrayendo el mayor valor exergético posible del residuo original y alcanzando niveles de eficiencia energética que resultan técnica y físicamente inalcanzables para sistemas de combustión pura.

3. EL SITGER FRENTE A RELLENOS SANITARIOS: INTERNALIZACIÓN DE EXTERNALIDADES

Para dimensionar objetivamente el valor de adoptar una tecnología de CAPEX intensivo como el SITGER, los estructuradores de proyectos deben cuantificar el costo oculto de mantener el modelo de disposición final por enterramiento.

De acuerdo con las evaluaciones multicriterio documentadas en los estudios de prefactibilidad desarrollados por REMOX para Latinoamérica, y con base en los lineamientos metodológicos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) y de la Ley de APP de Colombia, el análisis incorpora indicadores financieros —como la relación Beneficio/Costo (B/C), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN)—, ambientales —como límites de emisiones y reducción de pasivos—, sociales —como afectación a comunidades y participación de actores beneficiarios— y energéticos —como alineación con políticas de transición energética—. Bajo este marco de evaluación, el sistema SITGER muestra ventajas frente al modelo de enterramiento de residuos, particularmente en cinco frentes críticos:

Frente 1. Eficiencia Territorial y Mitigación del Fenómeno NIMBY

Mientras un relleno sanitario demanda vastas extensiones de terreno y compromete su uso de manera prolongada, el SITGER opera en una huella industrial compacta. Al reducir drásticamente el volumen de rechazo y transformar la fracción inorgánica en escoria vitrificada, elimina la presión sobre el uso del suelo. [11]

La arquitectura modular y de disposición vertical del SITGER optimizan su huella de implantación, permitiendo que la Planta de Valorización de Residuos (PVR) se integre de manera funcional en polígonos industriales, ecoparques o parques tecnológicos ambientales. Bajo esta configuración, la demanda de suelo resulta sustancialmente inferior a la de un relleno sanitario convencional: del orden de 6 a 8 hectáreas útiles para una capacidad de 500 toneladas por día (t/d), y de aproximadamente 10 a 12 hectáreas útiles al escalar a 1.000 t/d. En consecuencia, el sistema no solo libera suelo para usos corrientes, sino que también reduce el riesgo de licenciamiento asociado al fenómeno NIMBY (Not In My Back Yard).

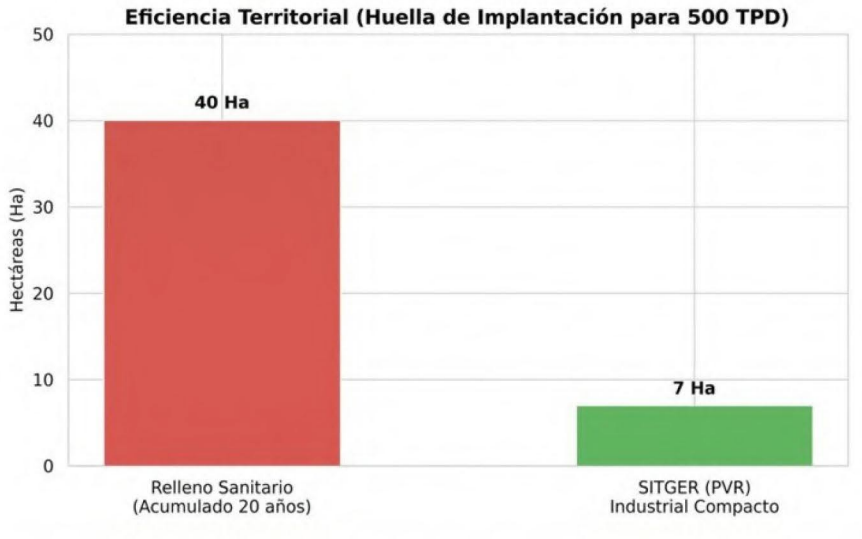


Figura 3. Comparación eficiencia territorial
Elaboración propia.

Frente 2. Erradicación de Pasivos Ambientales

El enterramiento genera lixiviados, las geomembranas y sistemas de impermeabilización pueden degradarse o presentar fallas con el tiempo, generando un problema ambiental y financiero grave a largo plazo. En contraste, el SITGER elimina este riesgo: desvía la fracción húmeda a biometanización, evitando lixiviados, y somete la fracción seca a gasificación por plasma directo, anulando estos impactos.



Figura 4. Comparativo Impactos Relleno vs SITGER de REMOX
Elaboración propia.

Frente 3. Balance de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Bonos de Carbono

En los rellenos sanitarios la descomposición anaerobia descontrolada produce grandes cantidades de metano fugitivo (CH_4), con un potencial de calentamiento global 28 veces el impacto del dióxido de carbono (CO_2). Aun con antorchas de control, los rellenos son

emisores crónicos. El SITGER desvía la biomasa hacia digestores anaeróbicos controlados y gasifica el resto; con ello, evita al máximo emisiones fugitivas y genera créditos de carbono certificables, abriendo una nueva línea de monetización en el flujo de caja del proyecto.

Frente 4. Riesgos Sanitarios, Olores y Proliferación de Vectores

La disposición final de residuos en rellenos sanitarios favorece la proliferación de roedores, aves e insectos, además de generar olores ofensivos que deterioran la calidad de vida y deprimen el valor del suelo circundante. La arquitectura SITGER, por el contrario, opera bajo un estándar de nave industrial en presión negativa, donde las etapas de descarga, separación y tratamiento se desarrollan en espacios confinados. El aire captado se trata mediante sistemas de filtración antes de ser devuelto al origen. El resultado es una instalación inodora desde el exterior, compatible con zonas industriales y semiurbanas.

Frente 5. Transición del Desaprovechamiento a la Economía Circular

El relleno sanitario es, por definición, un cementerio de recursos. Entierra materiales como plásticos de alto valor energético y nutrientes orgánicos que se pierden de forma definitiva. En suma, es un modelo de gasto puro (sumidero de capital) sostenido exclusivamente por la tarifa de recolección cobrada al ciudadano. En contraste, la arquitectura SITGER, implementada en Plantas de Valorización de Residuos (PVRs), transforma la energía primaria contenida en los residuos en electricidad firme o combustibles sintéticos —como hidrógeno o metanol— aprovechándolos como Fuente No Convencional de Energía Renovable (FNCER). De este modo, sustituye fuentes fósiles, diversifica ingresos y convierte un pasivo ambiental en economía circular.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO TERMOQUÍMICO Y FINANCIERO: INCINERACIÓN CONVENCIONAL (WTE) VS. GASIFICACIÓN POR PLASMA (GPAE)

Para comprender el núcleo de la propuesta de valor del SITGER, resulta imperativo profundizar en las diferencias estructurales, operativas y termodinámicas entre la incineración de parrilla móvil —estándar histórico predominante en el sector WtE— y la gasificación térmica avanzada por plasma.

Aunque la pirólisis también forma parte de las tecnologías de valorización térmica, no se incorpora en el análisis comparativo, debido a que su desempeño frente a residuos sólidos urbanos mezclados presenta restricciones en términos de humedad, heterogeneidad del residuo y exigencias de pretratamiento, lo que limita su aplicabilidad como alternativa robusta a gran escala para el tratamiento de los RSU.

El Paradigma de la Incineración: Combustión Masiva

La incineración es un proceso de oxidación total que emplea un exceso de aire frente a la mezcla estequiométrica ideal. Su objetivo primario ha sido la reducción física del volumen del residuo (entre 70% y 80%) y la liberación exotérmica de calor.

Para evaluar la viabilidad de replicar este modelo europeo en el contexto latinoamericano, REMOX y el Departamento de Energías Renovables (Laboratorio de Plantas Térmicas y Mecanismos de Desarrollo Limpio - MDL) de la Universidad Nacional de Colombia (Campus Bogotá), llevaron a cabo una visita técnica internacional asistida por personal técnico responsable en las plantas referentes del norte de Europa: ARC (CopenHill) en Copenhague, Dinamarca y la planta IRU en Tallin, Estonia.

Los resultados evidenciaron que, si bien la incineración tiene una alta viabilidad técnica y beneficios bajo parámetros europeos, presenta barreras estructurales, termodinámicas y financieras profundas que desaconsejan su aplicación directa en economías de libre mercado en nuestra región:

- **Corrosión Severa y Baja Eficiencia Eléctrica**: El ataque químico continuo de gases ácidos —especialmente el cloruro de hidrógeno (HCl)— obliga a limitar drásticamente la temperatura y presión del vapor en las calderas. Esta restricción de diseño castiga la eficiencia termodinámica, estancando la eficiencia eléctrica neta en un pobre rango del 15% al 25%, a la vez que genera altos costos operacionales para mantener y reponer las instalaciones afectadas por este concepto.
- **Emisiones y De Novo Synthesis**: El ambiente oxidativo, a temperaturas medias propicia reacciones colaterales, que forman óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SOx). Aún más crítico, facilita la recombinación de moléculas cloradas en la zona de enfriamiento (de novo synthesis), generando dioxinas y furanos. El cumplimiento de las normas ambientales implica altas inversiones en infraestructura de tratamiento; así como mayores costos operacionales para el mantenimiento de estos sistemas y la disposición de los residuos contaminantes capturados.
- **Asimetría Comercial y la "Ilusión" del Distrito Térmico**: El éxito financiero de las plantas visitadas en Europa radica en su capacidad de vender energía calórica (Calefacción Urbana o District Heating), la cual se comercializa a precios proporcionalmente ventajosos relativos a la electricidad. En la planta de IRU (Tallin), el calor representa casi el 48% de la eficiencia energética recuperada. En Latinoamérica, la ausencia de un mercado masivo para la calefacción urbana elimina esta crucial línea de ingresos, comprimiendo el EBITDA y extendiendo el retorno de inversión (Payback) a unos inviables 17 años bajo condiciones puras de mercado.
- **La Carga del CAPEX no Subvencionado**: En el modelo europeo, las inversiones de capital (CAPEX) para este tipo de infraestructuras suelen contar con un respaldo significativo del Estado nacional, de las regiones o de los municipios competentes. Este esquema permite que el operador destine la mayor parte de sus ingresos —provenientes

de tarifas de entrada y venta de la energía generada según las eficiencias de la tecnología— a cubrir la operación, el mantenimiento y la rentabilidad del proyecto, sin soportar una presión significativa por reposición de capital o servicio de deuda.

De acuerdo con la información obtenida in-situ, hoy día, una planta de escala similar a la de Estonia (250.000 t/año) implicaría un CAPEX cercano a USD 280 millones proyectados para 2026. Las simulaciones realizadas por el autor para alcanzar el cierre financiero permiten verificar que asumir una inversión de esta magnitud desde el sector privado, considerando los rendimientos energéticos actuales y sin participación pública mediante inversiones directas, subsidios al servicio, créditos blandos u otros mecanismos de apoyo adicionales a las meras exenciones fiscales, comprometería de manera severa el flujo de caja y la viabilidad financiera de un proyecto de este tipo.

- **Castigo Estructural al OPEX (Reactivos y Cenizas):** La viabilidad operativa de la incineración (OPEX) se encuentra severamente afectada por dos factores estructurales. En primer lugar, exige la incorporación de una costosa "planta dentro de la planta" destinada a la depuración de gases, la cual demanda un consumo intensivo de reactivos químicos, tales como cal pulverizada, carbón activado e inyección de amoníaco mediante sistemas SNCR. En segundo lugar, implica la gestión de emisiones: cenizas volantes (fly ash) y cenizas de fondo (bottom ash), consideradas residuos peligrosos por su concentración de metales pesados y compuestos volátiles. Su disposición en celdas de seguridad es altamente costosa lo que sumado a las bajas tarifas de disposición (tipping fees) que predominan en los municipios latinoamericanos, deteriora de forma crítica la ecuación operativa y compromete la viabilidad financiera del modelo.

Ventajas del SITGER: Gasificación por Plasma Directo

En contraste con la incineración convencional, el núcleo térmico del SITGER opera mediante la inyección de energía exógena de altísima densidad a través de antorchas de plasma (capaces de alcanzar temperaturas superiores a 10.000 °C, suficientes para inducir la atomización de la materia). El sistema funciona con una fracción marginal de oxígeno, inhibiendo la combustión tradicional.

- **Termólisis en lugar de combustión**: En el reactor de gasificación por plasma directo, el residuo no experimenta combustión masiva, sino una rápida disociación termoquímica bajo condiciones de oxígeno limitado. En este entorno, los compuestos orgánicos que pueden actuar como precursores de dioxinas y furanos se descomponen térmicamente, mientras que la baja disponibilidad de oxígeno reduce su potencial de recombinación. Para minimizar la reconformación secundaria, el diseño del sistema evita tiempos de residencia significativos en la ventana térmica crítica de aproximadamente 200–500 °C, mediante recuperación térmica a alta temperatura y una etapa posterior de enfriamiento rápido del gas (quenching), seguida del acondicionamiento y limpieza correspondientes.

- **Síntesis de combustible limpio (Syngas)**: En lugar de generar un gas de escape ácido y corrosivo, el plasma directo produce un gas de síntesis que puede limpiarse fácilmente mediante un lavado riguroso previo a su aprovechamiento. Esto elimina la necesidad de complejos y costosos trenes de limpieza postcombustión, característicos de los sistemas de incineración y responsables de una parte significativa de su OPEX. Además, al combinarlo con el biogás proveniente del proceso biológico de biometanización, se incrementa el rendimiento en la generación de energía, principal fuente de ingresos que sustenta la viabilidad financiera del sistema.
- **Eficiencia superior e independencia del calor**: Al aprovechar un syngas previamente purificado, en motores o turbinas de ciclo combinado (IGCC), la eficiencia eléctrica neta con el syngas del plasma directo, más el biogás, puede elevarse a rangos del 35% al 42%, o sea un diferencial neto superior al 60% al 120% en cantidad de energía por tonelada procesada. Este desempeño compensa la ausencia de mercados de calefacción urbana en Latinoamérica, posibilitando la autosuficiencia y solidez comercial del modelo. [6]
- **Vitrificación y economía circular**: La exposición del material inorgánico al reactor de plasma lo funde por completo, encapsulando permanentemente los metales pesados y otros contaminantes sólidos a temperatura ambiente en una matriz vítrea amorfa. Este subproducto inerte supera las estrictas pruebas de lixiviación de la EPA, transformando el pasivo tóxico y oneroso de las cenizas volantes en un vitrificado equivalente a un agregado pétreo de alto valor.

Otras alternativas de tratamiento térmico

- **Pirólisis:** Aunque en ciertos escenarios su rendimiento energético se aproxima al de la incineración, presenta limitaciones relevantes para residuos urbanos mezclados. Destacan su alta sensibilidad a la humedad y heterogeneidad, la necesidad de pretratamientos exigentes, la formación de alquitranes y subproductos que complican la depuración del gas, y menor robustez operativa ante variaciones de composición. Estas restricciones limitan su aplicabilidad a gran escala en la región, donde predominan residuos poco segregados y con elevada fracción orgánica húmeda.
- **Gasificación por plasma indirecto (GasOff)**: Es pertinente señalar una diferencia fundamental frente a los sistemas de gasificación por Plasma Indirecto o GasOff [12]. En estos, la masa de RSU se somete primero a una gasificación convencional, y el plasma se aplica únicamente al gas de síntesis resultante. Si bien este gas puede alcanzar altos niveles de limpieza, presenta una desventaja crítica: la reducción significativa de su poder calorífico debido a la incorporación, en esta etapa, de elevadas concentraciones de nitrógeno (N_2), que superan el 45 % del flujo másico combustible.

  El nitrógeno, al ser un gas inerte, no aporta energía al gas limpio final y, por el contrario, diluye su valor energético, afectando de manera directa la eficiencia global del proceso.

Conclusión de viabilidad técnico-comercial

El análisis comparativo que se ha presentado muestra que la incineración convencional, aunque técnica y ambientalmente controlable y rentable en Europa, no parece ser directamente replicable en Latinoamérica bajo esquemas de libre mercado. Su dependencia de subsidios públicos, mercados de calefacción urbana, altas tarifas de disposición y complejos sistemas de depuración, sumada a su baja eficiencia eléctrica neta y a su elevada carga de OPEX y CAPEX, compromete su bancabilidad en un contexto de residuos con alta humedad, baja segregación en fuente y restricciones tarifarias estructurales.

En contraste, la gasificación por plasma directo, integrada en el modelo SITGER, presenta una mayor adecuación al contexto regional. Su operación bajo un paradigma reductor (disponibilidad limitada de oxígeno) favorece la producción de syngas, mejora la eficiencia energética, reduce la dependencia de ingresos por venta de calor y disminuye la complejidad del tratamiento de emisiones respecto de la incineración convencional. Adicionalmente, permite transformar una parte de la fracción inorgánica en una escoria vitrificada potencialmente aprovechable, según las especificaciones técnicas y ambientales aplicables. Además, la sinergia con la separación mecánica avanzada y la biometanización de la FORSU, que permite retirar la humedad limitante, estabiliza la fracción de rechazo y maximiza el rendimiento global del sistema. En términos comerciales, SITGER no depende únicamente de la tarifa de tratamiento, sino de una estructura diversificada de ingresos basada en electricidad, combustibles limpios derivados de syngas y biogás, materiales reciclables, fertilizantes industriales, escoria vitrificada y créditos de carbono.

5. REFERENCIA COMPARATIVA: PLANTAS WTE EUROPA VS. SITGER LATAM

Para la gerencia de ingeniería y los fondos de estructuración, es vital establecer un marco comparativo entre la referencia mundial operativa europea y la vanguardia de los proyectos americanos. A través de auditorías técnicas presenciales realizadas a Europa, la vigilancia tecnológica a nivel mundial y el modelaje exhaustivo de proyectos en América, emerge el siguiente contraste estructural y de viabilidad.

El Modelo WtE Europeo (Incineración)

- **Planta IRU – Enefit Green (Tallin, Estonia):**

Instalación que representa el estándar maduro de la incineración con parrilla móvil, demostrando ser tecnológicamente robusta frente a residuos bálticos que poseen un contenido orgánico moderado (~40%) y un poder calorífico mayor de 10.4 MJ/kg según TalTech / Enefit Green.

Aunque a partir de 250.000 t/año la planta genera 17 MW de electricidad continua, su eficiencia energética neta y su ingreso financiero clave depende de la cogeneración (CHP),

impulsando una extensa red urbana de calor (District Heating) con una capacidad de 50 MW térmicos (Datos obtenidos durante visita técnica presencial, REMOX–UNAL, diciembre 2025. Verificables en reportes de segmento CHP de Enefit Green AS.). La venta de esta calefacción distrital representa casi el 75% de la energía útil recuperada, inyectando al proyecto ingresos comerciales por €10,9 millones anuales, que sumados a la venta de electricidad (€5,7 millones) y la recuperación de metales (€0,7 millones), alcanzan ingresos operativos directos de €17,3 millones al año. [13]

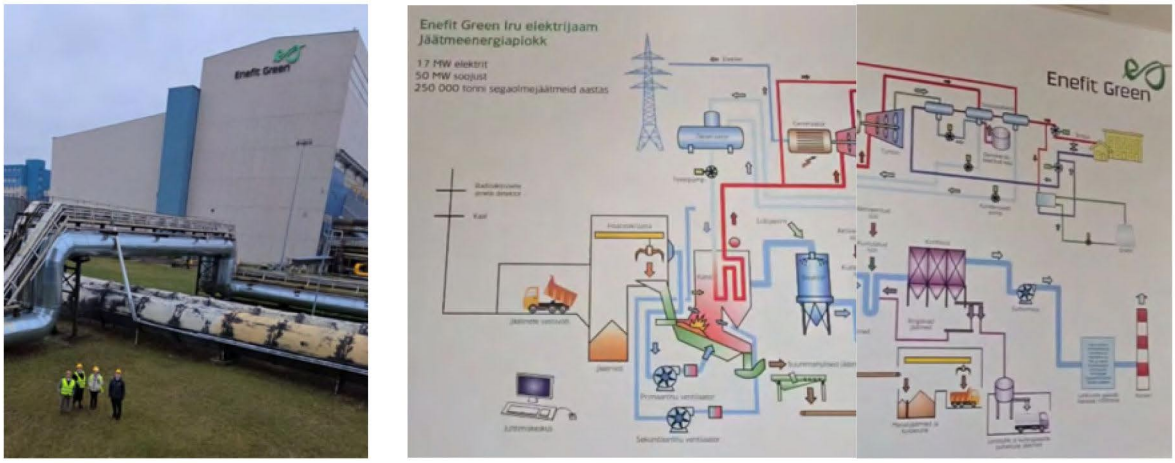


Figura 5. Visita a Planta de Incineración IRU-Enefit Green, en Tallin, Estonia. Elaboración propia. Visita de diciembre de 2025.

Adicionalmente, en IRU se constató que el modelo exige una alta tarifa de disposición (Gate Fee), cobrando entre 80 y 100 euros por tonelada ingresada, según el tipo de cliente [14]. Sin embargo, sus elevados costos operativos (OPEX), que oscilan entre 22 y 26 millones de euros anuales [15], están severamente castigados por el intensivo consumo de reactivos químicos para purificar los gases y el oneroso confinamiento de sus cenizas volantes, cuyo tratamiento como residuo peligroso cuesta hasta €205 por tonelada [16].

Este desequilibrio operativo se traduce en un EBITDA anual negativo de aproximadamente -6,7 millones de euros; el modelo solo resulta viable si se incluyen tarifas de entrada elevadas y mecanismos de apoyo público. La conclusión técnica es inequívoca: a pesar de los sólidos ingresos energéticos y las tarifas restrictivas, este modelo de incineración requiere financiación flexible, subsidios estatales para gastos de capital y la aceptación de un período de recuperación de la inversión prolongado de entre 15 y 20 años, condiciones difíciles de replicar en América Latina.

- **Planta ARC- Amager Bakkeen / CopenHill (Copenhague, Dinamarca)**

Si bien constituye un ícono arquitectónico global —célebre por la integración urbana de una pista de esquí en su cubierta—, la auditoría de su modelo operativo y financiero revela barreras estructurales para Latinoamérica. Su sostenimiento exige una tarifa de disposición (Gate Fee) cercana a los 65 €/tonelada [17] (una cifra inviable en nuestra región) y la

implementación de costosos trenes de depuración química intensiva para el abatimiento de emisiones tóxicas.

Además, la instalación procesa exclusivamente la fracción resto, asumiendo un escenario donde la sociedad civil realiza una gran proporción de separación en la fuente y los residuos orgánicos son derivados a plantas externas de transformación en fertilizantes y biometanización. Operativamente, para garantizar el punto de equilibrio volumétrico, la planta importa residuos desde Italia y Reino Unido, a la par que exporta de manera transfronteriza sus cenizas volantes hacia Noruega, donde son utilizadas industrialmente como agente neutralizante, catalogadas como residuos peligrosos por su alta concentración de metales pesados. [18]



Figura 6. Visita a Planta de Incineración ARC-Amager Bakkeen, CopenHill, Dinamarca. Elaboración propia. Visita de diciembre de 2025.

La realidad es contundente: el estándar y regulaciones europeas de incineración demanda una economía de altos ingresos en un escenario de gran conciencia ambiental de la sociedad, con la capacidad institucional de subsidiar la factura de sus externalidades ambientales.

Primeros SITGER en Latam / USA (Gasificación Integrada Multilínea):

- **PVR-Cali (Colombia) y Arequipa (Perú)**: Proyectos americanos modelados a escala modular de 300 a 500 t/d. La infraestructura de plasma se protege a sí misma con la separación previa. En el caso de Arequipa, para 500 t/d, la prefactibilidad proyecta el CAPEX en el orden de los US$ 250 a U$ 260M [11]. Este volumen de inversión se justifica y retorna sostenido no solo en la tarifa pública, sino en la emisión de certificados de reducción de CO2, en la venta en bloque ininterrumpida de 25 a 30 MW de potencia base (energía firme o no intermitente), y en el procesamiento marginal pero rentable de llantas y desechos médicos.

- **Miami (USA)**: Con el inicio de los diseños preliminares para proponer solucionar a nivel masivo (4 módulos de 1.000 t/d) y con mejores condiciones económicas para el cierre financiero, se valida la escalabilidad operativa de los reactores de plasma directo. En el condado Dade, la oposición ciudadana bloquea nuevas incineradoras tras el incendio de la planta de El Doral; este rechazo se fundamenta en la percepción de riesgo

ambiental y sanitario, así como en la desconfianza hacia tecnologías asociadas a emisiones atmosféricas contaminantes y olores; y los residuos secundarios (cenizas). La tecnología de plasma surge como una alternativa estratégica para recuperar capacidad de tratamiento con bajas emisiones y residuos secundarios mínimos, ofreciendo una solución limpia, eficiente, con amplios beneficios energéticos y socialmente aceptable para la gestión de residuos urbanos.

Esta fase inicial confirma que, ante los mayores flujos de residuo a procesar, el aprovechamiento de altos volúmenes de mixgas (biogás + syngas) limpio en turbinas de ciclo combinado, genera márgenes de flujo de caja capaces de captar la atención de los capitales de infraestructura de Private Equity de primer nivel global.

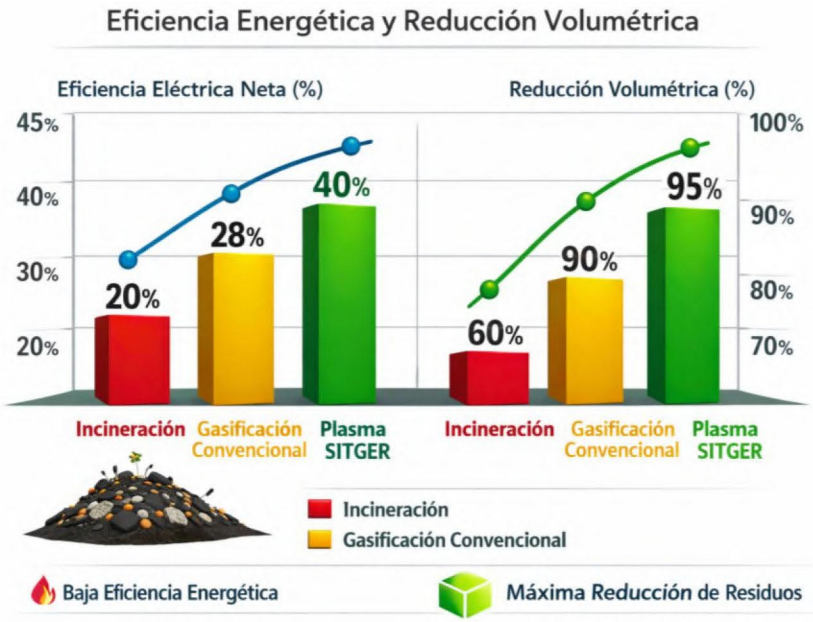


Figura 7. Eficiencia Energética Comparada SITGER de REMOX 5
Elaboración propia.

Tabla 1. Comparativa de enfoque tecnológico y modelos de negocio (Europa vs. Latam)

Variable Crítica de Análisis	Referentes Europeos (Copenhague / Tallin)	Proyectos SITGER (Cali, Arequipa, Miami)
Arquitectura de Tratamiento	Incineración Masiva (Horno de Parrilla móvil) - Una sola línea bruta.	Multilínea Inteligente (Separación Mecánica+ Biometanización + Plasma).
Escala / Flexibilidad Dinámica	Alta capacidad (1.000 - 2.000 t/d), poca flexibilidad de escala ante variaciones.	Modular (500 a 1000 t/d). Fácilmente escalable mediante reactores en paralelo.
Gestión Técnica de Cenizas	Genera cenizas volantes tóxicas (RESPEL) y cenizas de fondo que exigen vertederos especiales y licencias complejas.	Reduce la generación de residuos sólidos. Producción de escoria vitrificada inerte y comercializable sin restricciones según normativas locales.

Variable Crítica de Análisis	Referentes Europeos (Copenhague / Tallin)	Proyectos SITGER (Cali, Arequipa, Miami)
Tolerancia a la Humedad del RSU	Moderada a baja. Depende altamente de la separación ciudadana previa y disciplinada de los orgánicos.	Alta. La humedad crítica (orgánicos) se extrae forzosamente en la Fase 1 mecánica y se biometaniza. El Plasma recibe combustible seco.
Fuentes de Ingreso (Drivers del Flujo de Caja)	Altas tarifas de disposición ciudadana (ej. 64 €/t) + Venta de Electricidad subsidiada + Ingresos por Red de Calor (*District Heating*).	Tarifas privadas corporativas altas (RESPEL/Industria) + Electricidad PPA (Syngas) + Bonos Verdes *CO2* + Reciclables.
Exigencia operativa y dependencia de integración	Tecnología madura, operación estandarizada, pero con alta carga en control de emisiones y cenizas.	Mayor complejidad de integración y necesidad de personal especializado en plasma, syngas cleaning, control térmico y mantenimiento predictivo.
Riesgo Regulatorio y Ambiental	Estricta regulación y constante riesgo de cierre por picos de emisiones de furanos/dioxinas debido a la combustión.	Potencial ventaja regulatoria: menores riesgos estructurales de emisiones peligrosas, facilidad para clasificar en taxonomías verdes de la banca multilateral.

6. LOGÍSTICA INTELIGENTE Y SOSTENIBILIDAD OPERACIONAL

Un componente crítico, y con frecuencia subestimado en los megaproyectos WtE, es el impacto económico del consumo energético parasitario de la propia planta —es decir, el autoconsumo de motores, bombas y sistemas auxiliares—, así como la eficiencia de las operaciones logísticas externos en los accesos y procesos previos de abastecimiento como internos en el desempeño de la operación del sistema. De acuerdo con las proyecciones del Estudio de Eficiencia en Procesos Internos y Sostenibilidad, elaborado como parte del diseño conceptual de una Planta de Valorización Energética de Residuos (PVR) en la región, el modelo SITGER de REMOX incorpora vectores logísticos de alta tecnología, depurados y optimizados a lo largo de años de experiencia en plantas WtE del norte de Europa y en menor escala de EE.UU. Esta integración permite blindar los márgenes operativos mediante la aplicación de estrategias y procesos logísticos compatibles con las tecnologías integradas, orientados a maximizar la eficiencia energética, reducir costos operacionales y fortalecer la sostenibilidad integral del sistema. [19]

Eficiencia logística externa e interna (turn-around)

El modelo contempla el ingreso diario de grandes volúmenes de material. En proyectos de entre 500 y 1.000 t/d, la coordinación de cientos de camiones compactadores municipales y vehículos industriales exige una operación altamente sincronizada. Para ello, el sistema incluye una bahía de recepción multipuerta con básculas dinámicas de pesaje en movimiento, sistemas automatizados de lectura de placas (LPR) y fosos de descarga estrictamente segregados: por un lado, los RSU convencionales; por otro, los RESPEL hospitalarios e industriales en condiciones de bioseguridad, evitando así riesgos de contaminación cruzada.

El tiempo de rotación o turn-around time —desde el ingreso del vehículo hasta su salida, incluyendo pesaje y descarga— se diseña para mantenerse consistentemente por debajo de 15 minutos. Este parámetro evita congestiones operativas que, en los sistemas tradicionales de disposición final, suelen traducirse en sobrecostos significativos para las flotas de las empresas públicas de aseo. A nivel interno, la incorporación de fosos con puentes grúa automatizados, equipados con pulpos bivalva autónomos, y de bandas transportadoras cubiertas minimiza las pérdidas operativas y reduce prácticamente a cero el derrame de material dentro del predio. [19]

Sinergia fotovoltaica y resiliencia energética (2.000 m² de cubierta solar)

Una planta SITGER, basada en tecnologías integradas de valorización, presenta una demanda eléctrica intensiva tanto en sus etapas de arranque como en sus operaciones auxiliares y periféricas, incluyendo los desgarradores de la línea de separación mecánica, los agitadores de los reactores biológicos y las fuentes de poder de las antorchas de plasma. Aunque el sistema está diseñado para generar energía suficiente para su autoabastecimiento e incluso exportar excedentes comercializables, los picos de arranque, las cargas críticas y los servicios auxiliares exigen condiciones permanentes de estabilidad, respaldo y calidad del suministro eléctrico.

A partir del análisis de sostenibilidad logística y de la modelación de la integración arquitectónica de un sistema de generación fotovoltaica (FV), previsto sobre aproximadamente 2.000 m² de cubiertas industriales en las naves del parque tecnológico para una primera etapa de 500 t/d, se concluye que esta infraestructura no sustituye el proceso térmico principal, pero sí cumple funciones críticas dentro de la operación integral de la planta:

- Reduce el consumo eléctrico parasitario, al suministrar energía limpia y distribuida para iluminación, ventilación de naves, edificio administrativo, laboratorio interno de calidad y centro principal de control (SCADA), principalmente durante el periodo diurno y, de manera complementaria, en esquemas de respaldo auxiliar.
- Mejora la resiliencia operativa de la instalación frente a fluctuaciones transitorias de la red nacional o local, contribuyendo a sostener la continuidad de cargas esenciales y apoyando maniobras de recuperación operativa y black-start ante interrupciones zonales.
- Disminuye la demanda instantánea sobre la red en horas pico, suavizando el perfil de carga de la planta y reduciendo la exposición a penalizaciones o sobrecostos asociados a consumos máximos y variaciones bruscas de potencia.
- Aumenta la confiabilidad de los sistemas de control, monitoreo y seguridad, al reforzar la alimentación de equipos críticos de automatización, instrumentación, telecomunicaciones y supervisión operacional.
- Reduce la dependencia de generación auxiliar fósil, minimizando el uso de grupos electrógenos de respaldo para servicios complementarios y mejorando el desempeño energético global del complejo.

- Fortalece el desempeño ambiental del proyecto, ya que el uso de energía fotovoltaica para cargas auxiliares reduce la huella de carbono del autoconsumo, mejora los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) [20] [2] y aumenta el potencial de certificación y monetización de créditos de carbono, en concordancia con los lineamientos aplicables de la CMNUCC y las metodologías de referencia del IPCC.

7. BENCHMARK AMPLIADO DE TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO

Para las bancas de inversión, estructuradores e ingenieros de fase conceptual, la comparación entre el entierro físico, la quema controlada (incineración) y la disociación molecular (gasificación plasma directo) requiere definir variables objetivamente medibles y verificables. Contrastando los informes de visitas de investigación (2025), vigilancia tecnológica previa (2021), los análisis del ciclo de vida documentados por centros tecnológicos europeos (como Eurecat) e informes sobre economía energética en la literatura científica y sectorial, se consolida un Benchmark definitivo en 2 niveles operacionales: Técnico/ambiental y Económico/sostenible.

Comparativa técnica y físico química directa

El análisis traza con claridad meridiana el contraste termodinámico y medioambiental de las tres principales alternativas viables que enfrentan las administraciones regionales de Latam, a partir de la gran cantidad de propuestas tecnológicas diferentes que llegan hoy día a un territorio inexplorado pero en desarrollo y ávido de encontrar la mejor solución acorde con las condiciones existentes en los diversos aspectos técnicos, de características de los residuos, de las infraestructuras existentes, necesidades energéticas, y otros aspectos a evaluar.

Tabla 2. Análisis de Alternativas:
Relleno vs. Incineración vs. Gasificación vs. Gasificación por Plasma

Parámetro Evaluado	Relleno Sanitario	Incineración WtE Tradicional (Modelo Europeo)	Gasificación Convencional	Gasificación Plasma (Arquitectura SITGER)
Principio Físico y Químico	Contención en celdas y lenta descomposición biológica anaerobia lenta y descontrolada.	Combustión oxidativa masiva con exceso forzado de aire.	Oxidación parcial / gasificación termoquímica en atmósfera reductora con oxidante limitado (subestequiométrico) .	Termólisis / disociación molecular profunda mediante calor eléctrico extremo en atmósfera sub-oxigenada.
Rango de Temperaturas Operativas	Ambiente (calor microbiano interno marginal).	850 ºC a 1.100 ºC.	400 °C a 900 °C (típicamente >750 °C).	Núcleo del Arco Eléctrico: >10.000 ºC / Atmósfera del Reactor continuo: >3.500 ºC.

Parámetro Evaluado	Relleno Sanitario	Incineración WtE Tradicional (Modelo Europeo)	Gasificación Convencional	Gasificación Plasma (Arquitectura SITGER)
Índice de Reducción Volumétrica	Prácticamente nula (solo compactación mecánica).	70% a 80% (el volumen restante es altamente problemático).	85–90%; persisten char, cenizas y alquitranes.	>95% (máxima reducción posible en ingeniería de materiales).
Destino Físico y Pasivo Final	Generación perpetua de lixiviados tóxicos que requieren tratamiento por décadas tras el cierre.	Cenizas volantes (tóxicas, requieren celdas de seguridad) y cenizas de fondo (requieren relleno tradicional).	Generación de char, cenizas y alquitranes de conversión incompleta, con disposición controlada posterior.	Escoria vitrificada inerte tipo obsidiana, no lixiviable, apta para obras públicas.
Perfil de Emisiones Atmosféricas	Emisión constante de metano, COV y olores ofensivos en radios kilométricos.	Potencial formación de dioxinas/furanos, NOx, SOx, gases ácidos y COV; depende del control del proceso.	Menores que en incineración, pero pueden presentarse NOx, SOx, COV, hidrocarburos, material particulado, alquitranes y, en RSU, dioxinas/furanos.	Syngas acondicionado; la temperatura extrema limita la persistencia de compuestos tóxicos complejos.
Eficiencia de Generación Energética	Marginal (motores acoplados a biogás capturado, con eficiencias pasivas del 35–40% del gas).	Media/baja (20–25% neta), restringida por ciclo Rankine y corrosión por HCl.	Intermedia (28–30% neta); recuperación energética superior a incineración por menores pérdidas térmicas.	Alta (35–42% neta). Syngas purificado en turbinas aero-derivadas o motores bajo ciclo IGCC. Mayor generación en plasma directo vs. gas-off por menor contenido de N_2.

La tabla 2 indica que la gasificación por plasma presenta el mayor rendimiento combinado:

- La gasificación por plasma bajo la arquitectura SITGER ofrece la mayor eficiencia en la generación de energía final, alcanzando un 35-42% neto, en comparación con el 28-30% de la gasificación convencional y el 20-25% de la incineración convencional de residuos para la generación de energía. Esto representa una mejora de la eficiencia respecto a las otras alternativas de tratamiento y valorización térmica, lo que confirma su rendimiento superior en la conversión de energía, además de sus ventajas ambientales y de reducción de volumen.
- Aunque la incineración convencional de residuos para la generación de energía supone una clara mejora con respecto al vertido en rellenos sanitarios, aún presenta importantes limitaciones estructurales: menor eficiencia eléctrica, dependencia de la combustión oxidativa, posible formación de contaminantes atmosféricos complejos y generación de cenizas que requiere un manejo y eliminación controlados.
- El vertido en rellenos sanitarios es la alternativa menos favorable desde una perspectiva

técnica, ambiental y energética, ya que prácticamente no reduce el volumen, genera lixiviados y emisiones persistentes de metano, y no aprovecha el contenido energético de los residuos. Por lo tanto, la tabla sugiere una transición hacia esquemas de recuperación avanzados, donde la gasificación por plasma ofrece una ventaja comparativa.

	DIRECT PLASMA ARC GASIFICATION	PLASMA GAS-OFF	CONVENTIONAL GASIFICATION	PYROLISIS GASIFICATION	INCINERATION
OPERATION TEMPERATURE	>7.000 °C	>6.000 °C	>750 °C	400°C - 900°C	850 °C - 1.100 °C
SOLID RESIDUES	Solid Vitrified (by-product)	Unreacted Carbon	Incomplete combustion, Tar	Liquid and oil char	Fly and bottom ash
PRODUCT (GAS) OBTAINED in the THERMAL TREATMENT STAGE	Syngas (High heating value content)	Syngas N_2 > 45% *	Syngas	Syngas	Flue gas
EMISSIONS (THERMAL TREATMENT STAGE)	None	None	Dioxines and furans, NOx, COV	Dioxines and furans, NOx, COV	CO, CO2 and acid gases, dioxines and furans, COV[3]
EMISSIONS (VALORISATION STAGE)	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2[2]
THERMAL EFFICIENCY	90%	90%	72%	75%	70%

[1] Direct plasma gasification requires of a lower gas flow to treat the same amount of waste [2] Due to the combustion of natural gas
[3] The amount of toxic gases produced in the incineration is a function of the combustion type, temperature, gas cooling system and other factors
SOURCES: Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy (EU Commission) * N_2 measured in Indirect Gasification (Nota del Autor)
Treatment and valorisation of waste (Xavier Elias, 2005)

Figura 8. Comparación de tecnologías de valorización térmica de residuos. Elaboración propia a partir de [23, 12]

Benchmarking económico y de sostenibilidad de planta completa

La barrera histórica del plasma frente a otras tecnologías hasta ahora ha sido atribuida a la percepción sobre su supuesto costo de inversión excesivo (*CAPEX*), pero sin considerar la productividad unitaria de la inversión. Sin embargo, análisis recientes de ciclo de vida e ingeniería económica (basados en simuladores paramétricos de plantas termoquímicas y referencias como el *Life cycle costing for plasma gasification* del centro Eurecat) [20] permiten cuestionar este mito, si la métrica se evalúa a costo total de planta completa instalada y puesta en marcha; así como con el costo nivelado de producción de energía. Para un estándar industrial de planta de 500 t/d, las exigencias regulatorias sobre la incineración son igualmente severas a las de las tecnologías del SITGER; solo el costo de capital de sus extensos trenes de depuración química de gases iguala o supera el costo del equipo compacto de antorchas de plasma.

En consecuencia, el análisis técnico-económico se restringe a la Incineración frente a la Gasificación por Plasma, por ser las tecnologías con mayor capacidad de respuesta ante la escala utility (generación de energía a un nivel masivo). Se descartan la gasificación convencional y la pirólisis, dado que sus limitaciones en rendimiento energético y sus pasivos ambientales por subproductos tóxicos las sitúan en una posición de muy alta desventaja competitiva para proyectos de alto volumen.

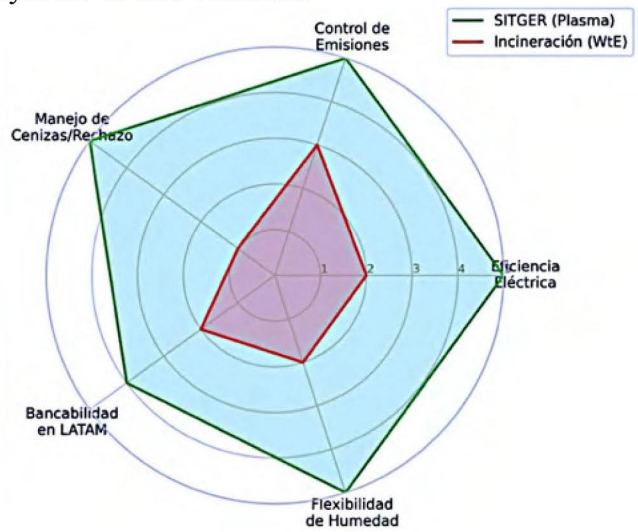


Figura 9. Comparativo Impactos Ambientales y Sociales Relleno Sanitario vs SITGER. Elaboración propia.

Tabla 3. Benchmarking financiero, operativo y ambiental (capacidad de 500 t/d)

Indicador Financiero y de Evaluación	Incineración Convencional de Parrilla (WtE)	Gasificación por Plasma Integrada con TMB
CAPEX aproximado (US$/tonelada/año instalada)	US$ 950 – US$1.300. Penalizado por equipos de control ambiental y chimeneas emisoras. Baja eficiencia en producción eléctrica, CAPEX orientado a producción de calor.	US$ 1.200 – US$ 1.400. Competitivo por ausencia de sistemas complejos de lavado de gases (scrubbers) para dioxinas. Casi duplica la cantidad de energía producida por t de RSU en incineración.
OPEX Anual Referencial	Margen ligado a consumibles pasivos y civiles (mantenimiento severo de parrillas móviles y reposición continua de cal y carbón activado).	Margen superior asociado a alta tecnología (reemplazo periódico de electrodos de antorcha y material refractario del crisol).
Eficiencia Eléctrica Neta Global	Menor. Entre 18–26%, restringida por corrosión en sobrecalentadores de calderas, alcanzando hasta 450 kW netos/t procesada.	Mayor. Literatura documenta rangos de 35–40% con IGCC, superando 800-1.000 kW netos/t procesada (RSU típico en LATAM).

Indicador Financiero y de Evaluación	Incineración Convencional de Parrilla (WtE)	Gasificación por Plasma Integrada con TMB
Beneficios Ambientales de Ciclo de Vida (LCA)**	Limitado. Recupera ~20 t de recursos primarios, pero hereda pasivos crónicos por micropartículas y cenizas.	Evita la extracción o movilización de una cantidad estimada de 260 t de recursos primarios/t tratada.
Tolerancia Técnica a la Heterogeneidad	Admite basura mixta sin pretratamiento, pero genera oscilaciones térmicas que desgastan turbinas y reducen estabilidad energética.	Requiere pretratamiento para estabilizar PCI (resuelto por SITGER con TMB).
Nota técnica: Si bien la inversión inicial en equipos de plasma puede ser mayor, la inversión total en la planta converge cuando se incorporan los sistemas completos de limpieza de gases, el manejo de cenizas y los costos asociados al ciclo de vida del sistema de incineración. Fuentes de Soporte: • Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste (Eurecat, 2020) • Plasma gasification of MSW (MDPI) • UNAM WtE, 2009 • Análisis Técnico-Económico WtE por Plasma, REMOX–Universidad Nacional de Colombia, 2019		

8. APLICACIÓN Y FACTORES DE ADOPCIÓN ESTRATÉGICA EN LATAM

Latinoamérica presenta un entorno macroeconómico y político particular para la adopción de tecnologías de valorización energética. En este contexto, la importación de modelos europeos llave en mano enfrenta una barrera estructural de viabilidad tarifaria y contractual, al chocar con las realidades de financiamiento municipal y las restricciones regulatorias de la región. La estrategia de adopción requiere, por tanto, arquitecturas adaptativas que integren:

- Flexibilidad financiera: esquemas de Asociación Público-Privada (APP) y mecanismos de subsidio cruzado que permitan sostener el flujo de caja en entornos de baja tarifa.
- Resiliencia tecnológica: soluciones capaces de procesar residuos heterogéneos y húmedos, evitando la dependencia de condiciones de separación estricta como en Europa o Japón.
- Compatibilidad regulatoria: alineación con marcos normativos de transición energética y economía circular, que faciliten beneficios fiscales y acceso a financiamiento internacional.

El desafío financiero y contractual regional

En regiones como Escandinavia o Japón, el ciudadano paga de manera disciplinada y consciente tarifas de recolección y disposición que superan los US$ 70 - US$ 120 dólares por tonelada. En contraste, en Latinoamérica, las municipalidades —y por ende las tarifas transferibles al recibo del usuario— rara vez logran sostener tipping fees (tarifas de entrada a planta) superiores a US$ 20 – US$ 40 por tonelada de RSU municipal. [21]

De acuerdo con múltiples análisis y estudios de caso de plantas a nivel mundial, se reconoce que por debajo del umbral de US$ 60 por tonelada [14] [15], un incinerador convencional Waste-to-Energy (WtE) carece de viabilidad financiera (TIR positiva) sin inyecciones significativas de subsidios estatales. Este esquema resulta inaceptable para los ministerios de hacienda y para las normas de implementación de infraestructura de este tipo en la región, ya que compromete la sostenibilidad fiscal y la independencia financiera de los proyectos.

El modelo adaptativo SITGER

La arquitectura de ingeniería del SITGER marca una diferencia sustancial. Se posiciona no como un quemador de basura subsidiado, sino como un parque de manufactura de bio-recursos y energía, capaz de integrar innovación tecnológica con modelos financieros sostenibles. Los factores clave que aceleran su pertinencia y viabilidad en la región incluyen:

- **Esquemas de Asociación Público-Privada (APP)**: Modelos como el presentado para la PVR-Cali permiten integrar inversión privada intensiva en CAPEX, con mecanismos de respaldo institucional y fondos internacionales de infraestructura, bajo contratos o concesiones de largo plazo que aseguren el suministro de residuos (biomasa garantizada) como corriente estable de alimentación.
- **Integración de corrientes de residuos con mayor valor tarifario**: la capacidad del sistema para procesar, en paralelo, residuos peligrosos y especiales —como residuos hospitalarios de riesgo biológico, borras de refinería y neumáticos fuera de uso— permite incorporar ingresos provenientes de segmentos con tarifas de tratamiento superiores a las del residuo sólido urbano convencional.
- **Aprovechamiento de incentivos fiscales y regulatorios**: los marcos de promoción a las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como la Ley 1715 en Colombia e instrumentos equivalentes en otros países de la región, pueden mejorar la viabilidad financiera del modelo mediante mecanismos como depreciación acelerada, beneficios en IVA y deducciones tributarias aplicables a bienes de capital.

9. NIVEL DE MADUREZ TECNOLÓGICA (TRL) Y EXPERIENCIA COMERCIAL

Uno de los factores que con mayor frecuencia condiciona la adopción de tecnologías de nueva generación en infraestructura ambiental en Latinoamérica es la cautela institucional frente al riesgo tecnológico. En este contexto, la evaluación del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) resulta esencial para distinguir entre desarrollos experimentales, tecnologías en escalamiento y soluciones con desempeño ya validado en condiciones operativas reales.

Desde esta perspectiva, el SITGER no debe presentarse como un equipo unitario o una invención aislada, sino como una arquitectura integrada compuesta por subsistemas tecnológicos cuya madurez ha sido probada previamente en sus respectivos ámbitos de aplicación. El fundamento de su viabilidad técnica reside, precisamente, en la articulación de tecnologías con antecedentes operativos consolidados:

Tecnología de pretratamiento

Los sistemas de clasificación mecánica, separación balística, trómeles, separadores magnéticos y por corrientes de Foucault, así como las etapas de acondicionamiento de CDR, corresponden a tecnologías ampliamente desplegadas en la industria del reciclaje y del tratamiento mecánico-biológico a nivel mundial, con desempeño eficiente en más de 200 plantas en operación internacional y equivalencia práctica a niveles altos de madurez tecnológica. (TRL 9). [7]

Tecnología biológica

La digestión anaerobia en reactores cerrados, junto con las etapas de separación y acondicionamiento previas, constituye una tecnología extensamente utilizada para el tratamiento de residuos orgánicos, lodos y mezclas biodegradables, con un largo historial comercial en plantas municipales e industriales con más de 1.000 plantas en operación internacional. (TRL 9). [8]

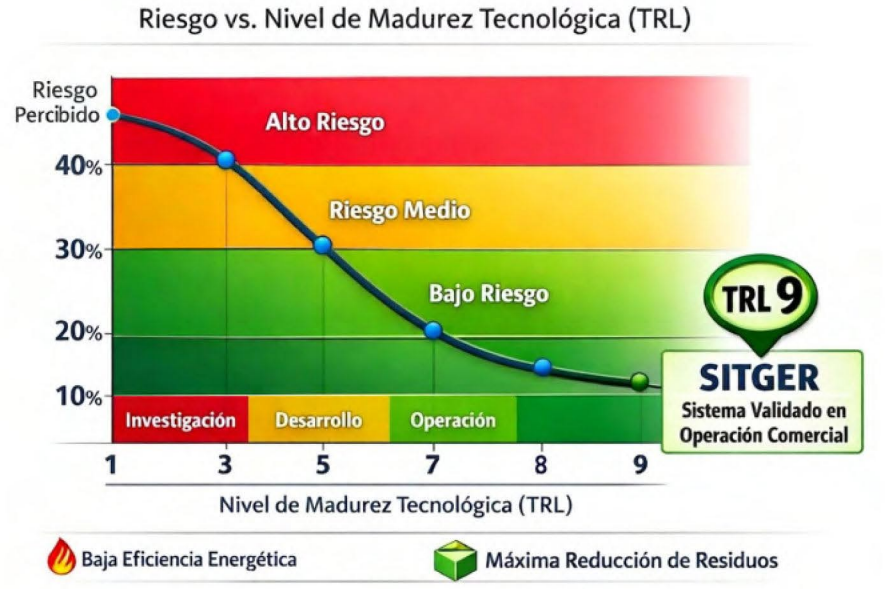


Figura 10. Nivel de preparación de tecnologías integradas en el SITGER de REMOX Elaboración propia.

El Núcleo térmico y de generación

Gasificador Phoenix Solutions Co. - PSC: En el caso del plasma, resulta más preciso señalar que la tecnología base se apoya en sistemas térmicos y antorchas de plasma con antecedentes industriales de más de 30 años documentados en aplicaciones de fusión de cenizas, gasificación de residuos, tratamiento de corrientes peligrosas y procesos metalúrgicos especializados. El anexo técnico de Phoenix Solutions Co. (PSC) registra referencias en

gasificación de RSU, CDR y residuos orgánicos, así como aplicaciones en residuos peligrosos, residuos médicos, tratamiento industrial y usos metalúrgicos, incluyendo proyectos vinculados a Plasco Energy, Bellwether, Enersol, Sound Environmental Resources Beijing, Kobelco Eco Solutions, Kobe Steel, Kawasaki y Baosteel, USAF, US Army, entre otros. (TRL 9). [9]

Ante los cuestionamientos sobre la supuesta inmadurez de las tecnologías integradas, debido a que aún no llegan estas tecnologías a la Latinoamérica, resulta poco riguroso descalificar una solución de esta magnitud basándose únicamente en la ausencia de instalaciones específicas para RSU ordinario en la región, cuando su eficacia ya ha sido validada en residuos de mayor complejidad en el resto del mundo.

El verdadero cambio de paradigma ocurre en la economía del proceso: el incremento en los costos de manejo ambiental de la incineración convencional —trenes de limpieza de gases cada vez más costosos y gestión de cenizas tóxicas— ha equiparado los CAPEX y OPEX entre ambas tecnologías. En consecuencia, la decisión se define por el diferencial en eficiencia energética: SITGER genera mayor cantidad de energía por tonelada de residuo. "*La Gasificación por arco de plasma podría ser considerada el más eficiente proceso de conversión a energía, de los diferentes procesos térmicos de gasificación*". [22]

Al ponderar la evaluación de riesgo del sistema integrado, los ingenieros estructuradores y analistas de crédito deben tener certeza de que el verdadero reto del SITGER en LATAM radica en la excelencia de la gestión del proyecto —construcción civil, integración de tuberías de gas, sincronización de lazos de control SCADA y logística gerencial— y no en la viabilidad intrínseca o física de las tecnologías base.
En resumen, según el nivel de madurez del sistema:

- **No es un prototipo**: SITGER integra tecnologías con décadas de validación internacional (pretratamiento mecánico, digestión anaerobia, gasificación por plasma directo y generación a partir de gases combustibles).
- **El riesgo real está en la ejecución**: planificación, integración y operación en el contexto latinoamericano.
- **Valor estratégico**: Según las gestiones en las cuales ha participado el autor, se ha visto que diversos fondos de project finance pueden favorecer la gasificación por plasma frente a la incineración convencional por su mayor eficiencia y menor pasivo ambiental.

10. EFICIENCIAS TÉCNICAS, RENTABILIDAD Y RIESGOS CRÍTICOS

Una Planta de Valorización de Residuos-PVR tipo SITGER, se configura como infraestructura híbrida de valorización avanzada, en la que la recuperación de energía, materiales y subproductos comercializables permite estructurar un esquema de poligeneración. Esta condición diversifica las fuentes de ingreso del proyecto y fortalece su estabilidad económico-financiera frente a contingencias regulatorias, tarifarias o de mercado.

Eficiencias operativas a largo plazo

- Maximización Constante del PCI (Poder Calorífico Inferior) y de la exergía disponible: La separación de compuestos orgánicos y agua libre en el pretratamiento primario, densifica el Combustible Derivado de Residuos (CDR) que ingresa al reactor de plasma. Esto permite extraer la máxima cantidad de Hidrógeno (H_2) y Monóxido de Carbono (CO) por tonelada procesada.
- Reducción Drástica del Mantenimiento Intermitente: Inyectar biogás y syngas limpios en motores o turbinas minimiza la corrosión a alta temperatura. Esto reduce paradas imprevistas y prolonga la vida útil del equipo, a diferencia de las calderas de incineración que sufren constantes fisuras.
- Estabilidad Térmica Híbrida de Carga Base: La integración de biogás, proveniente de la digestión anaerobia de la fracción orgánica, con syngas generado a partir de la valorización térmica de la fracción seca, garantiza una generación eléctrica híbrida, estable y continua (24/7), superando la intermitencia de energías renovables como solar o eólica sin depender de costosas baterías. [10]

El modelo de rentabilidad resiliente (casos Arequipa y Cali)

Para una planta con capacidad de 500 t/d, la inversión total puede situarse en un rango de USD 240 a 270 millones, incluyendo estudios y diseños de detalle, licenciamiento, obra civil, equipos electromecánicos, trenes de tratamiento, redes internas de conducción, planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y sistemas de generación eléctrica. No obstante, la estabilidad de indicadores financieros depende de una diversificación de las fuentes de ingreso, que permite reducir la exposición del proyecto a contingencias de mercado: [11]

- Optimización de Tarifas de Disposición (Tipping Fees Combinados): En gran parte de los municipios latinoamericanos, las tarifas de disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) en relleno sanitario se ubican en niveles relativamente bajos (menores de US $30 en promedio). En contraste, determinados sectores industriales y sanitarios pagan tarifas significativamente superiores por el tratamiento y disposición certificada de residuos especiales o peligrosos.
- Venta Directa de Energía al Mercado No Regulado (Grandes Consumidores): Una planta de 500 t/d puede alcanzar una exportación neta continua del orden de 24 a 30 MW, dependiendo de la composición del residuo, su contenido energético y la proporción de fracciones con mayor poder calorífico. La energía producida puede comercializarse mediante contratos bilaterales con usuarios industriales o en mercados no regulados (venta directa).
- Monetización de Activos de Carbono: El modelo operativo del proyecto, fundamentado en la mitigación de emisiones fugitivas de metano y la integración de energía solar

fotovoltaica para la optimización de la matriz energética, consolida un balance neto negativo por emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Esta condición faculta la estructuración de flujos de ingresos complementarios bajo criterios de adicionalidad de la CMNUCC (monetización de externalidades ambientales), mediante la emisión y comercialización de certificados de reducción de emisiones de GEI (créditos de carbono) en mercados regulados o voluntarios.



Figura 11. Fuentes de Ingresos Totales del SITGER.
Elaboración propia

- Ingresos por economía circular industrial: La comercialización de materiales recuperados y subproductos valorizables —como acero, aluminio, digestato estabilizado y escoria vitrificada— introduce corrientes adicionales de ingreso dentro de un esquema de economía circular. En configuraciones de mayor escala, estas fuentes complementarias refuerzan la robustez del modelo financiero, mejoran los indicadores de recuperación de la inversión y de la estrategia de 3Rs o Basura Cero.
- Viabilidad Financiera y Escalabilidad del Sistema: En configuraciones superiores al umbral de las 300 t/d, el modelo alcanza economías de escala que garantizan solvencia estructural bajo esquemas de Project Finance con horizontes de deuda de 15 a 20 años, mientras que el período de recuperación del capital o el período de recuperación simple pueden mantenerse debajo de los cinco (5) años bajo supuestos de ingresos favorables.

Riesgos, limitaciones y condiciones críticas estratégicas

La adopción de plantas de termovalorización, hibridación y separación automatizada a escala industrial conlleva retos estratégicos que no deben subestimarse en ningún punto del cronograma:

- Riesgo Crítico de Garantía de Suministro de Materia Prima: Una planta con capacidad definida en una cantidad de t/d requiere un abastecimiento continuo y real de residuos.

Es imperativo que la administración pública y los operadores privados de recolección aseguren, mediante contratos de largo plazo, el flujo diario ininterrumpido de las cantidades de residuos requeridos durante periodos de 20 a 30 años.

- Variabilidad fisicoquímica del residuo de entrada: además del volumen de suministro, la composición del residuo constituye una variable crítica. Cambios estacionales o territoriales en humedad, fracción orgánica, cloro, cenizas, metales, finos e inertes pueden alterar el PCI del CDR, la estabilidad térmica del reactor, la calidad del syngas y el desempeño del tren de limpieza. En consecuencia, la viabilidad del sistema, aunque más resiliente que otras tecnologías, depende de campañas de caracterización continuas y de una estrategia de pretratamiento capaz de amortiguar la variabilidad del residuo latinoamericano.
- Limitaciones de operación e integración tecnológica (OPEX especializado): Las antorchas de plasma, aunque confiables, requieren regímenes de mantenimiento de alta precisión técnica. La vida útil de los electrodos de cobre/tungsteno y de los refractarios del crisol se mide en miles de horas, lo que demanda mantenimiento predictivo avanzado (monitoreo de vibraciones, termografías), poco habitual en plantas municipales latinoamericanas. En suma, es fundamental contar con un equipo de O&M especializado en procesos de termólisis de alta temperatura.
- Limitaciones operativas y referencias de la tecnología de plasma: La aplicación de esta tecnología a escala comercial para el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) ha enfrentado diversos desafíos operativos. Un ejemplo son los proyectos de gasificación a gran escala de Air Products en Tees Valley (Reino Unido), que fueron cancelados debido a dificultades de diseño y operación al intentar escalar la tecnología GasOff. Estos fallos se asocian principalmente con la complejidad de mantener un flujo de alimentación constante y homogéneo, así como limitaciones derivadas de la alta humedad presente en los residuos. Por ello, resulta esencial implementar un pretratamiento TMB robusto y eficaz, capaz de procesar entre el 35 % y el 40 % de los RSU que constituyen la fracción de rechazo, y acondicionarlos como un Combustible Derivado de Residuos (CDR) con las características adecuadas para esta tecnología.
- Laberinto regulatorio y permisología ambiental: En varios países de América Latina, los marcos regulatorios aplicables al tratamiento térmico de residuos fueron diseñados para tecnologías convencionales y no siempre distinguen con precisión entre incineración, gasificación y sistemas asistidos por plasma. En Colombia, por ejemplo, persisten referencias regulatorias y criterios de control ambiental construidos sobre esquemas tradicionales, lo que puede inducir a que un reactor de plasma sea evaluado bajo parámetros pensados para incineración convencional. Situaciones análogas se observan en varios países de la región: en México continúa vigente la NOM-098-SEMARNAT-2002, enfocada en incineración de residuos; en Brasil, la Resolución CONAMA 316/2002 regula de manera general los sistemas de tratamiento térmico de residuos. Por ello, la gestión anticipada de soporte técnico, jurídico y social ante las autoridades constituye un requisito indispensable, que debe iniciarse desde la fase de factibilidad y previa a los trámites de aprobaciones correspondientes.

Conclusiones y relevancia estratégica para la región

Se anotan los siguientes elementos concluyentes.

- Obsolescencia tecnológica del relleno sanitario: La extensión artificial de la vida útil de los rellenos mediante permisos de contingencia ha perdido validez técnica, social y política en Latinoamérica. Las métricas de emisiones de metano, vectores de contaminación e infecciones y los impactos hídricos derivados de lixiviados evidencian su progresiva inviabilidad como infraestructura de disposición final en la ingeniería sanitaria moderna.
- Eficiencia energética demostrada por sinergia híbrida: SITGER optimiza el rendimiento termoeléctrico al integrar pretratamiento mecánico automatizado, digestión biológica estabilizada, autoconsumo fotovoltaico y disociación plasmática bajo esquema IGCC. Esta combinación permite alcanzar eficiencias eléctricas netas superiores al 35–42%, muy por encima de la incineración convencional.
- Rentabilidad operativa independiente del impuesto o tarifa municipal: Replicar modelos europeos de incineración de gran escala sin capacidad institucional para aplicar tarifas equivalentes conduce al colapso financiero y al poco probable rescate estatal. En contraste, SITGER se apoya en tres pilares:
  - Mantener la tarifa actual de disposición de residuos sin incrementos para los usuarios.
  - Vender energía mediante contratos PPA directamente a industrias que requieren suministro firme.
  - Comercializar commodities circulares como créditos de carbono, reciclados, escoria inerte y fertilizantes.
- Sostenibilidad y reducción de pasivos tóxicos: A diferencia de la incineración masiva, SITGER inmoviliza metales en una matriz vitrificada, mediante núcleos de arco superiores a 10.000 °C y operación del reactor por encima de 3.500 °C. En estas condiciones, y en atmósfera reductora, se reduce sustancialmente el potencial de formación de dioxinas y furanos. Además, el control de olores mediante presión negativa en descarga y pretratamiento favorece su implantación en áreas industriales o rurales con baja afectación a comunidades cercanas.
- Validación comercial y mitigación de riesgos sistémicos: Con tecnologías de alta madurez (TRL 9) en sus componentes principales, SITGER reduce la incertidumbre financiera asociada a la transferencia tecnológica. Su implementación responde a las necesidades críticas y puede mejorar la bancabilidad del proyecto al apoyarse en tecnologías ya validadas y en una necesidad regional en el sector de saneamiento.
- Acciones para la gobernanza y estrategia de negocios: Líderes del sector público, directivos gremiales/empresariales e inversionistas privados están llamados a encabezar la transición hacia sistemas como SITGER. Bajo este enfoque, la gestión de residuos deja de verse solo como un pasivo fiscal y pasa a concebirse como una

plataforma tecnológica de economía circular.

- Catalizador de I+D+i y Fortalecimiento de la soberanía tecnológica regional: La implementación de SITGER también puede actuar como plataforma de transferencia de conocimiento. Al incorporar tecnologías maduras en el contexto regional, impulsa capacidades locales en ingeniería de procesos termoquímicos, automatización industrial y logística circular, y fortalece la articulación Estado-Academia-Empresa en torno a investigación aplicada y formación de talento especializado.

11. ALGUNOS PUNTOS A VERIFICAR ANTES DE ADOPTAR UNA SOLUCIÓN COMO SITGER

Guía práctica de auditoría técnica y financiera para entes territoriales, gerentes de sostenibilidad, fondos de inversión en infraestructura de *Private Equity o Project Finance* e ingenieros estructuradores principales:

- Línea base real del PCI y humedad local. Evitar promedios genéricos de literatura europea o norteamericana. Trabajar con caracterización estadística del flujo de residuos actual y directamente en el municipio de origen, considerando variaciones estacionales y cuantificando en laboratorio el porcentaje orgánico real, cloro disuelto, metales y cenizas.
- Consolidación contractual final (blindaje del PPA y garantía de biomasa). La viabilidad financiera depende de dos factores inviolables: (i) compromisos políticos y legales de suministro diario de residuos durante 20–30 años, y (ii) contratos bilaterales de energía firme en formato take-or-pay (PPA) con clientes industriales de categoría AAA.
- Mapeo comercial de demanda industrial inmediata (off-takers). Antes de iniciar obra, se deben formalizar cartas de intención vinculantes con compradores de créditos de carbono y clientes agroindustriales para el digestato rico en nutrientes. Asimismo, garantizar la participación de constructoras viales y cementeras capaces de absorber el 100% de la escoria vitrificada proyectada.
- Auditoría del entorno regulador eléctrico. Analizar normativas locales aplicables a FNCER. Verificar si la subestación regional cercana tiene capacidad técnica y legal para integrar los MW adicionales sin comprometer transformadores ni generar peajes o sobrecostos de transmisión.
- Aseguramiento fiscal y tributario. Contratar un mapeo jurídico-tributario preventivo para vincular el proyecto a beneficios fiscales vigentes (depreciación acelerada, renta preferencial, exención de aranceles de importación e IVA). Estos incentivos son críticos para mitigar el impacto del CAPEX intensivo en bienes importados.
- Plan de logística inteligente de mínima fricción y alta rotación. Implementar modelos digitales dinámicos (simulación de colas y eventos discretos) para el tráfico y recepción de flotas de aseo. Incorporar bahías automatizadas con básculas dinámicas WIM (Weigh-In-Motion), fosos segregados de descarga de doble propósito y planes estrictos de contención de olores mediante presión negativa. Estos elementos conforman el

núcleo gerencial que previene colapsos operativos, sanciones ambientales e ineficiencias logísticas.

REFERENCIAS

1. Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016)., Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (Documento CONPES 3874). República de Colombia, Bogotá: República de Colombia, 2016.
2. «The price of heat energy produced at the Iru power plant is changing,» 2024. [En línea]. Available: https://www.enefit.ee/en/-/uudised/iru-elektrijaamas-toodetava-soojusenergia-hind-muutub.
3. «From Waste to Energy – The technology Inside Amager Bakke,» 2025. [En línea]. Available: https://a-r-c.dk/amager-bakke/from-waste-to-energy/.
4. A.S. Romero, 2025. [En línea]. Available: https://elbuho.pe/2025/11/arequipa-botadero-de-quebrada-honda-cerca-a-su-maxima-capacidad-alcaldesa-yura-pide-declaratoria-de-emergencia/.
5. «Remox Ingeniería Latam-USA,» 2026. [En línea]. Available: https://remoxenergy.com/de-desechos-a-energia-colombia-pone-en-marcha-proyecto-pionero-en-risaralda/.
6. REMOX - UNAL/Grupo de Investigación MDL, «ANÁLISIS TÉCNICO ECONOMICO DE LA GASIFICACION POR PLASMA,» Remox Ingeniería SAS, Bogotá, Colombia, 2019.
7. BIANNA Advanced Recycling Technologies, «Residuos municipales - Instalaciones de tratamiento mecánico,» 2026. [En línea]. Available: https://bianna.com/residuos-municipales/.
8. Anaergia Inc. (Canadá), «Anaergia | World-Leading Anaerobic Digestion Solutions,» 2026. [En línea]. Available: https://www.anaergia.com/cleanrex/.
9. «PHOENIX SOLUTIONS Co.,» 2025. [En línea]. Available: https://www.phoenixsolutionsco.com/.
10. Remox Renewable Energy Co., «Tecnologías de Generación de Energía para Mixgas (Biogás+Syngas),» Remox Ingeniería SAS, Houston, TX, USA, 2025.
11. Remox Ingeniería SAS, «Estudio de Prefactibilidad Planta de Valorización de Residuos - Cali, Valle,» Remox Ingeniería SAS, Cali, Colombia, 2026.
12. X. Elías Castells, Tratamiento y valorización energética de residuos., Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2005.
13. Remox - Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Investigación MDL, «Informe técnico de visita: Planta de valorización energética de IRU (Estonia),» Grupo de Investigación MDL y Gestión Energética, Bogotá, 2025.
14. Nasdaq Baltic, Tallinn, Estonia, «Enefit Green AS, Annual Report 2024,» Marzo 2025. [En línea]. Available: https://nasdaqbaltic.com/market/upload/reports/egr/2024_ar_en_eur_con_00.pdf.
15. Enefit Green AS, «Annual Report 2021— Financial Statements.,» 2021. [En línea]. Available: https://public-docs.enefitgreen.ee/investorile/2021/aastaaruanne-ENG.pdf.
16. HaloSep AB / Stena Recycling International / Vestforbrænding., «LIFE HALOSEP — Layman's Report. Proyecto LIFE15 ENV/SE/000265. Unión Europea.,» 2022. [En

línea]. Available: https://www.lifehalosep.eu/wp-content/uploads/2022/12/Laymans_Report_Halosep.pdf.
17. REMOX - Grupo de Investigación MDL Universidad Nacional de Colombia, «Informe técnico de visita: Planta ARC Copenhaguen,» REMOX - Grupo de Investigación MDL, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2025.
18. Zero Waste Europe, «Copenhagen Goes All In on Incineration, and It's a Costly Mistake,» 2021. [En línea]. Available: https://zerowasteeurope.eu/2017/10/copenhagen-goes-all-in-on-incineration-and-its-a-costly-mistake/.
19. G. Pospin SAS, «Asesoría Parque Tecnológico Ambiental en Santiago de Cali,» GRUPO POSPIN SAS, Medellín, 2025.
20. Eurecat, Centro Tecnológico de Cataluña, Costo del ciclo de vida de la gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos., Manresa, España: Centro Tecnológico de Cataluña, 2020.
21. MC Correal. C. Faleiro. C. Piamonte. J. Rihm. y M. Zambrano «Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe: Estructura de costos del servicio, NT IDB-TN-2663,» División de Agua y Saneamiento, Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Washington DC, EE.UU marzo 2023. Available: https://publications.iadb.org/es/sostenibilidad-financiera-de-la-gestion-de-residuos-solidos-en-america-latina-y-el-caribe.
22. T. I. R. Cuéllar, Factibilidad técnica económica y sustentable del proceso de gasificación por arco de plasma para el tratamiento de los residuos sólidos municipales (Residuos a Energía), Monterrey, México: División de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, dic, 2012.
23. Saveyn, H.; Eder, P.; Ramsay, M.; Thonier, G.; Warren, K.; Hestin, M. Towards a better exploitation of the technical potential of waste to-energy. JRC Science Hub, 2016, Consultado en 2026 en https://doi.org/10.2791/870953