

REVISTA SAI

VOL. 5 NO.8

JUNIO 2026



Arquitectura

Ingeniería

Futuro



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913



Palabras del **PRESIDENTE SAI**

Gerardo Domínguez Giraldo

El conocimiento como cimiento del futuro

Cada generación recibe la responsabilidad de construir el país que heredarán las siguientes. Esa tarea se construye con planificación y trabajo en equipo. Por eso, desde la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos, observamos con esperanza el inicio de una nueva etapa para Colombia, una etapa que representa una oportunidad para volver a poner la educación, la ingeniería y la arquitectura en el centro de las decisiones nacionales.

Durante los últimos años, como gremio hemos expresado de manera respetuosa pero firme nuestra preocupación por la pérdida de protagonismo de los criterios técnicos en muchos de los grandes debates del país. La infraestructura, el desarrollo urbano, la movilidad, la transición energética y la sostenibilidad requieren profesionales preparados, instituciones sólidas y decisiones respaldadas. La experiencia nos ha demostrado que cuando el conocimiento técnico es relegado, las consecuencias terminan afectando la competitividad.

Esta edición de nuestra revista reúne aportes sobre algunos de los grandes desafíos que enfrenta Colombia. Encontrarán análisis sobre infraestructura sostenible, movilidad, energía, seguridad industrial y desarrollo territorial. Todos estos temas tienen un elemento común: la necesidad de fortalecer las capacidades técnicas y profesionales que permitan convertir los retos en oportunidades. No existe competitividad sin educación de calidad.

Por ello, vemos con optimismo que el nuevo Gobierno Nacional liderado por el Dr. Abelardo De La Espriella, cuente con líderes que conocen de cerca las preocupaciones históricas de nuestro sector, como nuestro Socio Honorario y hoy vicepresidente electo

el Dr. José Manuel Restrepo Abondano y que han compartido espacios de diálogo con nuestra institución.

Valoramos especialmente que exista una mayor disposición para escuchar a los gremios, a la academia y a los profesionales que diariamente trabajan por el desarrollo del país.

La sostenibilidad, tema central de esta edición, nos recuerda que las soluciones del futuro deberán integrar responsabilidad ambiental y bienestar social. Para lograrlo, Colombia necesita más profesionales capacitados y una visión de largo y mediano plazo que trascienda los periodos de gobierno. Necesitamos construir puentes entre la academia, la empresa y el Estado.

Desde la SAI reafirmamos nuestro compromiso de seguir aportando conocimiento, promoviendo el debate técnico. Nuestros ingenieros y arquitectos han sido protagonistas de las transformaciones más importantes de nuestra historia y están preparados para seguir siendo parte de las soluciones que demanda el presente.

El momento exige decisiones, pero decisiones fundamentadas en la técnica y la experiencia. Confiamos en que esta nueva etapa nacional sea una oportunidad para fortalecer esos principios y para reconocer que el futuro de Colombia se construye cuando la educación y el conocimiento ocupan el lugar que merecen.

Gerardo Domínguez Giraldo
Presidente SAI



Notas del **DIRECTOR**

ENRIQUE POSADA RESTREPO

Con esta edición damos continuidad a nuestro ciclo moderno de publicación digital de la REVISTA DE LA SAI. Este es el número ocho, en el cual contamos con 12 artículos, resultado de la colaboración de distintos autores, muchos de ellos socios de la SAI; pero también agradecemos la presencia de escritores que no son socios. Creemos que todos los temas que acá se incluyen son de gran interés, e inclusive, en varios casos de novedad. Es muy satisfactorio observar cómo sigue adelante nuestra revista, con el apoyo de nuestro presidente el ingeniero Gerardo Domínguez, de la Junta Directiva y con el soporte de la subdirección estratégica de la SAI, a cargo del ingeniero Julián Pérez

Al personal de la SAI que ha intervenido en los distintos aspectos de esta edición, nuestro reconocimiento. Para nuestros colaboradores, un gran agradecimiento por esos aportes, que se constituyen en una invitación todos los socios y a los amigos de la SAI para que mantengamos activa la revista con sus contribuciones. Hemos logrado, con este número ocho, mantener nuestra firme decisión de publicar una edición de la revista al final de cada semestre, de tan manera que tenemos dos números anuales. Reciban entonces ustedes nuestra invitación a mandar sus trabajos para la edición del segundo semestre de 2026, para el número nueve, antes del 15 de septiembre y para el primer semestre de 2027, número diez antes del 15 de abril de ese año

Consulten en esta edición las normas de publicación, las cuales también estarán disponibles en nuestra página web de la SAI y en la dirección técnica de nuestra sociedad

Queremos publicar en cada edición:

- Artículos con opiniones, ensayos y reflexiones de fondo sobre temas esenciales y vitales para la ingeniería y la arquitectura, los proyectos importantes y los asuntos de importancia.

- Notas históricas, crónicas, notas sobre personajes importantes, sobre empresas y entidades, y sobre proyectos importantes, para registrar hitos de nuestras profesiones, de sus proyectos y de la actividad empresarial e institucional.
-
- Notas culturales que ilustren y amplíen la visión interdisciplinar e integral y que destaquen los ricos aspectos estéticos, artísticos, literarios, históricos que dan calidad de vida a la región y a las actividades de nuestras profesiones.
-
- Notas técnicas y científicas ilustrativas, que destaquen y divulguen los avances en la ciencia, en la tecnología, en el estado del arte de los temas que atañen a nuestras profesiones.

Artículos técnicos y científicos que se refieran a estudios, investigaciones, avances, desarrollos, sean originales o de divulgación. En el primer caso, serán sometidos a revisión de pares.

Si observan nuestra tabla de contenido, es evidente que estamos cubriendo temas importantes para nuestra ingeniería y para la región, como es el caso de los ferrocarriles, la inteligencia artificial y la teoría de la información, el manejo de residuos, la energía nuclear, las inundaciones, la sostenibilidad, entre otros.

Nuestra revista será publicada digitalmente, con la posibilidad futura de imprimir cantidades limitadas, en caso de lograr el patrocinio respectivo, para distribución limitada. Nuestra idea es evolucionar continuamente con la revista, registrarla dentro de los sistemas que acogen este tipo de revistas, para llevarla cada vez más a lograr una posición valiosa en nuestro medio, como un vehículo de expresión de todos aquellos que deseen compartir sus conocimientos, experiencias valiosas y reflexiones en temas relacionados con nuestro gremio y nuestras profesiones y sus proyecciones y logros.

Igualmente deseamos que sea un medio para divulgar a nuestros empresarios y a sus proyectos comerciales y negocios, a través de la publicidad, con la idea también de generar algunos recursos para la SAI, además de cubrir los costos que pueda tener este esfuerzo editorial.

Esperamos que la propuesta, ya en su octavo número, esté siendo atractiva para todos ustedes, de manera que nos apoyen en todas las formas posibles, con publicidades, difusión y participación

PRESIDENTE SAI

Gerardo Domínguez Giraldo

DIRECTORA EJECUTIVA SAI

Mónica Isabel Palacio Salazar

DIRECTOR REVISTA SAI

Enrique Posada Restrepo

CONSEJO EDITORIAL

Óscar Jaime Restrepo Baena

Enrique Posada Restrepo

DIAGRAMACIÓN

Daniel Alejandro Monsalve Bedoya

Julián Pérez Cardona



Medellín, Colombia - CRA 43B # 16-95 OF. 510-2



saiantioquia.com



SAI@SAI.ORG.CO



(+57) 319 289 6603



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos
La Fuerza de la Razón - 1913

Tabla de Contenido

- **EL BALANCE DE LA INGENIERIA FERROVIARIA: UNA DISCUSION TECNICA INAPLAZABLE.**
Fernando Rey Valderrama Página 1
- **CHERNOBYL 1986–2026. 40 AÑOS QUE TRANSFORMARON LA INDUSTRIA NUCLEAR. DEL PROGRAMA NUCLEAR SOVIÉTICO AL NACIMIENTO DE LA CULTURA MODERNA DE SEGURIDAD NUCLEAR**
Daniel Herrera Cardona Página 11
- **LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LOS DESAFIOS DE LA ACADEMIA CONTEMPORÁNEA: ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA ÉTICA – II**
Juan Fernando Molina Del Valle Página 23
- **METODOLOGÍA DE ARTICULACIÓN DE ACTORES PÚBLICOS, PRIVADOS, ACADEMIA Y CIUDADANÍA COMO ESQUEMA DE GOBERNANZA DEL AGUA EN CUENCAS HÍDRICAS LATINOAMERICANAS**
María del Pilar Restrepo Mesa..... Página 30
- **TRANSICIÓN DE WTE A VALORIZACIÓN INTEGRAL: EL SISTEMA SITGER DE REMOX**
Ricardo Antonio Berdugo Páez Página 45
- **LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN. EL LENGUAJE OCULTO DE LA REALIDAD MODERNA**
Elkin EcheverriPágina 79
- **EL PODER DE LAS CONVERSACIONES. UN APOORTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS DE TRABAJO DE ALTO RENDIMIENTO**
Arturo Alejandro Briso InostrozaPágina 109

Tabla de Contenido

- **DE LA PROMESA TECNOLÓGICA A LA INGENIERÍA VERIFICABLE: POR QUÉ LA APLICACIÓN DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES ES EL ÚNICO CAMINO SEGURO EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES EN LATINOAMÉRICA**
José María Fernández González Página 117
- **ALGUNOS TEMAS RELACIONADOS CON EL CONTROL DE INUNDACIONES EN CIUDADES Y LA MITIGACIÓN DE SUS IMPACTOS**
Enrique Posada Restrepo..... Página 124
- **UNA NOTA SOBRE EL POLÍGONO FUNICULAR APLICADO AL ANÁLISIS DE LAS VIGAS SIMPLES**
Tomás Castrillón Oberndorfer Página 155
- **CLAVES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALDERAS Y HORNOS INDUSTRIALES EN BÚSQUEDA DE LA EFICIENCIA INTEGRAL DE LOS PROCESOS**
Jaime Ramiro Giraldo Salinas Página 176
- **LA FACULTAD NACIONAL DE MINAS EN PERSPECTIVA HISTÓRICA Y DE FUTURO**
Eva Cristina Manotas Rodríguez Página 207
- **INSTRUCCIONES PARA PUBLICAR EN LA REVISTA SAI** Página 210



DIMINSA

E N E R G Y

FILTRACIÓN EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

3 razones para utilizar Separadores Centrífugos LAKOS®

01. ALTA EFICIENCIA

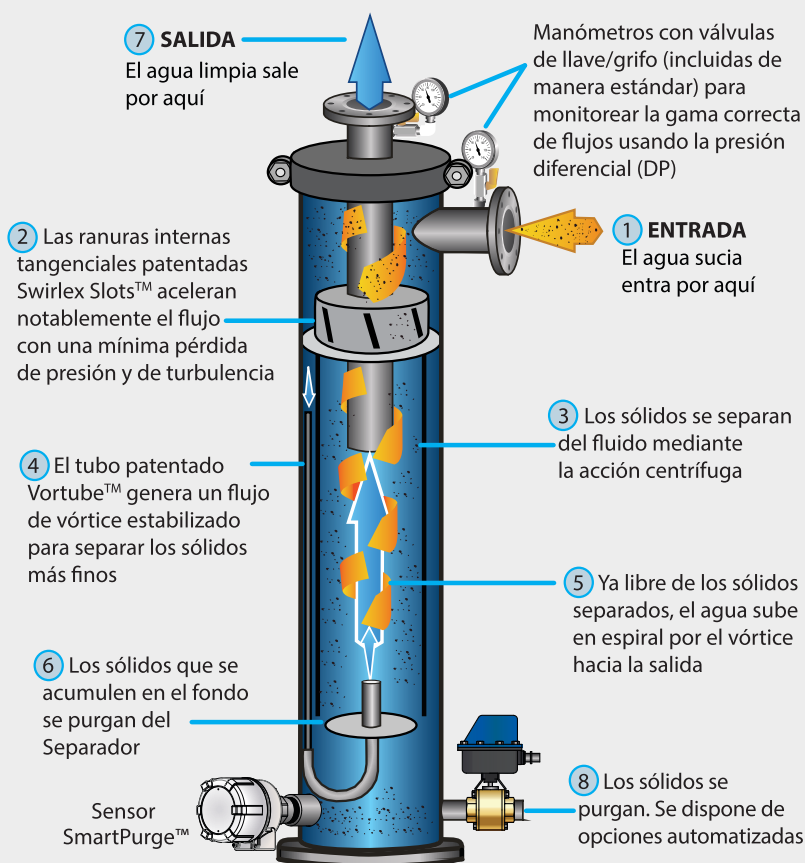
Separación continua de sólidos sin interrupción del flujo del sistema, garantizando un rendimiento óptimo constante.

02. BAJO MANTENIMIENTO

Sin mallas, cartuchos ni elementos filtrantes internos que se desgasten, saturen o requieran recambios costosos.

03. AHORRO DE AGUA

Mínima pérdida de líquido durante las purgas periódicas de sedimentos, maximizando la sostenibilidad operativa.



Rendimiento del filtro calificado para separar el 98% de sólidos de 44 micrones (malla 325), con gravedad específica de 2.6 (Arena) y de mayor tamaño en una sola pasada. Con separadores LAKOS en serie alcanza a separar hasta 22 micrones!

LAKOS
SOLUCIONES DE FILTRACIÓN
www.lakos.com

SUCURSALES

DIMINSA
E N E R G Y S.A.S.
Medellín · Colombia
☎ +57 3023739450

DIMINSA
E N E R G Y LLC
Brasil · Estados Unidos
☎ +1 7864644080
www.diminsa.com

**EL BALANCE DE LA INGENIERIA FERROVIARIA: UNA DISCUSION TECNICA
INAPLAZABLE****Fernando Rey Valderrama**

*Ingeniero Civil. Experiencia específica en el sector ferroviario. Máster en ingeniería
ferroviaria
frey0826@hotmail.com*

Resumen: Cuando los estudios se superponen sin integrarlos, cuando se mezclan enfoques incompatibles, cuando se modifican alcances sin una explicación técnica robusta o cuando los procesos administrativos no acompañan la complejidad del proyecto, el país no avanza hacia una red ferroviaria moderna; se aproxima, más bien, a una nueva acumulación de frustraciones. Colombia no necesita más retórica ferroviaria. Requiere de una conducción técnica capaz de convertir la promesa de revivir los ferrocarriles a través de una política pública seria, articulada y ejecutable.

Palabras clave: Mejores Técnicas Disponibles (MTD), Residuos Municipales, Valorización Energética, Economía Circular, Ingeniería de Procesos, Evaluación de Alternativas

1. DEL ENTUSIASMO PUBLICITARIO A LA FRAGILIDAD TÉCNICA.

Es necesario iniciar recordando que hace cuatro años en Colombia se volvió hablar del ferrocarril con la solemnidad de las grandes promesas, pero todavía no logra tratarlo con la seriedad y la disciplina de la buena ingeniería. En el discurso público, el modo ferroviario aparece como símbolo de competitividad, integración territorial, sostenibilidad y modernización logística; en la realidad administrativa de hoy aún persisten señales de desarticulación institucional, estudios inconclusos, decisiones regulatorias frágiles y procesos contractuales cuya maduración técnica no parece corresponder a la magnitud de los anuncios. La distancia entre lo que se anuncia y aquello que realmente se estructura es, en la actualidad, uno de los principales riesgos en la consolidación de una política ferroviaria seria.

Ese desfase no puede leerse como un simple tropiezo coyuntural. La revisión conjunta de los 18 proyectos anunciados por el gobierno 2022-2026, muestran un preocupante escenario: el país no enfrenta únicamente retrasos administrativos, sino un problema de gobernabilidad técnica. Cuando un sector tan complejo como el ferroviario se conduce con escaso conocimiento y la descoordinación entre entidades, con estudios que no se compaginan entre sí, con modificaciones contractuales que no obedecen a la normativa internacional y con vacíos de liderazgo en los niveles decisorios, se está comprometiendo no solo el cronograma de los proyectos, sino la credibilidad misma de la política pública y mucho más grave la exigencia reputacional que deben tener dichos programas.

Las estructuraciones publicadas entre 2025 y 2026 evidencian una paradoja difícil. Mientras se priorizan corredores y se anuncian inversiones multimillonarias, varios procesos fundamentales siguen atrapados entre la indefinición institucional y la insuficiencia técnica. Se advierte, por ejemplo, la existencia de contratos estratégicos adjudicados sin la oportuna suscripción de las actas de iniciación desconociendo así los compromisos contractuales; la persistente negativa a las iniciativas privadas que continúan sin definición, junto con la aparición de dudas técnicas sobre estructuras contractuales, alcances, cargas de diseño, documentos de soporte, estándares de referencia y conformación de equipos profesionales. Un país puede anunciar seis proyectos, diez corredores o un nuevo relato ferroviario; lo que no puede hacer es confundir el acto político de anunciar con el deber técnico de materializar.

En este punto conviene decirlo sin eufemismos: el ferrocarril no admite improvisación o aquello que los técnicos de ahora llaman “*operación temprana*”. No, no se trata de una infraestructura cualquiera ni de una agenda susceptible de administrarse con premisas improvisadas. Un sistema ferroviario exige coherencia entre el trazado, su infraestructura, análisis de la demanda, la operación y la seguridad, esto con una sólida capacidad institucional y una sostenibilidad financiera. Allí radica la gravedad del momento en que se encuentran nuestros ferrocarriles: buena parte del debate público se ha instalado en el plano de la expectativa, mientras que la ingeniería aún espera el escenario de la ejecución rigurosa.

2. LA CONFIANZA SE CONSTRUYE CON MÁS INGENIERÍA QUE CON ANUNCIOS.

La decisión sobre el corredor Pacífico y su conexión con el corredor central (La Dorada – Chiriguaná), junto con la situación de Bogotá–Belencito y el acceso del Altiplano Cundi-Boyacense a los puertos del Pacífico y el Atlántico, todavía no se vislumbran luego de este cuatrienio. Igualmente, pese a la importancia del canal alterno de Panamá, como lo es el Interoceánico entre Cupica y Tarena, en el departamento del Choco, este gobierno no logró llevarlo a buen término, pese a que fue propuesto como iniciativa privada que no requería de recursos públicos. Igual tratamiento sufrió la interesante y sustentada propuesta de una ferropista entre Cajamarca y Calarcá. Por otra parte, algunos expertos han coincidido en que el proyecto del corredor Villavicencio – Puerto Gaitán, no es viable si no se tiene conexión con Bogotá.

El efecto de las indecisiones administrativas propicia un ambiente de desconfianza tanto en la banca de inversión, como en las empresas interesadas en construir aquellos proyectos neurálgicos para Colombia. La infraestructura ferroviaria necesita de capital, tiempo, normatividad técnica, estabilidad regulatoria y administrativa del Estado. Entonces, para ganar la confianza de este sector, urge desarrollar una tarea a partir de documentos técnicamente impecables, reglas previsibles, interlocutores competentes y una institucionalidad acorde con las necesidades de un sistema integrado de carga y pasajeros, que tanto necesita el país.

Entre otras decisiones administrativas que pasaron por las manos de cuatro ministros que no las concretaron, fue la creación de la Agencia Nacional de Ferrocarriles y Puertos; los recursos destinados al fortalecimiento técnico del sector fueron utilizados en engrosar la nómina de las entidades para atender temas completamente ajenos al del sector férreo.

3. MODERNIZAR EL ESTADO PARA QUE LA INFRAESTRUCTURA FUNCIONE

El sector de infraestructura y transporte necesita una transformación profunda orientada a la modernización de la gestión pública, a la eficiencia del Estado en los asuntos públicos y a una desregulación inteligente que elimine trabas estériles sin sacrificar rigor técnico ni control. Colombia requiere instituciones ágiles para estructurar oportunidades de empresa e inversión, pero también suficientemente serias para impedir que la celeridad se convierta en improvisación. La ingeniería puede y debe aportar a esa transición mediante una mejor gestión de activos, una gobernanza institucional correcta, políticas claras para la inversión en grandes y pequeñas obras, con una visión de continuidad que supere el cortoplacismo burocrático.

En esa discusión vuelve a recobrar vigencia una enseñanza esencial de mi maestro, el Ingeniero Alfredo D. Bateman Q.: *“el ingeniero no es un simple ejecutor de instrucciones ni un adorno retórico del desarrollo, sino un actor central en la construcción material de país”*. Recuperar ese concepto implica volver a premiar la preparación, la técnica, el estudio y la práctica. Implica reconocer que la obra pública no prospera por afinidad ideológica, sino por competencia demostrada, también es entender que el esfuerzo ingenieril tiene un fin ulterior: producir bienestar, riqueza, conocimiento y mejores condiciones de vida para las comunidades. Sin esa jerarquía del mérito técnico, cualquier plan de infraestructura termina subordinado a la contingencia política como se vio en este gobierno.

4. EL FERROCARRIL EXIGE MÉRITO TÉCNICO Y EXPERIENCIA PROBADA.

Por eso resulta indispensable insistir en un punto que debería ser elemental, pero que hoy exige ser reafirmado: el sistema ferroviario colombiano necesita ingenieros y técnicos conocedores, personas que hayan estudiado el modo, sepan su operación, conozcan sus normas, entiendan sus restricciones y acumulen experiencia real en diseño, estructuración, mantenimiento, construcción y gestión. El ferrocarril no puede quedar a merced de funcionarios ocasionales, de improvisaciones burocráticas o de emotivas peroratas. Un corredor férreo no se rescata con eslóganes, se rescata con cálculo, diagnóstico, especificaciones, planeación, operación y disciplina técnica.

Del mismo modo, conviene trazar una frontera institucional sana: los políticos deben hacer política pública, definir prioridades, asignar recursos y responder por la orientación del Estado; pero la planeación, gestión y ejecución de las obras, los diseños, la estructuración especializada y la ingeniería de detalle deben quedar bajo la conducción de quienes saben

resolver problemas en su materia y para el cual el Estado los ha reconocido con una tarjeta profesional. Confundir esos planos ha sido uno de los grandes errores del presente gobierno. El ferrocarril es, en esencia, ingeniería pura y dura: geometría, resistencia, interacción rueda-riel, interoperabilidad, señalización, mantenimiento, logística, integración y economía del transporte. Cuando esa realidad se subordina al cálculo político y a la arenga del día, el resultado no es gobernabilidad; es deterioro técnico con consecuencias fiscales e institucionales.

5. LECTURA CRÍTICA DE LOS CORREDORES PRIORIZADOS

Conexión Interoceánica

En el corredor interoceánico se hace visible la desconexión entre entidades y la falta de definición estratégica. Mientras la UPIT adelantó un perfil, el sector privado radicó una iniciativa privada de mayor alcance en el año 2024. El problema no es que existan varias aproximaciones, sino que el Ministerio no haya integrado esas piezas en una sola hoja de ruta. La ausencia de decisión sobre la iniciativa privada, aun después de múltiples reuniones, transmitió un mensaje de incertidumbre que desalienta a los inversionistas y revela que este gobierno no estaba preparado y no sabe cómo resolver la coexistencia entre impulso público, el interés privado y la planeación nacional.

Corredor Pacífico Yumbo - Caimalito

Este corredor concentra una paradoja severa: se anuncia su recuperación, pero persisten obstáculos elementales para hacerlo viable. El antecedente de la concesión caducada y la no reversión plena del corredor a la Nación han impedido rehabilitarlo con normalidad. A ello se suma el deterioro causado por años de abandono, incluidos robos de superestructura y afectaciones a puentes. La problemática de fondo es contundente: se solicitaron cotizaciones para reconstrucción sin que estuvieran plenamente soportadas en diagnósticos técnicos integrales, estudios de puentes, subbases, bases y análisis de carga tipo COOPER. En ingeniería, cotizar sin soporte no es acelerar; es trasladar la incertidumbre al contrato y costos que deberá resolver el próximo gobierno.

Buenaventura - Palmira y su conexión con el corredor central

El tramo Buenaventura - Palmira no puede analizarse aisladamente porque hace parte de la conexión estratégica Buenaventura - La Dorada. Allí aparece una de las interferencias más graves: una miscelánea desacertada de estudios añejos con los actuales que derivó en recientes acciones administrativas, sin parámetros técnicos lógicos y con alcances operacionales diferentes. Este mal ejercicio debilitó la posibilidad de avanzar a una etapa de factibilidad de manera clara y precisa y no se continuó con la estructuración que se tenía planificada. En lugar de consolidar una secuencia técnica y ordenada al sector, solo se introdujo ruido, reprocesos y desgaste institucional como resultado de tareas asignadas a asesores que desconocen el tema. Un corredor de esta envergadura no puede construirse sobre

comparaciones arbitrarias; se necesita continuidad metodológica y una autoridad que cierre las discusiones con base en evidencia, no en urgencias políticas sin sustento.



Figura 1. Vista Norte de aproches del corredor ferroviario del Pacífico al puente sobre el Río Cauca en inmediaciones de Cali, Valle del Cauca, más de 6 años de abandono.

Fuente: el autor.



Figura 2 Vista sur, puente ferroviario en cercanías a la estación de Irra, Red Pacifico.

Fuente: el autor.

Villavicencio - Puerto López - Puerto Gaitán

Este corredor ilustra el riesgo de convertir una aspiración política en promesa de obra antes de resolver su viabilidad material. Los propios análisis mencionados para la prefactibilidad sugieren problemas de costo-beneficio por bajos volúmenes de carga, al tiempo que se cuestiona el destino funcional del trazado si no se articula con Bogotá o con la red central. A ello se suma un elemento simbólicamente delicado: anunciar la construcción ferroviaria a cargo de ingenieros militares que aún no se han conformado ni están debidamente dotados para semejante tarea. En materia férrea, la voluntad no reemplaza la especialización. Sin equipos, herramientas, normatividad de construcción y definición operacional, el corredor corre el riesgo de permanecer en el terreno de la consigna. Como ya se puede concluir, en el primer semestre de 2026 no se colocará ningún riel ni durmiente ni se obtendrán resultados prácticos, evidenciando la desproporcional desconexión de maduración de proyectos y negligencia de los funcionarios estructuradores con debilidades técnicas e improvisaciones en los criterios y pliegos, esto según las mismas y no pocas observaciones manifestadas por los proponentes.

Conexión Bogotá - Región con el corredor central

El caso de la conexión de Bogotá - Región con el corredor central obliga a una reflexión operativa de fondo. Tal como se plantea en los insumos, los nuevos recorridos propuestos pueden alargar de forma significativa trayectos que antes eran mucho más directos, encareciendo la movilización y aislando por ferrocarril aquellas zonas estratégicas de generación de carga, incluida parte de Boyacá y la conexión con Buenaventura. La discusión aquí no es meramente cartográfica: es económica, de logística y sistémica. Un corredor que aumenta sustancialmente la distancia efectiva para conectar centros de producción con los principales puertos de Colombia debe justificar con claridad sus ventajas comparativas; de lo contrario, el país puede terminar celebrando una conexión formal mientras pierde competitividad real.

Así mismo, es imperante que los estructuradores de la factibilidad se tomen la tarea de revisar cuidadosamente los estudios puesto que no se conocieron y la ANI no publicó los resultados que aún hoy no se han cerrado, como es el concepto de la ANLA sobre cruzar por la Serranía de los Yariguíes, un parque nacional, sin que comunique con ninguna población en más de 100 kilómetros, algo que es de sopesar puesto que no responde a un criterio sensato de ingeniería ferroviaria.

Bogotá – Belencito

Lejos de ser un corredor secundario, Bogotá - Belencito es una prueba de credibilidad para el Estado. Se trata de un corredor neurálgico, existente y activo pero afectado por la baja inversión y nula visión ferroviaria; sobre su operación se ciernen problemas de administración, puntos críticos históricos no resueltos, descarrilamientos, deslizamientos,

cierres operacionales y disponibilidad insuficiente de locomotoras. A esto se suman cambios contractuales recientes que, según los documentos, reducen plazos, recortan alcance, disminuyen personal y eliminan exigencias de experiencia para tareas especializadas. Ese tipo de flexibilización no es intrascendente: cuando se rebajan requisitos técnicos en un corredor complejo, la administración pública puede abaratar el papel, pero encarece el riesgo operativo y de mantenimiento. La pregunta ya no es solo cómo administrar el corredor, sino si el modelo escogido sirve realmente para recuperarlo con confiabilidad en los servicios de transporte.

Entre las observaciones realizadas por actores del sector se encuentran:

- Vacíos en documentos de soporte técnico
- Terminología técnica incorrecta o imprecisa
- Presupuestos alejados de las condiciones reales del mercado
- Ausencia de estudios previos robustos
- Debilidades en los documentos de planeación
- Inversiones no integradas con la realidad



Figura 3. Descarrilamiento en el corredor Bogotá - Belencito, en cercanías de Tunja.

Foto: Defensa Civil

También se ha señalado que de los profesionales firmantes de documentos de estructuración no acreditan experiencia comprobada en proyectos ferroviarios o de estructuración de este tipo de procesos, como es lo deseable. Lo anterior refleja el pésimo estado del sector ferroviario que era altamente especializado, situación que plantea interrogantes sobre la idoneidad técnica de quienes participan en procesos de decisión de alto impacto y si en verdad se hace control y seguimiento por parte de la Contraloría General de la República y la Procuraduría General de la Nación.



Figura 4. Descarrilamiento Accidente de tren en paso a nivel en Duitama un fallecido y tres heridos. Foto: Defensa Civil

6. UNA INSTITUCIONALIDAD FERROVIARIA CON DENSIDAD PROFESIONAL.

Es oportuna una reflexión seria sobre la arquitectura institucional. Desde hace años se reconoce la necesidad de un ente o de una capacidad estatal especializada, estable y ajena a la intriga política, capaz de ordenar técnicamente el sistema ferroviario en todo su ámbito. Pero esa necesidad no se resuelve creando burocracias nominales o grupos informales sin soporte real, como el anunciado “*grupo ferroviario*” del Ministerio de Transporte, el cual, si se ha conformado, no ha sido con el respaldo de profesionales altamente especializados. Esta situación se resuelve construyendo capacidades, integrando información, definiendo normas propias, consolidando equipos interdisciplinarios de alto nivel y garantizando continuidad administrativa competente. La ausencia de una estructura eficiente se explica, en parte, por qué proyectos estratégicos siguen empantanados entre anuncios, ajustes, reprocesos y vacíos de coordinación. Las grandes entidades adscritas al sector se convirtieron en “contrataderos” inoperantes que distan mucho de la fama de ser ejecutores.

Un país que aspira a reactivar su ferrocarril no puede permitirse repetir los errores de las décadas pasadas: corredores aislados, inversiones inconexas, contratos de administración sin recuperación estructural suficiente, decisiones divorciadas de la operación, fragmentación entre entidades y abandono de las lecciones ya aprendidas. Menos aún, cuando la red ferroviaria no debe pensarse como una sucesión de trazados sueltos, sino como un sistema articulado con puertos, plataformas logísticas, carreteras, centros de producción y nodos de transferencia. Sin integración técnica real, la política ferroviaria corre el riesgo de convertirse en una colección de mapas atractivos y resultados incipientes.

7. LA DECISIÓN DE FONDO

La pregunta, entonces, no es si Colombia debe tener ferrocarril. Esa discusión está superada. La pregunta verdadera es si el país está dispuesto a hacer lo que el ferrocarril exige: planeación integral, autoridad técnica, decisiones consistentes, prioridad al conocimiento especializado, evaluación rigurosa, seguridad jurídica, recursos bien ejecutados y una institucionalidad que responda más a la ingeniería que a la ansiedad del titular político. Si la respuesta sigue siendo ambigua, el país continuará celebrando anuncios falsos y disfrazados de novedad, mientras postergan las reales soluciones.

Adicional y no menos importante es la tortuosa situación por la que han pasado los diferentes interesados del sector privado, que mediante la figura de Asociaciones Público Privadas - APP o Iniciativas Privadas IP (que no requieren de recursos públicos), han invertido en la estructuración de proyectos estratégicos multimodales. Van más de 35 propuestas, sin que alguna de estas haya tenido aprobación por parte de la ANI. Esta situación incrementa la desconfianza de inversionistas, no solo por las deficiencias en la evaluación de estos proyectos, sino también por la ausencia de reglas claras que reglamenten las evaluaciones.

Todo esto ocurre en un momento en que el Estado colombiano ha destinado aproximadamente 1,4 billones de pesos para el modo ferroviario en la vigencia 2026, entre proyectos de inversión, obra pública y estructuración. Sin embargo, no existen indicadores públicos claros que permitan evaluar y hacer seguimiento al avance real de estos recursos en términos de ejecución efectiva de infraestructura.

La combinación de altos niveles de inversión, baja ejecución, debilidad técnica institucional y una conducción fragmentada de la política pública configura un riesgo fiscal, institucional y operativo para el país. Enfrentar un nuevo ciclo de frustraciones en política ferroviaria, comprometiendo seriamente el futuro del transporte de carga y pasajeros que el actual gobierno ha anunciado como una prioridad estratégica para el desarrollo nacional, deja retos importantes que deberán ser atendidos por el siguiente gobierno con la seriedad y responsabilidad que merece el modo.

La oportunidad consiste en revertir decisiones inoportunas derivadas del desconocimiento y, más bien, urge fortalecer académicamente al sector ferroviario colombiano que conserva un valor estratégico, demanda potencial, interés empresarial y una justificación territorial evidente. Aprovechar esa oportunidad exige abandonar la comodidad del relato y entrar en la exigencia de la técnica. No hay modernización ferroviaria sin Estado competente y no hay Estado competente sin un ferrocarril que respete la disciplina de la ingeniería.

Si Colombia quiere de verdad recuperar el ferrocarril, debe volver a una realidad fundamental y que nunca debió olvidar: los asuntos de normatividad, planeación, diseño, obra y operación no nacen de la consigna publicitaria sino del conocimiento y para ello la ingeniería ferroviaria tiene que exigir su participación y retomar la posición que antes mereció y le entregó al país inmensos beneficios. El ferrocarril no es solo transporte: es justicia territorial.

REFERENCIAS:

1. Bateman Quijano, A. D. (1935), “La profesión del ingeniero: Su misión histórica”, revista APEX, edición Oct-Nov.
2. Benavides Quintero, H. D. (2024). Análisis de la gestión de activos operacionales para el aprovechamiento estratégico infraestructuras ferroviarias.
3. Benavides Quintero, H. D. (2025). Políticas públicas globales del ferrocarril, Marco Normativo del sector ferroviario y su aplicación en Colombia, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, Encadenamientos productivos.
4. Departamento Nacional de Planeación. (2023). Plan Plurianual de Inversiones (PPI) 2023-2026.
5. Kohon, J. (2011, octubre). Más y mejores trenes: Cambiando la matriz de transporte en América Latina y el Caribe (Nota técnica No. IDB-TN-303). Banco Interamericano de Desarrollo.
6. Rey Valderrama, F. (2021, julio-septiembre). Reflexiones sobre el Plan de Ferrocarriles. Revista ACIEM, 143, 34–37.
7. Orduz Duarte, A. (2005). Los Ferrocarriles ante la Sociedad Colombiana de Ingenieros.
8. Escobar Muriel, O. (2018). Los caminos del Rionegro: Historia del Ferrocarril de Cundinamarca, 1847-1953. Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
9. Escobar Muriel, O. (2022). Los rieles de una ilusión: Historia del Ferrocarril del Norte (1870-1950). Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
10. Gobernación del Huila. (2023, junio 6). “Tenemos una oportunidad de oro de que el sur vuelva a integrarse”: Gobernador del Huila sobre red férrea.
11. Ministerio de Transporte. (2020). Plan Maestro Ferroviario.
12. Ministerio de Transporte. (2024). Ministerio de Transporte radicó por segunda vez el proyecto de Ley Ferroviaria ante el Congreso de la República.
13. Ministerio de Transporte. (2024). Proyecto de Resolución del Ministerio de Transporte, Por el cual se sustituye el Título 4 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1079 de 2015, Único Reglamentario del Sector Transporte.
14. Ministerio de Transporte. (2026), Audiencia Pública de Rendición de Cuentas del sector transporte.
15. Ministerio de Transporte. (2023). Plan Maestro de Transporte Intermodal (2021-2051): Conectividad, convergencia, progreso y calidad de vida para el país.

SÉ PARTE DE NUESTRA — REVISTA SAI —

Si deseas contribuir con artículos o contenido de interés, escríbenos a

subdireccionestrategica@sai.org.co



Tienes plazo hasta
OCTUBRE DEL 2026



Construyamos
conocimiento juntos.



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

CHERNOBYL 1986–2026
40 AÑOS QUE TRANSFORMARON LA INDUSTRIA NUCLEAR.
DEL PROGRAMA NUCLEAR SOVIÉTICO AL NACIMIENTO DE LA CULTURA
MODERNA DE SEGURIDAD NUCLEAR

Daniel Herrera Cardona

Físico Nuclear y de Plasma en formación. Divulgador e Investigador sobre Ciencia y Tecnologías Nucleares. Universidad de Antioquia, Colombia. Miembro de la Asociación Nuclear Colombiana (ASNC).

herreradaniel090@gmail.com

Resumen: A cuarenta años del accidente de Chernobyl, su significado histórico continúa siendo objeto de debate público, técnico y político. Con frecuencia, el accidente ocurrido el 26 de abril de 1986 en la Unidad 4 de la Central Nuclear Vladimir Ilich Lenin ha sido interpretado como una condena definitiva contra la energía nuclear. Sin embargo, una revisión rigurosa de sus antecedentes, causas y consecuencias permite una lectura más precisa: Chernobyl fue el resultado de una combinación específica de diseño reactor, cultura institucional, errores operacionales, secretismo estatal y debilidades regulatorias propias del programa nuclear soviético.

Este artículo examina los orígenes del programa nuclear de la Unión Soviética, la concepción del reactor RBMK, los incidentes previos que anticiparon vulnerabilidades sistémicas, la secuencia técnica del accidente y las transformaciones posteriores en la seguridad nuclear mundial. Se argumenta que el legado más importante de Chernobyl no fue el fin de la energía nuclear, sino el inicio de una nueva etapa marcada por la cultura de seguridad, la defensa en profundidad, la cooperación internacional, la regulación independiente y la mejora continua. Comprender Chernobyl con rigor permite superar el mito y extraer lecciones relevantes para el futuro energético, tecnológico e institucional de Colombia y el mundo.

Palabras clave: Chernobyl, RBMK, Seguridad nuclear, Cultura de seguridad, Energía nuclear.

CHERNOBYL ENTRE EL MITO Y LA INGENIERÍA

Pocas palabras tienen tanto peso simbólico en la historia tecnológica del siglo XX como Chernobyl. Para una parte importante del público, su sola mención evoca imágenes de destrucción, evacuación, radiación invisible, ciudades abandonadas y miedo nuclear. Durante décadas, el accidente ocurrido el 26 de abril de 1986 ha sido utilizado como argumento definitivo contra la energía nuclear, muchas veces sin distinguir entre el hecho histórico, las

condiciones técnicas específicas del reactor accidentado y las transformaciones profundas que siguieron dentro de la industria nuclear mundial.

Sin embargo, Chernobyl no puede entenderse únicamente como un símbolo cultural. Tampoco puede reducirse a una consigna política, ni a una advertencia abstracta contra toda forma de aprovechamiento de la energía nuclear. Fue, ante todo, un accidente técnico, institucional y humano, ocurrido dentro de un contexto histórico muy particular: el programa nuclear soviético, su estructura de poder, su cultura de secretismo, su modelo industrial y una concepción de la seguridad muy distinta a la que hoy se considera indispensable en el sector nuclear.

La tesis central de este artículo es que Chernobyl no demostró la inviabilidad de la energía nuclear. Lo que demostró fue algo más profundo y universal: ninguna tecnología compleja puede operar de forma segura cuando se combinan fallas de diseño, procedimientos inadecuados, presión institucional, entrenamiento insuficiente, debilidad regulatoria y ausencia de una cultura robusta de seguridad.

En ese sentido, Chernobyl pertenece a la historia nuclear, pero también a la historia general de la ingeniería. Su estudio permite comprender cómo interactúan los sistemas técnicos con las organizaciones humanas, cómo los errores latentes pueden acumularse durante años y cómo una cultura institucional cerrada puede impedir que señales tempranas se conviertan en acciones correctivas oportunas. Por eso, más que un episodio congelado en 1986, Chernobyl debe ser leído como una lección permanente sobre la relación entre tecnología, Estado, regulación, industria y sociedad.

Para entender el accidente es necesario retroceder varias décadas. El reactor número 4 de la Central Nuclear Vladimir Ilich Lenin no apareció de forma aislada en la historia soviética. Fue el resultado de una trayectoria científica, militar e industrial iniciada en los años cuarenta, acelerada por la Segunda Guerra Mundial y consolidada durante la Guerra Fría. Esa trayectoria determinó no solo el tipo de reactores que la Unión Soviética desarrolló, sino también la manera en que concebía la relación entre poder estatal, conocimiento científico y riesgo tecnológico.

DEL ÁTOMO MILITAR AL ÁTOMO INDUSTRIAL SOVIÉTICO

El programa nuclear soviético nació bajo la presión de una época extrema. Durante la Segunda Guerra Mundial, la Unión Soviética comprendió que el dominio del átomo podía definir el equilibrio estratégico global. La información sobre el Proyecto Manhattan estadounidense, sumada a la urgencia militar y política del momento, llevó al Estado soviético a organizar un esfuerzo científico altamente centralizado, controlado desde las más altas esferas del poder.

Bajo el liderazgo político de Iósif Stalin y con figuras científicas como Ígor Kurchátov, la Unión Soviética construyó una estructura nuclear marcada por la prioridad estratégica, la

disciplina burocrática y el secreto de Estado. El objetivo inicial era claro: romper el monopolio nuclear de Estados Unidos. Ese objetivo se cumplió el 29 de agosto de 1949, cuando la URSS detonó su primera bomba atómica, conocida como RDS-1, en el sitio de pruebas de Semipalatinsk, en Kazajistán.

Ese momento inauguró formalmente la carrera armamentista nuclear de la Guerra Fría. Pero el átomo soviético no se limitó al ámbito militar. En los años siguientes, la energía nuclear también se convirtió en un símbolo de modernidad, progreso científico e industrialización socialista. La central nuclear de Obninsk, conectada a la red eléctrica en 1954, fue presentada como una demostración de que el átomo podía servir no solo para la guerra, sino también para la producción de electricidad.

Obninsk tuvo una enorme importancia simbólica. Fue la primera central nuclear del mundo en suministrar electricidad a una red. Aunque su potencia era modesta, su valor propagandístico y tecnológico fue inmenso. Representaba la idea de que la Unión Soviética no solo podía competir militarmente con Occidente, sino también liderar el uso pacífico de la energía nuclear.

Durante los años cincuenta y sesenta, la URSS desarrolló varias líneas tecnológicas de reactores. Entre ellas destacaron los VVER, reactores de agua presurizada con cierta similitud conceptual con los PWR occidentales, y los RBMK, reactores de gran potencia, moderados por grafito y refrigerados por agua ligera. Ambas líneas respondían a necesidades distintas, pero el RBMK encarnó de manera particular la lógica industrial soviética: gran escala, potencia elevada, uso de uranio poco enriquecido y posibilidad de recargar combustible durante la operación.

Esta última característica era muy atractiva para un país que buscaba reactores capaces de operar de manera continua, producir grandes cantidades de electricidad y ajustarse a una infraestructura industrial propia. El RBMK no fue concebido como una anomalía irracional. Fue una solución tecnológica coherente con prioridades soviéticas específicas. El problema fue que esas prioridades no siempre estuvieron equilibradas por criterios de seguridad suficientemente transparentes, independientes y conservadores.

LA CONCEPCIÓN DEL RBMK: POTENCIA, ESCALA Y VULNERABILIDAD

El RBMK, sigla rusa de reactor de gran potencia de canales, fue una de las expresiones más características de la ingeniería nuclear soviética. A diferencia de muchos reactores occidentales, que utilizan una vasija de presión única para contener el núcleo, el RBMK se basaba en un diseño canalizado. Miles de canales de presión atravesaban un enorme bloque de grafito que actuaba como moderador neutrónico, mientras el agua ligera circulaba como refrigerante.

Esta arquitectura ofrecía ventajas industriales importantes. Permitía construir reactores de gran tamaño sin depender de grandes vasijas de presión, cuya fabricación requería

capacidades metalúrgicas muy exigentes. También permitía recargar combustible sin apagar el reactor, una característica operativa valiosa para maximizar la disponibilidad de la planta. Además, el uso de grafito como moderador permitía emplear uranio poco enriquecido, reduciendo algunas exigencias asociadas al combustible.

Desde una perspectiva soviética de los años sesenta y setenta, el RBMK era una máquina poderosa, flexible y alineada con las necesidades del Estado. Pero su diseño contenía rasgos que, bajo ciertas condiciones, podían comprometer gravemente la estabilidad del reactor.

Uno de los más importantes era el coeficiente de vacío positivo. En muchos reactores, cuando el agua refrigerante hierve y se forman burbujas de vapor, la reacción nuclear tiende a disminuir, porque el agua también participa en el equilibrio neutrónico del sistema. En el RBMK, bajo ciertas condiciones de operación, la formación de vapor podía aumentar la reactividad del núcleo en lugar de reducirla. Dicho de forma sencilla: en algunos escenarios, el reactor podía responder al aumento de vapor con un aumento adicional de potencia.

Esta característica era especialmente peligrosa a baja potencia y en configuraciones inestables del núcleo. Si a ello se sumaban procedimientos operacionales inadecuados, retiro excesivo de barras de control y condiciones complejas de distribución de potencia, el reactor podía entrar en un régimen difícil de controlar.

Otro elemento crítico fue el diseño original de las barras de control, que incorporaban desplazadores de grafito en sus extremos. La función general de una barra de control es absorber neutrones y reducir la reactividad del reactor. Sin embargo, en el diseño original del RBMK, al comenzar la inserción de las barras, los desplazadores de grafito podían introducir inicialmente un aumento local de reactividad en ciertas zonas del núcleo, antes de que la parte absorbente de la barra produjera el efecto esperado de apagado. Esta característica sería decisiva durante la activación del sistema AZ-5 la noche del accidente.

El RBMK también presentaba una complejidad operacional considerable. Su gran tamaño, la distribución espacial del flujo neutrónico, la sensibilidad del núcleo a ciertas configuraciones y la interacción entre refrigeración, moderación y control requerían una operación altamente disciplinada y una comprensión profunda de sus límites. En una cultura moderna de seguridad, esas características habrían exigido información abierta, entrenamiento permanente, revisión crítica del diseño, regulación independiente y comunicación transparente de incidentes previos.

Pero en el sistema soviético, la información técnica sensible no circulaba con libertad. El secretismo estatal, la jerarquía burocrática y la tendencia a proteger la imagen del programa nuclear limitaron la capacidad de aprendizaje colectivo. Vulnerabilidades conocidas no siempre fueron comunicadas con claridad a todos los operadores. Algunas señales de alerta quedaron atrapadas en canales técnicos restringidos. Y esa falta de transparencia contribuyó a que los riesgos del RBMK no fueran comprendidos en toda su magnitud por quienes operaban estas máquinas.

LOS CHERNOBYLS QUE NO FUERON

Una de las ideas más importantes para comprender el accidente de 1986 es que Chernobyl no surgió de la nada. Antes del desastre ya habían ocurrido incidentes que anticipaban vulnerabilidades importantes en la tecnología RBMK y en la cultura operacional soviética.

El caso más significativo fue el accidente parcial ocurrido en 1975 en la Unidad 1 de la central nuclear de Leningrado, una de las primeras instalaciones con reactores RBMK. Durante una operación a baja potencia, el reactor experimentó una subida inesperada de potencia que produjo daños en canales de combustible y liberaciones radiactivas parciales. Aunque el evento no alcanzó la escala catastrófica de Chernobyl, sí reveló problemas que luego serían centrales en 1986: inestabilidad a baja potencia, dificultades en la interacción entre operadores y reactor, y comportamiento peligroso del núcleo bajo determinadas condiciones. Leningrado 1975 fue, en retrospectiva, una advertencia temprana. Mostró que el RBMK podía comportarse de manera no intuitiva y que ciertas configuraciones operacionales podían llevar a aumentos peligrosos de potencia. También evidenció la necesidad de revisar procedimientos, diseño de barras de control y límites operacionales. Sin embargo, la información no se tradujo en una transformación sistémica suficientemente amplia.

Durante los años setenta y ochenta también se reportaron anomalías en otras plantas con reactores RBMK, incluyendo problemas de vibración, deformación de canales y comportamientos neutrónicos inesperados. En instalaciones como Smolensk y nuevamente Leningrado, los operadores y especialistas detectaron fenómenos que debieron alimentar una discusión técnica más abierta y profunda. Pero la cultura de secretismo soviética dificultaba que estos aprendizajes circularan de manera efectiva.

La propia central de Chernobyl también había presentado incidentes antes de 1986. La Unidad 1 registró problemas relacionados con daños en combustible y dificultades operacionales durante sus primeros años de funcionamiento. Aunque estos eventos no fueron equivalentes al desastre de la Unidad 4, sí formaban parte de una cadena de señales que mostraban vulnerabilidades técnicas y organizacionales.

Por eso resulta inadecuado describir Chernobyl como un accidente absolutamente imprevisible. Lo que ocurrió en 1986 fue la culminación de advertencias acumuladas, vulnerabilidades conocidas parcialmente, decisiones operacionales riesgosas y una cultura institucional que no favorecía la corrección abierta de errores. En ingeniería, las catástrofes rara vez nacen de un único fallo. Suelen surgir de la acumulación de fallos latentes que permanecen ocultos hasta que una secuencia específica los activa al mismo tiempo.

Chernobyl fue precisamente eso: una convergencia fatal de diseño, operación, cultura y contexto político.

LA NOCHE DEL 26 DE ABRIL DE 1986

La secuencia inmediata del accidente comenzó con una prueba de seguridad. El objetivo era determinar cuánto tiempo las turbinas podían seguir generando electricidad por inercia después de una pérdida de suministro externo, antes de que los generadores diésel de emergencia alcanzaran plena capacidad. En principio, la prueba buscaba mejorar la seguridad de la planta. El problema fue la forma en que se ejecutó y las condiciones en que terminó realizándose.

La prueba estaba programada para el 25 de abril de 1986, pero fue retrasada por demandas de la red eléctrica soviética, que necesitaba mantener la generación durante más tiempo. Como consecuencia, el reactor permaneció en una condición transitoria durante varias horas. El equipo de operación nocturno recibió una situación ya alterada, con el reactor en un estado complejo y con presión por completar la prueba.

Durante la reducción de potencia, el reactor cayó accidentalmente a un nivel extremadamente bajo. Esta caída favoreció el envenenamiento por xenón-135, un producto de fisión que absorbe neutrones de manera muy eficiente y dificulta mantener la reacción en cadena. Para recuperar potencia, los operadores retiraron un número excesivo de barras de control, dejando el reactor en una configuración inestable y con márgenes de seguridad reducidos.

La combinación era peligrosa: operación a baja potencia, núcleo envenenado por xenón, distribución irregular de potencia, muchas barras retiradas y un reactor con coeficiente de vacío positivo. En tales condiciones, el RBMK podía reaccionar de manera abrupta ante cambios en la refrigeración y la generación de vapor.

Al comenzar la prueba, se redujo el flujo de agua y se alteraron las condiciones termohidráulicas del sistema. La formación de vapor aumentó. Debido al coeficiente de vacío positivo, ese aumento de vapor incrementó la reactividad del núcleo. La potencia comenzó a subir rápidamente. Ante la situación, se activó el sistema de apagado de emergencia AZ-5.

En cualquier reactor, el sistema de apagado de emergencia debería llevar el núcleo a una condición segura. Pero en el RBMK de Chernobyl, el diseño de las barras de control produjo un efecto inicial contrario en ciertas regiones del núcleo. Los desplazadores de grafito entraron primero, desplazando agua absorbente de neutrones y aumentando localmente la reactividad antes de que la sección absorbente de las barras pudiera dominar el proceso. En un reactor que ya estaba extremadamente inestable, ese aumento inicial fue suficiente para desencadenar una excursión de potencia catastrófica.

En cuestión de segundos, la potencia se elevó de forma descontrolada. El combustible se fragmentó, los canales de presión se rompieron, el agua se transformó violentamente en vapor y el núcleo fue destruido. Las explosiones resultantes destruyeron el reactor número 4 y expusieron material radiactivo al ambiente. El grafito del núcleo contribuyó a incendios prolongados que facilitaron la dispersión de radionúclidos.

La tragedia humana comenzó de inmediato. Trabajadores de la planta, bomberos y personal de emergencia respondieron sin comprender inicialmente la magnitud radiológica del evento. Muchos recibieron dosis elevadas de radiación. La ciudad de Pripyat, construida para alojar a los trabajadores de la planta y sus familias, fue evacuada al día siguiente. Con el paso de los días, la zona afectada se amplió y se estableció una zona de exclusión alrededor de la planta.

La respuesta inicial estuvo marcada por heroísmo, improvisación, desinformación y control político de la comunicación. La Unión Soviética tardó en reconocer plenamente la magnitud del accidente. Fue la detección de niveles anómalos de radiación en otros países europeos lo que obligó a admitir públicamente que había ocurrido un accidente severo.

Chernobyl se convirtió así no solo en una crisis nuclear, sino en una crisis de credibilidad institucional. La radiación no pudo ser contenida por las fronteras, y la información tampoco pudo permanecer indefinidamente oculta.

CONTENCIÓN, ZONA DE EXCLUSIÓN Y MEMORIA TÉCNICA

Después de la destrucción del reactor, el desafío inmediato fue contener la liberación de material radiactivo y estabilizar una instalación gravemente dañada. Miles de trabajadores, conocidos como liquidadores, participaron en tareas de emergencia, descontaminación, remoción de escombros, construcción de barreras y control radiológico. Su papel fue fundamental para evitar consecuencias aún mayores, aunque muchos de ellos trabajaron en condiciones extremadamente peligrosas.

Uno de los esfuerzos más importantes fue la construcción del sarcófago original, una estructura levantada con rapidez para cubrir los restos del reactor 4 y reducir la dispersión de material radiactivo. El sarcófago fue una obra de emergencia, construida bajo condiciones difíciles, con altos niveles de radiación y limitaciones técnicas evidentes. No fue concebido como una solución permanente, sino como una medida urgente de contención.

Décadas después, el New Safe Confinement fue construido para cubrir el antiguo sarcófago y proporcionar una estructura mucho más robusta, diseñada para facilitar el desmantelamiento futuro y mejorar la seguridad a largo plazo. Esta enorme obra de ingeniería simboliza uno de los aspectos más importantes del legado de Chernobyl: la transición desde la emergencia improvisada hacia la gestión técnica, internacional y planificada del riesgo.

La zona de exclusión, por su parte, se convirtió en uno de los elementos más complejos de la memoria de Chernobyl. La evacuación de Pripyat y de otras poblaciones representó una fractura humana profunda. Miles de personas fueron separadas de sus hogares y de su territorio. Al mismo tiempo, la reducción drástica de la actividad humana permitió procesos de recuperación ecológica no planificada. Con los años, la zona se transformó en un espacio donde conviven contaminación, memoria histórica, investigación científica y vida silvestre.

Es importante evitar una lectura romántica de esta transformación. La presencia de fauna y vegetación no elimina la realidad del daño radiológico ni el sufrimiento humano asociado al accidente. Pero sí muestra que la historia posterior de Chernobyl es más compleja que la imagen estática de una tierra muerta. La zona de exclusión es hoy un laboratorio involuntario sobre los efectos de la radiación, la resiliencia ecológica y la relación entre abandono humano y recuperación ambiental.

Chernobyl, por tanto, no terminó en 1986. Sigue siendo una instalación en gestión, un territorio en vigilancia, una memoria social abierta y una fuente de aprendizaje técnico para la industria nuclear mundial.

LA TRANSFORMACIÓN DE LA SEGURIDAD NUCLEAR MUNDIAL

El legado más importante de Chernobyl no fue el miedo. Fue la transformación profunda de la seguridad nuclear.

Después del accidente, la industria nuclear internacional comprendió que la seguridad no podía depender exclusivamente del diseño físico de las plantas. La ingeniería seguía siendo fundamental, pero no bastaba. Era necesario incorporar de manera explícita la dimensión organizacional, regulatoria y cultural. De esa reflexión surgió con fuerza el concepto moderno de cultura de seguridad nuclear.

La cultura de seguridad implica que la seguridad debe ser el principio rector de todas las decisiones, desde el diseño hasta la operación, desde la sala de control hasta la alta dirección, desde el operador hasta el regulador. Significa que las organizaciones deben fomentar la comunicación abierta, el reporte de errores, el cuestionamiento técnico, el aprendizaje continuo y la independencia profesional frente a presiones externas.

Chernobyl mostró lo que ocurre cuando la cultura institucional falla. El secretismo impidió que vulnerabilidades conocidas fueran comprendidas plenamente. La presión operativa contribuyó a ejecutar una prueba en condiciones inadecuadas. La confianza excesiva en el diseño redujo la percepción del riesgo. La debilidad regulatoria limitó la capacidad de corregir problemas de fondo. La seguridad fue tratada, en la práctica, como un aspecto subordinado a otros objetivos.

Tras el accidente, el Organismo Internacional de Energía Atómica fortaleció su papel en la cooperación técnica, la revisión de seguridad y la asistencia internacional. Se impulsaron mecanismos de notificación temprana, respuesta ante emergencias y revisión por pares. La comunidad internacional comprendió que un accidente nuclear severo no es un asunto puramente nacional. Sus consecuencias pueden atravesar fronteras físicas, políticas y psicológicas.

Los reactores RBMK que continuaron operando fueron sometidos a modificaciones importantes. Se rediseñaron aspectos de las barras de control, se redujo el coeficiente de vacío positivo, se establecieron límites operacionales más estrictos y se fortalecieron los sistemas automáticos de protección. Estas modificaciones no borran el accidente, pero demuestran que la industria nuclear estudió sus causas con profundidad y actuó sobre ellas.

También se consolidó el principio de defensa en profundidad. Este principio establece que la seguridad nuclear debe basarse en múltiples capas de protección. Ningún sistema único, ningún procedimiento aislado y ninguna decisión humana deben ser la única barrera entre una planta y un accidente severo. Deben existir redundancias, barreras físicas, sistemas independientes, procedimientos rigurosos, entrenamiento constante, supervisión regulatoria y preparación para emergencias.

La defensa en profundidad es, en cierto modo, una filosofía de humildad ingenieril. Reconoce que los componentes pueden fallar, los operadores pueden equivocarse, las condiciones externas pueden cambiar y las organizaciones pueden cometer errores. Por eso, la seguridad debe construirse como una arquitectura de capas, donde la falla de una barrera no implique la pérdida total del control.

El entrenamiento de operadores también cambió de manera profunda. La formación moderna utiliza simuladores avanzados, escenarios de emergencia, análisis de factores humanos y evaluación continua. La operación de una central nuclear no se entiende únicamente como una tarea técnica, sino como una actividad cognitiva compleja, donde la toma de decisiones bajo presión puede ser tan importante como el conocimiento de los sistemas físicos.

La regulación nuclear también se fortaleció. Una de las grandes lecciones de Chernobyl es que la seguridad requiere organismos reguladores independientes, técnicamente competentes y con autoridad real. Un regulador subordinado a intereses políticos, industriales o institucionales no puede cumplir adecuadamente su función. La independencia regulatoria es una condición esencial para cualquier programa nuclear serio.

En paralelo, los diseños nucleares modernos han incorporado cada vez más sistemas de seguridad pasiva, mayores márgenes de diseño y análisis probabilísticos de seguridad más sofisticados. La industria nuclear contemporánea opera bajo estándares internacionales mucho más exigentes que los existentes en 1986. Esto no significa que el riesgo haya desaparecido, pero sí que la manera de entenderlo, gestionarlo y reducirlo ha cambiado radicalmente.

Chernobyl obligó a la industria nuclear a mirarse críticamente. Ese proceso fue doloroso, pero indispensable. La seguridad nuclear moderna nació, en parte, de esa revisión profunda.

LECCIONES PARA COLOMBIA Y AMÉRICA LATINA

Para Colombia y América Latina, Chernobyl ofrece una lección especialmente importante. No se trata de importar miedo, ni de importar propaganda. Se trata de construir capacidad técnica, institucional y cultural para discutir la tecnología nuclear con madurez.

En nuestra región, el debate nuclear suele oscilar entre dos extremos: la fascinación acrítica y el rechazo automático. Ambos son insuficientes. La energía nuclear, como toda tecnología compleja, exige conocimiento, regulación, talento humano, infraestructura, transparencia y responsabilidad. No puede ser tratada como una solución mágica ni como un tabú intocable. Colombia cuenta con aplicaciones nucleares en medicina, industria, agricultura, investigación y protección radiológica. También posee una historia científica vinculada al reactor de investigación IAN-R1 y a capacidades institucionales que, aunque limitadas, pueden fortalecerse. En un contexto de transición energética, seguridad energética, descarbonización e industrialización tecnológica, el país necesita elevar el nivel de su conversación pública sobre lo nuclear.

Chernobyl enseña que la seguridad debe construirse antes que la infraestructura. Antes de hablar de grandes proyectos nucleares, un país debe preguntarse por su marco regulatorio, su autoridad competente, su formación universitaria, sus capacidades de emergencia, su cultura de protección radiológica, su sistema de comunicación pública y su articulación internacional.

La ingeniería colombiana tiene un papel central en esa discusión. Las asociaciones profesionales, las universidades, los centros de investigación y las instituciones públicas deben contribuir a formar una ciudadanía capaz de distinguir entre riesgo real, percepción de riesgo, evidencia técnica y narrativa mediática. Una sociedad que no entiende la tecnología queda condenada a discutirla desde el miedo o desde la propaganda.

Chernobyl también recuerda que la seguridad no es un documento, sino una práctica. No basta con tener normas escritas. Se requiere una cultura donde los profesionales puedan advertir problemas, cuestionar decisiones, reportar anomalías y actuar con independencia técnica. Esa lección trasciende la energía nuclear. Aplica a la ingeniería civil, la industria química, la aviación, la minería, la infraestructura energética y cualquier sector donde una falla pueda tener consecuencias mayores.

Por eso, estudiar Chernobyl desde Colombia no es un ejercicio distante. Es una oportunidad para reflexionar sobre cómo queremos gobernar nuestras tecnologías complejas. El accidente ocurrió en la Unión Soviética de 1986, pero sus lecciones pertenecen al mundo entero.

MEMORIA TÉCNICA PARA EL FUTURO NUCLEAR

A cuarenta años de distancia, Chernobyl sigue siendo una herida histórica. Debe ser recordado con respeto por las víctimas, por los trabajadores expuestos, por las comunidades evacuadas y por las consecuencias sociales, ambientales y políticas que produjo. Minimizar el accidente sería irresponsable. Pero simplificarlo también lo sería.

Chernobyl no fue simplemente “la prueba de que la energía nuclear es peligrosa”. Fue el resultado de un tipo específico de reactor, operado bajo condiciones inadecuadas, dentro de una cultura institucional marcada por el secretismo, la presión jerárquica y la debilidad de la seguridad como valor rector. Comprender eso no reduce la gravedad del accidente. Al contrario, permite aprender de él con mayor precisión.

El verdadero legado de Chernobyl no es la parálisis. Es la transformación. Después de 1986, la industria nuclear mundial fortaleció sus estándares, revisó sus diseños, modificó reactores, consolidó la cultura de seguridad, amplió la cooperación internacional y elevó la exigencia regulatoria. La energía nuclear posterior a Chernobyl no es la misma de antes de Chernobyl. Esto no significa que la energía nuclear deba ser promovida sin debate. Significa que debe ser discutida con rigor. Sus beneficios, riesgos, límites y posibilidades deben analizarse desde la ciencia, la ingeniería, la economía, el ambiente y la política pública. En un mundo que enfrenta desafíos energéticos y climáticos enormes, ninguna fuente de energía debería ser evaluada desde el prejuicio, sino desde la evidencia.

Chernobyl debe permanecer en la memoria técnica de la humanidad. No como una consigna simplificadora, sino como una advertencia compleja: la tecnología sin cultura de seguridad puede volverse peligrosa; la ingeniería sin transparencia puede fallar; el poder político sin regulación independiente puede amplificar el riesgo; el secretismo puede ser tan dañino como una falla de diseño.

La pregunta contemporánea no es si debemos olvidar Chernobyl para hablar de energía nuclear. La pregunta es si somos capaces de recordarlo con suficiente rigor como para construir instituciones, tecnologías y decisiones más responsables.

Chernobyl no fue el fin de la energía nuclear. Fue el fin de una forma de entender la seguridad.

Y esa lección, cuarenta años después, sigue siendo indispensable.

REFERENCIAS

1. International Atomic Energy Agency. INSAG-7: The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. Safety Series No. 75-INSAG-7. Vienna: IAEA, 1992.

Herrera Cardona, Daniel CHERNOBYL 1986–2026. 40 AÑOS QUE TRANSFORMARON LA INDUSTRIA NUCLEAR. DEL PROGRAMA NUCLEAR SOVIÉTICO AL NACIMIENTO DE LA CULTURA MODERNA DE SEGURIDAD NUCLEAR (Pág. 11–22)

2. International Atomic Energy Agency. INSAG-1: Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident. Safety Series No. 75-INSAG-1. Vienna: IAEA, 1986.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR Reports on the Chernobyl Accident. United Nations.
4. OECD Nuclear Energy Agency. Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts. 2002 Update of Chernobyl: Ten Years On. Paris: OECD/NEA, 2002.
5. World Nuclear Association. Chernobyl Accident 1986. World Nuclear Association, updated technical information page.
6. International Atomic Energy Agency. The Chernobyl Forum: Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. Vienna: IAEA, 2006.
7. Medvedev, Grigori. The Truth About Chernobyl. Basic Books, 1991.
8. Plokhyy, Serhii. Chernobyl: The History of a Nuclear Catastrophe. Basic Books, 2018.
9. Higginbotham, Adam. Midnight in Chernobyl: The Untold Story of the World's Greatest Nuclear Disaster. Simon & Schuster, 2019.
10. Malko, Mikhail V. The Chernobyl Reactor: Design Features and Reasons for Accident. Technical analysis on RBMK reactor design and accident causes.

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LOS DESAFIOS DE LA ACADEMIA CONTEMPORÁNEA: ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA ÉTICA - II

Juan Fernando Molina Del Valle

Arquitecto. Universidad Piloto de Colombia

Magister. Universidad Nacional de Colombia

*Especialista. Arquitectura interior. École d'Architecture de Paris Belleville CEO ADI
ESTUDIO DE DISEÑO Y MOBEL (diseño Bauhaus)*

adinteriores2010@gmail.com

Resumen: Esta es la segunda parte de un artículo del mismo nombre publicado en la Revista SAI en junio de 2025. La inteligencia artificial (IA) está transformando profundamente la academia contemporánea, abriendo nuevas oportunidades para la investigación, la enseñanza y el aprendizaje, pero también planteando desafíos éticos y estructurales. Por un lado, la IA permite analizar grandes volúmenes de datos, automatizar procesos y personalizar la educación, facilitando entornos de aprendizaje más adaptativos y eficientes. Herramientas basadas en IA pueden apoyar a estudiantes y docentes en tareas como redacción, evaluación y acceso a información, potenciando la productividad académica.

Sin embargo, esta innovación conlleva importantes dilemas. Uno de los principales desafíos es el riesgo de dependencia excesiva de la tecnología, lo que podría afectar el desarrollo del pensamiento crítico y la autonomía intelectual. Asimismo, surgen preocupaciones sobre la integridad académica, ya que el uso indebido de herramientas de IA puede facilitar el plagio o la generación de trabajos sin un aprendizaje real.

En el plano ético, también se cuestiona la transparencia de los algoritmos, los sesgos en los datos y la privacidad de la información. La academia debe enfrentar la tarea de establecer normas claras que regulen el uso de estas tecnologías, promoviendo un equilibrio entre innovación y responsabilidad.

En este contexto, es fundamental que las instituciones educativas no solo adopten la IA, sino que también fomenten una alfabetización digital crítica. Esto implica enseñar a estudiantes y docentes a usar estas herramientas de manera ética, reflexiva y consciente, asegurando que la IA sea un complemento del conocimiento humano y no un sustituto.

Palabras clave: Inteligencia artificial, Ética académica, Transformación educativa, Desigualdad digital, Humanismo tecnológico

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la inteligencia artificial (IA) se presenta en el ámbito académico como una promesa de innovación capaz de transformar profundamente los procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación. Sin embargo, este discurso tecnooptimista suele ocultar tensiones estructurales y dilemas éticos que la academia contemporánea aún no ha resuelto de manera satisfactoria. Lejos de ser una herramienta neutral, la IA incorpora lógicas de automatización, estandarización y control que pueden entrar en conflicto con los principios fundamentales de la educación superior, como el pensamiento crítico, la autonomía intelectual y la formación integral.

En este contexto, la creciente incorporación de sistemas de IA —desde plataformas de evaluación automatizada hasta modelos generativos de texto— plantea interrogantes sobre la autenticidad del conocimiento producido, la erosión de la autoría académica y la posible dependencia tecnológica de estudiantes y docentes. Asimismo, emergen preocupaciones sobre los sesgos algorítmicos, la opacidad de los sistemas y la mercantilización de los datos educativos, lo que evidencia una asimetría de poder entre las instituciones académicas y las corporaciones tecnológicas que desarrollan estas herramientas.

De este modo, la relación entre inteligencia artificial y academia no puede reducirse a una narrativa de progreso lineal. Por el contrario, exige una mirada crítica que cuestione sus implicaciones epistemológicas, éticas y políticas. Enfrentar estos desafíos implica no solo regular el uso de la IA, sino también repensar el sentido mismo de la educación en una era marcada por la automatización del conocimiento.

CONCEPTOS Y CONTEXTO

La inteligencia artificial (IA) ha adquirido un papel central en la transformación de la educación superior, posicionándose como un factor clave en los procesos de innovación académica. De acuerdo con Stelian Popenici y Sharon Kerr (2017), la incorporación de la IA en la educación permite optimizar la enseñanza mediante sistemas adaptativos, analítica de datos y automatización de procesos, lo que abre nuevas posibilidades para la personalización del aprendizaje. Sin embargo, estos avances no están exentos de cuestionamientos sobre su impacto en la calidad educativa y en la autonomía del pensamiento crítico.

Desde una perspectiva crítica, la IA no debe entenderse únicamente como una herramienta tecnológica, sino como un sistema que reproduce estructuras de poder y desigualdad. Cathy O’Neil (2016) advierte que los algoritmos pueden amplificar sesgos existentes, afectando la equidad en distintos ámbitos, incluida la educación. En esta misma línea, Shoshana Zuboff (2019) señala que el uso masivo de datos en entornos digitales responde a lógicas de mercado que pueden comprometer la privacidad y la autonomía de los usuarios, lo que resulta especialmente problemático en contextos académicos.

Por otro lado, el desarrollo de la IA plantea desafíos éticos fundamentales relacionados con la transparencia, la responsabilidad y el control de estas tecnologías. UNESCO (2021) ha enfatizado la necesidad de implementar principios éticos que garanticen un uso inclusivo, equitativo y centrado en el ser humano. Asimismo, Stuart Russell (2019) sostiene que el desarrollo de sistemas de IA debe alinearse con valores humanos para evitar consecuencias no deseadas.

En el ámbito académico, la introducción de herramientas basadas en IA, especialmente aquellas capaces de generar texto y contenido, ha reconfigurado las nociones tradicionales de autoría, originalidad e integridad académica. Esto plantea interrogantes sobre la evaluación del aprendizaje y el papel del docente en un entorno donde el acceso al conocimiento es mediado por sistemas automatizados. Además, la creciente dependencia de plataformas tecnológicas desarrolladas por corporaciones privadas refuerza dinámicas de subordinación institucional, lo que limita la soberanía educativa.

En síntesis, la relación entre inteligencia artificial y academia contemporánea se configura como un campo de tensión entre innovación y ética. Si bien la IA ofrece oportunidades significativas para transformar la educación, su implementación requiere un análisis crítico que permita mitigar riesgos y garantizar que su uso contribuya al desarrollo de una educación más justa, inclusiva y reflexiva.

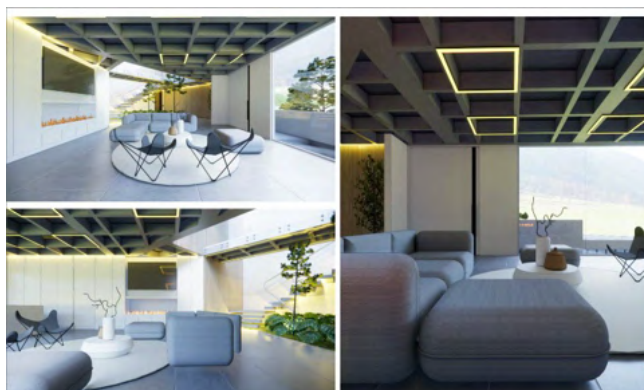
Las imágenes presentadas a continuación han sido elaboradas mediante herramientas de inteligencia artificial. Permiten evidenciar cómo las nuevas tecnologías no solo transforman los procesos de enseñanza y aprendizaje, sino también las formas de representación visual y construcción del conocimiento. Estas ilustraciones reflejan escenarios donde la interacción entre humanos y sistemas inteligentes redefine la producción académica, generando oportunidades para la innovación educativa, pero también cuestionamientos éticos relacionados con la autoría, la creatividad y la veracidad de la información. De este modo, las imágenes complementan el contenido del artículo al simbolizar los retos y posibilidades que la inteligencia artificial plantea en el contexto académico actual



*Figura 1. Proyecto: MONTECLARO vivienda campestre. Espacio: Living y cocina
Lugar: Hispania – Antioquia.
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2026.*



*Figura 2. Proyecto: MONTECLARO vivienda campestre. Espacio: Alcoba huéspedes
Lugar: Hispania - Antioquia
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2026.*



*Figura 3. Proyecto: CASA JARDÍN vivienda campestre. Espacio: Living
Lugar: Carmen de Viboral - Antioquia.
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2026.*



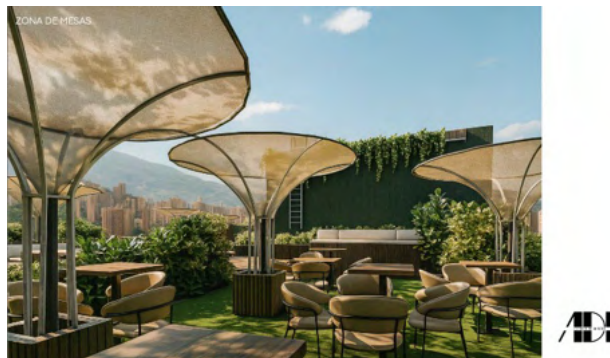
*Figura 4. Proyecto: CASA JARDÍN vivienda campestre. Espacio: Acceso alcoba principal
Lugar: Carmen de Viboral - Antioquia.
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2026.*



*Figura 5. Proyecto: Plan parcial Isla de la Fantasía. Espacio: Vista senderos y ciclo ruta
Lugar: Leticia - Amazonas.
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2025.*



*Figura 6. Proyecto: Plan parcial Isla de la Fantasía. Espacio: Vista sobre el río puente peatonal.
Lugar: Leticia - Amazonas
Realizó: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2025*



*Figura 7. Proyecto: Rooftop Go Living & Suites. Espacio: Zona de mesas estancias.
Lugar: Medellín – Antioquia.
Realizo: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2025.*



*Figura 8. Proyecto: Rooftop Go Living & Suites. Espacio: Zona húmeda
Lugar: Medellín - Antioquia
Realizo: EQUIPO ADI ESTUDIO DE DISEÑO 2025.*

POSICIÓN DEL AUTOR

La inteligencia artificial, en el contexto de la academia contemporánea, no debe ser entendida únicamente como una amenaza ética o una disrupción radical, sino como una herramienta que, bien utilizada, permite optimizar procesos y ampliar las capacidades humanas. Desde esta perspectiva, su valor radica en su carácter instrumental: la IA no reemplaza el pensamiento crítico ni la labor académica, sino que actúa como un apoyo que facilita tareas complejas, repetitivas o que requieren procesamiento rápido de información.

En el ámbito de la investigación, por ejemplo, la inteligencia artificial permite acelerar la revisión de literatura, organizar grandes volúmenes de datos y generar primeras aproximaciones a determinados problemas, lo que libera tiempo para el análisis profundo y la reflexión crítica. De manera similar, en otros campos más prácticos —como la carpintería u oficios técnicos— puede servir como guía o referente, ofreciendo explicaciones más accesibles, esquemas simplificados o soluciones iniciales que orienten el aprendizaje.

No obstante, asumir esta postura implica también reconocer que el valor de la IA depende directamente del uso que se le dé. La herramienta, por sí misma, no garantiza conocimiento ni comprensión; es el usuario quien debe interpretar, cuestionar y validar la información proporcionada. En este sentido, el verdadero desafío para la academia no es rechazar la inteligencia artificial, sino integrarla de manera consciente, promoviendo un uso crítico que potencie el aprendizaje sin sustituir el esfuerzo intelectual.

Así, la inteligencia artificial se posiciona como un recurso que, lejos de desplazar al ser humano, puede fortalecer su capacidad de comprender, crear y transformar su entorno.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La inteligencia artificial se consolida como una herramienta clave en la transformación de la academia contemporánea, al potenciar la innovación en los procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación. Sin embargo, su incorporación no debe ser acrítica ni desregulada.
- El equilibrio entre innovación y ética es fundamental. El uso de la IA exige marcos normativos claros que garanticen la integridad académica, la transparencia en los procesos y la protección de datos, evitando prácticas como el plagio o la dependencia tecnológica excesiva.
- La IA no sustituye el pensamiento humano, sino que debe funcionar como un complemento. Es indispensable preservar habilidades como el pensamiento crítico, la creatividad y la capacidad de análisis, que siguen siendo el núcleo de la formación académica.
- Las instituciones educativas tienen la responsabilidad de promover una alfabetización digital ética. Esto implica formar a estudiantes y docentes en el uso consciente, responsable y crítico de estas tecnologías.
- Finalmente, el futuro de la academia dependerá de su capacidad para adaptarse a los avances tecnológicos sin perder de vista sus principios fundamentales. La IA representa una oportunidad valiosa, siempre que se gestione con responsabilidad, equidad y sentido ético.

REFERENCIAS

1. Cabero-Almenara, J., & Barroso-Osuna, J. (2025). La ética de la inteligencia artificial en la educación: hacia un uso responsable e inclusivo. *Educação e Pesquisa*. <https://doi.org/10.1590/S1678-4634202551293347es>
2. Cortes Osorio, J. A. (2024). El impacto de la inteligencia artificial en la academia: un llamado a la adaptación y la ética. *Scientia et Technica*, 29(1), 4–6. <https://doi.org/10.22517/23447214.25598>
3. Pérez Llaín, Y. Y., Durán Chinchilla, C. M., & Casadiegos Santana, M. H. (2025). La inteligencia artificial en la educación superior: un examen ético-jurídico de su perspectiva transformadora. *Academia & Derecho*, 18(30). <https://doi.org/10.18041/2215-8944/academia.30.12707>
4. Aparicio Gómez, O. Y., & Aparicio Gómez, W. O. (2023). Consideraciones éticas para el uso académico de sistemas de inteligencia artificial. *Revista Internacional de Filosofía Teórica y Práctica*, 4 (1). <https://doi.org/10.51660/riftp.v4i1.95>
5. Caldas Ayala, J. A. (2025). La inteligencia artificial en la educación: ética y desarrollo del pensamiento crítico. *Revista Ideales*. <https://doi.org/10.59514/2539-5211.4006>
6. Rojas, M. L., Toledo Quispe, P. M., Leaño Arias, A. C., Majo Marrufo, H. R., & Cervera Cajo, L. E. (2025). Inteligencia artificial en la educación: revisión sistemática de su impacto, formación y consideraciones éticas. *Revista Tribunal*.

METODOLOGÍA DE ARTICULACIÓN DE ACTORES PÚBLICOS, PRIVADOS, ACADEMIA Y CIUDADANÍA COMO ESQUEMA DE GOBERNANZA DEL AGUA EN CUENCAS HÍDRICAS LATINOAMERICANAS

María del Pilar Restrepo Mesa

Ingeniera Forestal. Especialista en Gestión ambiental con énfasis en proyectos energéticos. MSc en medio ambiente y Desarrollo. PhD en sostenibilidad

restrepomariadelpilar@gmail.com

Resumen: Este trabajo es un resumen de la tesis doctoral (distinción Cum Lude) de la autora, que surge con el fin de mejorar y fortalecer la gestión del agua en cuencas hidrográficas latinoamericanas. La idea es superar los enfoques tradicionales, que muchas veces fracasan por desconfianza, desarticulación, falta de continuidad y poca participación social, mediante una metodología innovadora que permita articular a actores públicos, privados, académicos y ciudadanos en una gobernanza participativa y sostenible. La propuesta se basa en fortalecer redes de liderazgo comunitario, crear observatorios de cuencas, y promover diálogos horizontales que valoren tanto el conocimiento técnico como el saber local.

Las conclusiones resaltan que la clave no solo está en la movilización de recursos, sino en promover relaciones humanas basadas en la confianza, la reciprocidad y el liderazgo consciente, lo que se traduce en altos niveles de cooperación y mejoramiento de las condiciones ambientales y sociales de la cuenca hidrográfica a intervenir. Las herramientas tecnológicas son necesarias para coadyuvar en la definición de las prioridades, las cuales analizadas a la luz del saber local proponen hojas de ruta claras, donde cada actor, mediante mecanismos de cocreación, identifica cuál será su aporte efectivo en la tarea conjunta a emprender, mediante un trabajo colaborativo.

Palabras clave: Gobernanza, Agua, Sinergias, Confianza, Reciprocidad, Cooperación, Restauración, liderazgo

INTRODUCCIÓN

Luego de muchos años de reflexión y preocupación genuina por encontrar los mecanismos que permitan consolidar efectivamente modelos de generación de sinergias entre todos los actores de un territorio para alcanzar objetivos comunes, y teniendo en cuenta los diferentes roles profesionales que he tenido en mi vida laboral, especialmente los últimos 20 años alrededor de la planificación y ordenación de cuencas hidrográficas, puesta en marcha de proyectos para mejorar sus condiciones ambientales y sociales y recientemente como servidora pública en EPM (Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios) donde participo de la orientación para la toma de decisiones frente a la conservación del agua y siendo consciente

del creciente deterioro de las cuencas hídricas agravado por las consecuencias del cambio y la variabilidad climática que de una u otra manera ponen en riesgo la seguridad hídrica de la población, realicé mi tesis doctoral “Metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas”, partiendo de la premisa de que han sido muchos los esfuerzos que se han hecho a lo largo del tiempo por diversos actores, con el fin de dinamizar procesos sostenidos en el tiempo que contribuyan a mejorar las condiciones ambientales y sociales de los territorios.

Lamentablemente, el deterioro ambiental sigue aumentando en el planeta, así como las necesidades básicas insatisfechas de sus pobladores. Este trabajo de investigación que inició en el año 2018, se realizó durante siete (7) años e inspiró la realización del proyecto Alianza para la emergencia climática y sanitaria en el Valle de Aburrá, el cual contó con la participación de dos autoridades ambientales del Departamento de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia, el Distrito de Medellín, el Municipio de Barbosa, la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto Tecnológico Metropolitano, empresas del sector privado, EPM como empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios y las comunidades de las áreas de influencia, entre otros actores. A su vez, contó con el apoyo económico del Ayuntamiento de Barcelona.

Esta propuesta surge de la necesidad de contar con una herramienta metodológica que permita generar dinámicas disruptivas de apropiación social por parte de los actores que se asientan en las cuencas hídricas que posibiliten el despliegue de acciones eficientes y eficaces que permitan avanzar de manera decidida en la consolidación de una cultura del agua que garantice la seguridad hídrica para los habitantes.

Abordar conceptualmente la Gobernanza del Agua, implica comprender inicialmente que, la relación entre los seres humanos y los recursos naturales se ha visto mediada por un acceso sin restricciones y por el aumento considerable en su demanda, lo cual ha traído como consecuencia que cada vez se planteen escenarios de posible escasez y conflictos sociales, por tanto deben trabajarse de manera simultánea estrategias para consolidar ejercicios de gobernanza del agua que le apunten de manera efectiva a garantizar el suministro de agua con la calidad y cantidad que requiere la población para su consumo diario y para el desarrollo de sus actividades productivas.

El estudio de caso se desarrolló en la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, la cual está conformada por diez (10) municipios, donde Medellín es el Municipio núcleo y capital del Departamento de Antioquia, República de Colombia.

Antioquia se ha caracterizado por contar con líderes preocupados por el progreso tanto de su territorio, como del país en general, el trabajo en equipo siempre ha sido una constante para sacar adelante planes programas y proyectos de interés común. En todos los sectores, se han obtenido avances significativos, que, de no ser por la pujanza y sentido de pertenencia de sus

dirigentes, no se habrían logrado. Este esfuerzo ha hecho que el Departamento y el país se proyecten como referente a nivel Latinoamericano.

Sin embargo, ha costado tener una visión de futuro, así como objetivos comunes, que optimicen en el tiempo los recursos técnicos, humanos y financieros movilizados y procuren una sostenibilidad de las acciones implementadas, llevando a repensar vez por vez, gobierno tras gobierno, las metas y proyecciones con realidades económicas, sociales y ambientales cada vez más preocupantes y difíciles de superar en el corto plazo. Aun así, el interés por propiciar condiciones de vida más dignas a los pobladores tanto urbanos, como rurales, ha sido una constante y una intención transversal que ha caracterizado a la Región.

Mirando en retrospectiva, de haber dado continuidad a los proyectos iniciados en cuencas hidrográficas en décadas anteriores o de haber realizado un adecuado seguimiento a los mismos, la realidad del recurso hídrico sería diferente. Es por ello, que se hace demasiado importante contar con metodologías que trasciendan en el tiempo y lleven a que las buenas iniciativas y los logros obtenidos en una época determinada, se aprovechen de mejor manera, libres de egoísmos y reticencias en una mirada integral, posibilitante y de futuro que genere hábitats plurales, e incluyentes, donde la confianza en la institucionalidad tanto público, como privada sea la constante y se propicie la verdadera participación de la ciudadanía activa, de la academia, de la institucionalidad tanto pública, como privada, con miras a consolidar una seguridad hídrica en estas cuencas de tanta importancia para los habitantes en escenarios cada vez más retadores.

Se espera que esta metodología, dados los contextos socio-ambientales similares que se presentan en otras regiones de América Latina, pueda ser replicada y por ello el interés y el apoyo que se ha tenido de la Universidad Politécnica de Cataluña, la cátedra UNESCO de Sostenibilidad, el Ayuntamiento de Barcelona, entre otras entidades desde que se inició el proceso, para lograr un producto que sirva de referente dada la creciente necesidad de afianzar los esquemas de Gobernanza del agua y justicia ambiental resaltando la importancia del recurso dentro del nexo agua-energía-alimentos, lo cual se constituye en elemento vital para la supervivencia humana en el planeta.

OBJETIVOS

El objetivo general fue proponer una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas en el marco de la emergencia climática.

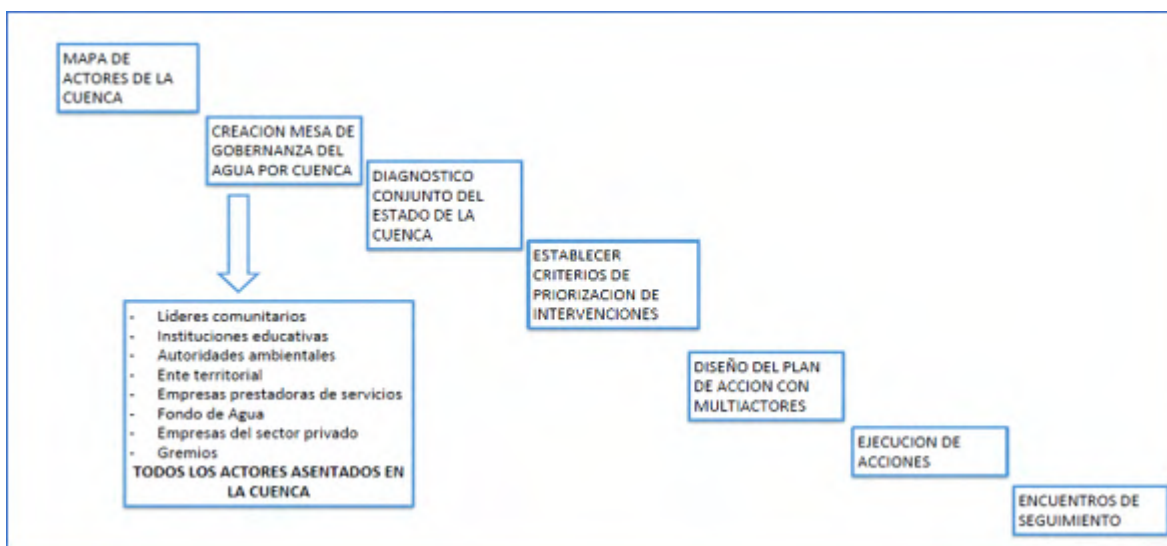
Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento.

- Desarrollar un proceso participativo para el codiseño de una intervención piloto en tres (3) cuencas seleccionadas de la ciudad de Medellín en el contexto de la emergencia climática y sanitaria.
- Validar el modelo de articulación entre todos los actores relevantes como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas, a partir de un estudio de caso en la ciudad de Medellín, Colombia.
- Este proyecto doctoral buscó ante escenarios de cambio y variabilidad climática, desarrollar una metodología que aborde las problemáticas de cuencas urbanas altamente antropizadas, donde diversos actores hayan movilizado recursos en torno a su protección y estén dispuestos a seguir movilizándolos, para obtener mejores resultados en términos de seguridad hídrica, en coordinación con la ciudadanía y comunidades rurales.

METODOLOGÍA

El proyecto parte del establecimiento de un plan para la transformación acorde a la teoría del cambio, que busca definir, partiendo de una línea base que dé cuenta del estado actual de las cuencas priorizadas, una hoja de ruta que permita mostrar cómo se obtienen los objetivos deseados a partir de la puesta en práctica de la metodología.



*Visión general metodológica del proyecto
Elaboración propia*

Esta investigación inspiró el desarrollo del programa alianzas por la emergencia climática y sanitaria en el Valle de Aburrá que se llevó a cabo entre los años 2020 y 2023 el cual contó con el apoyo económico del Ayuntamiento de Barcelona bajo la coordinación de la Universidad Politécnica de Cataluña. Programa operado por el Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM - y donde participaron entidades del sector público como el Área

Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA, ambas autoridades ambientales en la región, el Distrito de Medellín, Municipio de Barbosa, Universidad Nacional de Colombia, EPM como Empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios, Instituciones educativas, Fondo del agua Corporación Cuenca verde, empresas del sector privado como Pork Colombia, Mesas ambientales, Líderes comunitarios, entre otros.

Para lograr este propósito, se escogieron unas cuencas hídricas que ya habían sido priorizadas años atrás por otros programas gubernamentales, donde se elaboraron:

- Plan de Ordenación de la Cuenca Aburrá-Medellín (año 2006)
- Planes integrales de ordenación y manejo de cuencas - PIOM (año 2007)
- Proyectos priorizados en el marco del Plan Quebradas, liderado por la Autoridad ambiental urbana Área Metropolitana del Valle de Aburrá y del cual hacen parte varias entidades públicas y privadas, organizaciones comunitarias, universidades, entre otros. (2017 - a la fecha)
- Actualización del Plan de Ordenación de la Cuenca Aburrá-Medellín (año 2018)
- El Plan de Manejo Ambiental del Acuífero - PMAA (2019)

Las cuencas seleccionadas para realizar el ejercicio propuesto fueron:

- Cuenca de la quebrada Doña María ubicada en el Distrito de Medellín, Municipio de Itagüí y Municipio de La Estrella
- Cuenca de la quebrada Santa Elena ubicada en el distrito de Medellín
- Cuenca de la quebrada La Iguaná ubicada en el Distrito de Medellín

A continuación, se realiza una descripción del abordaje metodológico que se empleó en este estudio, mediante “paquetes de trabajo” (PT) con el ánimo de facilitar su comprensión. Esta propuesta empleó un enfoque de investigación mixto, en donde se hizo uso tanto de métodos de tipo cualitativo como cuantitativo.

PT 1. Revisión y análisis bibliográfico

PT2. Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento.

PT3. Construir línea base que permita entender cómo se encuentra o cual es el estado del recurso hídrico en el territorio.

PT4. Realizar ejercicios de interacción con expertos técnicos, representantes de entidades públicas, privadas, academia, fondos del agua y líderes comunitarios.

PT5. Realizar ejercicios pilotos en las cuencas urbanas seleccionadas y validar el modelo de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza en cuencas hídricas urbanas.

Se conformaron los siguientes espacios de trabajo:

- Mesa Comunitaria (aprovechando las mesas del Plan Quebradas).
- Mesa Interinstitucional con representantes de las comunidades

Además de las mesas descritas, se conformó una Comisión Técnica Intersectorial y un Consejo Asesor para dinamizar la Alianza por la emergencia climática en el Valle de Aburrá, de la cual se obtuvieron experiencias muy importantes que harán parte de las conclusiones de este estudio.

HERRAMIENTAS

- Talleres grupales iniciales con grupos de interés para el codiseño de las actividades. Estos grupos serán conformados por los líderes comunales, la comisión técnica intersectorial, y los habitantes del área de influencia del proyecto.
- Estructuración de un plan de trabajo conjunto en el que se definan las actividades, plazos y responsabilidades para el logro de los objetivos y metas trazados.
- Jornadas de seguimiento y evaluación de resultados para que se haga una retroalimentación del desarrollo del proceso y se realice de manera permanente la difusión del esquema de relacionamiento entre los habitantes hacia sus comunidades.

Como entregables se tienen actas e informes de resultados de cada mesa de trabajo y documento del plan de trabajo diseñado a partir del esquema de relacionamiento definido.

Esta estrategia se basa, por tanto, en la conformación de dos mesas de trabajo, una mesa de trabajo comunitaria liderada en este caso por la autora como estudiante de la Universidad Politécnica de Cataluña y representante de la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios EPM. y una mesa de trabajo interinstitucional con representantes de las comunidades y organizaciones sociales.

Teniendo en cuenta que varios de los líderes comunitarios se conocían de tiempo atrás por ejercicios también liderados por la autora como el Plan Quebradas en su rol como autoridad ambiental en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se les invitó a hacer parte de estas mesas comunitarias para que se articulen en la realización de recorridos de campo, talleres que buscan definir claramente la problemática de las cuencas seleccionadas, e identificar de manera conjunta las iniciativas sociales para la recuperación socioambiental del área de incidencia.

En la fase inicial, se parte de la revisión de toda la información técnica que tienen las entidades públicas y académicas de la cuencas priorizadas, y con base en el saber local se

elabora una línea de tiempo que dé cuenta de las intervenciones realizadas anteriormente y una lectura situacional que identifique las principales problemáticas que se presentan actualmente en cada una de ellas, reconociendo los logros realizados anteriormente por otros ejercicios y las brechas encontradas que aún persisten.

A partir de ahí, en sesiones de trabajo con las mesas comunitarias y las mesas interinstitucionales, mediante la metodología de cocreación, se identifican los proyectos prioritarios a realizar en el territorio visualizando el futuro que quiere emerger en cada una de las cuencas, las posibilidades reales para concretarlas, las instituciones que pudieran movilizar recursos para ello, y en términos generales, los movimientos sinérgicos que se deben potenciar para alcanzar el objetivo común.

Con las mesas de trabajo instaladas, se generará un pacto por la Cuenca o acuerdo social que constituirá una visión conjunta del territorio, y un ejercicio de gobernanza del agua, plasmado en un documento o Plan Maestro de Acciones e Iniciativas para la Apropiación Socio Ambiental y la Emergencia Climática en las cuencas seleccionadas.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A pesar de los innumerables esfuerzos que se han realizado por décadas, para generar una metodología que permita gestar cambios significativos en los mecanismos de relacionamiento entre actores con el fin de mejorar las condiciones ambientales y sociales del planeta, la realidad es que el deterioro de los recursos naturales se incrementa cada vez más poniendo en riesgo la supervivencia de los seres humanos y de los demás seres vivos que lo habitan, lo que da cuenta que los esfuerzos no son suficientes para revertir el daño ambiental y que es necesario realizar ejercicios de innovación social para generar un cambio colectivo, desde la transformación de cada individuo, identificando objetivos comunes y movilizandolos acciones entre todos para materializarlos.

Es por ello por lo que se plantea este trabajo de investigación y luego de siete (7) años de desarrollarlo, renace la esperanza al poder plantear y desarrollar una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía, como esquema de gobernanza del agua en cuencas hídricas latinoamericanas, que parte de abrir la mente, el corazón y la actitud, trascendiendo las miradas netamente tecnicistas que consideran su saber como único y por lo general han buscado, consciente o inconscientemente, orientar la toma de decisiones de los actores, máxime cuando se cuenta con recursos de tipo económico que se deben ejecutar en vigencias fiscales o períodos de gobierno con horizontes de tiempo muy restringidos.

La aplicación de la metodología propuesta y aplicada en las cuencas priorizadas incluye como premisas fundamentales:

- El definir una cuenca hidrográfica como la unidad de planeación por excelencia.

- El ejercicio es válido tanto para cuencas menores, como para macrocuencas y puede ser empleado en países latinoamericanos dado sus similares contextos y problemáticas comunes.
- Identificar los actores asentados en las cuencas es fundamental para potenciar la creación de redes por tipo de actor y finalmente redes multiactor, así se potenciar las sinergias y se dinamiza la movilización de recursos con un líder natural que jalone el proceso y que permanezca a pesar de los cambios administrativos que puedan darse en algunas entidades. En este sentido elaborar mapas de actores y mapas de objetivos que visibilicen intereses en juego es necesario para el diseño de las estrategias a implementar.
- Los observatorios de cuencas, que deben partir de una cualificada síntesis ambiental, además de ser ejercicios de apropiación social, son herramientas claves para la construcción de una línea base que permita tener claro los puntos de partida donde se puedan registrar sus cambios en el tiempo, bien sea por la aplicación de recursos técnicos, económicos y financieros vía proyectos o por cambios generados por las dinámicas antrópicas y/o naturales que se puedan presentar en horizontes de tiempo definidos. Contar con varios observatorios de cuencas para monitorear la calidad, cantidad de cada fuente, así como la demanda del recurso bien sea para consumo humano o para actividades productivas, es una necesidad sentida para el ordenador del recurso, por ello pensar en Hidrotorios del territorio se constituye en una prioridad a la luz del trabajo mancomunado del saber técnico con el saber local de las comunidades rurales y la ciudadanía en lo urbano.

Identificar las barreras que limitan la gobernanza del agua, fue un ejercicio de cocreación muy valioso donde el diálogo horizontal multiactor fue más que importante. Permitió abrir la puerta del conocimiento, entender que es necesario escuchar de manera activa al otro, que todos los actores están preocupados por el destino de su cuenca ante los posibles escenarios de escasez o sobreabundancia de agua, que hay desgaste y frustración por todos los esfuerzos que se han hecho en el tiempo, pero que en la mayoría de los casos, mueren con los cambios de gobierno y se deben iniciar de nuevo, muchas veces partiendo desde cero, perdiendo tiempos valiosos en la consolidación del propósito de intervenir de manera integral el territorio para mejorar sus condiciones ambientales y sociales.

Elaborar de manera conjunta la hoja de ruta para implementar los proyectos priorizados es necesario, toda vez que cada actor se empodera del objetivo común, independiente de su rol, competencia y capacidad de movilizar recursos económicos. El movimiento sinérgico requiere aplicar la balanza múltiple de recursos y así visibilizar el aporte de cada actor, lo cual es significativo para concretar el modelo de gobernanza del agua, toda vez que motiva el trabajo colaborativo y la visión de conjunto.

Estas reflexiones y esta propuesta van en concordancia de manera efectiva a lo planteado en las hipótesis del Proyecto de investigación a saber:

- La aplicación de una metodología de articulación entre actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza genera escenarios de transformación participativa, y viabilizando la gestión colectiva en cuencas hídricas urbanas.
- La generación de un esquema de gobernanza, que promueva el trabajo colaborativo y la articulación entre actores públicos privados Academia y ciudadanía, incide de manera positiva sobre la gestión del recurso hídrico en las cuencas urbanas de Latinoamérica, partiendo de las potencialidades y debilidades del territorio cómo especialmente o el contexto de la emergencia climática.
- Descentralizar la gestión del recurso hídrico y formular mecanismos de participación colectiva integral genera hábitats plurales e incluyentes para la seguridad hídrica en el territorio.

Con ello se soluciona lo planteado en la pregunta de investigación: ¿Cómo generar una transformación participativa en torno a la gestión del recurso hídrico en cuencas urbanas en Latinoamérica dentro de un escenario de cambio variabilidad climática que apunte a su mejoramiento con procesos sostenidos en el tiempo?

La síntesis metodológica que se esbozó anteriormente se amplía a continuación:

1. Selección de la Cuenca regenerar o intervenir
2. Elaboración de mapa de actores asentados en la Cuenca y su respectiva matriz de relacionamiento
3. Identificación de competencias de cada actor a la luz de la legislación vigente - mapa de objetivos
4. Creación de mesa de gobernanza del agua
5. Elaboración de diagnóstico socio ambiental con información de cada uno de los actores - información secundaria
6. Recorridos de campo para evaluar el estado actual de la Cuenca intervenir o a regenerar – información primaria
7. Síntesis ambiental y social de la Cuenca con línea de tiempo (mínimo cinco años atrás)
8. Levantamiento de línea base que refleje el estado actual de la cuenca
9. Talleres de cocreación para priorización de acciones con participación de todos los actores que hacen parte de la mesa de gobernanza del agua
10. Priorización de acciones a realizar en la Cuenca hídrica
11. Balanza múltiple de recursos a movilizar por parte de cada actor
12. Suscripción de pacto o acuerdo por la Cuenca
13. Inicio de movilización de acciones en puntos priorizados
14. Seguimiento a acciones y propuestas de seguimiento en sesiones de la mesa de Gobernanza del agua, potenciando la red de actores en cada Cuenca y motivando la interacción con redes de otras cuencas para compartir lecciones aprendidas y avanzar hacia el mejoramiento del proceso en general

Lo anterior, atiende lo planteado en el objetivo general: Proponer una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas en el marco de la emergencia climática, así como los objetivos específicos:

- Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento
- Desarrollar un proceso participativo para el co-diseño de una intervención piloto en 3 cuencas seleccionadas de la ciudad de Medellín en el contexto de la emergencia climática y sanitaria
- Validar el modelo de articulación entre todos los actores relevantes como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas a partir de un estudio de caso en la ciudad de Medellín Colombia.

A pesar de la dificultad que se tuvo en la puesta en marcha de uno de los proyectos piloto por situaciones de tipo administrativo donde se ralentizó la entrega de recursos para poder llevar a cabo la actividad planteada, finalmente se materializó con muy buenos resultados a la fecha.

De igual manera, la red de actores que se potenció, en especial la Red SOS cuenca, persiste, motivada por los mismos líderes comunitarios y por entidades como EPM con su Programa Hidrofonías voces y sonidos comunitarios del Agua, que han potenciado todo el esfuerzo realizado en el marco del Programa Alianza por la emergencia climática y sanitaria en el valle de Aburrá, donde aún vigentes las mesas de gobernanza del agua y los pactos por la cuenca que suscribieron todos los actores de cada una de las cuencas priorizadas.

De igual manera, las interacciones entre las comunidades, las entidades públicas, privadas y las instituciones educativas, se siguen fortaleciendo cada día a través de un compartir e intercambio permanente de experiencias que cualifican el saber de todos los actores. Esto da cuenta de que la metodología propuesta para articular a los actores efectivamente funcionó.

CONCLUSIONES GENERALES

La metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas parte de la premisa de que es necesario valorar en igual medida, el conocimiento técnico que a lo largo del tiempo han cualificado las instituciones públicas con el objetivo de implementar políticas de orden local, regional y nacional y apuestas globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, con el saber local que por décadas también han cualificado las comunidades asentadas en los territorios.

En este orden de ideas, es fundamental en cada Cuenca diseñar un observatorio ambiental que permita afianzar los procesos de cocreación de conocimiento e interacción de los diferentes tipos de usuario a la luz de su rol y competencia, a fin de abordar los ambientales y sociales de forma simultánea. Este observatorio requiere un compromiso directo de los

usuarios y el fortalecimiento de la investigación de acción participativa y en la medida de lo posible, debe estar acompañado por una institución académica que preferiblemente tenga asiento en la Cuenca y por una entidad que tenga como foco de atención el cuidado y protección de los recursos hídricos. Identificar un líder comunitario que movilice a los demás integrantes de la comunidad para realizar esta acción colectiva de registro de información es más que necesario y relevante.

El contar con información precisa proveniente de la aplicación por más de diez (10) años de instrumentos de planificación para las cuencas hidrográficas seleccionadas como planes de ordenación y manejo de microcuencas, planes de ordenamiento territorial, planes de manejo del recurso hídrico, planes de manejo del acuífero, los resultados de los diferentes ejercicios que se han hecho en el territorio producto de alianzas convenios y o consultorías, así como los informes de supervisión de cuencas elaboradas por la corporación Cuenca verde en asocio con EPM constituyeron un insumo fundamental para obtener información de primera mano sobre las cuencas priorizadas.

Gran aprendizaje se obtuvo, al evidenciar que muchos de estos planes integrales de ordenamiento de cuencas realizados en el año 2007 no se materializaron en proyectos concretos perdiendo tiempo valioso para el mejoramiento integral de estas cuencas abastecedoras, lo que motiva aún más a contar con herramientas participativas construidas de la mano de todos los actores que puedan permanecer en el tiempo trascendiendo los períodos de gobierno y el inicio y fin de convenios de cooperación. Esta es la verdadera apuesta que hay que hacer para tener un esquema de trabajo que trascienda los tradicionales mecanismos de interacción entre instituciones, la aplicación de sus recursos que en el caso de las entidades públicas están sujetos a vigencias fiscales que limitan de alguna manera la continuidad de los procesos generando frustraciones, retrasos y por tanto desconfianza, desestímulo y mayor degradación ambiental y social.

Para que esta metodología sea exitosa, se deben realizar varios pasos que incluyen análisis conjuntos entre técnicos de las diversas instituciones y líderes comunitarios que por lo general permanecen en el tiempo en sus territorios, a diferencia de los funcionarios públicos y en algunos casos de representantes de empresas del sector privado instituciones académicas que rotan con más facilidad dificultando la consolidación de procesos sostenidos en el tiempo.

Uno de los primeros pasos que se deben realizar es la construcción de la línea base, la cual es más que necesaria para poder comprender el estado actual de cada microcuenca en sus aspectos sociales, ambientales y económicos, ello implica hacer una medición y un registro de los impactos que se han generado sobre el recurso agua en el tiempo, su nivel de relevancia y la eficacia de la implementación de estrategias que permitan mitigar dichos impactos, con el fin de extraer la experiencia y motivar lecciones aprendidas con todos los actores para evitar reprocesos y dilapidación de recursos. Si bien la línea base se puede obtener de los informes técnicos que preparan los diferentes profesionales, los recorridos de campo con los líderes comunitarios, autoridades ambientales, entes territoriales, instituciones académicas,

fondos de agua, es un complemento perfecto para validar directamente en campo las problemáticas identificadas y poderles priorizar. Esta práctica está en total consonancia con lo recomendado por Ostrom (2000) de tener los límites claramente definidos, conocimiento de las condiciones locales, mecanismos para resolución de conflictos, identificación de entidades existentes, si hay o no coherencia entre las reglas de apropiación y provisión, entre otras.

En este sentido, la creación y el fortalecimiento de mesas interinstitucionales y mesas comunitarias con participación de las entidades que finalmente se consolidan en Mesas de Gobernanza del agua por cada cuenca a intervenir, es una estrategia más que importante, porque generan:

- Sentido de pertenencia en cada uno de los actores tanto los asentados en ellas, como los que tienen competencias en ordenación de uso del suelo, cuidado y protección de los recursos naturales, educación a la comunidad y movilización de recursos.
- Visión integradora de la cuenca y diálogos entre todos los actores de la parte alta, media y baja, fomentando la hidrosolidaridad, la acción colectiva y la cooperación.

Para optimizar la movilización de recursos requeridos en la implementación de los proyectos priorizados con miras a realizar intervenciones integrales en las cuencas abastecedoras, que efectivamente regeneren los ecosistemas y reorienten su vocación protectora sobre todo en las partes altas de las mismas, mediante mecanismos como pago por servicios ambientales, saneamiento básico, adecuada separación de residuos en la fuente, cultura del agua, es necesario contar con operadores eficientes que puedan hacer una gestión oportuna y ágil al interior de sus entidades, para que de manera asertiva lograr disponerlos en los plazos establecidos. Cualquier retraso en esta dinámica, pone en riesgo el ejercicio de corresponsabilidad, de confianza, reputación y deteriora la intención de cooperación que se buscó potenciar al instalar las mesas de gobernanza del agua.

Con miras a mejorar las condiciones de los recursos de uso común, en nuestro caso el agua, la hoja de ruta propuesta en los diversos ejercicios de cocreación, debe contener proyectos realizables y medibles en el corto, mediano y largo plazo, donde la gobernabilidad del proceso debe trascender las esferas de los períodos de gobierno, por ello es importante:

1. Diseñar planes estratégicos de largo plazo, con metas a alcanzar en el corto plazo, ello con el fin de generar confianza y animar la cooperación de todos los actores, velando porque en la construcción de los ejercicios de prospectiva, planes empresariales, planes de gestión ambiental regional, planes de gobierno, queden plasmadas las actividades que se identificaron como prioritarias, así como aquellas que se deben seguir desarrollando de manera atemporal. Esto va en consonancia con lo propuesto por Scharmer (2024) al liderar desde el futuro que quiere emerger. Visualizar los resultados de la inacción, puede ser muy productivo, así como entender que, si se actúa ya para mejorar de manera asertiva las condiciones de las cuencas, se va cerrando la

- brecha que existe y se acortan los tiempos para una verdadera regeneración de los ecosistemas estratégicos.
2. Trabajar con todos los estamentos de la institucionalidad tanto pública, como privada y académica. En este sentido promover reuniones de socialización del estado actual del movimiento sinérgico plasmando el modelo de gobernanza del agua tanto con los funcionarios de carrera administrativa en el sector público, con profesionales de las empresas del sector privado y docentes de las instituciones educativas, que por lo general permanecen en el tiempo en las entidades, como con sus directivos (Secretarios de Despacho, Alcaldes, Presidentes de compañías, Rectores) es estratégico para que los diálogos escalen y se realice un trabajo integrador que pueda permanecer en el tiempo, sin verse afectados por los movimientos inherentes a los cambios de administración.
 3. Comprender que la gobernanza del agua, no solo es posible plasmarla con la movilización de recursos económicos, en muchos casos, es más importante consolidar redes de líderes como SOS Cuenca, redes de instituciones educativas como las que propone el Laboratorio Vivo de la Cuenca de la quebrada La Volcana en Medellín, Colombia, toda vez que se generan dinámicas con alto contenido social que invitan al cuidado de las fuentes de agua y dejan huella indeleble en cada participante. Al ser observadas la dinámica de estas redes por otros actores, se motivan redes multiactor que consolidan visiones compartidas y orientan su accionar para construir nuevas realidades en cada territorio sumando esfuerzos y sinergias.

En este mismo orden de ideas, fortalecer los diálogos horizontales entre todos los actores, motivando una participación genuina es necesario. En algunos casos, empresas del sector privado que generan algún tipo de afectación esporádica a las fuentes de agua, por sus actividades productivas, no generan un diálogo asertivo con las autoridades ambientales y viceversa. Al hacer parte de mesas de gobernanza del agua, se logra entendimiento de los esfuerzos que cada actor está realizando, la escucha activa motiva acercamiento y dispone a los demás a seguir actuando en pro del objetivo común, esto en palabras de Ostrom (2000) es la comunicación cara a cara, necesaria en relaciones recíprocas y propositivas.

La única forma de superar las barreras que limitan la gobernanza del agua, es, tal como lo define Scharmer (2024), disponernos interiormente trabajando desde un liderazgo consciente y participativo, poniendo en práctica una mente, corazón y actitud abiertos al servicio del cambio que quiere emerger, donde el buen líder reconoce en los demás actores unos aliados estratégicos y para ello debe saber conectar con el otro, valorando su ser y su saber e integrándose a un movimiento colectivo con visión integral de la cuenca a intervenir. Este líder natural comprende que la articulación de actores, públicos, privados, academia y ciudadanía es un ejercicio atemporal, que se nutre de la visión de todos y de esfuerzos compartidos donde cada uno debe salir de su centro poniendo todo de sí para el cumplimiento del objetivo común en cada cuenca hídrica priorizada.

La gobernanza del agua es la herramienta que asegura la seguridad hídrica para la población, todos los esfuerzos que se realicen para consolidarla y cualificarla en cada cuenca

abastecedora son más que necesarios. Los modelos de integración territorial son una estrategia que ayudan a dinamizar esta apuesta de desarrollo sostenible y regeneración de ecosistemas.

REFERENCIAS:

Se presentan algunas referencias relevantes,

1. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). Actualización del Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca –POMCA del Río Aburrá (NSS 2701-01). Medellín.
2. Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners*, 35(4), 216–224. <https://doi.org/10.1080/01944366908977225>
3. Correa, M., Romero, F., & Salazar, C. (2021). Desafíos de la gobernanza del agua en Colombia: Un análisis desde la gestión integrada de recursos hídricos. Universidad de los Andes.
4. Cosens, B. A., & Williams, M. K. (2012). Resilience and water governance: Adaptive governance in the Columbia River Basin. *Ecology and Society*, 17(4), 3. <https://doi.org/10.5751/ES-04986-170403>
5. Emerson, K., Nabatchi, T., & Balogh, S. B. (2012). An integrative framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 22, 1–29.
6. Fernández-Vargas, G. (2020). La gobernanza del agua como marco integrador para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Latinoamérica. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 23(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1561>
7. Ferreyra, C., & Beard, P. (2007). Evaluación participativa de la gestión colaborativa e integrada del agua: perspectivas desde el campo. *Journal of Environmental Planning and Management*, 50(2), 271–296.
8. Gupta, J., Pahl-Wostl, C., & Zondervan, R. (2013). “Glocal” water governance: A multi-level challenge in the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.003>
9. Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
10. Hoefsloot, F. I., Jimenez, A., Martinez, J., Miranda, L., & Pfeffer, K. (2022). Eliciting design principles using a data justice framework for participatory urban water governance observatories. *Information Technology for Development*, 28(3), 617–638. <https://doi.org/10.1080/02681102.2022.2091505>
11. Hoff, H. (2011). Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: The water, energy and food security nexus. Stockholm Environment Institute.
12. Howells, M., Hermann, S., Welsch, M., Bazilian, M., Segerström, R., Alfstad, T., et al. (2013). Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water

- strategies. *Nature Climate Change*, 3(7), 621–626.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1789>
13. Karpouzoglou, T., Zulkafli, Z., Grainger, S., Dewulf, A., Buytaert, W., & Hannah, D. M. (2016). Environmental Virtual Observatories (EVOs): Prospects for knowledge co-creation and resilience in the Information Age. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 18, 40–48.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.07.015>
 14. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
 15. OCDE. (2015). Principios de Gobernanza del Agua. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
 16. Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
 17. Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21, 49–62.
<https://doi.org/10.1007/s11269-006-9040-4>
 18. Presidencia de la República de Colombia. (2012). Decreto 1640 de 2012: Por el cual se reglamenta la formulación, implementación, seguimiento, evaluación y actualización de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA). Diario Oficial No. 48.523.
 19. Restrepo, M. (2006). Sinergias para potenciar el desarrollo sostenible a escala local. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas.
 20. Urbinatti, A. M., Benites-Lazaro, L. L., Carvalho, C. M. de, & Giatti, L. L. (2020). The conceptual basis of water-energy-food nexus governance: Systematic literature review using network and discourse analysis. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17(2), 21–43. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2020.1749086>

Somos Centro de Pensamiento,

La SAI cuenta con un **Centro de Pensamiento** integrado por expresidentes, socios y colaboradores de la institución, quienes se reúnen periódicamente para analizar y estudiar temas de interés para la ingeniería y la arquitectura en la región y el país. Como resultado de este trabajo conjunto, el Centro de Pensamiento desarrolla publicaciones, estudios y aportes especializados que contribuyen al fortalecimiento del sector.

Pensar juntos es nuestra mayor razón



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

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 Copenhagen (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 biomásas, 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.

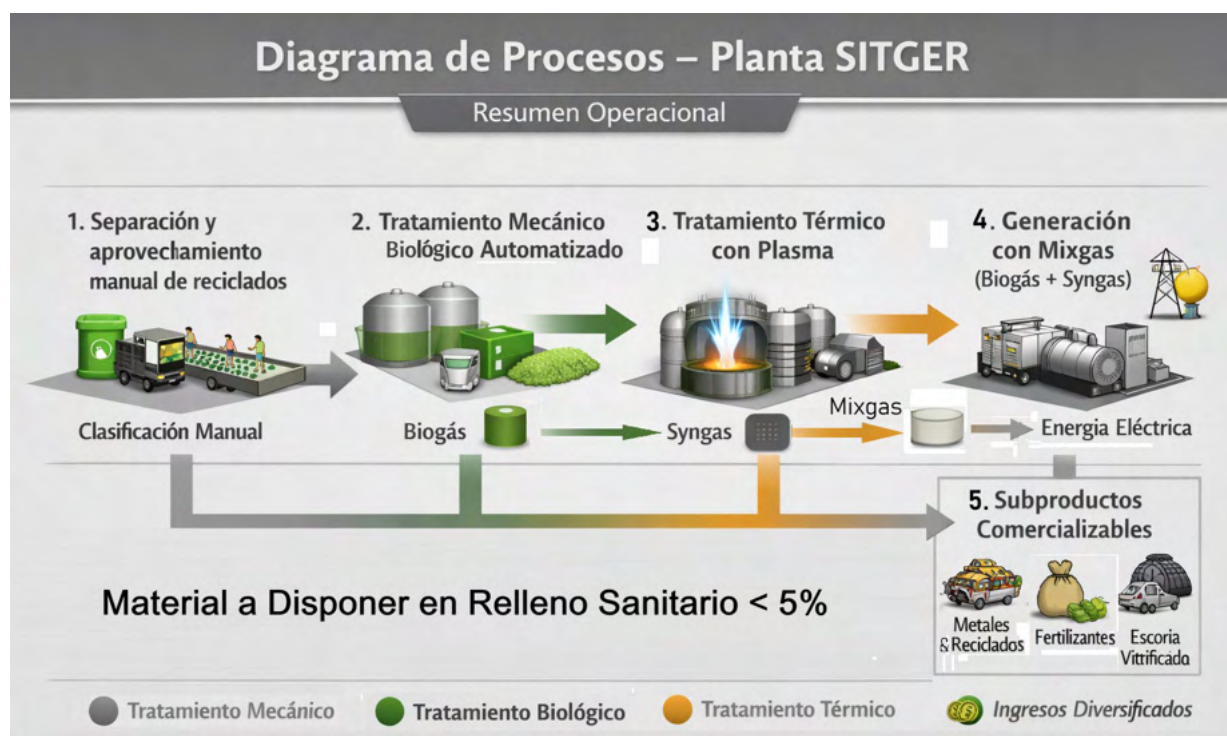


Figura 2. Flujo de Procesos - Planta de Valorización SITGER de REMOX
Elaboración propia.

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).

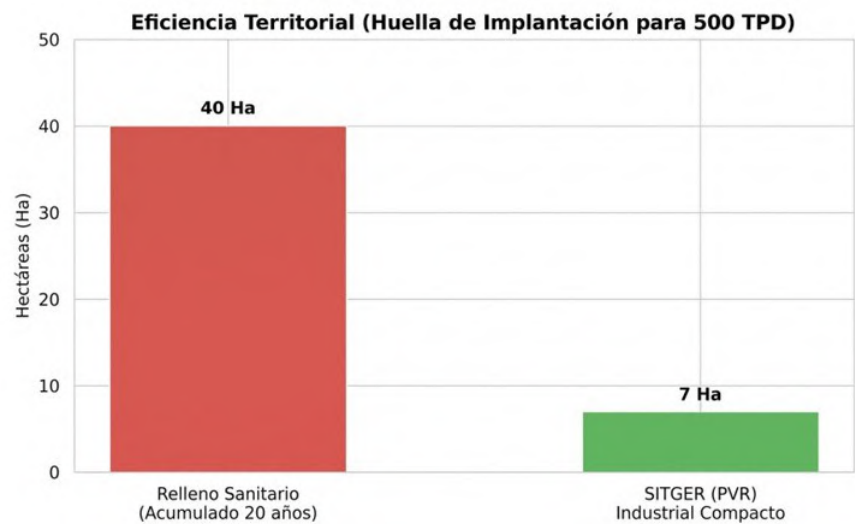


Figura 3. Comparación eficiencia territorial
Elaboración propia.

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.

Comparativa de Externalidades Ambientales y Sociales



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 (CH₄), con un potencial de calentamiento global 28 veces el impacto del dióxido de carbono (CO₂). 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 inviábiles 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 reconfiguración 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 (N₂), 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.

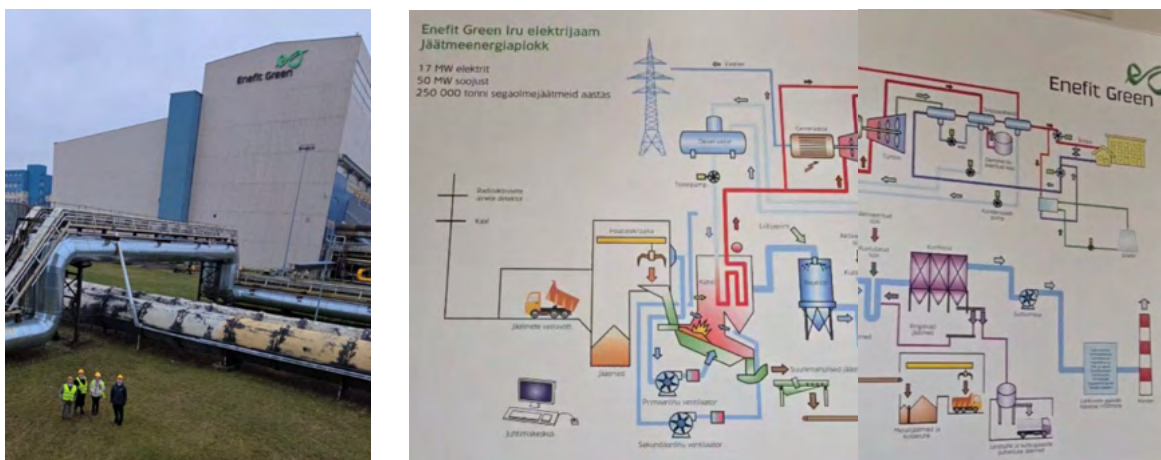
El Modelo WtE Europeo (Incineración)

- **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 Enfit 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-Enfit 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 Bakke / 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 Bakkeke, 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 US\$ 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.

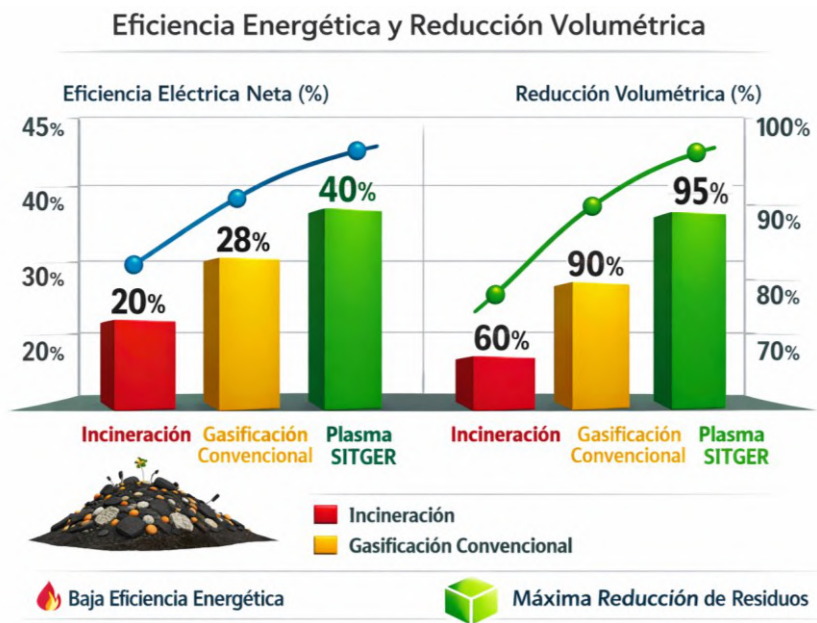


Figura 7. Eficiencia Energética Comparada SITGER de REMOX 5
Elaboración propia.

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 (<i>District Heating</i>).	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 °C a 1.100 °C.	400 °C a 900 °C (típicamente >750 °C).	Núcleo del Arco Eléctrico: >10.000 °C / Atmósfera del Reactor continuo: >3.500 °C.

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	PYROLYSIS 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, NO _x , COV	Dioxines and furans, NO _x , COV	CO, CO ₂ and acid gases, dioxines and furans, COV ³
EMISSIONS (VALORISATION STAGE)	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂ 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.

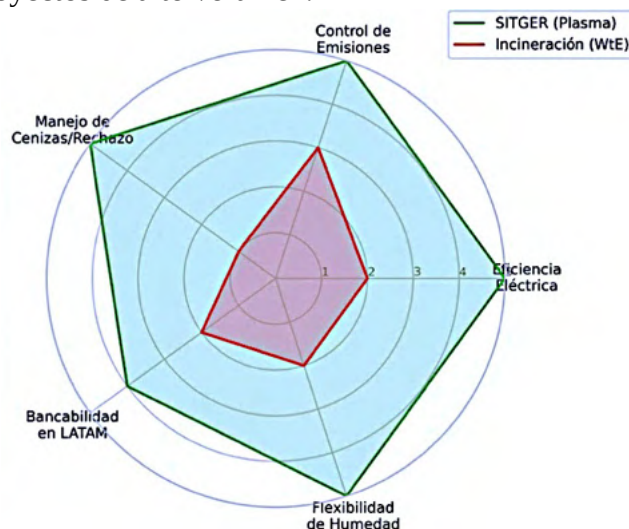


Figura 9. Comparativo Impactos Ambientales y Sociales Relleno Sanitario vs SITGER. Elaboración propia.

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 (FNCR), 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]

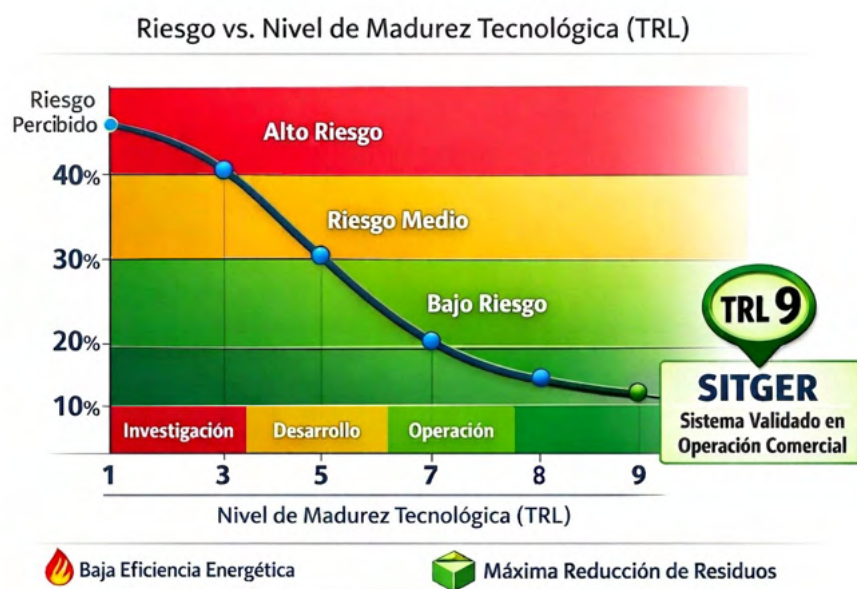


Figura 10. Nivel de preparación de tecnologías integradas en el SITGER de REMOX
Elaboración propia.

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 (H₂) 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 contruidos 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 Copenhagen,» 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://zerowasteurope.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>

LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN EL LENGUAJE OCULTO DE LA REALIDAD MODERNA

Elkin Echeverri

Ingeniero electrónico, maestría en telecomunicaciones

<https://www.elkinecheverri.in>

Resumen: La teoría de la información constituye uno de los fundamentos matemáticos más importantes de la ingeniería moderna. Sus conceptos centrales, tales como entropía, capacidad de canal y codificación, permiten comprender y optimizar la transmisión, almacenamiento y procesamiento de información en sistemas digitales. Actualmente, su impacto abarca áreas como telecomunicaciones, biología, inteligencia artificial, economía, entre otras. Este artículo analiza la evolución de la teoría de la información y su relevancia estratégica en el desarrollo de las tecnologías digitales y los sistemas inteligentes del siglo XXI.

Palabras clave: Límites físicos, Entropía, Capacidad de canal, Ingeniería de telecomunicaciones, Inteligencia artificial, Aprendizaje automático, Codificación de canal, Compresión de datos, Sistemas complejos, Criptografía, Procesamiento de señales, Información mutua, Ingeniería digital, Ruido, Procesos estocásticos, Lenguaje humano.

INTRODUCCIÓN

En 1948, cuando Claude Shannon publicó *‘The Mathematical Theory of Communication’* [1], probablemente no anticipó que estaba sentando las bases, no solo de las telecomunicaciones modernas, sino también de una de las estructuras conceptuales más profundas para entender el mundo contemporáneo.

Hoy, más de siete décadas después, la Teoría de la Información ha dejado de ser una disciplina confinada a la ingeniería para convertirse en un **marco universal de interpretación de sistemas complejos**.

Su alcance trasciende los cables, las ondas y los bits: se infiltra en la inteligencia artificial, la biología, la física, la economía e incluso en la comprensión del lenguaje humano.

En esencia, la Teoría de la Información responde a una pregunta fundamental: ¿Qué es realmente la información y cuáles son sus límites de generación, transmisión y transformación?

Esta pregunta, aparentemente abstracta, es hoy el núcleo de algunos de los desarrollos más disruptivos de nuestra era.

DE SHANNON A LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los modelos de inteligencia artificial más avanzados, incluyendo los sistemas de lenguaje especializados, los LLMs, sistemas de visión y toma de decisiones, operan implícitamente sobre principios derivados de la Teoría de la Información:

- La entropía mide la incertidumbre de los datos.
- La información mutua cuantifica cuánto aprende un modelo.
- La compresión define representaciones eficientes del conocimiento.
- El ruido modela la incertidumbre inherente del mundo real.

En otras palabras, entrenar un modelo de inteligencia artificial no es más que optimizar la extracción de información relevante en presencia de incertidumbre (ruido).

Cada predicción que realiza un sistema de IA es, en el fondo, una estimación probabilística sobre el próximo símbolo, exactamente en la misma línea conceptual planteada por Shannon al analizar el lenguaje humano como un proceso estocástico.

Más sorprendente aún es el papel de la Teoría de la Información en muchas áreas de la biología. Por ejemplo, el ADN puede interpretarse como un canal de almacenamiento y transmisión de información, donde:

- Los genes son símbolos.
- Las mutaciones son ruido.
- La evolución es un proceso de codificación y decodificación imperfecto.

Desde esta perspectiva, la vida misma puede entenderse como un sistema que **procesa, comprime y transmite información a través del tiempo**.

Este paralelismo no es metafórico: disciplinas como la bioinformática, la genética computacional, la neurociencia y el estudio de la consciencia humana utilizan conceptos como entropía, redundancia y capacidad de canal para modelar sistemas biológicos.

“Creo que, en última instancia, la física subyacente es teoría de la información”

Demis Hassabis, CEO of Google DeepMind, Premio Nobel Química 2024

LÍMITES FÍSICOS

Uno de los aportes más poderosos de la Teoría de la Información es su capacidad para establecer **límites fundamentales** [2]. No importa cuán avanzada sea la tecnología:

- Existe un máximo de información que puede transmitirse por un canal.
- El ruido no puede eliminarse completamente.
- Debes consumir una cantidad de energía mínima por cada bit transmitido.

- La eficiencia perfecta no es inalcanzable, pero puede aproximarse.

Estos límites no son tecnológicos, son **físicos**. Parámetros como el ancho de banda, la potencia de la señal y el ruido determinan la capacidad máxima de cualquier sistema de comunicaciones. Este hecho tiene implicaciones profundas en redes de telecomunicaciones, infraestructura digital, centros de cómputo, sistemas de IA.

UNA TEORÍA UNIFICADORA

La verdadera importancia de la Teoría de la Información radica en algo más ambicioso: proporciona un lenguaje común para describir sistemas completamente distintos. Todos ellos pueden analizarse bajo el mismo prisma: flujos de información, incertidumbre y capacidad de procesamiento.

PROPÓSITO DE ESTE ARTÍCULO

Es importante presentar de manera didáctica, pero rigurosa, los fundamentos de la Teoría de la Información, en especial su aplicación en la ingeniería de telecomunicaciones, pero conectando sus bases fundamentales con su impacto práctico en otras áreas del saber, mediante conceptos como: entropía, canal y ruido, tratamiento probabilístico de la información, estacionariedad y ergodicidad, límites de capacidad de sistemas de intercambio de información [3]. Todo lo anterior bajo una premisa central: entender la información no como un subproducto de los sistemas, sino como su elemento constitutivo fundamental.

En un mundo donde la economía, la tecnología y la sociedad están cada vez más determinadas por datos, algoritmos y conectividad, comprender la Teoría de la Información ya no es opcional para el ingeniero moderno, es en muchos sentidos entender el lenguaje en el que está escrita la realidad digital y cada vez más, la realidad misma.

SISTEMA DE COMUNICACIONES

En el artículo: “*The Mathematical Theory of Communication*” de Claude Shannon en 1948, se incluye un esquema gráfico similar al de la figura 1, que muestra un esquema que es útil para representar a dos personas conversando.

En ese caso, el canal sería el aire, la señal sería compuesta por energía que viaja como ondas mecánicas en ese aire (en el canal), el transmisor es nuestro sistema de fonación, y el receptor del sistema auditivo. El codificador trasladaría señales neuronales a sonidos, y el decodificador efectuará la función inversa, transformando sonidos en señales neuronales.

La fuente de información sería el cerebro/mente de una persona, y el destino el cerebro/mente de la otra. El mensaje estará codificado en el idioma común de las personas que están dialogando.

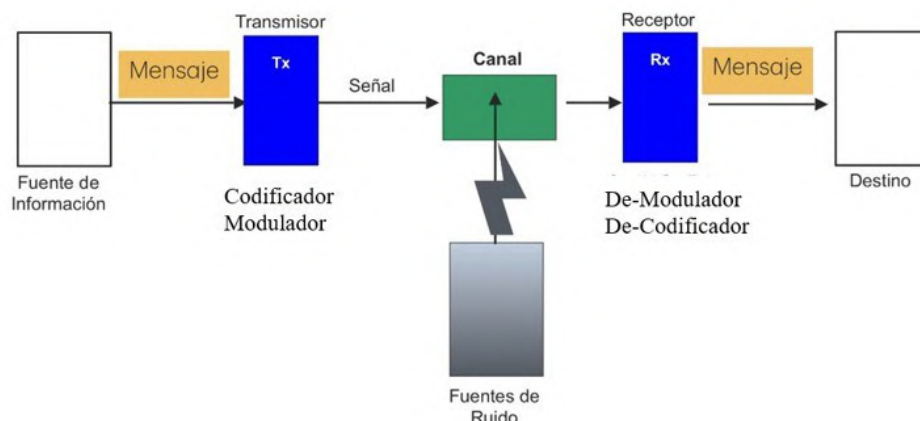


Figura 1
Elaboración propia

Las fuentes de ruido serán todas ellas alteraciones mecánicas del aire circundante, incluyendo también otros sonidos que estén en ese momento en el mismo espacio físico, y que se mezclan con los sonidos enviados por estas personas para su conversación.

Las relaciones suministradas por la Teoría de la Información permiten vislumbrar los compromisos de diseño entre los diversos elementos y parámetros en un sistema de comunicaciones real. Como consecuencia de ello, suministra un método general para comparar sistemas de cualquier tipo a pesar de su diversidad tecnológica u operativa [9].

MODELO AMPLIADO TELECOMUNICACIONES

La Teoría de la Información suministra un marco de trabajo para ubicar modelos matemáticos que caractericen también los elementos reales de su sistema de telecomunicaciones. Ese fue el ámbito inicial donde se aplicaron por Shannon y donde son la base fundacional de su funcionamiento [9].

En orden a simplificar el estudio de estos sistemas basados en modelos de fuente y modelos de canal, es útil aislar parcialmente el efecto de la fuente en el sistema y separarlo del efecto del canal, como se observa en la figura anterior [4]. Ver figura 2.

El codificador de fuente se debe enfocar en codificar de la manera más eficiente la información de la fuente (utilizar el menor número de bits o de información análoga para ello), mientras que el codificador de canal se concentra en lograr que las secuencias de datos producidas por el codificador de fuente sean recibidas correctamente al otro extremo en la salida del canal. Finalmente, el modulador se encarga de ser la interfaz con el canal y de correlacionar los dígitos binarios¹ a los tipos de señales más apropiadas para su viaje a través del canal que haya sido escogido para ese sistema de telecomunicaciones.

¹ Si el sistema es digital. Puede ser análogo, e igual se debe encontrar la forma adecuada de representación, por ejemplo, mediante algún tipo de modulación.

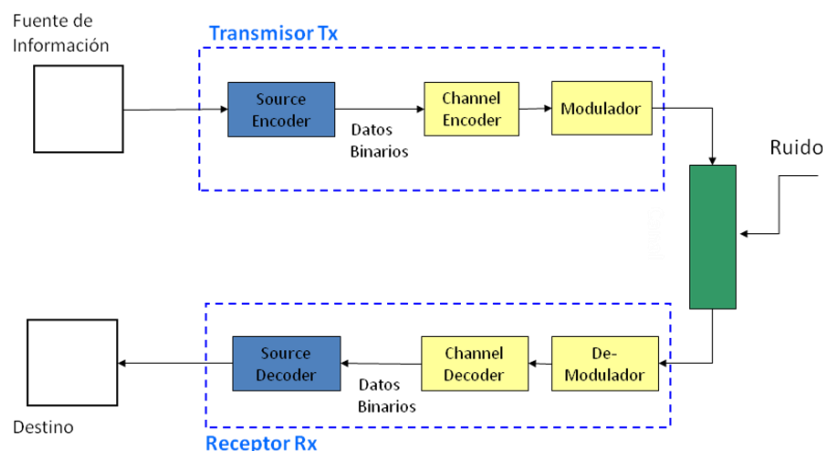


Figura 2
Elaboración propia

Veamos ahora algunos conceptos básicos.

TRANSPORTE DE INFORMACIÓN EN SEÑALES FÍSICAS

Un sistema de comunicaciones se basa en utilizar cualquier tipo de señal física, empleando cualquier variación de energía periódica, que se desplace en el espacio y en el tiempo. Con ello se busca incorporar en ella la información que deseamos sea transportada, “codificada y/o modulada” mediante transformaciones específicas en cualquiera de sus parámetros “morfológicos” básicos (amplitud-intensidad, fase, frecuencia, longitud de onda o combinaciones de ellos).

Mediante la adecuada “de-modulación y/o decodificación” de esas variaciones en la señal entrante, y un código previamente establecido entre las partes, el receptor puede extraer la información remitida en la señal desde el transmisor.

La cantidad máxima de información, usualmente denominada **C**, es aquella que se pueda movilizar desde un lugar a otro por unidad de tiempo. Esa cantidad estará por tanto relacionada de forma directa con el número de “variaciones” de la señal que pueda transportar adecuadamente el canal, y que el receptor pueda procesar completamente sin error, o más precisamente, en razón a los resultados de Shannon, con un nivel de error tan bajo como quiera el diseñador del sistema. Lo veremos más adelante en este artículo.

CAPACIDAD

Inicialmente hemos manejado la palabra “capacidad” en términos generales como adjetivo en su interpretación corriente, pero luego lo utilizaremos en términos más precisos descritos

en esta sección, como medida en bits^2 por segundo, bps, de una fuente, a través de un canal o de un sistema de comunicaciones en su totalidad.

Con el maravilloso trabajo de Shannon en 1948, tenemos las bases teóricas y matemáticas necesarias para determinar la capacidad en términos de cantidad de información por unidad de tiempo (por ejemplo, en bits por segundo), y ello se ha constituido en la base conceptual³ de las tecnologías de telecomunicaciones modernas.

Como se podrá imaginar, se deben utilizar canales que tengan una capacidad igual o superior a la capacidad de la fuente. Por ejemplo, si Netflix emite una película en 4K (ultra HD), requiere un canal con una capacidad de 25 Mbps, valor óptimo recomendado por Netflix. Mínimo 15 Mbps degradando la calidad del video.

APROXIMACIÓN PROBABILÍSTICA

Algunas personas se acercaron conceptualmente a la definición correcta de estos modelos que hoy denominamos Teoría de la Información. Algunos autores, William G. Tuller (trabajo referenciado por Shannon) [14] y Calvier, encontraron expresiones para la capacidad de un sistema similares a la de Shannon [9]; sin embargo, todos ellos fallaron en concebir un modelo basado en probabilidades, que diera sustento firme a todo el fenómeno y al efecto del ruido.

Norbert Wiener tenía aproximaciones similares y, además, había desarrollado⁴ la base del tratamiento matemático de los procesos estocásticos para tratar el efecto del ruido; sin embargo, sus explicaciones no eran tan claras como las de Shannon y su acercamiento a los problemas de ingeniería no era tan evidente.

En una primera aproximación, la mayoría de las personas no piensa en las comunicaciones como un problema estadístico basado en probabilidades, pero en asumir esa visión radica parte del éxito del análisis de Claude Shannon.

Para una persona que emite su propia información, hay poco espacio para pensar que el azar y la probabilidad tengan algún efecto. Sin embargo, cuando te ubicas como un observador de otra fuente de información, por ejemplo, otra persona que te habla a ti, ese tipo de acercamiento cobra vigencia, ya que solo puedes esperar saber con cierta probabilidad lo que

² Un colega de C. Shannon en Bell Labs, John W Tukey, un estadístico muy reconocido por los aportes a su campo de trabajo, fue el creador de esa palabra como una contracción de “binary digit”, pero fue el mismo Shannon quien en realidad popularizó su uso.

³ En IEEE: Institute of Electric and Electronic Engineers, existe una sociedad dedicada al estudio de este tema, quien de cierta forma es la “heredera” del trabajo de Shannon y todos los trabajos subsiguientes que de allí se derivan, ya que dicho personaje fue miembro activo de IEEE casi hasta su muerte en 2001. De esta forma la sociedad de Teoría de la Información (<http://www.itsoc.org/>), es la fuente más prestigiosa y respetada en el mundo sobre el estado del arte en esas materias.

⁴ De manera simultánea con Kolmogorov, se desarrollaron también la teoría de filtrado y predicción.

escuchaste y lo que recibiste, lo cual puede variar de forma significativa si estás cerca o lejos, si hay o no gente hablando alrededor, y si tu sistema auditivo es deficiente, etc.

También verás cómo natural “asignar una probabilidad” al próximo símbolo o mensaje que tú “crees” que esa fuente emitirá (muchas veces uno se adelanta a su interlocutor, si él se demora en emitir la próxima palabra). Esas es una de las bases de los LLMs, que hoy son el fundamento de la actual generación de tecnologías de AI: predecir con cierto nivel de probabilidad, cual es la palabra (token) que vendrá a continuación.

De la misma forma “medimos” de forma intuitiva la cantidad de información emitida por una fuente en función de la sorpresa que ella nos genera. Un mensaje muy probable, casi cierto (quizás algo que ya conocemos) “sentimos” que no nos brindará información (no contiene información para nosotros).

Por el contrario, un mensaje que sea para nosotros muy poco probable generará sorpresa y contendrá una gran cantidad de información.

De esta forma, la cantidad de información de un mensaje estará en directa relación con su probabilidad de ocurrencia. Así mismo, la cantidad de información que produzca una fuente estará con relación a la suma de toda la información producida por los símbolos de su alfabeto en el tiempo.

PROBABILIDADES EN EL LENGUAJE CORRIENTE

Para acercarnos a esos conceptos, sigamos un poco los razonamientos que el mismo Shannon consideró sobre el lenguaje natural. El demostró cómo los textos y sus palabras en inglés podrían ser generados de forma aproximada por un proceso con un componente probabilístico, que sin pérdida de generalidad podemos imaginar implementado en una máquina. Ese proceso descrito a continuación es tomado de [16].

Si tomamos esa máquina y producimos letras, una por una aleatoriamente seleccionadas, de forma tal que su elección actual sea independiente de la última letra producida (una fuente sin memoria) e incluyendo un símbolo para el espacio en blanco, tendremos algo que denominamos aproximación de orden 0:

Aproximación de orden 0:

XFOML RXKHRJFFJUJ ZLPWCFWKCYJ FFJEYVKCQSGHYD QAAMKBZAACIBCLHJQD

Si hacemos una nueva selección aleatoria, pero en este caso cada símbolo no tendrá la misma probabilidad de aparición.

Según sea cada letra en cuestión, tendremos en cuenta en nuestra máquina lo que ocurre regularmente en los lenguajes humanos, que unas letras son más utilizadas que otras, y por supuesto tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

Por ejemplo, las letras “E” y “A” en Inglés⁵, aparecen más que Z o W, tendremos así:

Aproximación de orden 1:

OCRO HLI RGWR NMIELWIS EU LL NBNESEBYA TH EEI ALHHENHTTPA OOBTTVA NAH BRL

Siempre que aparece una letra en un lenguaje, las que vendrán a continuación es muy probable que vengan desde unos grupos de letras, que desde otros.

Por ejemplo, después de una Q lo más probable es tener una U, después de una T que aparezca una H, después de una O una R, y después de una B una E, y así sucesivamente.

Al modificar nuestra máquina con esas probabilidades obtendremos algo así:

Aproximación de orden 2:

ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S DEAMY ACHIN D ILONASIVE TUCOOWE AT TEASONARE FUSO TIZIN ANDY TOBE SEACE CTISBE

Los criptoanalistas⁶ han construido en el pasado tablas de probabilidades para grupos de tres letras en el idioma inglés, que se denominan “tiagrams”. Incluyendo también ese hecho podemos subir un nivel más en nuestra máquina:

Aproximación de orden 3:

IN NO IST LAT WHEY CRATICT FROURE BIRS GROCID PONDENOME OF DEMONSTURES OF THE REPTAGIN IS REGOACTIONA OF CRE

Luego hay que decir que existen reglas (por ejemplo, gramaticales) que hacen que unas palabras sean o no válidas, con sus probabilidades asociadas, en la aparición de cada palabra. Adicionando esas reglas.

Aproximación de orden 1 palabras:

RESPRESENTING AND SPEEILY IS AN GOOD APT OR COME CAN DIFFERENT NATURAL HERE HE THE A IN CAME THE TO OF TO EXPERT GRAY COME TO FURNISHES THE LINE MESSAGE HAD BE THESE

Hay reglas gramaticales que limitan cuáles letras y palabras deben estar antes o después de cada grupo de ellas, probabilidades de aparición de una palabra después de otra.

Aproximación de orden 2 palabras:

⁵ Ocurre de manera similar en el idioma español.

⁶ Mientras la Teoría la Información define los límites teóricos de la comunicación y el secreto. La criptografía aplica estas leyes para construir sistemas seguros en el mundo real.

TEH HEAD AND FRONTAL ATTACK ON AN ENGLISH WRITER THAT THE CHARACTER OF THIS POINT IS THEREFORE ANOTHER METHOD FOR THE LETTERS THAT THE TIME OF WHOEVER TOLD THE PROBLEM FOR AN UNEXPECTED.

Al considerar la fuente como un proceso estadístico gobernado por probabilidades, poco a poco la remembranza del idioma inglés aparece rápidamente, confirmando lo acertado de dicho tratamiento.

CAPACIDAD DEL EMISOR

Si consideramos cualquier fuente de información como un ente ideal construido con relación a su análisis estadístico -según lo visto en la sección anterior-, podremos modelarla de forma matemática.

Se puede imaginar la fuente como una caja cerrada con un conjunto máximo (finito) de símbolos en su interior (alfabeto), y que ella puede escoger uno a uno, para producir en un orden dado, mensajes para comunicarse (por ejemplo, un ser humano con otros).

De esta forma se puede asociar a cada uno de esos símbolos una probabilidad de ocurrencia, según sea lo que la fuente escoja en un momento dado para comunicarse hacia el exterior.

Si pensamos ahora en una fuente independiente con un conjunto finito de n símbolos o mensajes que puede producir ella en su salida:

$$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_n]$$

y probabilidades de ocurrencia para cada uno de ellos:

$$[p(x_1), p(x_2), p(x_3), \dots, p(x_k), \dots, P(x_n)],$$

La cantidad de información (**I**), asociada con un símbolo o mensaje de la fuente para el símbolo k será medida en bits y se calcula de la siguiente forma:

$$I_k = -\log_2 [p(x_k)]^7$$

La cantidad total de información para toda la fuente será la suma de la información de todos sus símbolos o mensajes, y es denominada Entropía, y representada por la letra mayúscula H . El signo negativo del logaritmo se introduce por conveniencia operacional para evitar que la información se mida en unidades negativas.

⁷ Si la base del logaritmo empleado es 10, la unidad de medida de información no se denomina en bits, sino en Hartleys. Si la base es e (logaritmo natural), la unidad se denomina entonces Nats.

Para una fuente, H nos indicará la cantidad de información que ella posee [1]⁸:

$$H = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i)$$

- Todos los modelos de fuente en Teoría de la Información son procesos aleatorios o modelos de secuencias aleatorias.
- n variables aleatorias con probabilidades $P_1 \dots P_n$
- H medida en bits por símbolo.
- H mide la cantidad de información de una fuente.

La capacidad de la fuente podrá ser medida en símbolos por segundo.

Como H es medida en bits por símbolo, y cada símbolo puede estar codificado en uno o varios bits, la capacidad de generación de la fuente puede también ser mediada en bits por segundo (bps).

El número de símbolos máximos que puede generar por segundo una fuente cualquiera, nos entregará entonces una medida de su capacidad máxima de generación de información por unidad de tiempo⁹: H/t .

ENTROPÍA DE UNA FUENTE DISCRETA, INDEPENDIENTE, BINARIA Y SIN MEMORIA

Como una forma de ilustrar los conceptos anteriores de forma más rigurosa, veamos el caso más simple, una fuente que solo posee dos símbolos (1 y 0). La base de cualquier sistema digital moderno. Sabemos que esa fuente puede producir de manera autónoma, con probabilidades de p para uno de los símbolos, y de $1-p$ para el otro.

En este caso, estamos suponiendo que en general sus selecciones pasadas de símbolos no tienen ningún efecto en ello (no tiene memoria).

$$H = -[p \log p + (1-p) \log(1-p)]$$

⁸ Según el teorema de Margolus – Levitin [6] hay una cota máxima para la frecuencia de vibración de cualquier material, derivado de la mecánica cuántica, y basado en consideraciones de disipación de energía y del máximo número de cambios de estado por segundo para un dispositivo de un kilogramo (dada la equivalencia masa energía se toma el famoso “ultimate laptop” de Lloyd’s de tal masa para ese cálculo) [21]). Sin embargo, si se considera que no todo el dispositivo está involucrado en la producción de esos cambios de estado, si no una porción de su masa total, algunos autores [7] suponen ese límite en un valor más cercano de cambios de estado de 1 PHz. Hoy los más cortos eventos que pueden ser creados, controlados y medidos, son ráfagas rápidas de luz láser y su interacción con la materia con pulsos que ocurren en escalas de tiempo de femto-segundos y atto-segundos [8], lo cual se adapta a lo ya descrito desde [21] para una fuente o un canal.

⁹ Físicamente eso significaría una frecuencia máxima de oscilación de algún material, la cual no puede ser infinita (en términos mecano-cuánticos significaría una energía infinita).

En ese caso, calculemos su entropía:

$$H = -[1/2 \log(1/2) + 1/2 \log(1/2)] = 1 \text{ bit / simbolo}$$

Si realizamos una gráfica de esa expresión:

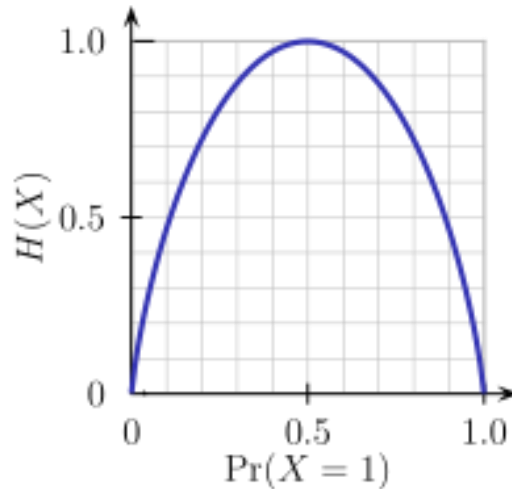


Figura 3 Entropía de una fuente independiente discreta binaria sin memoria

Como podemos observar, la Entropía H de esa fuente, su cantidad de información, será máxima cuando la probabilidad de todos sus símbolos sea igual. En este caso, será cuando la probabilidad de ocurrencia de ellos sea igual a un medio ($1/2$).

Ese es el resultado que uno intuitivamente esperaría: que baste como máximo un bit, en una fuente, para representar (almacenar) dos probables selecciones (1 o 0) y que su incertidumbre máxima sea la de que sus símbolos tengan igual probabilidad de ocurrencia en cualquier instante del tiempo.

ALFABETO, CODIFICACIÓN Y ENTROPÍA

Desde la ecuación para la Entropía puede quedar una inquietud que es muy usual respecto a la razón por la que la información generada por una fuente, medida por su entropía, esté relacionada con una medida logarítmica. Algunos ejemplos pueden ayudarnos a entender ese concepto.

Si tengo un alfabeto de 4 símbolos necesito máximo 2 dígitos binarios para representarlo, si tengo 8 símbolos, 3 dígitos y así sucesivamente. De esta forma el Log en base 2 del número de símbolos del alfabeto es una medida de la información en bits que la compone. De ahí que en Teoría de la Información sea más conveniente el uso de medidas logarítmicas.

•Método Codificación1

•a₁-- 00

•a₂-- 01

•a₃-- 10

•a₃-- 11

H= 2bits/símbolo

(Probabilidades iguales por símbolo)

El siguiente ejemplo ilustra un poco más este concepto y demuestra cómo la cantidad de información final depende de la eficiencia de la codificación de la fuente escogida.

Si estamos buscando que la fuente genere menos información por unidad de tiempo, el método anterior de codificación será mejor, si en ese sistema de comunicación el símbolo de todo su alfabeto más empleado usualmente es el a₄.

•Método Codificación 2

•a₁-- 0

•a₂-- 10

•a₃-- 110

•a₄-- 111

H<2bits/símbolo

(probabilidades diferentes por símbolo)

Desde la perspectiva del ingeniero de telecomunicaciones, se debe tratar de minimizar la cantidad de información de la fuente, escogiendo la mínima cantidad, en su número de bits por símbolo, de las fuentes que emplee: aplicar la mejor codificación de fuente disponible para sus propósitos¹⁰.

Si observamos con atención los lenguajes humanos, veremos que ellos tienen una codificación en la que el cerebro optimiza el gasto de energía, ya que busca asignar a los mensajes de más uso, una menor longitud.

Las palabras que más usamos tienden a ser de muy pocas letras. Las palabras que más usamos usualmente son menos largas. Palabras que antes usábamos poco y se empiezan a utilizar más, usualmente se van recortando por los hablantes que las usan.

LIMITES DEL CANAL

Un canal de comunicaciones de cualquier tipo (par de cobre, fibra óptica, cable coaxial, el aire, el “vacío”, etc.) está caracterizado por su construcción intrínseca, materiales y geometría, así como por su longitud entre los puntos que unen finalmente emisor y receptor. Todos ellos determinan su habilidad para que una señal pueda ingresar al canal desde el emisor y luego pueda llegar al receptor con un nivel de energía y “morfología” apropiada, de

¹⁰ También se debe usar algoritmos compresión en los códigos de las fuentes de datos, por ejemplo, cuando comprimimos un archivo antes de enviarlo a otra persona. La información contenida es la misma, pero se requiere enviar menos bits por el canal. Sin embargo, ese tema está por fuera del enfoque de este artículo.

tal forma que pueda ser extraída sin error la información que por él fue tramitada (más precisamente: con un nivel máximo de error esperado).

El material del canal tiene entonces un límite máximo intrínseco de variaciones de señal que puede transportar entre sus extremos.

ANCHO BANDA

En términos específicos debemos hablar de que el canal tiene un parámetro característico derivado de todas sus propiedades físicas que se denomina el **ancho de banda B** que se mide en unidades de frecuencia Hz (seg^{-1}).

De la misma forma las señales de energía antes mencionadas y producidas por la fuente tienen también un ancho de banda, un rango de frecuencias que las caracterizan y las componen, las cuales podremos conocer mediante el análisis de Fourier, y por ende calcular desde allí su ancho de banda.

Es importante entonces enunciar que para cada tipo de señal o grupo de ellas en algún rango específico de sus frecuencias (sus anchos de banda), existirán a su vez canales con propiedades apropiadas para transportarlas.

Los canales no apropiados transportarán esas señales, pero atenuarán y/o distorsionarán agresivamente su energía en muy pequeños tramos de canal, haciendo impracticable para el receptor la recuperación de la información codificada que le fue enviada, aún en muy pequeñas distancias del canal.

Para transportar mayor información por unidad de tiempo también se requieren señales con mayores rangos de frecuencia, y por ende canales apropiados para transportarlas en longitudes de canal esperadas (las que en la práctica sean económicamente factibles y útiles para la comunicación de sitios y localidades típicamente distribuidos en la geografía objetivo). Sin embargo, ese es solo uno de los factores necesarios. Analizaremos otros factores relacionados en este artículo, pero antes definamos de forma rigurosa la forma de medir el ancho de banda.

DEFINICIÓN DEL ANCHO DE BANDA

El concepto de ancho de banda de una señal está relacionado con mantener para tal señal toda su energía en un rango de frecuencias. De similar forma, el ancho de banda de un canal será aquel rango en el que una señal puede viajar a través de ese canal sin perder toda su energía, y aunque ella sea disminuida, aún tengamos en su salida una cantidad que sea suficiente para extraer la información que venía codificada en las variaciones de tal señal (tenga la energía mínima requerida para sensibilidad del receptor).

De manera más rigurosa, podemos decir que un canal puede ser **limitado en ancho de banda** si no hay potencia de señal por fuera de dicho rango de frecuencias¹¹. De esta forma no es de extrañar que una definición precisa del ancho de banda de una señal o de un canal tenga diversas formas de interpretación.

Hay varias formas de especificar cuál es el rango de frecuencias de una señal, según sea su composición espectral. A continuación, se especifican las más comunes:

- Rango de frecuencias en los cuales la señal pierde al menos 3 dB, o sea ancho de banda de la mitad de su potencia.
- Ancho de banda entre los primeros nulos en el análisis espectral (el lóbulo espectral principal). Es un método común pero impreciso, ya que según el formato de modulación ese lóbulo principal puede no aparecer bien definido.
- ancho de banda de contenimiento fraccional. Aceptada por la FCC en EU (FCC Rules and Regulations 2.202). Ella define el rango de frecuencias que dejan solo 0,5% de la potencia de la señal por encima del límite superior de la banda y el 0,5% por debajo del límite inferior de la banda. Esto significa que esta definición toma el 99% de potencia de la señal para definir el ancho de banda.
- Limitada por la PSD. La PSD es la densidad espectral de potencia. El rango de frecuencias del ancho de banda es aquel en el que la PSD ha caído entre 35 y 50 dBs.

ANCHO DE BANDA Y LONGITUD DEL CANAL

En la medida que un canal aumenta su longitud física, aumenta la atenuación en el extremo de salida de la señal, y obtiene también una adición mayor de señales indeseables, tanto intrínsecas del material como externas, todas denominadas ruido; lo cual se explicará más adelante. De esta forma, para cada definición de ancho de banda antes enunciada en este escrito y cada tipo de señal introducida, existirá una extensión o longitud diferente posible de ese canal. De la misma forma, el reducir la extensión de un canal, en general, aumentará el rango de frecuencias que puede transportar adecuadamente y que denominamos el ancho de banda de ese canal. Es como si de alguna forma fueran parámetros intercambiables, con relaciones de intercambio diferentes en cada caso¹².

RUIDO Y PROBABILIDAD

Cualquier señal distinta a la transmitida por la fuente que esté presente en cualquier lugar del sistema de telecomunicaciones puede ser considerada ruido en ese sistema.

¹¹ Sin embargo, en la práctica no hay señales limitadas en banda ya que su espectro de frecuencias tiene componentes en todas las frecuencias, aunque la mayor parte de su energía esté en un rango determinado.

¹² Los pares telefónicos tradicionales que conectaban estos dispositivos en el pasado, podrían conectarse a su central desde 15 o más kilómetros ("pupinizados"), porque solo requerían transportar la voz humana en un ancho de banda de 3 kHz. Si ese mismo par de cobre telefónico lo utilizamos para suministrar Internet de alta velocidad, por ejemplo, mediante tecnología DSL, solo podría soportar muy altas capacidades de Internet en distancias de 50 o 100 metros, desde el abonado hasta la central telefónica más cercana donde esté su equipo receptor de DSL.

El ruido no lleva información útil para nuestro sistema y por el contrario, altera o destruye la información transportada por la señal emitida por la fuente, al causar errores en la recepción del mensaje transmitido.

El ruido es un fenómeno dependiente de procesos internos en el sistema de telecomunicaciones, tales como ruido térmico, no linealidades en los materiales; o generado por procesos externos a él: señales electromagnéticas producidas por otros sistemas de cualquier tipo: atmosférico, radiación intergaláctica e interferencia de dispositivos humanos, etc.

El ruido limita la capacidad de transportar información de un sistema de telecomunicaciones. El ruido, por definición, es una señal aleatoria -no se conoce la señal y por ello ella solo se puede moldear por medio de probabilidades- caracterizándola así estadísticamente. Tal modelamiento debe ocurrir de forma tal que la distribución de probabilidad PDF¹³ que represente esa señal de ruido refleje su comportamiento en la mayoría de los escenarios reales de operación.

La potencia de una señal depende de su amplitud (señales de potencia¹⁴) y, en el caso del ruido, podemos determinar la distribución de probabilidad¹⁵ que nos indique sus valores más probables.

El modelar matemáticamente algunos tipos de señales aleatorias de una forma efectiva para muchos sistemas tecnológicos, como los de telecomunicaciones, es un logro muy valioso del conocimiento humano.

RUIDO BLANCO GAUSSIANO AWGN

Un caso usual en los sistemas de telecomunicaciones corresponde al ruido que se presenta en todas las frecuencias y que se denomina por tanto ruido blanco: la suma de todas las longitudes de onda visibles brinda una señal luminosa de color blanco, en inglés, AWGN: Additive White Gaussian Noise. Es producido por el comportamiento térmico de cualquier tipo de material, por ello está presente en todos componentes de un sistema de comunicaciones.

La temperatura de cualquier elemento físico está en relación directa con la vibración de sus partículas básicas. A mayor temperatura, mayor es la intensidad de tales vibraciones –la energía cinética de la partícula es proporcional a su temperatura-, así el ruido térmico es la señal electromagnética asociada a las vibraciones de todas sus partículas.

¹³ Por sus siglas en Inglés: Probability Density Function. La densidad espectral de potencia PSD de una señal nos indica cuanta potencia transporta cada una de las frecuencias de su espectro.

¹⁴ Toda señal puede ser clasificadas como de potencia o de energía.

¹⁵ Una función matemática que nos indica para cada suceso posible el valor de su probabilidad.

Como es de esperar, tales señales se encontrarán con mayor o menor intensidad en todas las frecuencias del espectro.

De esta forma, el ruido térmico –también conocido como ruido de Nyquist o Johnson- es causado por el movimiento aleatorio de partículas cargadas (electrones, protones, iones y similares), por tanto, también será producido por la causa antes descrita desde la atmósfera y por radiaciones desde cuerpos interestelares, también formados por las mismas partículas cargadas.

Como el ruido térmico es de espectro plano y por ello se presenta por igual en todas las frecuencias¹⁶, recolectaremos más ruido de este tipo mientras mayor sea el ancho de banda de nuestro sistema de telecomunicaciones.

La expresión que cuantifica por tanto la potencia del ruido blanco en cualquier sistema de telecomunicaciones es [10]:

$$P_n = kTB$$

K: Constante de Boltzmann= 1.380×10^{-23} J/K

T: Temperatura absoluta del material en grados Kelvin

B: Ancho de banda de nuestro sistema de telecomunicaciones.

RELACIÓN SEÑAL A RUIDO

Como describimos anteriormente, toda señal cuando viaja por cualquier medio físico consume energía en su desplazamiento: atenuación, absorción, reflexión, dispersión, pérdidas, etc., de esa forma su recuperación en el extremo del receptor requiere que el nivel de energía con el que finalmente llega; sea aún lo suficientemente alta para distinguirla respecto a las señales de ruido, al menos del ruido térmico antes descrito y siempre presente en cualquier dispositivo¹⁷.

Dicha situación se puede especificar como la comparación entre dos niveles de potencia, el de la señal y el del ruido. Esta relación es conocida como la **relación señal a ruido SNR o S/N** (“Signal to Noise Ratio” en Ingles¹⁸).

Tanto la señal en sí misma como el equipo receptor pueden ser caracterizados con esa relación. Una comunicación exitosa requiere que la señal al arribar al receptor no tenga una

¹⁶ Se ha calculado con base en la mecánica cuántica, y se ha probado experimentalmente, que el ruido térmico es independiente de la frecuencia para rangos de frecuencia desde 0 a 1THz [10].

¹⁷ Todo equipo electrónico incluye entre sus especificaciones, una denominada, Figura de Ruido, que indica su calidad respecto a cuanto es capaz de minimizar el ruido que introduce ese equipo en sí mismo, para cada rango de temperatura de operación.

¹⁸ En sistemas ópticos de comunicación es usual hablar de la OSNR, que es simplemente la SNR óptica.

S/N inferior a aquella mínima con la cual puede trabajar el receptor, y para la cual fue diseñado todo el sistema.

La potencia de la señal S inyectada por el emisor es también un parámetro de diseño y construcción del transmisor. Su valor debe estar de acuerdo con el nivel de diseño de S/N, esperado en las peores condiciones de operación regular, a la entrada del receptor.

De esta forma, la señal, después de recorrer el tramo máximo esperado de canal, como explicamos previamente, tendrá aún la energía mínima necesaria para que el receptor pueda extraer de forma correcta TODA la información “modulada-codificada” por el transmisor. Ello será posible a pesar de la presencia de ruido en ese mismo receptor y a lo largo de todo el medio o canal empleado.

PROCESOS ESTOCÁSTICOS

La teoría matemática de la probabilidad nos permite estudiar sistemas en los cuales la aleatoriedad juega un papel clave en el resultado de un suceso, y no existe una modelación matemática adecuada que nos permita predecir con certeza el resultado final de su ocurrencia (lanzamiento de un dado, por ejemplo).

El estudio de la probabilidad tradicional puede denominarse “estática” ya que se centra en el análisis de sucesos en los cuales las variables aleatorias no modifican su comportamiento con el paso del tiempo (por ejemplo, lanzar una moneda al aire y determinar en qué lado quedará ella hacia arriba al detenerse en el suelo). Cuando el tiempo¹⁹ modifica el comportamiento de las variables aleatorias, se debe entonces estudiar con las herramientas adecuadas para una probabilidad que podemos denominar “dinámica”.

En esos últimos casos estaremos en el dominio de los denominados **procesos estocásticos**. Muchos procesos naturales se presentan con variaciones aleatorias (estocásticas) en el transcurso del tiempo.

En telecomunicaciones, el ruido genera un comportamiento que podría describirse como variación de voltaje en los componentes del sistema, en cada instante t . Tenemos así una variable aleatoria que se modifica con el tiempo y, por tanto, para moldear sus resultados debemos utilizar la teoría de los procesos estocásticos.

Ella nos brinda herramientas matemáticas para tratar un proceso, que, si bien es aleatorio, puede moldearse según sus probabilidades, de forma análoga a lo que ya efectuamos antes para las fuentes de información discretas y que haremos ahora para el canal.

¹⁹ En general tenemos un proceso estocástico si el depende del tiempo, o de cualquier otra variable en el dominio de los números reales.

Un proceso estocástico podemos vislumbrarlo como una variable aleatoria indexada por el tiempo, cuyas salidas son secuencias infinitas o funciones en contraste a las variables aleatorias cuyas salidas son números o vectores.

En otras palabras, un proceso estocástico $X(t)$ es un proceso probabilístico cuyas posibles salidas son funciones de la variable t . Si los valores de esos procesos en los instantes: $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, son: $X(t_1), X(t_2), X(t_3), \dots, X(t_n)$; ellas forman una secuencia de variables aleatorias.

El estudio de los procesos estocásticos corresponde al análisis de series de tiempo y ello significa la introducción de algunos términos nuevos relacionados con promedios y esperanzas matemáticas de esas series.

ENSEMBLES, PROCESOS ESTACIONARIOS Y ERGODICOS

Consideremos a modo de ilustración un sistema de comunicaciones con un número muy grande de receptores recibiendo voltajes aleatorios de ruido en función del tiempo como se registra en la siguiente gráfica.

El voltaje registrado por cada receptor λ_k es una salida del proceso estocástico y es denominado un miembro de la función de ensamble (**ensemble**). Se puede imaginar una fuente de ruido como aquella que en cualquier momento del tiempo tendrá alguna de las salidas de voltaje descritas en su ensemble infinito de secuencias posibles. El estudio de las regularidades del ensemble nos permitirá conocer el comportamiento del fenómeno a pesar de ser este aleatorio.

Un ejemplo adicional que he tomado de [16], se puede ilustrar un poco más este concepto. Como se indicó antes, cualquier persona puede ser considerada una fuente de información analizada de forma probabilística, la cual tiene un alfabeto finito de símbolos para comunicarse (alfabeto de su lenguaje nativo).

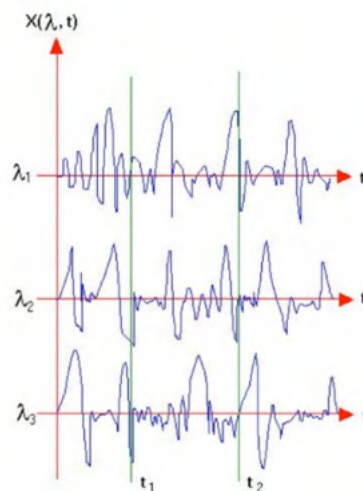


Figura 4 Ejemplos de fuentes [16]

No pensando en una persona en particular, y tratando de caracterizar el comportamiento de esta fuente en cualquier instante del tiempo, podemos pensar en infinitos momentos e infinitas personas creando secuencias de letras que conforman sus mensajes (similar a la aproximación que ya vimos de orden 0 de Shannon para el idioma inglés).

Secuencia Sujeto 1: A B A B A B A B A B, etc.

Secuencia Sujeto 2: B A B A B A B A B A, etc.

Secuencia Sujeto 3: E E E E E E E E E E, etc.

En los casos antes ilustrados podemos vislumbrar cómo estas secuencias que caracterizan esas fuentes aleatorias pueden tener promedios en el tiempo y promedios en el ensemble. El siguiente cuadro lo resume para las tres secuencias de letras antes descritas:

Probabilidad de la letra	Promedio Sujeto 1	Promedio Sujeto 2	Promedio Sujeto 3	Promedio Ensemble
A	1/2	1/2	0	1/3
B	1/2	1/2	0	1/3
E	0	0	1	1/3

ESTACIONARIEDAD

Una fuente es estacionaria cuando las probabilidades de asignación de los símbolos escogidos en cualquier posición del ensemble son las mismas. En nuestro ejemplo anterior la probabilidad de encontrar una E, una B o una A en cualquiera de las 10 posiciones ilustradas del ensemble es la misma (1/3) y así suponemos que se mantiene para cualquier número de letras en todas las secuencias (1/3).

Estrictamente hablando las secuencias se consideran sin principio ni fin, pero suponer que una fuente es estacionaria significa esperar que no haya posiciones o ranuras de tiempo privilegiadas para cualquiera de los símbolos posibles de la fuente y que en promedio todos harán aparición por igual en cada ranura de tiempo.

ERGODICIDAD

Si las probabilidades de aparición de símbolos en una fuente hacen que los promedios de su ensemble medidos por carácter, o por grupos de ellos (palabras en el caso del lenguaje), sean iguales a los promedios a lo largo de las secuencias de tiempo, esa fuente la gobierna un proceso estocástico ergódico.



Figura 5. Clasificación Procesos Estocásticos [17]

En el ejemplo de la tabla anterior el proceso es estacionario, más no ergódico. En general, el proceso del lenguaje humano, y la mayoría de las fuentes que nos interesan en los sistemas de comunicaciones son aproximadamente estacionarias y ergódicas, y podemos considerarlas teóricamente como tales.

Si nos referimos a las señales de ruido, en veremos que es estacionaria si los promedios de los valores en $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, son iguales para las λ_k componentes del ensemble y es ergódica si los promedios temporales en cada λ_k son a su vez iguales a los promedios de ensemble antes enunciados en $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

CAPACIDAD DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES

La forma en que todos estos parámetros antes descritos están relacionados fue enunciada por Shannon en su importante trabajo [1], en el que nos brinda la forma de calcular la capacidad C (bits seg^{-1}) de un sistema, en función del ancho de banda B (seg^{-1}) del canal, la potencia S (watts) de la señal emitida y la potencia N (watts) del ruido presente en el canal y en general en todo el sistema.

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

Esta fórmula aplica fuentes ergódicas estacionarias y para el ruido denominado AWGN: Additive White Gaussian Noise, antes mencionado, que es el caso más usual, más no el único²⁰.

Los parámetros de esta ecuación son en cierta forma intercambiables en el análisis de cada nueva situación, por ejemplo, una relación S/N muy baja en un receptor se puede compensar algunas veces aumentando la potencia de la señal emitida, y/o recortando el valor máximo

²⁰ En situaciones en las que el ruido se multiplique con la señal -como ocurre en comportamientos no lineales en la fibra óptica o con los fenómenos de “fading” (“desvanecimiento”) de señal en sistemas inalámbricos- o los que en general el ruido no tenga los comportamientos de estacionariedad y ergodicidad, las fórmulas derivadas por Shannon no son estrictamente válidas. Sin embargo, para esos casos, aún la mayoría de las expresiones obtenidas serán cualitativa y cuantitativamente muy cercanas a esta ecuación antes descrita.

de longitud posible de canal²¹, lo que significaría aumentar **B** (el BW). De la misma forma, un **B** pequeño para una longitud dada de canal puede ser compensado con un aumento de potencia en la señal emitida.

¿HERTZ O BITS POR SEGUNDO?

Una confusión corriente es la de mezclar como iguales los términos de **B** (Hz) de un canal y los de capacidad **C** (*bits seg⁻¹*), ya que de hecho este último es más una medida de un sistema de comunicación completo y no de un canal.

Una cosa diferente es considerar que, en términos usuales, con el estado de la técnica en determinado momento (componentes electrónicos y tecnologías de modulación y codificación), el canal es el componente, que manteniendo iguales las demás condiciones, es el que más determina la capacidad total del sistema -según sea el tipo de canal que sea empleado-.

Esto lleva a mencionar de manera usual en el vocabulario técnico que un “canal” tiene o brinda tal o cual capacidad, cuando estrictamente hablando ello es incorrecto, ya que de un canal solo puede enunciarse que soporta el transporte adecuado, en una longitud determinada de canal, de señales de determinado tipo y frecuencia (¡ósea efectivamente su **B**!).

En resumen, cualquier canal tiene ancho de banda **B** y no se le puede asignar ninguna capacidad “per se”. Más adelante en este texto se brindan algunos ejemplos prácticos que ilustran este concepto.

B VS S/N

Desde la fórmula básica de capacidad, del trabajo de Shannon, podemos observar que se pueden intercambiar los tamaños de ambos parámetros y se lograrán resultados similares. En la siguiente gráfica [13] se puede observar que hay un punto límite para ese proceso antes descrito.

Siempre deseamos un valor **B/C** menor (el menor **B** requerido para intercambiar una capacidad **C** en bits ya dada), pero solo para valores de **S/N** menores y cercanos a 10, el intercambio de **B** por **S/N** es ventajoso. Para valores mayores, un incremento de **S/N** no tiene un afecto apreciable en reducción de ancho de banda **B**. En cada sistema de comunicaciones hay un límite respecto a construir un receptor cada vez más sofisticado, y que sea más sensible, ya que su efecto en aumento de capacidad será marginal.

²¹ Esa disminución es posible en la fase de diseño del sistema de telecomunicaciones.

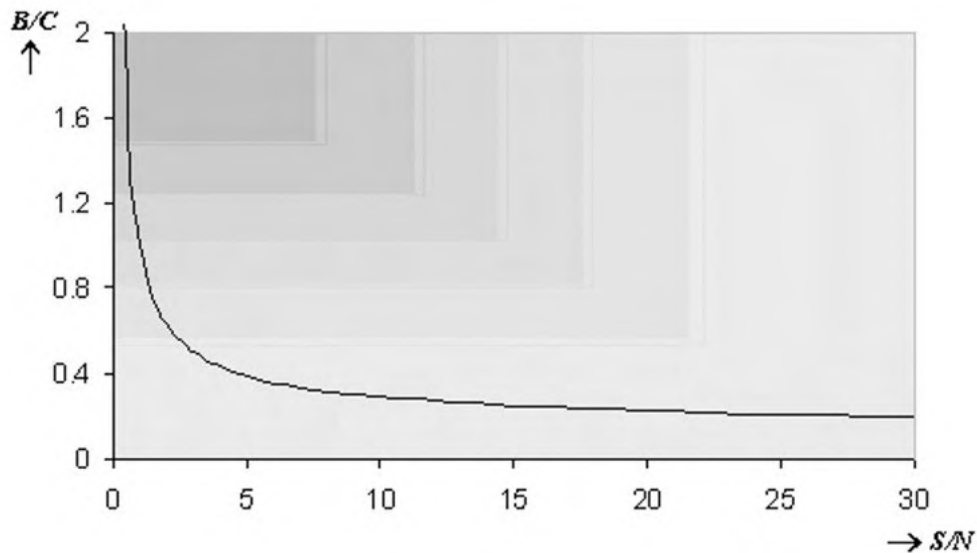


Figura 6. Ancho de banda vs SNR

Cuando se utiliza mucho ancho de banda para compensar el uso de una relación señal a ruido muy pequeña, se dice que se emplea un sistema con “coding upwards”. Ejemplos de ello son sistemas ópticos actuales, FM, PM y PCM. [14]

Cuando se aumenta la relación S/N para compensar el uso de un ancho de banda pequeño, se dice que se emplea un sistema con “coding downwards”. Ejemplos de ello son los sistemas multinivel PAM, QAM y similares [14]. En estos casos la reducción en el uso de B se da finalmente con relación al nivel de potencia disponible y “soportable” por el canal. Por ejemplo, si el canal tiene comportamientos no lineales, un aumento indefinido del nivel de potencia de la señal no aumenta la capacidad y por el contrario, más allá de cierto valor límite, puede disminuirla o incluso anularla.

EFICIENCIA ESPECTRAL

La ecuación de la capacidad también podemos organizarla así:

$$C/B = \log_2(1 + S/N) = Es$$

La cantidad C/B medida²² en $\text{bits seg}^{-1} \text{hz}^{-1}$, podemos definirla como la eficiencia espectral del sistema o del ancho de banda. Más adelante veremos que según sea el nivel de codificación de un sistema podremos obtener una E más alta.

Visto de otra forma, E puede ser analizado como un cálculo del *número de bits transmitidos por cada Hz de B empleado*. Nos dice cuántos bits logramos “empacar” por cada

²² Estrictamente hablando es una medida adimensional.

“modificación” de la señal física empleada²³, y de ahí su nombre. Mientras más avanzado sea un sistema de comunicaciones en términos de teoría de la información, mayor será la eficiencia espectral que lo caracteriza.

Reforzando los conceptos anteriores, es bueno entonces enunciar que dos sistemas que se indican con capacidades iguales – por ejemplo 1 Gbps – no pueden ser comparados, si no se conoce primero el ancho de banda que emplean para ello, o lo que es lo mismo, la eficiencia espectral que caracteriza a cada uno.

EL EFECTO DE LA LONGITUD DEL CANAL

Anteriormente se explicó el efecto de la longitud sobre el ancho de banda y ahora es importante también hacer notar que la fórmula de capacidad antes enunciada no tiene incluida una variable que represente de manera directa la longitud del canal; sin embargo, es de esperar que ella esté implícita, ya que al determinar cómo parámetros de diseño un valor confiable del **B** del canal y el **S/N** del receptor (o la potencia del emisor), hay sin duda una especificación de la longitud máxima de canal para la que se aplican sin confusión dichos valores.

Eso significa que en la práctica damos la especificación de la capacidad de un tipo de canal, siempre pensando en la longitud máxima que en términos prácticos de ingeniería hemos diseñado²⁴.

Por ejemplo, un canal en cable UTP que cumpla las normas de cableado estructurado -tales como categoría 5e o 6 o superiores- soporta en 100 metros señales de cierto B máximo²⁵ y eso asegura diversos niveles de capacidad (ahí sí medida en bps) según el estándar que aplique para todo el sistema de comunicaciones completo que lo emplee²⁶.

Nota: Es importante resaltar aquí que si se tiene una longitud de canal mayor al especificado (por ejemplo, un cable UTP de 150 metros), el estándar respectivo no garantiza que la capacidad esperada de todo el sistema de comunicaciones se mantenga. La confiabilidad para transmitir información no podrá ser asegurada. Eso no significa que eventualmente el sistema no opere “bien” en ese cable, ya que puede darse el caso que opere adecuadamente la mayor parte del tiempo; sin embargo, alteraciones inesperadas en el ruido o la interferencia (por ejemplo, el encendido de un motor eléctrico en las inmediaciones del cable) alterarán de manera significativa el comportamiento del sistema. Por el contrario, el estándar asegura que si se cumplen todos sus requerimientos y se está en el rango de 100 metros máximo definido, tendremos la capacidad esperada sin importar qué ocurra en el ambiente circundante

²³ En una terminología ya poco empleada algunos textos hablan del número de “Baudios” de la señal y los bits por baudio para el número de modificaciones de señal por unidad de tiempo.

²⁴ Muchas veces se habla de un ancho de banda MODAL, en el cual se normaliza la distancia del canal para eliminar su efecto, por ejemplo, se puede comparar el B obtenido por kilómetro de diversos medios físicos.

²⁵ Que corresponden a 100 MHz para categoría 5e y 220-250 MHz para Categoría 6.

²⁶ Para el caso mencionado de 100 metros se tendrán 10 Mbps en Ethernet 802.3, 100 Mbps en Fast Ethernet y 1 Gbps en Ethernet IEEE 803.3z, etc.

(obviamente dentro de los límites de “normalidad” previstos por los diseñadores de tal estándar).

RUIDO Y REDUNDANCIA

El ruido en el canal y el involuntariamente introducido en el transmisor y en el receptor tienen en general un efecto destructor respecto a la información modulada-codificada en la señal. La forma más apropiada de mejorar entonces la respuesta global del sistema y obtener una mayor capacidad, manteniendo sus parámetros básicos estáticos (**B** y **S/N**), es la introducción deliberada en el emisor de redundancia en la información.

En general, se trata de obtener la información correcta enviada por el transmisor a pesar de la información perdida por el efecto del ruido, al reconstruirla o recuperarla con la información redundante adicionada por el emisor de una forma especial para ese objetivo (tecnología de códigos). Algo muy similar a lo que ocurre en el lenguaje nuestro escrito o hablado, el cual es altamente redundante y “permite **una comunicación completa a pesar del efecto del ruido**”.

Una de las características más interesantes del trabajo de Shannon fue mostrar matemáticamente que el máximo posible de capacidad de un sistema de comunicaciones, definido como la máxima rata **C** de intercambio de información, y medida en bits por segundo (bps), puede lograrse haciendo arbitrariamente pequeño el error, el cual puede incluso tomarse como un parámetro de diseño del sistema: el denominado BER: Bit Error Rate.

Otra forma corriente de enunciar el **BER** es el **Pe: Probabilidad de Error**, el cual utilizaremos más adelante en nuestros cálculos.

REDUNDANCIA Y CAPACIDAD MÁXIMA

Si extraemos del trabajo de Shannon en [1] la siguiente ecuación:

$$R_b = H(x) - H_y(x)$$

R_b : Rata de transmisión de un sistema de Comunicaciones en bps

- $H(x)$: Entropía de la fuente por segundo en bps.
- $H_y(x)$: Entropía o incertidumbre en el receptor de que una vez sea recibido el símbolo y , él (“el que se acaba de recibir”), efectivamente corresponda al símbolo x realmente transmitido por el emisor. Esa cantidad es también llamada la “**equivocación**” en el receptor.

Es claro que si no hay errores en la comunicación (canal ideal sin ruido):

$$H_y(x) = 0, \text{ entonces } R_b = H(x).$$

Así todo lo que transmita el emisor llegará al receptor y las consideraciones de B y S/N serán entonces innecesarias.

Si el canal es real, existirá ruido y errores, así la forma de lograr que el sistema haga llegar correctamente al receptor la información remitida será mediante el empleo de redundancia en la información enviada, mediante adecuadas técnicas de codificación en el transmisor.

Esa redundancia consume ancho de banda que no podrá ser empleado para transmitir datos originales del usuario emisor externo (del sistema de comunicaciones), sin embargo, permitirá lograr el objetivo primario de cualquier sistema de comunicaciones.

Es claro que R_b debe ser siempre menor que C (capacidad máxima para un sistema real), ya que si fuera igual o superior no podría incluirse e intercambiarse la información redundante necesaria por ese mismo canal.

Se puede escoger por el diseñador del sistema la rata de errores (BER o P_e) deseada/apropiada para su aplicación (un error por cada tantos bits transmitidos), pero en la medida que esta sea menor, necesitará su sistema implementar una relación S/N mayor.

Asimismo, mientras más alto sea el ruido presente y la relación S/N del receptor esté aún constante, el BER se deteriorará y será proporcionalmente más alto. De la misma forma y sin importar el ruido que se presente, caracterizado como N_0 (ruido 0 o “base”) podemos acercarnos al máximo C mediante la escogencia de los códigos apropiados para representar la información en el emisor.

Si se modifican los parámetros en términos de mejores canales (mejor B en tamaños de longitud iguales) o mejores receptores en sus características electrónicas (poder extraer la información correcta a pesar de que la señal esté más deteriorada por el ruido, o lo que es lo mismo, tener un receptor con una relación S/N mejor), se puede lograr siempre una C mayor. Sin embargo, una gran parte del desarrollo de la Teoría de la Información está centrada en la búsqueda de los códigos más apropiados en términos de lograr esa máxima C posible en un sistema ya dado (S , B y su longitud de canal ya fijos).

Esa es una de las facetas más interesantes de los sistemas de comunicación modernos prevista por el propio Shannon: la obtención de mayores R_b , cada vez más cercanas a C para un sistema determinado, solo basándonos en tecnología “blanda” de codificación y modulación.

ENERGÍA MÍNIMA POR BIT TRANSMITIDO

Si en la ecuación de Shannon para C asumimos que la potencia de la señal emitida es constante, veremos el efecto de aumentar o disminuir el ancho de banda. Disminuir B hará disminuir sin límite la capacidad C , pero aumentar B sin límite no hace aumentar a C , más allá de un valor límite. Lo explicamos antes cuando mostramos la relación B vs S/N . Ahora sin esa misma ecuación para C , suponemos una potencia de señal muy pequeña respecto al ruido:

$S/kTB \ll 1$ entonces $S \sim 0,693kTC$ ²⁷.

En sistemas digitales la energía mínima por bit (definida E_b), sería $E_b = S/C$:

$$E_b = 0,693 * kT = -1,59 \text{ dB} * kT$$
 ²⁸

Podemos ver que sin importar qué tan grande sea el ancho de banda **B**, siempre se requiere disponer en el transmisor de una energía mínima por cada bit que vaya a ser transmitido.

Este es un resultado muy profundo: *cada bit transmitido necesita una energía mínima del orden de kT* ²⁹ cuando estás en el límite teórico ideal³⁰. La información es física, no es una construcción ideal por encima del mundo material, del cosmos.

LÍMITE DE SHANNON Y UMBRAL DE CODIFICACIÓN

Es claro que existe un umbral aplicable a todos los códigos hasta ahora conocidos, por debajo del cual el sistema sin codificación se comporta mejor.

En la gráfica siguiente se muestra el efecto en la probabilidad de error P_e . Se observa que por debajo de un valor para E_b/N_0 aproximadamente de 5.3 dB³¹, la codificación hace más deficiente el sistema y sería mejor no emplearla.

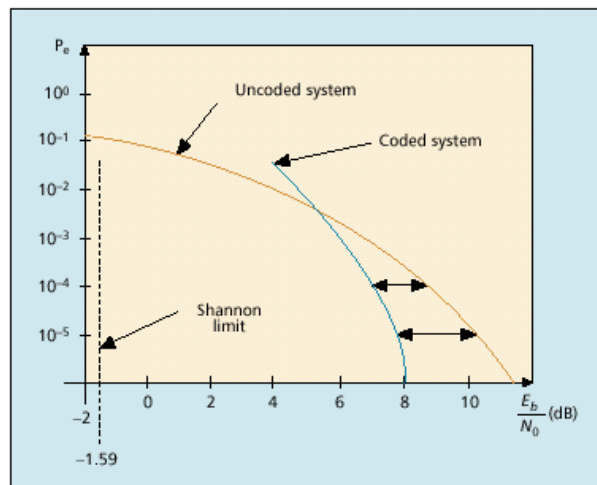


Figura 7. Límite de Shannon y Ganancia de Codificación³² [2].

²⁷ Aplicando que $\text{Log}(1+x) \sim x$ y que $\text{Log}_2(e) \sim 1.44$

²⁸ $10 \text{ Log}_{10}(0.693) \sim -1.59 \text{ dB}$

²⁹ Aunque empleemos comunicaciones ópticas y primen los efectos cuánticos, ese límite se mantiene.

³⁰ A temperatura ambiente típica, para ser transmitido, cada bit necesita una energía cercana a 3×10^{-21} Joules

³¹ A diferencia de los sistemas analógicos de comunicaciones, caracterizados por la relación S/N antes expuesta, es común enunciar en sistemas digitales tal relación en términos de la relación equivalente E_b/N_0 , la cual es construida entre los parámetros E_b (Energía por bit) y N_0 (Densidad Espectral de Potencia del Ruido a la ENTRADA del receptor).

³² Algunos autores denominan esa gráfica el “error-rate plane”

El Límite de Shannon, -1.59 dBs para E_b/N_0 que antes explicamos, puede ser observado en la ilustración anterior como una “pared” vertical (raya punteada), que no podemos superar en ningún sistema de comunicaciones.

No deja de ser sorprendente que mediante este aparato teórico se pueda demostrar que un sistema ideal podría inclusive transportar correctamente toda su información en presencia de ruido, siempre y cuando la energía por bit sea tan solo 0,6 de la densidad espectral de potencia del ruido.

EL IMPACTO DE LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN EN LA IA

La inteligencia artificial (IA) moderna parece, a primera vista, una disciplina completamente nueva: redes neuronales gigantes, modelos capaces de escribir texto, reconocer imágenes, producir música y resolver problemas complejos.

Sin embargo, detrás de gran parte de estos avances existe una base matemática mucho más antigua y profunda: la Teoría de la Información.

Con el paso del tiempo los investigadores descubrieron algo extraordinario: los mismos principios que gobiernan la transmisión de información en telecomunicaciones también describen muchos de los procesos fundamentales del aprendizaje inteligente.

Conceptos antes vistos en este artículo como entropía, compresión, incertidumbre, información mutua, ruido y capacidad, y los límites físicos asociados, son elementos centrales en los sistemas de IA más avanzados.

La primera conexión profunda entre IA y Teoría de la Información es el concepto de incertidumbre.

Cuando un modelo de inteligencia artificial intenta predecir la siguiente palabra en una frase, reconocer un objeto en una imagen o diagnosticar una enfermedad, realmente está tratando de reducir incertidumbre.

La Teoría de la Información cuantifica precisamente esa incertidumbre mediante la entropía. Esto tiene una consecuencia directa en IA: Aprender significa reducir incertidumbre sobre los datos.

Como ya habíamos mencionado, los modelos modernos de IA, como los grandes modelos de lenguaje (LLMs), funcionan de manera sorprendentemente similar a las ideas originales de Shannon sobre el lenguaje humano.

Los modelos de IA actuales hacen exactamente eso, pero a escala gigantesca, ya que un LM intenta estimar:

$P(\text{siguiente palabra} \mid \text{contexto previo})$

Es decir: ¿Cuál es la probabilidad de que determinada palabra sea la siguiente?

La inteligencia emergente de estos sistemas aparece porque aprenden patrones estadísticos extremadamente complejos dentro del lenguaje.

De otro lado, uno de los conceptos más importantes en IA moderna es la entropía cruzada (cross entropy), utilizada prácticamente en todos los modelos de aprendizaje profundo. La función básica puede escribirse como:

$$L = -\sum_i y_i \log(\hat{y}_i)$$

Donde: y_i representa la respuesta correcta, mientras que $\hat{y}_i$ la predicción del modelo. El objetivo del entrenamiento es minimizar esta pérdida.

Desde la perspectiva de la Teoría de la Información, esto significa que el modelo intenta minimizar la diferencia entre la distribución real de información y la distribución que él ha aprendido. En otras palabras, el entrenamiento de IA es esencialmente un problema de optimización informacional.

Otra de las ideas poderosas y modernas es que la inteligencia puede interpretarse como un problema de compresión eficiente. Cuando un modelo aprende millones de ejemplos y luego es capaz de generalizar, realmente está construyendo una representación comprimida del mundo.

Un sistema inteligente es aquel capaz de encontrar estructuras comprimidas y reutilizables dentro de enormes cantidades de datos. Por eso, algunos investigadores consideran que aprender, comprimir y generalizar son manifestaciones diferentes del mismo fenómeno matemático.

Otro concepto fundamental heredado de Shannon es el papel del ruido.

Ya vimos que, en telecomunicaciones, el ruido altera las señales transmitidas, en IA ocurre algo parecido: datos incompletos, imágenes borrosas, errores humanos y ambigüedad del lenguaje actúan como formas de ruido. Los modelos modernos deben aprender a operar correctamente incluso bajo incertidumbre.

Esto ha llevado al desarrollo de técnicas como: regularización, “dropout”, “data augmentation”, entrenamiento “adversarial” y otros similares.

Otro concepto extremadamente importante es la información mutua, que mide cuánto conocimiento comparte una variable respecto a otra. Formalmente:

$$I(X; Y) = H(X) - H(X|Y)$$

Con esto se cuantifica cuánto reduce (Y) la incertidumbre sobre (X). En IA, este concepto aparece constantemente: qué partes de una imagen contienen información útil, qué neuronas aprenden patrones relevantes, qué variables ayudan realmente a una predicción. Muchas

arquitecturas modernas buscan maximizar información útil y eliminar redundancia innecesaria.

Todo lo anterior sugiere una idea profunda: La inteligencia podría no ser una propiedad exclusivamente biológica, sino una consecuencia emergente del procesamiento eficiente de información bajo restricciones físicas. Desde esta perspectiva, la Teoría de la Información deja de ser únicamente una rama de telecomunicaciones y se convierte en una teoría general sobre cómo los sistemas aprenden, representan y transforman conocimiento.

La inteligencia artificial moderna no puede entenderse completamente sin la Teoría de la Información. La IA contemporánea, en el fondo, es un gigantesco sistema de procesamiento probabilístico de información.

Precisamente por eso, la Teoría de la Información sigue siendo una de las estructuras matemáticas más influyentes y vigentes de toda la ingeniería moderna y, por supuesto, vital para aprender sus fundamentos para cualquier que hoy quiera emplear o desarrollar sistemas de IA.

REFERENCIAS:

1. C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell Syst. Tech. Journal, vol. B, July –October 1948, pp. 379–243, 623–656.
2. D. Drajić and D. Bajić, "Communication System Performance: Achieving the Ultimate Information-Theoretic Limits," IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 6, 2002, pp. 124–129.
3. J. M. Kahn and K.-P. Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 10, no. 2, March/April 2004, pp. 259–272.
4. L.W. Couch II, "Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos," Pearson Educación, 1998, pp. 742.
5. W. Timothy, "Optical Transport Network (OTN) Tutorial," ITU-T.
6. N. Margolus and B. Levitin, "The maximum speed of dynamical evolution," in T. Toffoli et al., eds. PhysComp96 (Proceedings of the Fourth Workshop of Physics and Computation), New England Complex Systems Institute, 1996.
7. M.P. Frank, "Physical Limits of Computing," CISE University of Florida, March 6, 2002.
8. S. Diddams, T. O'Brian, National Institute of Standards and Technology "What is the fastest event (shortest time duration) that can be measured with today's technology, and how is this done?," Scientific American, December 2004.
9. R. G. Gallager, "Information Theory and Reliable Communications," John Wiley and Sons, 1968.
10. M. Pozar, "Microwave and RF design of Wireless Systems," John Wiley and Sons, 2001.

11. B. Sklar, "A Structured Overview of Digital Communications -a Tutorial Review- Part I," IEEE Communications Magazine, 1983.
12. J. Dunlop, D. G. Smith, "Telecommunications Engineering," CRC Press, Third Edition, 1994.
13. P. S. Satyanarayana, "VTU-Edusat, Bangalore, 2008."
14. L. Lundheim, "On Shannon and "Shannon's formula," Department of Telecommunication, Norwegian University of Science and Technology (NTNU). 1993.
15. J. G. Proakis, "Digital Communications," McGraw-Hill, Fourth Edition, 2001.
16. J. R. Pierce, "An Introduction of Information Theory, Symbols, Signals and Noise," Dover Publications Inc., Second Edition, 1961.
17. F. M. Reza, "An Introduction of Information Theory," Dover Publications Inc., First Edition, 1994.
18. T.M. Cover, J.A. Thomas, "Elements of Information Theory," Wiley Interscience, 2006.
19. E. Echeverri, "Maximum Capacity of a Optical Communications System," IEEE Latincom, Medellin, 2009.
20. IEEE Information Theory Society, "50 Years Commemorative Issue," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, Number 6, October 1998.
21. Lloyd, S. "Ultimate physical limits to computation". Nature, 406(6799), 1047-1054 (2000).

EL PODER DE LAS CONVERSACIONES UN APOORTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS DE TRABAJO DE ALTO RENDIMIENTO

Arturo Alejandro Briso Inostroza

Ingeniero Civil Industrial

Experto en Riesgos Profesionales, Universidad de Santiago de Chile

*Magister en Desarrollo Organizacional y Gestión Estratégica de Personas, Universidad
Diego Portales (UDP), Chile*

ingenierobrisoi@gmail.com

Resumen: Las organizaciones contemporáneas operan en contextos de alta complejidad, cambio acelerado e interdependencia creciente con alta competitividad. En este escenario, la calidad de las conversaciones internas se ha convertido en un factor crítico para el desempeño colectivo. Más allá de los procesos, estructuras o tecnologías, son las conversaciones — explícitas e implícitas— las que configuran la forma en que las personas coordinan acciones, toman decisiones, resuelven conflictos y construyen confianzas.

Habitamos en conversaciones privadas y públicas; aquellas que se sostienen con uno mismo (internas – personales) y las que establecemos cuando nos relacionamos con otros. Mientras más alto es el nivel del cargo de una persona en una organización, su función más importante es CONVERSAR; escuchar, preguntar, afirmar, enjuiciar, prometer, comprometer, ofrecer, pedir, articular conflictos; todo con un sentido de servicio, servir para que el otro y la organización logren un “Mayor Valor”.

Palabras clave: Diálogos generativos, Conversaciones efectivas, Sostenibilidad, Equipos de Alto Rendimiento, Quiebres, Demandas no resueltas.

1. MARCO CONCEPTUAL: ¿QUÉ ENTENDEMOS POR CONVERSACIONES?

Desde una perspectiva sistémica y el enfoque de la “Ontológica del Lenguaje”, las conversaciones no se limitan al intercambio de información verbal. Constituyen espacios relacionales donde se generan significados, identidades, compromisos y posibilidades de acción.

En la obra de Rafael Echeverría García-Huidobro, sociólogo y doctor en filosofía chileno, conocido por desarrollar el discurso de la Ontología del lenguaje, concepto que acuña en un libro homónimo publicado en 1994, se establece en forma sistemática la estructura del habla y los actos más importantes que la constituyen, como un recurso fundamental “que le otorga poder al ser humano” y que usa como marco de referencia.

Una conversación efectiva integra tres dominios inseparables:

- Lenguaje: lo que se dice y cómo se dice.
- Emoción: el estado emocional desde el cual se conversa.
- Cuerpo: posturas, gestos, tono y presencia.

Las conversaciones crean realidad organizacional: no solo describen el mundo, lo producen y lo crean.

Conversaciones en un proceso de “Petición, Compromiso y Cambio” en equipos de alto rendimiento

Las emociones e intereses siempre estarán presente en las conversaciones, en consecuencia, quien dirige un diálogo, o quien lidera para servir, requiere considerar este fenómeno, de manera que vaya conduciendo más eficazmente el proceso comunicacional y las relaciones. Cuando hacemos una petición y el otro la acepta y se compromete a su ejecución, bajo las condiciones acordadas, se observa cómo el lenguaje diseña y construye el futuro; provoca que se hagan ciertas acciones. Así, por ejemplo, de no mediar una petición o reclamo, seguirán ocurriendo o podrían ocurrir hechos no deseados que perjudican a la persona, organización o grupo de interés.

Es importante que una petición se haga en forma adecuada, para que sea efectiva; precisar lo que se solicita se haga, ¿cómo se hará?, ¿cuándo y dónde se hará?, etc., para que así se pueda generar el compromiso. No basta con hacer una petición y esperar que sucedan los cambios. Eso sería actuar desde las expectativas; siempre es necesario chequear que el otro la acepte y queden claras las condiciones de su ejecución y resultados esperados.



Figura 1. Esquema del Proceso de Petición, Compromiso y Cambio
Elaboración propia CONSULTORÍA BRISO INTERNATIONAL.

Una conversación de calidad requiere que los conversadores idealmente estén alineados con cierta coherencia, emocional y corporal, y develen contenido de sus necesidades e intereses, para que se logre un nivel de satisfacción y efectividad en los acuerdos o compromisos que se requieran construir. Para que esta coherencia opere con más fluidez, las conversaciones tienen que darse dentro de un contexto adecuado “de asertividad”

Asertividad la entendemos como el “comportamiento” de decir en forma oportuna y emocionalmente adecuada, lo que pensamos y sentimos de lo que nos está ocurriendo. Es la habilidad de un conversador efectivo de “agregar valor a las relaciones de convivencia”, generando siempre un contexto emocional adecuado para conducir las conversaciones a una situación donde se abren posibilidades para acordar como abordar acciones futuras, o para superar quiebres o demandas no resueltas.

En el mundo emocional, la calidad de las conversaciones, el manejo de las competencias técnicas y el uso eficaz de la corporalidad que nos sustenta, nos construyen en un ser más o menos efectivo y satisfecho en la vida. Si se pretende lograr mayor bienestar y efectividad en las personas y equipos, es en estos dominios donde se requieren nuevos aprendizajes. Estos transformarán a las personas “que sienten que no pueden responder” a las exigencias del medio con efectividad, en personas más emprendedoras, efectivas y alegres.

Los equipos de alto rendimiento se distinguen no solo por sus resultados, sino por la forma en que conversan. Investigaciones en liderazgo, psicología organizacional y aprendizaje colectivo muestran que estos equipos presentan patrones conversacionales consistentes:

- Claridad de propósitos compartidos.
- Capacidad de sostener conversaciones difíciles.
- Escucha activa y respetuosa.
- Retroalimentación frecuente y constructiva.
- Gestión explícita de quiebres y tensiones.

El desempeño sostenido surge cuando las conversaciones habilitan coordinación efectiva, aprendizaje continuo y compromiso genuino.

2. TIPOLOGÍAS DE CONVERSACIONES CLAVE EN LOS EQUIPOS

Para efectos prácticos, es posible distinguir al menos cinco tipos de conversaciones críticas:

1. **Conversaciones de propósito y sentido:** alinean al equipo con una visión compartida y sentido de misión para lograr un mayor impacto en su trabajo de equipo.
2. **Conversaciones de coordinación de acciones:** pedidos, ofertas, promesas y compromisos claros.
3. **Conversaciones de aprendizaje:** reflexión sobre errores, aciertos y mejoras.
4. **Conversaciones de retroalimentación:** refuerzan conductas efectivas y corrigen desviaciones.
5. **Conversaciones de reparación:** abordan quiebres de confianza, conflictos y tensiones relacionales.

Un equipo de alto rendimiento debe estar preparado para dominar conscientemente estos cinco dominios conversacionales.

2.1. El rol de la Confianza Conversacional

La confianza no es un atributo abstracto; se construye y se erosiona en cada conversación. En equipos de alto rendimiento, la confianza se sustenta en tres pilares conversacionales:

- **Sinceridad:** coherencia entre lo que se dice y lo que se hace.
- **Competencia:** cumplimiento consistente de compromisos.
- **Cuidado:** consideración genuina por las personas y el equipo.

La ausencia de confianza genera conversaciones defensivas, silencios improductivos y bajo compromiso, con lo cual se impide que la organización alcance resultados de alto rendimiento.

2.2. Liderazgo conversacional en equipos de alto rendimiento

El liderazgo efectivo es, en gran medida, liderazgo conversacional generativo. Los líderes de equipos de alto rendimiento destacan por su capacidad para:

- **Diseñar** conversaciones estratégicas.
- **Habilitar** espacios seguros de diálogo.
- **Formular** preguntas poderosas.
- **Escuchar** más allá de las palabras.
- **Declarar** quiebres y oportunidades.

El líder actúa como arquitecto de conversaciones, modelando los estándares conversacionales del equipo.

2.3. Barreras conversacionales frecuentes en las organizaciones

A pesar de la importancia de minimizar las barreras conversacionales, muchas organizaciones presentan patrones comunicacionales limitantes, tales como:

- Suposiciones no declaradas.
- Evitación del conflicto.
- Conversaciones paralelas o informales no transparentes.
- Enfoque excesivo en la tarea y descuido de la relación.
- Lenguaje impreciso en compromisos.

Identificar y hacer visibles estas barreras es un paso esencial para la transformación del equipo y elevar sus estándares comunicacionales en pro de lograr altos rendimientos.

3. MODELO OPERATIVO PARA FORTALECER CONVERSACIONES DE ALTO RENDIMIENTO

Se propone un modelo operativo de cuatro etapas:

- **Diagnóstico conversacional:** identificación de patrones actuales.
- **Alineación y acuerdos conversacionales:** definición de estándares compartidos.
- **Entrenamiento y práctica:** desarrollo de habilidades conversacionales clave.
- **Seguimiento y retroalimentación:** medición de impacto y ajustes continuos.

Este modelo puede integrarse a programas de desarrollo de equipos, liderazgo y gestión del desempeño.



Figura N°2: Esquema del Modelo

El modelo del poder conversacional se representa visualmente cómo las conversaciones efectivas actúan como núcleo generador del desempeño colectivo. En el centro del modelo se sitúan las Conversaciones Efectivas, entendidas como interacciones conscientes que integran lenguaje, emoción y corporalidad para producir coordinación, sentido y acción.

Alrededor de este núcleo se articulan cuatro dimensiones dinámicas e interdependientes:

Confianza y cohesión

Las conversaciones construyen o erosionan confianza en cada interacción. Cuando existe coherencia entre lo que se dice y lo que se hace, se fortalece la cohesión del equipo y se habilita la apertura, la colaboración y la seguridad psicológica.

Alineación y compromiso

Las conversaciones claras sobre propósito, prioridades y expectativas permiten que los miembros del equipo comprendan el para qué de su trabajo y se comprometan activamente con los objetivos compartidos.

Coordinación de acciones

Pedidos, ofertas, promesas y declaraciones explícitas posibilitan una ejecución efectiva. La calidad de estas conversaciones reduce ambigüedades, reprocesos y conflictos operativos.

Aprendizaje y mejora continua

Las conversaciones reflexivas habilitan el aprendizaje colectivo, permitiendo revisar errores, capitalizar aciertos y ajustar prácticas para mejorar el desempeño sostenido.

El modelo del poder conversacional se sostiene sobre cuatro principios transversales: confianza, claridad, compromiso y resultados, los cuales actúan como indicadores visibles de la madurez conversacional del equipo.

Este modelo gráfico puede utilizarse como herramienta de diagnóstico, marco de intervención y recurso pedagógico en procesos de desarrollo de equipos, liderazgo y coaching organizacional.

4. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVA

El poder de las conversaciones constituye una palanca estratégica para la construcción de equipos de trabajo de alto rendimiento. Invertir en calidad conversacional no es un elemento accesorio, sino es una decisión organizacional estratégica con impacto directo en los resultados, el clima laboral, la competitividad y la sostenibilidad.

Cada persona observa, crea y explica de un modo particular el mundo que vive, y de acuerdo a estas explicaciones se desempeña en él, obteniendo ciertos resultados y niveles de satisfacción. Nuestro actuar trae consecuencias, y si no estamos conformes con los resultados obtenidos, nos sentimos desencantados, con baja motivación, perdemos efectividad en nuestros propósitos no funcionamos eficazmente en equipo; por tanto “estamos llamados a hacer un alto”. Entonces, es necesario buscar dentro de nosotros y en el ser de nuestra organización, con asistencia de profesionales idóneos, cómo descubrir y transformar la coherencia de nuestro ser y de nuestra organización: sus valores, su emocionalidad, sus sistemas de comunicación, sus operaciones, sus juicios de límites y sus prácticas, por una nueva forma de ser y actuar que nos reporte el bienestar que anhelamos.

La antesala para construir equipos de trabajo de Alto Rendimiento es “confiar en nosotros y los demás”; abrirse a nuevas posibilidades de aprender a ser equipo y abordar las conversaciones desde la sinceridad, haciendo explícito nuestro ser emocional, nuestros

juicios, temores y saberes. Que cada uno es un producto de su biografía, que lo ha construido en el ser que es en este momento. Que es posible también, aprender a cambiar, que el cambio es una posibilidad que trae nuevas oportunidades; para dar los saltos que nos conducirán a adoptar una nueva mirada, una mayor comprensión y “nuevas formas de actuar en el mundo que creamos a diario”.

Este documento de connotación técnica se sugiere como base para usar en ámbitos de formación ejecutiva; en programas de liderazgo, coaching ejecutivo y de equipos, desarrollo organizacional y negociación y resolución de conflictos.

Este documento desarrolla el concepto del “poder de las conversaciones como eje estratégico” para la construcción y sostenibilidad de equipos de trabajo de alto rendimiento, integrando fundamentos teóricos, enfoques prácticos y lineamientos de implementación organizacional.

REFERENCIAS

Se presentan ordenadas por los temas del artículo

Conversaciones, lenguaje y ontología del observador

1. Echeverría, R. (2011). *Ontología del Lenguaje*. Santiago: Granica. (→ Texto base para comprender cómo el lenguaje genera acción y realidad organizacional).
2. Flores, F. (2012). *Creando organizaciones para el futuro*. Santiago: Dolmen. (→ Fundamentos sobre conversaciones, compromisos y coordinación de acciones).
3. Austin, J. L. (1962). *How to Do Things with Words*. Oxford: Oxford University Press. (→ Obra clásica sobre actos del habla y performatividad del lenguaje).
4. Searle, J. R. (1969). *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge: Cambridge University Press. (→ Marco teórico para pedidos, promesas, declaraciones y compromisos)

Equipos de alto rendimiento y efectividad colectiva

5. Katzenbach, J. R., & Smith, D. K. (2005). *The Wisdom of Teams*. New York: HarperBusiness. (→ Referente clásico sobre equipos de alto desempeño y disciplina colectiva).
6. Hackman, J. R. (2002). *Leading Teams: Setting the Stage for Great Performances*. Boston: Harvard Business School Press. (→ Condiciones estructurales y relacionales para el alto rendimiento).
7. Edmondson, A. (2018). *The Fearless Organization*. Hoboken: Wiley. (→ Seguridad psicológica como base conversacional del aprendizaje y desempeño).

Liderazgo conversacional y coaching

8. Whitmore, J. (2017). *Coaching for Performance*. London: Nicholas Brealey. (→ Rol de la conversación en el desempeño y la responsabilidad).
9. Hawkins, P. (2017). *Leadership Team Coaching*. London: Kogan Page. (→ Coaching de equipos y conversaciones estratégicas colectivas).
10. Stelter, R. (2019). *The Art of Dialogue in Coaching*. Copenhagen: Danish Psychological Publishing. (→ Diálogo, sentido y aprendizaje en contextos organizacionales (enfoque nórdico)).

Aprendizaje organizacional y reflexión colectiva

11. Senge, P. (2006). *The Fifth Discipline*. New York: Doubleday. (→ Conversaciones, modelos mentales y aprendizaje sistémico).
12. Argyris, C., & Schön, D. (1996). *Organizational Learning II*. Reading, MA: Addison-Wesley. (→ Conversaciones defensivas, aprendizaje de doble bucle y cambio sostenible).

Comunicación, confianza y cultura organizacional

13. Lencioni, P. (2002). *The Five Dysfunctions of a Team*. San Francisco: Jossey-Bass. (→ Confianza, conflicto y compromiso como dinámicas conversacionales).
14. Covey, S. M. R. (2006). *The Speed of Trust*. New York: Free Press. (→ La confianza como acelerador del desempeño organizacional).
15. Heifetz, R., Grashow, A., & Linsky, M. (2009). *The Practice of Adaptive Leadership*. Boston: Harvard Business Press. (→ Conversaciones adaptativas en entornos de alta complejidad).
16. Laloux, F. (2014). *Reinventing Organizations*. Brussels: Nelson Parker. (→ Nuevas formas de conversación, autogestión y sentido en las organizaciones).

ÚNETE A LA SAI



Hazte socio y disfruta los beneficios de la SAI. Visita saiantioquia.com,
síguenos en [@saiantioquia](https://www.instagram.com/saiantioquia), llámanos al 319 289 6603 o visítanos en
la Cra. 43B #16-95 Of. 510-2, El Poblado, Medellín.

Juntos somos la fuerza de la razón



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

DE LA PROMESA TECNOLÓGICA A LA INGENIERÍA VERIFICABLE: POR QUÉ LA APLICACIÓN DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES ES EL ÚNICO CAMINO SEGURO EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES EN LATINOAMÉRICA

José María Fernández González

Dr. Ingeniero Civil

Proma, Proyectos de Ingeniería Ambiental, S.L.

josemaria@promaingenieros.com

Resumen: El artículo analiza el creciente interés en Latinoamérica por tecnologías de valorización de residuos municipales que prometen soluciones integrales, especialmente en el ámbito energético. A partir de esta tendencia, se plantea una reflexión crítica sobre la distancia existente entre el diseño teórico de estos sistemas y su comportamiento en condiciones reales de operación, marcadas por la alta variabilidad y complejidad de los residuos urbanos, domésticos o municipales.

En este contexto, se introduce el concepto de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como marco técnico de referencia basado en la experiencia acumulada y en el desempeño verificable de instalaciones en funcionamiento. Aunque su origen es europeo y su aplicación no es obligatoria en Latinoamérica, se defiende su utilidad como herramienta para reducir riesgos en la toma de decisiones y evitar errores ya documentados.

El artículo pone de relieve que muchos de los fracasos en proyectos de valorización tienen su origen en la ausencia de un diagnóstico riguroso previo, en la sobreestimación de rendimientos y en modelos económicos poco realistas. Asimismo, se subraya que la gestión de residuos municipales seguirá requiriendo financiación pública, independientemente de la tecnología utilizada.

Finalmente, se expone el enfoque aplicado en el proyecto de Sogamoso como ejemplo de aplicación progresiva y adaptada de estos principios, priorizando el conocimiento del residuo y la evaluación multicriterio frente a soluciones tecnológicas preconcebidas.

Palabras Clave: Mejores Técnicas Disponibles (MTD), Residuos Municipales, Valorización Energética, Economía Circular, Ingeniería de Procesos, Evaluación de Alternativas

INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos municipales en Latinoamérica atraviesa un momento decisivo. El progresivo agotamiento del modelo basado en el relleno sanitario, unido a la presión social y a los compromisos ambientales, está impulsando la búsqueda de alternativas más sostenibles

Fernández González, José María DE LA PROMESA TECNOLÓGICA A LA INGENIERÍA VERIFICABLE: POR QUÉ LA APLICACIÓN DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES ES EL ÚNICO CAMINO SEGURO EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES EN LATINOAMÉRICA (Pág. 117 – 123)

y eficientes. En este contexto, han comenzado a proliferar artículos y tendencias que presentan sistemas integrales de valorización capaces de transformar residuos en energía y subproductos, proponiendo soluciones que, sobre el papel, parecen resolver simultáneamente los problemas ambientales, energéticos y económicos.

La cuestión no es tanto si estas soluciones son técnicamente posibles (muchas de ellas lo son), sino si son capaces de operar de manera estable, eficiente y sostenible en las condiciones reales de los sistemas municipales de residuos en Latinoamérica. Es precisamente en este punto donde las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) resultan especialmente útiles, aunque su aplicación como criterio de decisión aún no está generalizada en Latinoamérica.

LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

Para comprender mejor su alcance, conviene detenerse brevemente en cómo se construyen y qué incluyen realmente las MTD. No se trata únicamente de una lista de tecnologías recomendadas, sino de un marco técnico completo que integra condiciones de diseño, parámetros operativos, sistemas de control y valores de referencia de emisiones y consumos. Su elaboración responde a un proceso estructurado en el que participan administraciones públicas, operadores industriales, centros de investigación y organismos independientes, a partir del análisis de instalaciones reales en funcionamiento.

Este proceso da lugar a los denominados documentos de referencia, en los que no solo se identifican las técnicas más eficaces, sino también las condiciones bajo las cuales han demostrado su rendimiento. De este modo, una MTD no se define únicamente por la tecnología empleada, sino por su desempeño global en términos ambientales, operativos y económicos. Esta distinción resulta especialmente relevante, ya que evita reducir el análisis a la elección de equipos concretos y obliga a considerar el sistema en su conjunto.

En otras palabras, las MTD no responden a la pregunta “qué tecnología utilizar”, sino a una cuestión más exigente: “en qué condiciones una tecnología ha demostrado funcionar de manera fiable y sostenible”.

El concepto de MTD tiene su origen en el marco regulatorio europeo, particularmente en la Directiva de Emisiones Industriales, donde se consolidó como herramienta para garantizar un alto nivel de protección ambiental en instalaciones industriales complejas, pero su valor trasciende con mucho el ámbito jurídico en el que nació. En esencia, las MTD representan la síntesis del conocimiento técnico acumulado durante décadas de operación real de instalaciones industriales y de tratamiento. No identifican la tecnología más novedosa ni la más sofisticada, sino aquella que ha demostrado, de forma consistente, su capacidad para funcionar en condiciones reales, con resultados ambientales verificables y dentro de márgenes de viabilidad económica razonables. Es precisamente esta combinación de rendimiento probado, estabilidad operativa y viabilidad económica, la que convierte a las MTD en una referencia de enorme valor también en contextos donde no son de obligado cumplimiento.

Fernández González, José María DE LA PROMESA TECNOLÓGICA A LA INGENIERÍA VERIFICABLE: POR QUÉ LA APLICACIÓN DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES ES EL ÚNICO CAMINO SEGURO EN LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MUNICIPALES EN LATINOAMÉRICA (Pág. 117 – 123)

En Latinoamérica, donde la normativa no exige su aplicación, podría pensarse que las MTD son un marco ajeno o incluso prescindible. Sin embargo, la práctica demuestra lo contrario. Cada vez más procesos de financiación, evaluación técnica y cooperación internacional utilizan criterios alineados con las MTD, no por una cuestión normativa, sino por una razón mucho más sencilla: evitar errores que ya han sido cometidos en otros lugares. Ignorarlas no impide desarrollar proyectos, pero sí aumenta significativamente la probabilidad de repetir problemas bien conocidos.

TENDENCIAS ACTUALES EN LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

Frente a este enfoque basado en la experiencia acumulada, las tendencias actuales en valorización energética apuestan con frecuencia por sistemas altamente integrados que combinan separación mecánica avanzada, tratamiento biológico y procesos termoquímicos complejos. Desde el punto de vista conceptual, la propuesta es difícilmente cuestionable. La idea de maximizar la recuperación de materiales y energía, reduciendo al mínimo el rechazo, encaja perfectamente con los principios de la economía circular.

Sin embargo, la experiencia operativa introduce un matiz esencial: la integración de tecnologías no suma complejidad, la multiplica. Cada nuevo proceso incorpora dependencias adicionales, aumenta la sensibilidad del sistema a las condiciones de entrada y eleva los requisitos de operación y mantenimiento. El resultado es que el rendimiento global deja de depender de una tecnología concreta y pasa a depender del equilibrio simultáneo de todas ellas. En condiciones ideales, estos sistemas pueden ofrecer resultados muy notables. El problema es que los sistemas municipales de residuos rara vez operan en condiciones ideales.

En la práctica, esto implica que cualquier desviación en una de las etapas se transmite al conjunto del sistema. Una separación insuficiente afecta a la calidad del material orgánico, compromete el tratamiento biológico y, en cascada, condiciona el funcionamiento de los procesos posteriores. Del mismo modo, variaciones en la humedad o en la composición del residuo pueden alterar de forma significativa los equilibrios energéticos y operativos previstos en fase de diseño.

Este carácter interdependiente convierte a estos sistemas en estructuras especialmente sensibles a las condiciones reales de operación. Y es precisamente ahí donde aparecen las principales limitaciones: la variabilidad del residuo, su elevada humedad, la limitada separación en origen y las restricciones operativas hacen que ese equilibrio sea, en la práctica, extraordinariamente frágil. Es en esa distancia entre el diseño teórico y la operación real donde se concentran la mayoría de los problemas.

El sector no carece de ejemplos que ilustran esta situación. Más allá de debates técnicos o posicionamientos ideológicos, lo cierto es que ya se han producido intentos de implantar soluciones tecnológicamente avanzadas bajo expectativas de alto rendimiento que no han llegado a materializarse. Algunos de estos procesos han puesto de manifiesto hasta qué punto

la ausencia de un análisis riguroso del residuo, de las condiciones locales y de la viabilidad económica puede derivar en proyectos que, aun siendo atractivos en su planteamiento, no llegan a consolidarse.

En determinados casos, estas iniciativas han trascendido el ámbito estrictamente técnico para situarse en el debate público, evidenciando que las decisiones en materia de gestión de residuos no son neutras desde el punto de vista institucional ni social. Cuando una promesa tecnológica se adelanta al método, no solo aumenta la probabilidad de fallo operativo, sino que también se amplifican sus efectos: inversiones comprometidas sin retorno, infraestructuras infrautilizadas o inoperativas y una pérdida de confianza que dificulta la implantación de soluciones futuras, incluso cuando estas están técnicamente fundamentadas.

Este patrón, que combina expectativas sobredimensionadas con un análisis insuficiente, pone de relieve la importancia de estructurar los procesos de decisión sobre criterios verificables. No se trata de rechazar la innovación, sino de integrarla en un marco que permita evaluar su idoneidad real antes de su implementación. Cuando este principio se invierte y la elección tecnológica precede al diagnóstico, el margen de error aumenta de forma considerable, y con él, las consecuencias económicas, operativas y reputacionales asociadas.

Este tipo de situaciones no suele deberse a un único factor, sino a la concurrencia de varios: sobreestimación de los rendimientos, subestimación de la variabilidad del residuo, complejidad operativa elevada y modelos financieros contruidos sobre hipótesis optimistas. En conjunto, configuran un patrón que se repite con cierta frecuencia cuando la decisión tecnológica precede al análisis técnico.

LA GESTIÓN DE RESIDUOS COMO SERVICIO PÚBLICO

A este escenario se suma una cuestión que rara vez se aborda con suficiente claridad: la dimensión económica del sistema. La gestión de residuos municipales es, y seguirá siendo, un servicio público. Como tal, su sostenibilidad depende de mecanismos de financiación que, en última instancia, recaen sobre el conjunto de la sociedad. Ninguna tecnología de valorización energética modifica esta realidad estructural. La energía generada puede contribuir a mejorar el balance económico, pero difícilmente puede sustituir el conjunto de costes asociados a la recogida, tratamiento y disposición final.

Este aspecto no es exclusivo del sector de los residuos. Otros servicios públicos esenciales, como el abastecimiento de agua o el transporte urbano, presentan estructuras económicas similares, en las que los ingresos derivados de la operación contribuyen a la sostenibilidad del sistema, pero no sustituyen la necesidad de financiación pública. En este sentido, pretender que la valorización energética permita cerrar por sí sola el balance económico introduce un sesgo que puede condicionar de forma significativa la toma de decisiones.

Además, conviene considerar que muchas de estas tecnologías incorporan costes de operación y mantenimiento elevados, asociados a la complejidad de los procesos y a los

requisitos de control ambiental. En determinados casos, estos costes pueden superar los de alternativas más convencionales, lo que refuerza la necesidad de analizar el sistema desde una perspectiva global y no únicamente desde el potencial de generación de ingresos.

De hecho, en numerosas ocasiones, la implantación de soluciones de valorización energética no responde a un criterio de menor coste, sino a la necesidad de reducir la dependencia del relleno sanitario o de cumplir objetivos ambientales. Plantearlas como sistemas autosuficientes introduce un riesgo adicional: el de construir modelos económicos apoyados en expectativas de ingresos que no siempre se cumplen. En este sentido, conviene recordar que la energía puede ayudar a cerrar el sistema, pero no lo financia por sí sola.

ENFOQUE MULTICRITERIO

Frente a este contexto, proyectos como el que Proma acompaña en Sogamoso parten de una lógica diferente: comprender primero el sistema y actuar después sobre él. El trabajo desarrollado se ha estructurado de forma progresiva, comenzando por la identificación y selección del emplazamiento más adecuado para la implantación de la instalación, y continuando con la caracterización detallada de los residuos municipales, paso imprescindible para entender las verdaderas condiciones de partida del sistema.

A partir de este conocimiento, se ha llevado a cabo un análisis de alternativas en fase de prefactibilidad, mediante un enfoque multicriterio que integra aspectos técnicos, económicos, operativos, ambientales, sociales y jurídicos. Este proceso ha permitido seleccionar, no una solución preconcebida, sino aquella que mejor se adapta a la realidad local, en este caso una instalación de tratamiento mecánico-biológico orientada a la recuperación de subproductos, a la estabilización y valorización de la fracción orgánica y a la reducción de la dependencia del relleno sanitario, contribuyendo a la mejora global del sistema de gestión de residuos del municipio.

El desarrollo posterior de los estudios y diseños se está abordando, por tanto, como la consecuencia lógica de ese proceso previo, orientado a la estructuración técnica, económica y ambiental de la solución elegida. El resultado no es un modelo cerrado, sino un marco de toma de decisiones que permite avanzar de forma gradual, priorizando aquellas opciones que ofrecen mayor robustez frente a la variabilidad del residuo y a las condiciones reales de operación.

Este enfoque ha permitido, además, identificar con mayor precisión tanto las limitaciones como las oportunidades del sistema, evitando la adopción prematura de soluciones tecnológicas que no se ajusten al contexto. Lejos de partir de una tecnología predeterminada, el modelo se construye progresivamente a partir del conocimiento del residuo, de las capacidades operativas existentes y de los condicionantes económicos y sociales del municipio, en coherencia con los principios que inspiran las MTD.

Este tipo de aproximación, basada en el análisis previo y en la evaluación comparada de alternativas, es coherente con la lógica que subyace a las MTD. No se trata de reproducir modelos externos, sino de aplicar un método que permita seleccionar, en cada contexto, aquellas soluciones que han demostrado mayor fiabilidad en situaciones comparables.

Aun cuando este enfoque pueda resultar menos llamativo desde el punto de vista tecnológico, presenta una ventaja decisiva: maximiza la probabilidad de funcionamiento real. En un sector donde los sistemas deben operar todos los días, durante años y bajo condiciones cambiantes, esta variable no es, en absoluto, menor.

La innovación, por supuesto, es necesaria. Tecnologías avanzadas como la gasificación, la pirólisis o determinados procesos termoquímicos pueden desempeñar un papel relevante en el futuro. Pero su incorporación debe responder a una lógica de validación, escalado progresivo e integración sobre sistemas previamente estabilizados. Saltarse este proceso no acelera la transición, la pone en riesgo.

En este sentido, cuando se plantean soluciones basadas en tratamientos térmicos, conviene recordar que el marco técnico europeo sí recoge una referencia clara y contrastada: la incineración con recuperación de energía, desarrollada específicamente en los documentos de Mejores Técnicas Disponibles aplicables a la incineración de residuos. Estos documentos no se limitan a describir una tecnología, sino que establecen condiciones muy precisas de operación, eficiencia energética y control de emisiones, que han sido validadas a lo largo de décadas de funcionamiento en múltiples instalaciones.

Este nivel de desarrollo técnico permite situar la incineración en un contexto muy distinto al de otros procesos termoquímicos emergentes. No se trata únicamente de una opción tecnológica, sino de un sistema ampliamente estudiado, con parámetros de desempeño conocidos, requisitos operativos definidos y resultados ambientales verificables. De hecho, su consideración dentro de las MTD no deriva de su carácter innovador, sino precisamente de lo contrario: de su grado de madurez y de la evidencia acumulada sobre su funcionamiento en condiciones reales.

Esto no implica que deba ser la solución en todos los contextos, pero sí establece un punto de referencia claro. Si el objetivo es incorporar tratamiento térmico en la gestión de residuos municipales, la comparación no debería hacerse frente a modelos teóricos, sino frente a aquellas soluciones que ya han demostrado su viabilidad técnica y ambiental. Ignorar este marco de referencia introduce un riesgo evidente: el de evaluar tecnologías emergentes sin un criterio sólido de contraste.

La transformación del modelo de gestión de residuos en Latinoamérica es una oportunidad indiscutible. Pero también lo es evitar errores que ya han sido ampliamente documentados en otras partes del mundo. En este contexto, las MTD no representan una limitación, sino un punto de apoyo: el conocimiento de lo que ya ha demostrado funcionar.

Porque, en última instancia, no es la tecnología más prometedora la que define el éxito de un sistema, sino su capacidad para operar de manera continua en condiciones reales.

En este contexto, la transición hacia modelos más avanzados de gestión de residuos no depende tanto de la incorporación inmediata de tecnologías complejas como de la capacidad para construir sistemas progresivos, técnicamente coherentes y adaptados a las condiciones reales de operación.

Conviene recordar, además, que ni la gasificación ni la pirólisis de residuos municipales están consideradas como MTD.

REFERENCIAS

1. Arena, U. (2012). *Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review*. Waste Management, 32(4), 625–639.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).
3. European Commission. (2018). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment*. Publications Office of the European Union.
4. European Commission. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. Publications Office of the European Union.
5. Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., & Zamorano, M. (2017). *Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities*. Waste Management, 67, 360–374.
6. Martín-Pascual, J., Fernández-González, J. M., Ceccomarini, N., Ordoñez, J., & Zamorano, M. (2020). *The Study of Economic and Environmental Viability of the Treatment of Organic Fraction of Municipal Solid Waste Using Monte Carlo Simulation*. Applied Sciences, 10(24), 9028.
7. UNEP & ISWA. (2015). *Global Waste Management Outlook*. United Nations Environment Program.
8. World Bank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications.

ALGUNOS TEMAS RELACIONADOS CON EL CONTROL DE INUNDACIONES EN CIUDADES Y LA MITIGACIÓN DE SUS IMPACTOS

Enrique Posada Restrepo

Ingeniero mecánico. Máster en ingeniería mecánica.

eposadar@yahoo.com

Resumen: A partir de información comparativa sobre ciudades que disfrutaban del paso de ríos se presenta una visión general sobre la gravedad del problema de las inundaciones y las medidas que se toman para la mitigación del impacto de tales inundaciones. Se hace una descripción de las medidas de mitigación. Se hace una presentación del caso de la ciudad de San Antonio (Tejas, Estados Unidos) como un ejemplo a destacar de las buenas prácticas. Se presenta el caso del manejo de las quebradas y el río en la ciudad de Medellín

Palabras clave: Inundaciones, Ríos, Ciudades, Mitigación, Flujos, Episodios, Buenas prácticas, San Antoni, Medellín

1. CIUDADES Y RÍOS

Se ha hecho una revisión de casos en distintas ciudades y ríos icónicos, con base en datos disponibles en red. Las tablas 1 muestra un resumen de la información encontrada.

Ciudad	Río	Población Actual (2026)	Caudal Medio (m ³ /s)	Caudal Máximo (m ³ /s)	Relación Q Max. a Q medio
Paris	Sena	2.150.000	310	2.400	7,74
Londres	Támesis	9.000.000	66	370	5,61
Budapest	Danubio	1.700.000	2.350	10.000	4,26
Viena	Danubio	2.000.000	1.920	8.500	4,43
Rome	Tíber	2.800.000	239	2.700	11,3
Cairo	Nilo	22.000.000	2.000	15.000	7,5
Bangkok	Chao Phraya	11.000.000	718	5.960	8,3
New Orleans	Mississippi	369.000	16.800	66.000	3,93
Praga	Moldava	1.300.000	150	5.160	34,4
Seúl	Han	10.050.000	613	20.000	32,63
Moscú	Moscova	12.757.000	120	3.000	25
Florescia	Arno	367.000	57	4.100	71,93
Dresde	Elba	555.000	317	4.700	14,83
Hanoi	Red River	8.500.000	4.300	35.000	8,14
Wuhan	Yangtze	11.000.000	30.000	100.000	3,33

Es evidente que se generan caudales máximos mucho mayores que los caudales medios, hasta 70 veces mayores en algunos casos.

Una de las características de las ciudades bañadas por ríos, es que estas se han acercado notablemente a los cauces de los ríos, eliminando los típicos humedales, pantanos, zonas naturales de inundación y meandros. Las ciudades han llenado las depresiones, rectificado los cauces eliminando curvas y construido canales en los cauces de los ríos. Además, los terrenos vecinos se han urbanizado, cubriendo de espacios duros, de cemento y de tejados los espacios, de modo que las aguas de las lluvias fluyen con rapidez y con baja absorción e infiltración, dando lugar a cambios rápidos en los caudales bajo condiciones de lluvias fuertes. Cambios que se suman a los altos flujos que puede traer el río desde las cuencas.

2. CIUDADES, RÍOS Y MEDIDAS DE CONTROL DE INUNDACIONES

Como consecuencia de todo ello, las ciudades han tenido que desarrollar medidas de protección, de prevención y de mitigación. Se muestran a continuación algunos casos para ilustrar. Al inicio de cada caso se presenta una tabla resumen.

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
París (Sena)	Sistema de lagos artificiales aguas arriba, cuencas de retención, diques y monitoreo. Construidas desde 1910, expandidas en siglo XX.	1.500-2.000 millones	Reduce alturas de inundación, protege a millones en Île-de-France; evita 30 mil millones en daños en caso de una inundación de 100 años.	1910 2018 (gestionado efectivamente).

En enero de 1910, el río Sena desbordó su cauce y paralizó a París durante varias semanas. Fue una catástrofe sin precedentes que afectó a 200.000 habitantes de la ciudad. El río alcanzó 8,62 metros en el puente de Austerlitz, transformando la capital en un auténtico lago interior. El metro se inundó, cuando apenas llevaba una década en funcionamiento. Varias líneas se llenaron de agua, y los túneles se convirtieron en galerías sumergidas. La reapertura se hizo varias semanas después. Los daños fueron equivalente a 1,5 mil millones de euros actuales y a varias decenas de miles de millones si se incluye el valor de las infraestructuras modernas. Las víctimas directas fueron solamente cinco. Para evitar tales extremos se ha venido trabajando con acciones como las siguientes.

Se construyeron cuatro embalses en los cuatro ríos más caudalosos: el Yonne, el Sena, el Aube y el Marne:

El embalse de Pannecière, construido en 1949 cerca de la ciudad de Château-Chinon, en la región de Nièvre; el embalse de Orient, cerca de Troyes, construido en 1966 para regular directamente el Sena; el embalse de Der-Chantecoq, inaugurado en 1974, entre los ríos Marne y Haute-Marne, cerca de Saint-Dizier; El embalse de Temple-Amance, de dos lagos, en 1990, también cerca de Troyes.

En 2016 y 2018, el río subió hasta 6 metros, arrasando los muelles, ya que ni siquiera las reservas en las cuencas fueron capaces de absorber el agua extra.



Figura 1. Las inundaciones de 1910 en París [4]



Alerta emitida el de febrero de 2026
Ante el riesgo de desbordamiento, el Ayuntamiento de París ha decidido cerrar casi veinte calles en el río y vías clave. Estas restricciones permanecerán hasta nuevo aviso y afectan principalmente a los muelles bajos, túneles y accesos a los puertos, lo que complica la circulación, especialmente en las horas punta.

Figura 2. El Sena amenaza las orillas en 2026 [4]

Ciudad	Medidas mitigación de	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Londres (Támesis)	Barrera del Támesis (1974-1984), diques elevados, muros de inundación y plan de manejo del estuario, actualizaciones hasta 2070.	Barrera: 2.400 millones; total sistema 5.600 millones (incluyendo mantenimiento 2015-2020 por 1.000 millones).	Evita 320 mil millones en daños potenciales; protege 1.4 millones de personas;	1928 (mayor en centro); barrera previene desde entonces.

Las barreras del Támesis

En 1984 se inauguraron con objetivo de proteger Londres de las avenidas que suben Támesis arriba procedentes del Mar del Norte. Se trata de un conjunto de 10 compuertas que se extienden a lo largo de los 520m de ancho del río Támesis. Son dos tipos de compuertas: 4 descendentes, y 6 ascendente, de movimiento es rotacional.

Las más grandes tienen 61m de longitud y 20m de altura, con un peso de 3.500 toneladas. Las 4 descendentes se encuentran siempre cerradas, mientras que las 6 ascendentes se encuentran abiertas, esperando en el lecho del río a ser activadas. Se estima que desde su entrada en servicio han protegido unos 125.000 Km2 de territorio urbano de más de 160 de inundaciones por la crecida del Támesis desde el Mar del Norte... Si no existieran estas barreras, Londres estaría sujeto a inundaciones tal y como se muestra en la siguiente imagen,



Figura 3. Inundaciones potenciales sin barreras en Londres [15]

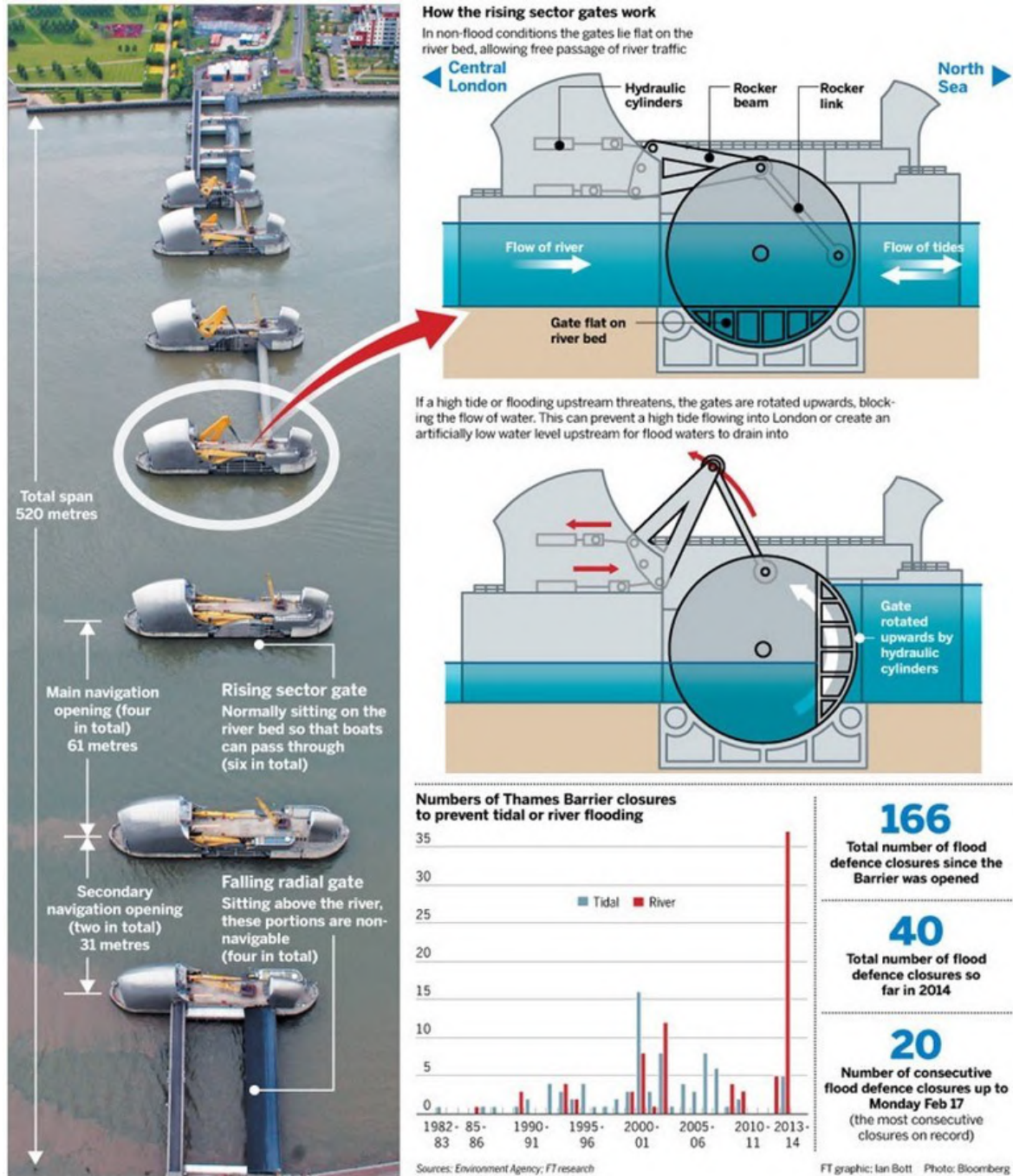


Figura 4. Las barreras de Támesis [15]

Ciudad	Medidas mitigación de	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Budapest (Danubio)	Diques reforzados, muros de defensa, barreras móviles y obras de alcantarillado. Diques post 1838, actualizaciones 1890s-1900s y recientes.	500 a 1.000 millones para actualizaciones recientes en cuenca Danubio.	Protege áreas residenciales y sitios históricos; gestionó aguas altas 2023-2024, reduciendo riesgos.	2013 (mayor reciente) 2023 gestionado.



Figura 5. El Danubio y Budapest. La inundación de 1838 [8]

Conmemorada con numerosas placas y señales del nivel del agua en el centro de la ciudad, no fue solo un desastre natural, sino una tragedia que unió al país. El heroísmo del barón Miklós Wesselényi, por ejemplo, se recuerda con gran admiración hasta el día de hoy. El joven barón obtuvo reconocimiento nacional por remar alrededor de la ciudad inundada rescatando personas. Durante las inundaciones, que duraron cinco días, se derrumbaron más de 2.200 edificios, cerca de 50.000 personas perdieron sus hogares y 153 fallecieron.

Desde 1989, Budapest ha sufrido dos grandes inundaciones: una en 2002 (con un nivel máximo de 848 centímetros) y otra en 2013 (891 centímetros). En la actualidad, Budapest se prepara para su tercera gran inundación desde el cambio de sistema, pero afortunadamente es poco probable que las inundaciones alcancen los niveles de la de 2013



Figura 6. El Danubio crece amenazadoramente. Por ello se utilizan barreras móviles si es del caso [8]

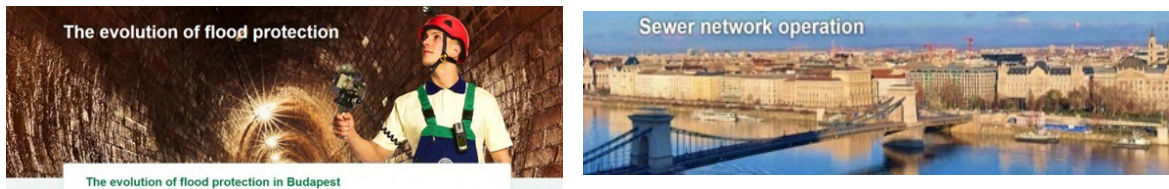


Figura 7 La ciudad cuenta naturalmente con extensas redes de conductos de aguas lluvias y negras, además de sistemas de túneles [8]

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Viena (Danubio)	Isla Danubio artificial y canal de control Nuevo Danubio (1972-1988, post-1954).	1.000-2.000 millones ajustado con costos históricos no detallados	Maneja hasta 14.000 m ³ /s; protegió en 2013 (11,000 m ³ /s pico) y 2024, evitando daños masivos.	2013 (mayor reciente); el sistema evitó impactos graves

Viena y las inundaciones del Danubio

Para controlar las inundaciones se hicieron diversas obras desde 1875, año en que se decidió intervenir radicalmente el río, creando un gran cauce lineal de unos 280 metros de ancho. Esta decisión supuso cortar y asilar los múltiples brazos y meandros existentes en las marismas de la zona. Pero la regulación del Danubio realizada pronto se demostró

insuficiente con las catastróficas inundaciones de 1897 y 1899. El desastre que ocasionaron las crecidas de 1954 abrió debates y reflexiones para acometer una actuación que pudiera solucionar definitivamente el problema.

Se valoraron diferentes opciones como incrementar la altura y reforzar los diques existentes, ampliar la anchura del cauce del río, modificar la anchura de la llanura que acogía las crecidas o construir canales de evacuación que complementaran las medidas existentes.

En 1970 se concibió un plan que permitiría una evacuación extraordinaria de 14.000 m³/s. mediante un nuevo canal, paralelo al río, como aliviadero de las crecidas. Este nuevo canal de 21 kilómetros es el denominado Neue Donau y con su ejecución se creó una nueva y singular isla artificial entre el río y el canal (la denominada Donauinsel). En 1972 comenzaron las obras de la primera fase del proyecto que concluyó en 1992. A la operación se le han ido incorporando nuevos componentes como una central eléctrica para la producción energética (Kraftwerk Freudenau) que se finalizó en 1998.



Figura 8. El Danubio a su paso por Viena, a la izquierda el cauce principal, a la derecha el canal aliviadero Neue Donau, y entre ambos la Donauinsel o Isla del Danubio, es una franja artificial de 21,1 km creada para la protección contra inundaciones. Junto a ella corre el Nuevo Danubio (Neue Donau), un canal de control de crecidas que absorbe el exceso de agua del río. Ha surgido una zona con amplio espacio recreativo con playas, bares y naturaleza. [5]

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Roma (Tíber)	Diques altos, presas aguas arriba y regulación de Lago Bracciano; canal artificial post-1937.	500-1.000 millones ajustado (costos históricos, actualizaciones menores).	Evitó daños extensos en 1915; protege el centro histórico.	1937.

Roma y el río Tíber - Los terraplenes modernos

La construcción de los modernos diques del Tíber comenzó en 1876, tras la unificación de Italia. El recién formado gobierno italiano reconoció la urgente necesidad de proteger la ciudad de las inundaciones. Los diques se diseñaron para contener el Tíber y prevenir futuros desastres. Estos muros de piedra, conocidos como «muraglioni», se construyeron a lo largo del río, elevando así las riberas y controlando el caudal. Actualmente, el caudal del Tíber se regula también mediante una serie de sistemas hidráulicos y presas. El río se monitorea cuidadosamente para prevenir inundaciones, especialmente durante periodos de fuertes lluvias. Una de las medidas clave es la regulación del lago Bracciano, que ayuda a controlar el caudal del Tíber. Además, existen presas hidroeléctricas y esclusas aguas arriba de Roma que contribuyen a mantener el nivel del río, asegurando que el Tíber siga siendo un elemento bello y a la vez manejable del paisaje urbano.

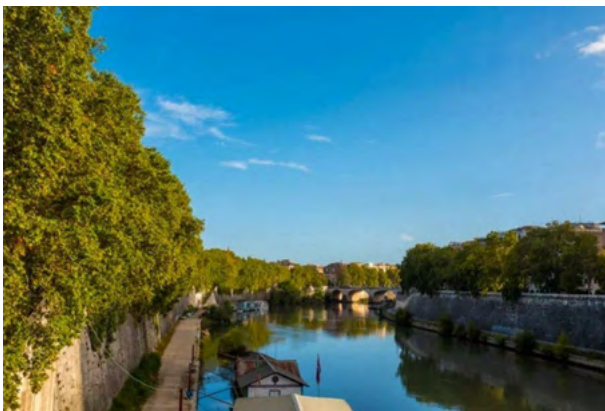


Figura 9. Se observan los muros de piedra en las riberas del río. Esta calmada corriente adquiere aspectos muy amenazantes en sus crecidas. [7]

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Bangkok (Chao Phraya)	Diques, reservorios, canales de desvío y drenaje bajo plan post-2011; soluciones basadas en naturaleza.	9.400 millones para plan total 10.000-15.000 millones ajustado (incluyendo túneles 2027).	Reduce riesgo fluvial para la mitad de la agricultura de Tailandia; reduce daños potenciales hasta 2055.	2011

BANGKOK FLOOD PROTECTION SYSTEM Bangkok Metropolitan Administration (BMA)



El sistema de protección de la ciudad contra inundaciones se basa en un conjunto integrado de medidas. Como se observa, el río tiene una gran influencia en buena parte del país, que se ve amenazada por inundaciones. De esta forma el sistema nacional protege también a la capital que queda en la desembocadura del río.

En las gráficas se describen los distintos sistemas



Figura 10. Algunos aspectos del sistema de protección de inundaciones en Bangkok [9]



Figura 11. Algunos otros sistemas en Bangkok [9]



Figura 12. A pesar de todo ello, se presentan problemas, como sucedió en 2011 [9]

Causas de las inundaciones en Bangkok en general

- Lluvias torrenciales que superan la capacidad de drenaje existente
- Coincidencia de mareas altas
- Hundimiento del terreno
- Sistema de drenaje en ciertas áreas que no funciona a su máxima capacidad
- Insuficientes zonas de retención de agua

Causas de las inundaciones en Bangkok en 2011

- Mala gestión de los embalses en varias regiones. Estaba llenos con agua retenida que se suponía iba a ser liberada para la agricultura
- Cinco tormentas azotaron las regiones central y norte Bangkok tuvo que soportar descargas imprevistas aguas arriba
- Mal funcionamiento de varias compuertas a lo largo del río Chao Phraya y desbordamiento de agua por encima de esas compuertas hacia las provincias vecinas al norte de Bangkok. El exceso de agua proveniente de las provincias vecinas inundó Bangkok.
- La ciudad de Bangkok respondió con diques de sacos de arena y controló la entrada de agua con sus compuertas.
- Residentes de las zonas vecinas que viven a lo largo de los diques y las compuertas de la BMA creían erróneamente que al eliminar los diques y con la apertura libre de las compuertas se reduciría el nivel de la inundación en sus residencias. Estos residentes, indignados, destruyeron los diques y abrieron las compuertas a su antojo. La ciudad de Bangkok debió reparar los daños para prevenir nuevas inundaciones.

Como se advierte en el caso de Bangkok se trata de problemas muy complejos

El sistema de control de inundaciones de Praga

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
Praga (Moldava)	Barreras fijas y móviles, válvulas de seguridad en canales; construido post-2002	145 millones ajustado	Protege contra inundaciones 500 años; redujo daños en 2013; beneficios superan costos para eventos Q50+.	2002

Reforzado tras la devastadora inundación de 2002, es una infraestructura robusta centrada en el río Moldava. Las medidas de adaptación gris (infraestructuras de ingeniería) incluyen:

Barreras fijas (palancas, diques, montículos de tierra, muros de hormigón macizo) construidas a lo largo del río Moldava.

Barreras móviles que se utilizan principalmente en el antiguo centro histórico, y en parte en las áreas circundantes. Las barreras móviles se almacenan en un área de almacenamiento central. El transporte y la instalación de barreras móviles en las zonas potencialmente afectadas por las inundaciones se basan en el Plan de Gestión de Inundaciones de la ciudad de Praga.

Otras medidas, como cierres, sistemas de bombeo y válvulas de seguridad en la red de canalización a lo largo del río Moldava.

Las soluciones verdes y azules realizadas principalmente para hacer frente a las inundaciones repentinas, consisten en la revitalización de arroyos más pequeños en la ciudad. En este caso, el objetivo principal es ralentizar la escorrentía y reducir las modificaciones hechas por el hombre de los lechos de los ríos. Otras estrategias o enfoques ecológicos se encuentran en fase de estudio.



Figura 12. Sistemas de barreras en Praga [6]



Figura 13 Estación de bombeo de la corriente Rokytká en Praga [6]



Figura 14. Durante los eventos de 2013, se inundaron zonas no protegidas de la ciudad, como la de Troja. [6]

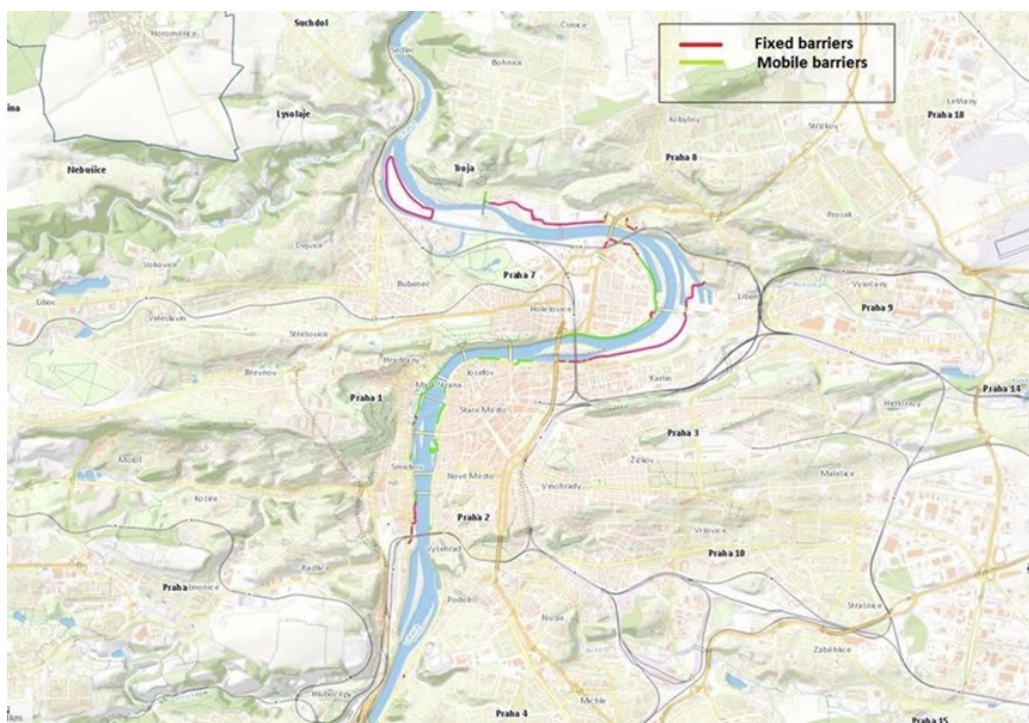


Figura 15. Mapa de las barreras en el Río Moldava en la zona de la ciudad de Praga. Muestra los sitios de barreras fijas y de barreras móviles [6]

Tabla 1. Otras ciudades y sus ríos en el mundo y medidas de protección

Ciudad	Medidas de mitigación	Inversiones totales estimadas (USD a 2026)	Beneficios estimados	Último año de situaciones catastróficas
El Cairo (Nilo)	Presa Alta de Asuán (completada 1970), controlando inundaciones estacionales.	5,000-10,000 millones ajustado	Eliminó inundaciones anuales; permite irrigación todo el año, evita desastres.	Pre-1970; ahora controlado.
Nueva Orleans (Misisipi)	Río Misisipi y sus afluentes (diques, compuertas, canales de desvío post-1927); Post-Katrina (2005) nuevos sistemas.	120.000 millones ajustado (desde 1928) más 14.500 millones.	Evitó miles de millones en daños (2011, 2019); beneficios 7 USD por 1 USD invertido (FEMA).	1927 (río mayor); 2005 (originada por huracán Katrina).
Seúl (Han)	Presas (Soyanggang 1973, Chungju 1985), diques, estaciones de bombeo; actualizaciones post-2011.	1.000-5.000 millones para sistema (presas históricas)	Controla inundaciones, reduce daños (ej. 2010-2011); mejora resiliencia.	2011
Moscú (Moscova)	Canales de drenaje históricos (siglo XIX), diques y monitoreo; sistema limitado.	estimado 500-1.000 millones para mantenimiento y actualizaciones.	Reduce riesgos de inundaciones primaverales; protege áreas bajas.	1926
Florencia (Arno)	Reservorios aguas arriba (Bilancino 1990s), presas y modificaciones de puentes; post-1966, actualizaciones hasta 2022.	500-1.000 millones ajustado	Aumenta capacidad río a 3,400 m ³ /s; reduce riesgo de inundación.	1966
Dresde (Elba)	Diques reforzados, canales de desvío, barreras móviles; post-2002 (2009-2029).	1,000-2.000 millones para cuenca Elba post-2002.	Redujo daños en 2013; mejora seguridad con monitoreo en tiempo real.	2002

Hanói (Río Rojo)	Diques (históricos desde 1108), reservorios (Hoa Binh 1990); actualizaciones post-2008.	1,000-5,000 millones	Protege delta bajo; reduce inundaciones para miles de hogares.	2008
Wuhan (Yangtsé)	Presa Tres Gargantas (1994-2009), diques reforzados; post-1998.	Presa 28.600 millones ajustado; total sistema 50.000 millones.	Redujo picos 2020 vs. 1998; protege millones, evita 20.500 millones en daños anuales estimados.	1998; 2020 gestionado.

3. SOBRE LAS CAUSAS DE LAS INUNDACIONES

Las avenidas son fenómenos naturales caracterizados por la aparición de caudales y niveles de agua extraordinarios en los ríos, los cuales pueden causar daños a la vida humana, a la propiedad y a las infraestructuras.

Los tipos de lluvia responsable de la generación de la mayor parte de las avenidas son las lluvias muy intensas y de muy corta duración caídas sobre cuencas de pequeño tamaño y fuertes pendientes.

El tipo de avenida que genera esta clase de lluvias es conocido como *flash flood* o avenida relámpago. Estas avenidas son las que tienen los efectos más catastróficos, como lo muestran las ocurridas en España (Biescas en 1996 con 86 muertos) y en Italia (Sarno y Quindici en 1998 con 300 muertos), debido a que la gran rapidez con que se produce la avenida impide el empleo de los procedimientos de alerta y de las acciones de emergencia.

En otros casos las principales avenidas son consecuencia de lluvias intensas y continuas de gran duración caídas sobre cuencas de medio o gran tamaño. Las avenidas generadas por estas lluvias son las propias de las grandes cuencas, típicas de los tramos medios y bajos de los grandes ríos y se caracterizan por su larga duración y por el aumento relativamente lento de los caudales. Durante su desarrollo se suele producir la inundación de grandes extensiones de terreno, aunque, al producirse de una forma relativamente lenta, suele dar tiempo a adoptar medidas para mitigar sus efectos. Este tipo de avenidas también pueden producirse en los tramos bajos de los grandes ríos.

Un indicador de la irregularidad del régimen de crecidas de un río es la relación entre su caudal extraordinario y ordinario. Este indicador depende del tamaño de la cuenca y del régimen meteorológico y, con carácter general. La figura siguiente muestra el comportamiento típico en Europa. Muestra valores pequeños en los ríos del norte y centro de Europa y grandes en los del Mediterráneo, disminuyendo a medida que crece el tamaño de la cuenca,

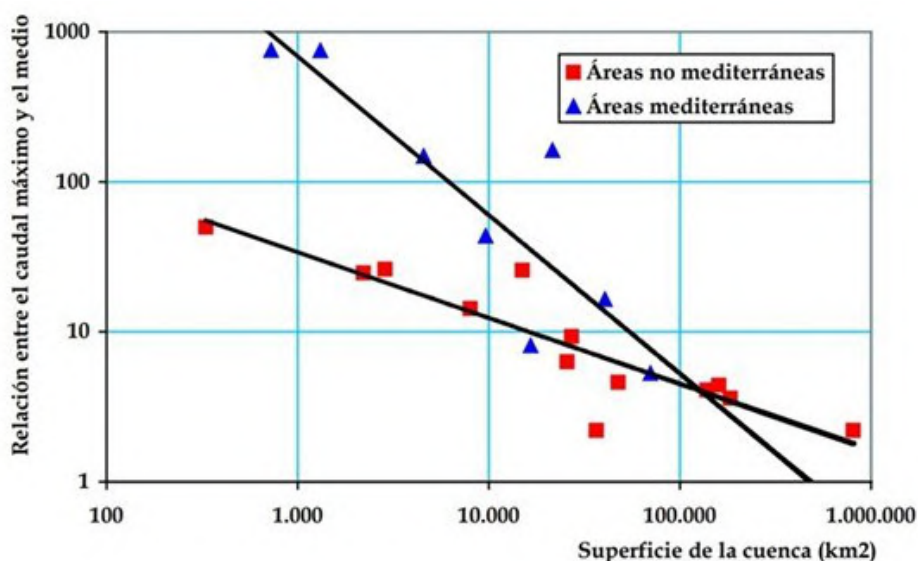


Figura 15. Relación entre caudales extraordinarios y medios según tipo de cuencas en Europa [3]

Otro de los factores esenciales en la formación de las avenidas súbitas e inundaciones es la naturaleza del terreno y la vegetación de la cuenca.

Tanto la lluvia interceptada por la vegetación como la infiltrada en el terreno pueden reducir significativamente la formación de escorrentía y, por tanto, los caudales que llegan súbitamente a las corrientes.

La presencia de vegetación es esencial para fijar el terreno y evitar la erosión principalmente en terrenos con gran pendiente. Esto es importante en Colombia. La protección contra la erosión es uno de los principales objetivos de la reforestación y del cuidado de los bosques y la vegetación existente.

Los efectos de la deforestación son mucho más importantes cuando las áreas deforestadas no se cubren rápidamente de hierba y maleza.

Por otra parte, además de los cambios de uso del suelo en zona rurales, hay que destacar la urbanización de los terrenos rurales mismos y en las zonas cercanas a las ciudades.

La localización de los asentamientos y actividades humanas en zonas potencialmente inundables es uno de los motivos de las graves consecuencias de las avenidas.

El aumento de población y su tendencia actual a concentrarse densamente en zonas urbanas han agravado considerablemente los efectos de las inundaciones. En Europa se destaca en

este sentido la costa mediterránea como una de las zonas de mayor crecimiento urbanístico en los últimos años.

Por otra parte, cuando los núcleos urbanos se localizan en la cabecera de las cuencas pueden conducir a un aumento de los caudales, principalmente cuando se eliminan zonas de los cauces, de almacenamiento natural o zonas pantanosas.

El proceso de desertificación puede originar una reducción en la infiltración del suelo, aumentando la escorrentía superficial, formando corrientes súbitas y avenidas y consecuentemente, aumentando el caudal máximo. Asimismo, da origen a modificaciones en la cubierta vegetal, que, a consecuencia de una mayor tala de árboles y eliminación de cubiertas ricas en vegetación, resulta sustituida por vegetación escasa y más pobre. El suelo, al estar desprotegido, se erosiona con mayor facilidad y rapidez, ayudado por el aumento de la escorrentía superficial, que a la vez origina una mayor erosión. Se considera que, si el suelo cubierto por vegetación es menor del 30%, el proceso de erosión se incrementa

La medida más extendida para luchar contra la erosión es la recuperación de las masas arbóreas y de vegetación de arbustos y las denominadas malezas. Esta medida sin embargo encuentra muchas dificultades en climas áridos y semi-áridos, donde el simple abandono de la roturación y la regeneración de matorral pueden ser muy efectivos para generar daños. No se debe olvidar que la recuperación de una cubierta vegetal degradada, requiere recorrer en sentido inverso los mismos pasos que le llevaron a su situación actual deteriorada.

Los embalses son muy importantes en el manejo de los excesos de precipitación. Conviene mencionar que una consecuencia de la erosión hídrica es el arrastre de sedimentos, que conduce a la reducción en la capacidad de almacenamiento de los embalses, en los que se depositan una mayor cantidad de sedimentos aportados por la cuenca receptora.

4. SOBRE LAS MEDIDAS DE MITIGACIÓN

En los cuadros siguientes se presenta una lista de medidas, tomada de la literatura, que se utilizan comúnmente, las cuales ya se han descrito en el análisis que se hizo para las ciudades, sus ríos y las medidas de mitigación.

Como se puede deducir, el caso de las inundaciones en Colombia debe ser asumido desde un punto de vista integral, a medida que las ciudades crecen en zonas estrechas, de ladera y abundantes en cañadas, zonas geológicamente inestables y abundantes en aguas de todo tipo. Ello implicará importantes inversiones y proyectos serios y de largo plazo.

Tabla 2. Sistemas de mitigación y control de inundaciones

Sistema	Descripción	Características
Túneles de desvío	Los túneles de desvío son conductos subterráneos que redirigen el exceso de agua de ríos o tormentas lejos de áreas pobladas. almacenándola temporalmente o descargándola en zonas seguras. Implican inversiones estimadas entre 30 y 200 millones de US\$ por km. según longitud y diámetro	Son pasos subterráneos para el agua. con diámetros de 3-14 metros y profundidades de hasta 30-90 metros. Minimizan el impacto superficial. con alta capacidad de flujos y manejos y reducen riesgos en ríos que atraviesan zonas densas.
Canales de drenaje	Los canales de drenaje son estructuras artificiales diseñadas para recolectar y desviar el agua de lluvia o de inundaciones en áreas urbanas. evitando la acumulación de agua en calles y edificios. Se utilizan para mejorar el flujo de agua hacia ríos o sistemas de almacenamiento. Requieren inversiones entre 5 y 20 millones de US\$ por km.	Funcionan por gravedad o bombas para evacuar agua rápidamente. Reducen inundaciones locales. mejoran la higiene urbana y son integrables con sistemas de alcantarillado. Requieren mantenimiento para evitar obstrucciones Aplicación típica: En ciudades con alto riesgo de lluvias torrenciales.
Barreras fijas	Las barreras fijas son muros o paredes permanentes construidas a lo largo de ríos para contener el agua durante crecidas. actuando como una defensa rígida contra inundaciones. Inversiones 5-50 millones por km. según altura y materiales	Funcionan elevando el nivel de contención del río (altura típica 2-5 metros). Dan protección constante. duradera y bajo mantenimiento. Tienen alto impacto visual y ecológico. no flexible para variaciones extremas.

Sistema	Descripción	Características
Barreras móviles	Las barreras móviles son sistemas desplegables como compuertas o paneles que se activan durante eventos de inundación. Inversiones 1-10 millones por km para instalación. más bajos que las fijas por ser modulares	Funcionan con mecanismos hidráulicos o manuales para cerrarse rápidamente Son flexibles. de menos impacto estético. y reutilizables; ideales para áreas con tráfico fluvial. Requieren operación y mantenimiento regular.
Diques protectores	Los diques protectores son terraplenes elevados a lo largo de ríos para prevenir desbordamientos. actuando como barreras naturales o reforzadas contra inundaciones. Inversiones 1-10 millones por km.	Funcionan elevando el borde del río (altura 3-10 metros). Tienen buenos rangos de costo-efectividad. integrables con paisajes. y fáciles de reforzar. Hay riesgo de falla si no se mantienen. Sufren erosión.
Presas río arriba	Las presas río arriba son estructuras grandes construidas en la parte superior de un río para retener agua durante crecidas. liberándola controladamente y reduciendo el caudal aguas abajo durante los eventos. Implican inversiones de decenas a centenares de millones de US\$. dependiendo del tamaño	Funcionan almacenando agua en represas grandes Permiten control y uso multifuncional (inundaciones. irrigación. energía); protección a largo plazo. Pueden tener impactos ambientales, desplazamientos y altas inversiones
Dragado del fondo del río/canal	Remoción mecánica o hidráulica de sedimentos acumulados en el lecho del río para aumentar temporalmente la profundidad y capacidad hidráulica. Se usan dragas de succión excavadoras anfibia o hidráulicas, con disposición de material dragado. El costo total por km 1-10 millones US\$	Aumento rápido de sección transversal y reducción de niveles locales en crecidas. Intervención puntual efectiva (puentes, curvas, zonas obstruidas); mitiga socavaciones inmediatas. Es solución temporal; acelera flujo y puede agravar inundaciones aguas abajo

Sistema	Descripción	Características
Depósitos subterráneos (detención/almacenamiento)	Estructuras excavadas bajo tierra (módulos plásticos/geomembranas. tanques de hormigón, arcos o bóvedas) que captan exceso de escorrentía o crecida, almacenándola temporalmente y liberándola controladamente a drenajes. infiltración o reutilización. Instalados bajo parques. estacionamientos o calles. Inversiones 200-600 US\$ por m ³ de capacidad instalada	Reduce picos de flujo sin ocupar superficie; integra calidad del agua y potencialmente recarga de acuíferos. Hay ahorro de espacio urbano; invisible y seguro; multifuncional (reutilización agua; efectivo en zonas impermeables. Alto costo inicial; excavación disruptiva; mantenimiento complejo (sedimentos/obstrucciones). Puede complementar drenajes existentes.
Revegetalización y cuidado de riberas de las quebradas y afluentes	Proceso de plantar vegetación nativa (árboles. arbustos. hierbas) en las orillas de quebradas y afluentes para estabilizar suelos, reducir erosión y mejorar la absorción de agua. Requieren mantenimiento. Inversiones de 10 a 50 US\$ por m ² de ribera revegetalizada; entre 0.5-2 millones US\$/km.	Reduce sedimentos en ríos principales, filtra contaminantes y mitiga inundaciones al aumentar retención de agua. Ecológico (hábitat para fauna. biodiversidad); mejora calidad del aire y estética urbana; duradero si se mantiene. Requiere tiempo para madurar (años); vulnerable a vandalismo o sequías; no efectivo como solución única en crecidas extremas.
Revegetalización de bordes de aceras, de zonas en calles y aumento de jardines urbanos	Plantación de vegetación en bordes de aceras, medianas de calles y expansión de jardines públicos y privados para capturar lluvia en origen y reducir escorrentía urbana. Inversiones de 20-100 US\$ por m ² de área revegetalizada. Costo total por km urbano: 1-5 millones USD	Absorbe aguas pluviales locales. reduciendo carga en quebradas/ríos y mitigando inundaciones urbanas. Mejora microclima (sombra. frescura); multifuncional (biodiversidad. recreación); integrable con urbanismo. – Espacio limitado en ciudades densas; requiere diseño para no obstruir tráfico; impacto inicial en construcción.

Sistema	Descripción	Características
Canales para manejo de aguas lluvias evitando su descarga inmediata a las quebradas y ríos	Construcción de canales o sistemas de retención para capturar y ralentizar aguas pluviales, evitando descarga directa a quebradas/ríos. Incluye biozanjas, canales infiltrantes o con vegetación. Inversiones 50-200 US\$ por m lineal de canal, dependiendo del tipo	Reducen picos de crecida en quebradas. Efectivo en tormentas intensas; integrable con paisajismo urbano. Requiere espacio lineal; posible acumulación de contaminantes; Aplicación típica: Áreas residenciales / comerciales con escorrentía alta.
Ampliación y cuidado de canales naturales para las quebradas	Expansión de cauces naturales de quebradas mediante remoción de obstrucciones, invasiones urbanas, ensanchamiento y mantenimiento para aumentar capacidad hidráulica, preservando ecología. Incluye estabilización de orillas y monitoreo. Inversiones por km 5-20 millones	Mejora flujo natural. Reduce desbordamientos y erosión en quebradas afluentes. Desplazamiento posible de comunidades; impacto ambiental inicial; mantenimiento constante para evitar nuevas invasiones.
Construcción de parques lineales en las quebradas, mediante renovación urbana	Creación de parques a lo largo de quebradas mediante reubicación de estructuras, revegetalización y diseño multifuncional (senderos, zonas de protección inundables). Integrando renovación urbana. Inversiones 20-100 millones US\$ por km lineal de parque	Combina control de inundaciones con espacios públicos, permitiendo expansión natural de quebradas en crecidas. Beneficios sociales (recreación, salud); económico (valor inmobiliario); ecológico (hábitat, infiltración); transformador para barrios. Alto costo inicial y reubicaciones; complejidad logística.

5. EL CASO DE SAN ANTONIO TEJAS

Este es un caso muy interesante. San Antonio está atravesada por el Río San Antonio, cuyos caudales son aproximadamente la mitad de los del río Medellín. En el pasado, se han generado impresionantes avenidas e inundaciones en este río, que causaron pérdidas humanas y grandes impactos económicos y destrozos en el centro de la ciudad. Ante esas circunstancias, las fuerzas vivas comerciales, turísticas, financieras, educativas, cívicas y gubernamentales, decidieron acometer un extenso y progresivo programa de obras públicas relacionados con el río y sus cuencas, hasta llegar a contar con el Río San Antonio como un

tesoro urbano, cultural y turístico, que ha hecho que la ciudad sea una meca del turismo. La figura siguiente muestra aspectos del sistema de taxis y de esclusas en el Río San Antonio.



Figura 16. Aspectos del Río San Antonio como río urbano con atractivos turísticos y sistema de transporte [14]

Este sistema está compuesto de una serie de obras, que se reflejan en la posibilidad de que el paso del río por el centro de la ciudad se pueda mostrar de forma atractiva, como se observa en el siguiente esquema.

El Río San Antonio es un río relativamente pequeño, alimentado principalmente por manantiales del Acuífero Edwards, pero altamente variable debido a tormentas repentinas

Se estima que el flujo medio es del orden de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$. En cambio, el flujo máximo en su paso urbano por el centro fue de $433 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1921. Existe una presa previa al paso del río por la ciudad. Antes de la misma se han registrado flujos hasta del $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$. El pico de 2021 causó un gran desastre como se verá. La situación sería terrible si la ciudad tuviera que soportar más de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$

Luego de evento histórico más devastador, que ocurrió en la inundación de 1921, la ciudad decidió emprender la construcción de infraestructuras de control de inundaciones para esta población que con su área metropolitana alcanza del orden de 1,500,000 habitantes

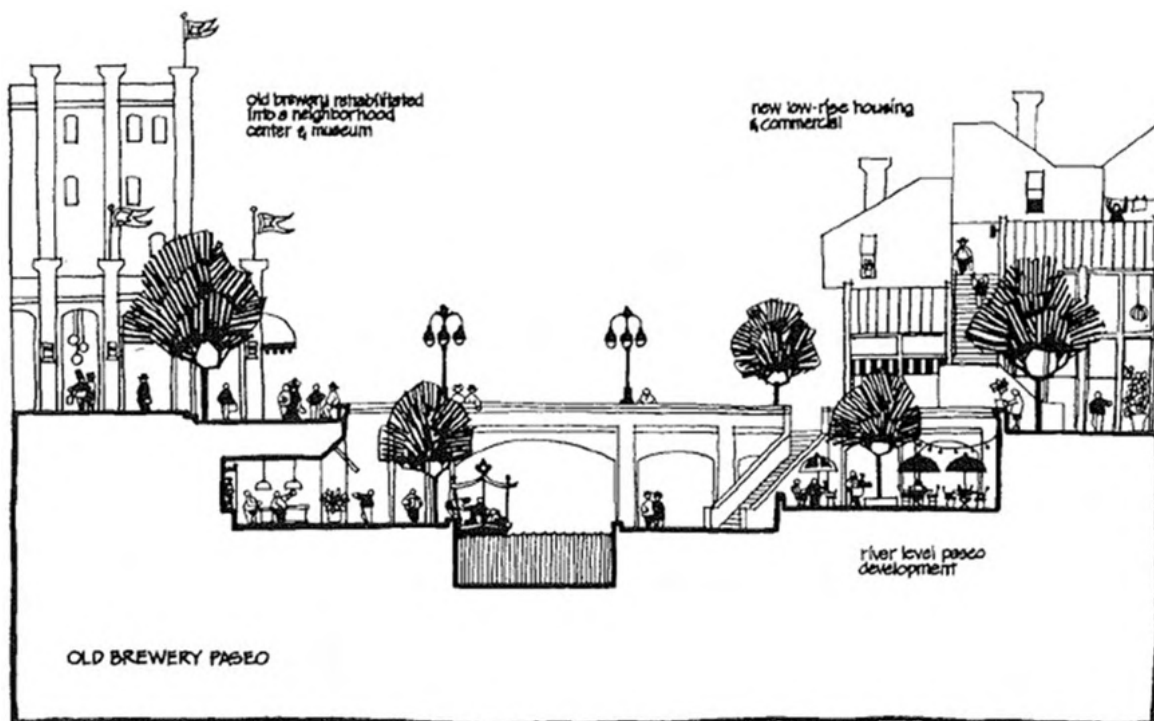


Figura 17. Esquema del paso del río por el centro [10]

San Antonio ha invertido fuertemente en control de inundaciones desde la catástrofe de 1921. Las principales obras incluyen:

- Presa Olmos, construida en la década de 1920 específicamente para proteger el centro de inundaciones del río.
- San Antonio River Improvements Project, que comprende 13 millas en el núcleo urbano que combina control de inundaciones, parques, senderos y restauración ecológica. Completado en fases principales alrededor de 2015.
- Westside Creeks Ecosystem Restoration Project y San Pedro Creek Culture Park: Restauración de arroyos canalizados previamente para mejorar el flujo, hábitat y reducción de riesgos.
- Rehabilitación de presas de control de inundaciones (Escondido Creek Dams No. 1, 4 y 12 en el condado de Karnes, gestionadas por San Antonio River Authority).
- NextGen Flood Warning System (lanzado en 2025): Sistema avanzado de alerta temprana con tecnología moderna, barreras en cruces bajos y mantenimiento de vegetación.

- Múltiples proyectos de drenaje, mejoras en cruces de caminos y planes de cuencas en el 2024 Texas State Flood Plan (586 proyectos recomendados para la región de San Antonio).

Estas obras integran infraestructura gris (presas, canales) con soluciones verdes (parques de tormentas, restauración de hábitat). Se estima que las inversiones realizadas (actualizadas a 2026) llegan a más de dos mil millones.

A pesar de todas las obras el último año desastroso fue 2025, que registró inundaciones repentinas, con más de 6 pulgadas de lluvia en pocas horas, dando lugar a 13 muertes en San Antonio, decenas de vehículos arrastrados y rescates. Fue declarado desastre local y es considerado el peor evento de inundación en una década.

Pero el desastre más grande de la historia fue la inundación de septiembre de 1921, en el cual una depresión tropical mostro hasta 17 pulgadas de lluvia en partes de la ciudad. El Río San Antonio y sus arroyos (especialmente en el West Side) provocaron una ola de agua de hasta 4 m en algunas zonas. Con ello hubo del orden de 80 muertes en San Antonio y más de 200 muertes en todo Texas.

Este desastre cambió la historia de la ciudad: impulsó la construcción de la presa Olmos y un canal de desviación para proteger el centro. San Antonio ha avanzado mucho en mitigación desde entonces, pero eventos como el de 2025 recuerdan que las inundaciones repentinas en arroyos siguen siendo un riesgo.

Se muestran a continuación algunos aspectos de las obras de defensa. Una de ellas es el Canal de *by pass* de la curva que da el río en el centro de la ciudad. Este canal permite, mediante un sistema de esclusas, regular el flujo que puede pasar por el centro de la ciudad. Bajo condiciones más extremas, se cuenta con otra obra, quizás la más importante, para garantizar que los flujos altos repentinos no pasen por el río en la zona central es el Túnel del Río San Antonio, una estructura subterránea que maneja grandes flujos. Está dotada de obras especiales en la entrada, antes de pasar por la ciudad para desviar los grandes flujos, y en la descarga, aguas abajo, para permitir que estos excesos regresen al río.

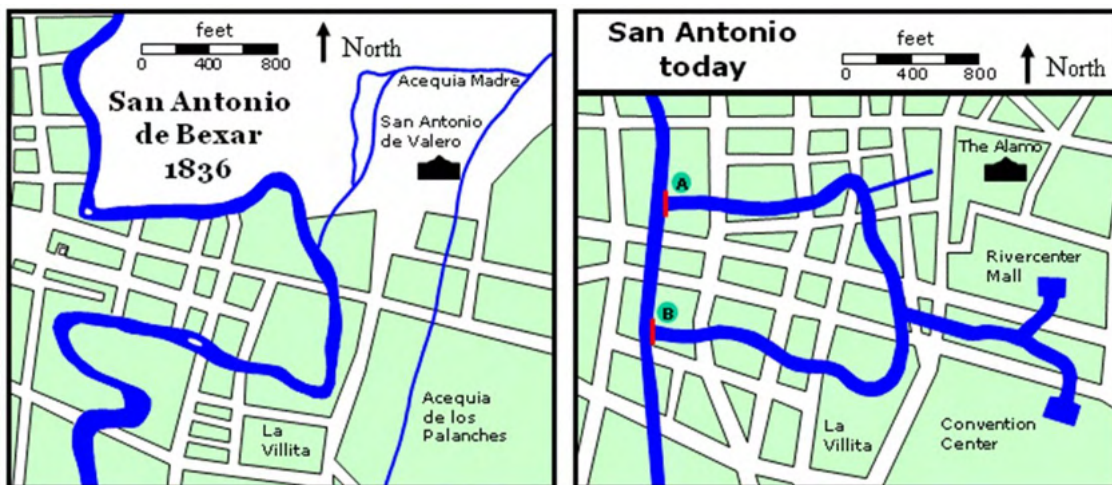


Figura 18. Canal de by pass de la curva que da el río en el centro de la ciudad [10]



Figura 19. Esquemas de los túneles y canales del Río San Antonio [10]

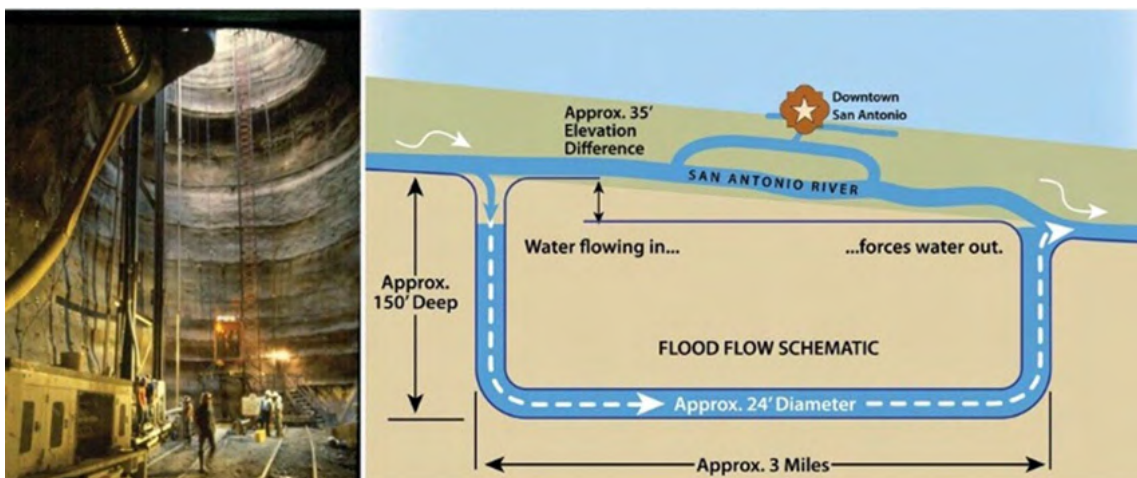


Figura 20. Túnel del Río San Antonio [10]



Figura 21. Estructuras de entrada y de salida del Túnel del Río San Antonio. En la de salida, abajo, se aprecian los flujos normales y bajo altos caudales [10]

6. EL CASO DE LA CIUDAD DE MEDELLIN

En Medellín y el Valle de Aburrá se están experimentando situaciones de riesgo que deben ser atendidas. Se trata de un valle estrecho, con zonas urbanas cada vez más extensas que cubren las zonas planas y se extienden hacia las laderas y cañadas por donde bajan las numerosas quebradas.

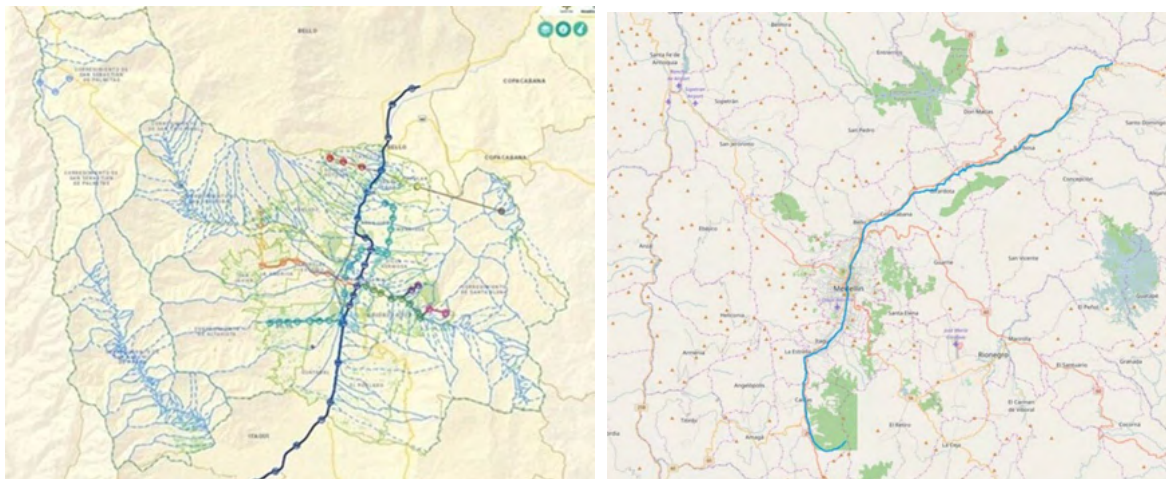


Figura 22. A la derecha, Río Medellín, desde su nacimiento en el sur, municipio de Caldas hasta su unión con el Río Grande, para formar el Río Porce, en los límites de los municipios de Santo Domingo y Don Matías, al norte. Su longitud es del orden de los 100 km. A la izquierda, la gran cantidad de quebradas de Medellín. [14]

La ciudad es muy consciente de estas situaciones. Invitados al Honorable Concejo de Medellín, nuestro Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación, desde la SAI contribuimos al PROYECTO DE ACUERDO que fue aprobado, por medio del cual se establecen los lineamientos para la formulación y adopción del Plan Maestro de Recuperación y Atención Integral del Río Aburrá-Medellín, las quebradas y demás elementos del recurso hídrico superficial y el Plan Maestro de Drenaje Urbano Sostenible del Distrito de Medellín, y se dictan otras disposiciones. Creo que vale la pena resumir acá los temas principales de este acuerdo, para contribuir a que, entre todos, contribuyamos a que sea efectivamente aplicado.

Puntos del acuerdo

- Se deben formular Planes Maestros de Recuperación y Atención Integral del Río Aburrá-Medellín, sus quebradas y afluentes. Es importante contar con ideas rectoras y tener hojas de ruta
- Se debe diagnosticar, formular y adoptar el Plan Maestro de Drenaje Urbano Sostenible. En una ciudad cada vez más pavimentada, cubierta de techos y zonas duras, es vital proteger los cauces y las cañadas y estar en capacidad de contar con zonas verdes, vegetación ripiara (o ribereña) y métodos de amortiguación de escorrentías, flujos

regulados, drenajes, sistemas de limpieza y mantenimiento y posibilidades de retención de aportes súbitos de aguas.

- Intervención sanitaria en las quebradas y el río. Hay que evitar la contaminación, la basura, los malos olores, las espumas. Retener en la fuente, mediante la cultura y mediante acciones técnicas.
- Restaurar el equilibrio ecológico en los cuerpos de agua y cauces. Garantizar salud y abundancia de vida. Que retornen la belleza, los ecosistemas y la presencia culta de las y respetuosa de las comunidades.
- Intervención en infraestructura e Intervención hidráulica: En una ciudad compleja, llena de quebradas y de cañadas, de barrios y de vías, hay que proteger y regular las condiciones físicas de los cuerpos de agua, respetando al máximo los cauces naturales, su función ecológica, y entender los flujos y sus variaciones, de modo que no haya riesgos para las poblaciones y daños para el equipamiento urbano. Es algo complejo, requiere inversiones, pero es necesario.
- Intervención ecológica y medioambiental: Para caer en cuenta y prestar atención a los preciosos y especiales ecosistemas naturales asociados a los cuerpos de agua. Las quebradas son corredores naturales de vida y zonas de reserva y de cuidado.
- intervención como espacio cívico, de recreación y educación para la Ciudad: Caer en cuenta del enorme valor humanístico, cívico, cultural recreativo y estético de estos espacios únicos. Crear ecoparques, senderos peatonales, áreas verdes, zonas de esparcimiento, observación, contemplación y educación. Evitar que sean zonas de desorden, criminalidad y abandono, garantizando cuidado, vigilancia y seguridad,
- Contar con la actualización cartográfica de la red hidrográfica distrital: Se trata de una compleja red que tiene que ver con suelos, equipamientos urbanos, fronteras, espacios, áreas. Contar con mapas y datos técnicos de calidad permite conocer, tener criterios, diseñar, predecir, estudiar, describir, regular, proteger, planificar, es decir tener orgullo y sentido de propiedad y pertenencia sobre las aguas, los suelos y los territorios.
- Estrategia educativa y de apropiación social para la gestión del recurso hídrico: Nada como la educación para inspirar respeto, tradiciones, cuidado, pertenencia; para dar valor; para crear cultura, amor y orgullo comunitario. Estos corredores son aulas naturales, regalos recibidos por la región.
- Estrategias de innovación y desarrollo: Aspecto fundamental para una ciudad que es distrito de ciencia, tecnología en innovación: por ello hay que articular los cuerpos de agua con el impresionante ecosistema creativo, científico, universitario, tecnológico y emprendedor de ciudad para impulsar valiosos y novedosos proyectos, buscando alianzas y mecanismos de financiación con la participación de todo tipo de actores.
- Estrategias de estímulo al turismo y al desarrollo empresarial. En todo el mundo los cuerpos de agua y sus cuencas, protegidos y vibrantes, se convierten en poderosos atractivos vinculados con la actividad económica del turismo respetuoso y los muchos desarrollos empresariales que se pueden asociar con la cultura, los paisajes, las crónicas, el arte, la artesanía, las ferias y eventos cívicos y culturales.
- Estrategias regionales: Sin duda las cuencas del municipio y el río que recibe sus tributos son parte de una extensa red que abarca grandes e interconectados territorios. De ahí la

importancia de orientar acciones hacia una unidad ecológica, geográfica, social, cultural e hidrológica integrada que atraviesa y conecta los diversos municipios vecinos, en busca de la gobernanza del agua a escala amplia y territorial. Recordemos que las cuencas son los instrumentos principales de nuestro ordenamiento territorial.

Quiero resaltar otros aspectos, como ingeniero y ciudadano, que igualmente merecen atención y que se desprenden de los nobles objetivos de este acuerdo.

Ideas inspiradas

- Las maravillas de este valle nuestro
- Aprender de la quebrada la Ayurá y de Envigado – como ejemplos de muchas cosas
- Caer en cuenta del ejemplo pionero de Parques del Río
- Caer en cuenta de la maravilla que son los sistemas de alcantarillas y drenaje y las plantas de tratamiento de aguas residuales que tienen las aguas antes de caer al Río Medellín y llevar la idea de la limpieza a la conciencia colectiva
- Utilizar la fotografía, la poseía y el arte para educar sobre los cuerpos de agua.
- Crear conciencia de los nombres y de las historias de las quebradas en los distintos barrios y comunas
- Distribuir mapas a la población con las quebradas y sus nombres.
- Hacer crecer la noble tradición que existe de los Grupos de conservación y protección por cuencas.
- Que cada universidad patrocine una cuenca
- Que las empresas, los comerciantes y las unidades residenciales patrocinen cuencas

REFERENCIAS

- [1]. Sánchez Calderón, Vladimir. Ríos urbanos: partícipes del pasado, el presente y el futuro de las ciudades y regiones. Instituto de Estudios Urbanos, 2023, Universidad Nacional de Colombia. Consultado en línea en 2026, en <https://ieu.unal.edu.co/divulgacion-academica/rios-urbanos-participes-del-pasado-el-presente-y-el-futuro-de-las-ciudades-y-regiones/>
- [2]. Ruka Atuq, Diederik. Más que agua, todo lo que puede ser el río. Los ríos en el cauce de la historia. Revista Pesquisa, Universidad Javeriana, Colombia, 2025. Consultado en línea en 2026, en <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/mas-que-agua-especial-rios/>
- [3]. Estrela, T., Marcuello, C., Dimas, M. Las aguas continentales en los países mediterráneos de la Unión Europea, CEDEX Report.2000. Consultado en 2026 en línea en https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/aguas_continental union_europea.pdf

- [4]. OECD. (2014). Seine Basin, Île-de-France: Resilience to Major Floods. OECD Publishing. Consultado en línea en 2026 en https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2014/01/seine-basin-ile-de-france-2014-resilience-to-major-floods_g1g3e711/9789264208728-en.pdf
- [5]. Kryžanowski, A., Brilly, M., & Šraj, M. (2014). Review Article: Structural flood-protection measures on the Danube River. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 135-150. Consultado en línea 2026 <https://nhess.copernicus.org/articles/14/135/2014/nhess-14-135-2014.html>
- [6]. European Environment Agency (EEA). (s.f.). Realisation of flood protection measures for the city of Prague. *Climate-ADAPT*. Consultado 2026 en <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/realisation-of-flood-protection-measures-for-the-city-of-prague>
- [7]. Valenti, S. (2025). Floods and the regularisation of the river Tiber, 1870–1937. *Journal of Historical Geography*. Consulta 2026 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305748825001264>
- [8]. Flood Control and Sewerage Management Ltd. (FCSM). (s.f.). The evolution of flood protection in Budapest. <https://www.fcsm.hu/en/services/flood-protection/the-evolution-of-flood-protection>
- [9]. Pratoomchai, W., et al. (2022). A Dilemma between Flood and Drought Management: Case Study of the Upper Chao Phraya Flood-Prone Area in Thailand. *Water*, 14(24), 4056. Consultado en línea 2026 en <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/24/4056>
- [10]. Rebuild by Design. (2015). San Antonio River Improvements Project. Consultado 2026 en <https://rebuildbydesign.org/atlas-of-inspiration/san-antonio-river-improvements-project/>
- [11]. Texas Water Development Board (TWDB). (2023). 2023 San Antonio Regional Flood Plan. Consultado en línea en 2026 en https://www.twdb.texas.gov/flood/planning/plans/2023a/doc/R12_Vol1_RFP_Amended_2023-11-28_PDFUA.pdf
- [12]. City of San Antonio. (2024). City of San Antonio Hazard Mitigation Plan. Consultado en 2026 en <https://www.saoemprepare.com/Portals/16/Files/Plans/Hazard-Mitigation-Plan-2024.pdf>
- [13]. Kumar, N., et al. (2021). A Systematic Review Comparing Urban Flood Management Policies and Practices in India and China. *Sustainability*, 13(11), 6346. Consultado 2026 en línea en <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6346>
- [14]. Posada, E. *Las quebradas de Medellín, una crónica poética*, Editorial Libros para Pensar, Medellín, 2022
- [15]. The Thames Barrier, Protect London from flooding with a massive steel barrier that works like a tap. Consultado 2026 en línea en <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/infrastructure-projects/thames-barrier>

UNA NOTA SOBRE EL POLÍGONO FUNICULAR APLICADO AL ANÁLISIS DE LAS VIGAS SIMPLES

Tomás Castrillón Oberndorfer

Ingeniero Civil
tomascastrillon@hotmail.com

Resumen: En el contexto del análisis estructural básico, se hace, inicialmente, un repaso de la teoría de la Estática Plana relacionada con el denominado Polígono Funicular, para proceder a presentar algunas aplicaciones sencillas en el análisis previo al dimensionamiento de las vigas simples.

Palabras clave: Análisis Estructural, Estática, Métodos gráficos, Polígono Funicular, Vigas simples, Diagramas de fuerzas.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos gráficos para estudiar la Estática de las Construcciones, basados en las hipótesis fundamentales de la Mecánica Analítica básica, debido a las demandas de la industria ferroviaria de la época, fueron desarrollados principalmente en la segunda mitad del siglo 19, gracias a los trabajos de James Clerk Maxwell (1831-1879), Karl Culmann (1821-1881) y Luigi Cremona (1830-1903). Fueron muy utilizados antes del advenimiento de los medios modernos mecánicos y electrónicos. Se les considera de gran valor, no solo desde el punto de vista histórico, sino que también son muy útiles para efectuar verificaciones acordes con las hipótesis de diseño, utilizando operaciones manuales sencillas del dibujo básico elemental.



Karl Culmann



James Clerk Maxwell



Luigi Cremona

A pesar de que se consideran muy útiles en las etapas de formación profesional, al contribuir a la intuición o percepción natural del funcionamiento de las construcciones (“*feeling*”), el continuo desarrollo de los algoritmos de cálculo ha hecho que estos temas no se estudien suficientemente en las escuelas técnicas.

2. EL POLÍGONO FUNICULAR

Se presenta, en primera instancia, un repaso de la Teoría del Polígono Funicular.

En la figura 1 se tienen 4 fuerzas planares P_1, P_2, P_3, P_4 . Se construye el “Polígono de Fuerzas” $ABCDE$. Se escoge un polo arbitrario O y se trazan los “Radios” 1, 2, 3, 4, 5. Es claro que AE es la resultante R de las fuerzas.

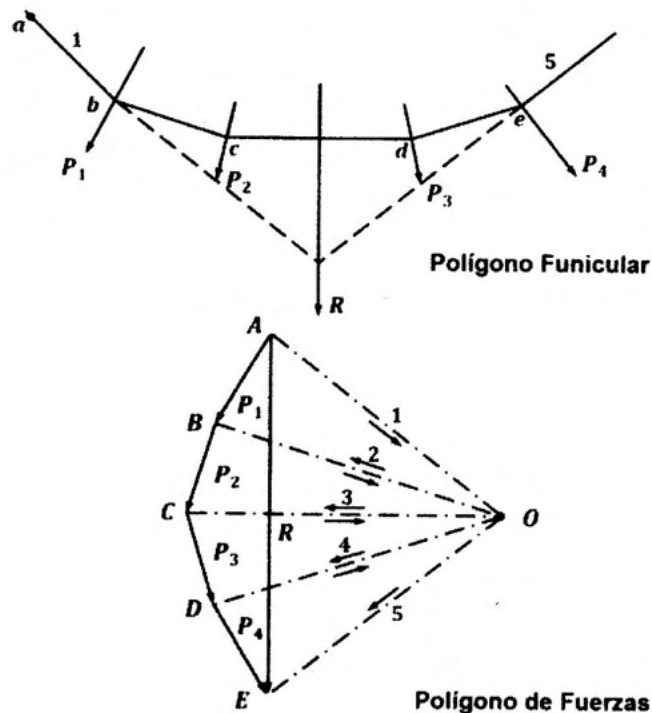


Figura 1. Polígonos funiculares y de fuerzas

Se traza en el plano de las fuerzas, empezando en un punto “a”, cada una a continuación de la anterior, las líneas ab, bc, cd y de respectivamente paralelas a los “Radios” 1, 2, 3, 4, 5.

En cada triángulo del Polígono de Fuerzas, cada una de las Fuerzas P_1, P_2, P_3 y P_4 es reemplazada por 2 componentes representados por los Radios del polígono, constituyendo un polígono cerrado

con resultante nula.

Como se ve en el polígono de fuerzas, las fuerzas bc , cd y de se compensan o se anulan. Solo quedan las fuerzas 1 y 5.

La intersección de estas líneas da un punto de la línea de acción de la resultante de las fuerzas R .

El nombre de Polígono Funicular se debe a que sus lados conformarían un hilo inextenso y sin peso para soportar las fuerzas.

Es importante tener en cuenta lo siguiente: si el polígono de fuerzas es cerrado, no hay resultante y el primer radio y el último coinciden y es claro que entonces, los lados correspondientes del polígono funicular son paralelos o coinciden.

En el primer caso, cuando son paralelas se tiene un par.

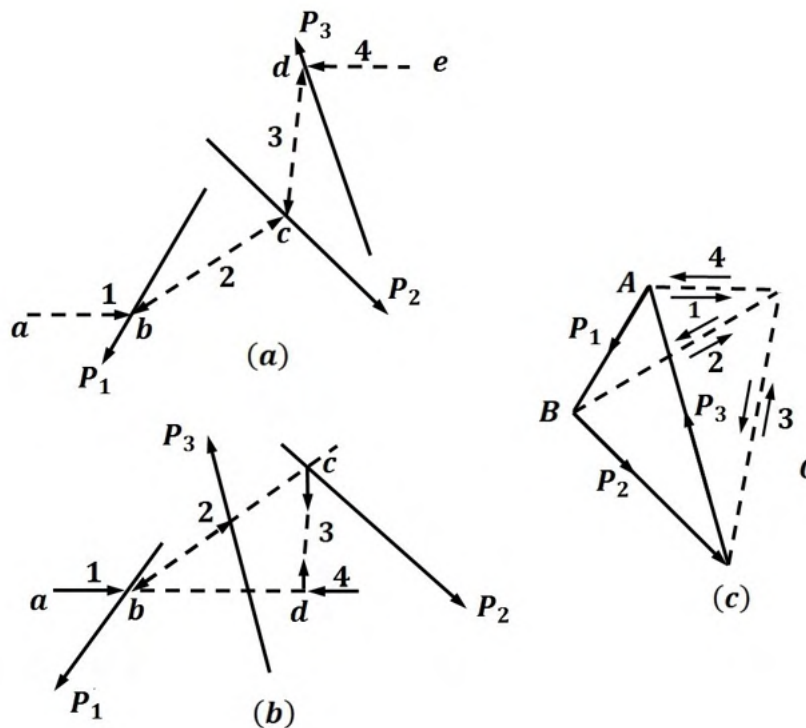


Figura 2. Polígonos de fuerzas y funicular cerrados

En el segundo caso son colineales y se equilibran como se ilustra en la figura 2 donde se tienen 3 fuerzas P_1 , P_2 y P_3 que constituyen un polígono de fuerzas cerrado (fig. 2c). Claramente se ve que los lados extremos 1 y 4 coinciden.

En la figura 2a se presenta un polígono funicular en donde los lados extremos 1 y 4 correspondientes forman un par.

En la figura 2b, se ilustra el caso en que los lados extremos 1 y 4 son colineales y se equilibran.

En el Polígono Funicular, se obtiene la condición de equilibrio, agregando otra fuerza igual y de sentido contrario a la resultante, y continuando con la construcción, resultando con el cierre del polígono, como lo puede comprobar muy fácilmente el lector, utilizando la figura 1.

Conclusión: la solución gráfica para garantizar la condición de equilibrio exige que tanto el Polígono de Fuerzas como el Polígono Funicular sean cerrados.

3. LA DESCOMPOSICIÓN DE UNA FUERZA EN DOS PARALELAS.

Es importante, además, repasar el proceso de la descomposición de una fuerza en 2 fuerzas paralelas P_1 P_2 cuya trayectoria está dada previamente por 2 puntos fijos S_1 y S_2 (Fig. 3).

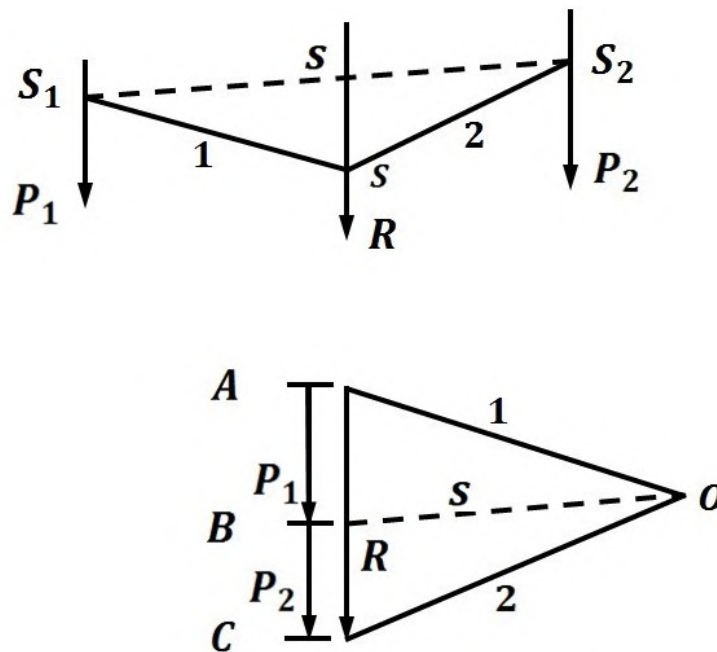


Figura 3. Descomposición de una fuerza

En el polígono de fuerzas se tiene $\overline{AC} = R$ con un polo O escogido arbitrariamente. Por un punto cualquiera S de la línea de acción de R , se trazan paralelas a los radios polares OA (1) y OC (2) que cortan a las líneas de acción de las fuerzas P_1 y P_2 en los puntos S_1 y S_2 que definen los lados SS_1 y SS_2 del polígono funicular.

La línea S en el Polígono de Fuerzas, paralela a la línea de cierre $S_1S_2 = s$ del Polígono Funicular corta a la resultante R en el punto B y define los valores $\overline{AB} = P_1$ y $\overline{BC} = P_2$, las fuerzas buscadas

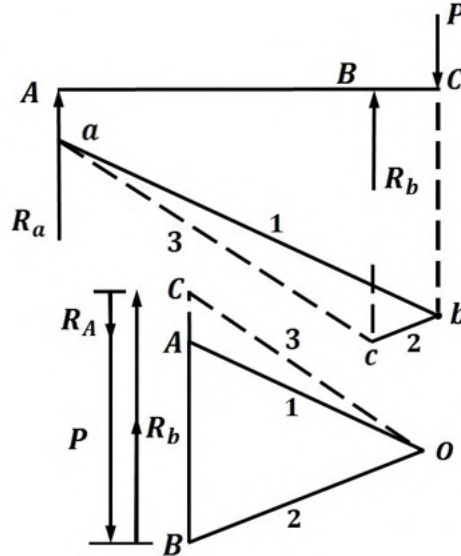


Figura 4. Cálculo de reacciones en viga simple

Esta construcción puede bien utilizarse para determinar las reacciones de una viga simple sometida a cargas verticales.

En la figura 4 se presenta una viga ABC con el tramo AB sostenido en los puntos A y B y un voladizo con una carga P aplicada en el extremo libre.

La carga P está representada en el polígono de fuerzas por $\overline{AB}$. Escogiendo un polo O , se trazan los radios 1 y 2. Las paralelas a dichos radios dan las líneas $\overline{ab}(1)$ y $\overline{bc}(2)$ del polígono funicular.

La línea de cierre del polígono $\overline{ac}$ determina la dirección del Radio 3 en el polígono de fuerzas. Las reacciones se determinan por los vectores R_A y R_b dadas por $\overline{BC}$ y $\overline{CA}$ en el polígono de fuerzas. Nótese que la reacción R_A es hacia abajo.

4. EL POLÍGONO FUNICULAR PASANDO POR 2 PUNTOS

Frecuentemente, se necesita que el polígono funicular pase por 2 puntos.

En la figura 5 se presenta un conjunto de fuerzas planares paralelas A , B y C . Se trata de construir el polígono funicular correspondiente que pase por los puntos M y N fijados previamente.

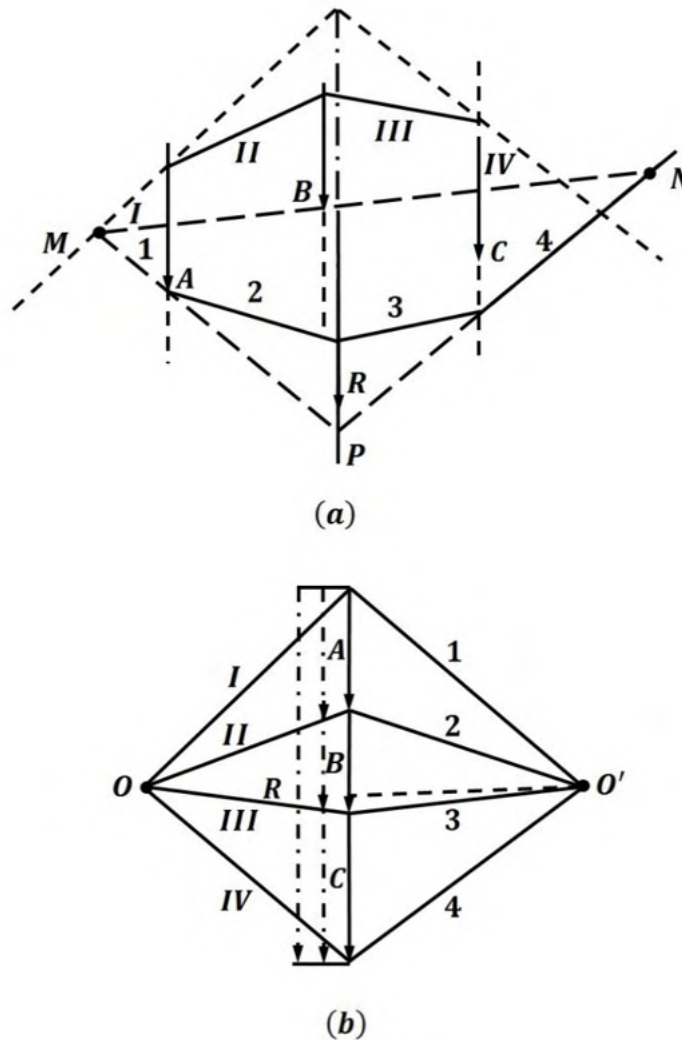


Figura 5. Polígono funicular pasando por 2 puntos

En la figura 5b se presenta el polígono de fuerzas correspondiente a las fuerzas A , B y C .

Se trazan los radios I , II , III y IV correspondientes a un polo O .

En la figura 5a se muestra el polígono funicular correspondiente a I , II , III , IV y el polo O , partiendo del punto previamente definido M .

La intersección de las prolongaciones de los lados I y IV da un punto por el cual pasa la línea de acción de la Resultante R .

Se descompone la fuerza R en 2 componentes que pasen por los puntos M y N , líneas 1 y 4, a partir de un punto P . Se construye el triángulo MNP .

Con las paralelas a 1 y 4 se obtiene el punto O' en el polígono de Fuerzas; por último se traza el nuevo polígono funicular 1, 2, 3, 4 que pasa por los puntos M y N .

Existen otras construcciones como la del polígono funicular que pase por 3 puntos, utilizado en el análisis de Arcos Triarticulados, que están fuera del alcance de estas notas.

5. EL MOMENTO ESTÁTICO

Para determinar el Momento Estático de un conjunto de fuerzas situado en el plano, se toman, por ejemplo, las fuerzas P_1, P_2, P_3, P_4 (Fig. 6).

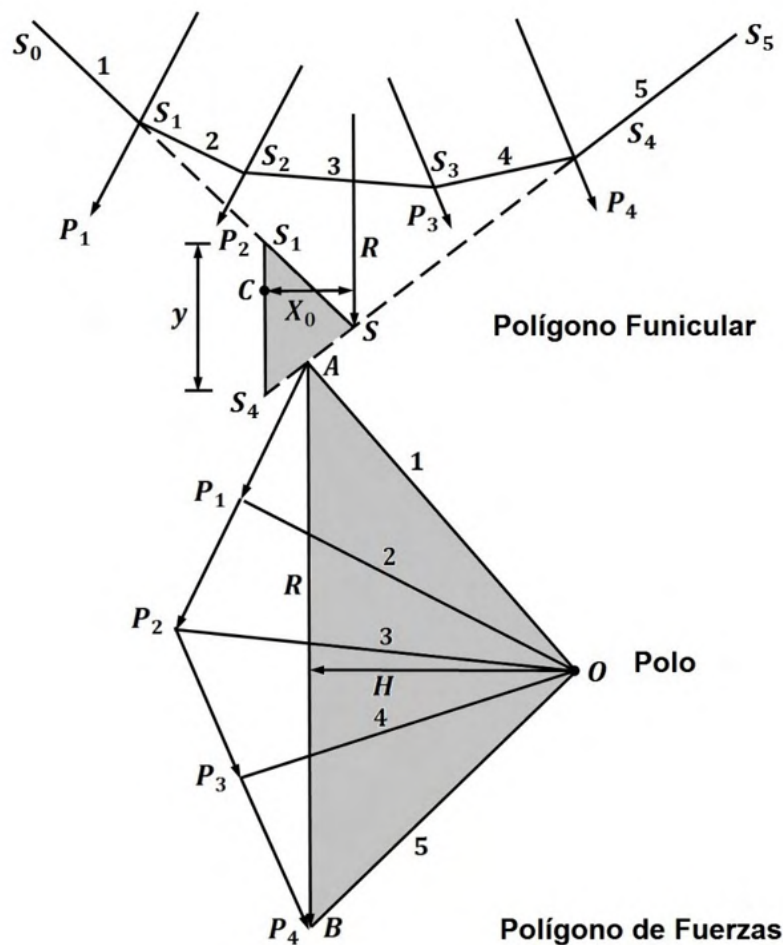


Figura 6. Momento Estático

Se trata de encontrar el Momento Estático de las fuerzas, respecto al punto C , denominado “Centro de momentos”

Se construye el polígono de fuerzas y se determina la resultante R dada por la línea AB en la figura 6.

Se toma un polo cualquiera O a una distancia H de la resultante R .

Se construyen los “Radios Polares” 1, 2, 3, 4, 5 y el polígono funicular $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$.

La intersección S de los extremos S_0 y S_5 queda dentro de la Resultante R , o sea que por dicho punto pasa la resultante que es paralela a $\overline{AB}$, del polígono de fuerzas.

Por el punto C , se traza una perpendicular a la línea de acción de la resultante R .

El momento de la resultante R respecto al punto C es: $M = Rx_0$.es

Por el punto C , se traza también una paralela a la recta AB y se obtienen los puntos S_1 y S_4 donde corta a las prolongaciones de los lados S_0 y S_5 , del polígono funicular.

Los triángulos $\triangle_{SS_1S_4}$ y $\triangle_{AOB}$ son semejantes por tener respectivamente los lados paralelos.

Luego

$$\frac{R}{H} = \frac{y}{x_0}$$

De donde,

$$R \cdot x_0 = H \cdot y$$

$R \cdot x_0$ es el momento de las fuerzas respecto al punto C . Luego

$$M = H \cdot y$$

Si las fuerzas son paralelas, se considera para mejor ilustración un ejemplo.

En la figura 7 se tienen las fuerzas P_1, P_2, P_3 .

Se trata de hallar el Momento Estático de estas fuerzas, respecto al punto C .

Se tiene también, el polígono de fuerzas que da la resultante R , y con un polo O , se han trazado los Radios Polares 1, 2, 3, 4 y el correspondiente polígono funicular.

La intersección de las líneas 1 y 4 del polígono funicular, da el punto por el cual pasa la resultante R . La paralela a R trazada por el centro C corta los lados del polígono funicular, puntos S_0 al lado 1 y S_4 al lado 4.

La recta $\overline{S_0 S_4}$ da "y" y se cumple debido a la semejanza de los triángulos, que:

$$R \cdot x_0 = \sum P \cdot x = M = H \cdot y$$

Siendo los triángulos $\triangle_{OS_0 S_4}$ y $\triangle_{O14}$ (sombreados) semejantes.

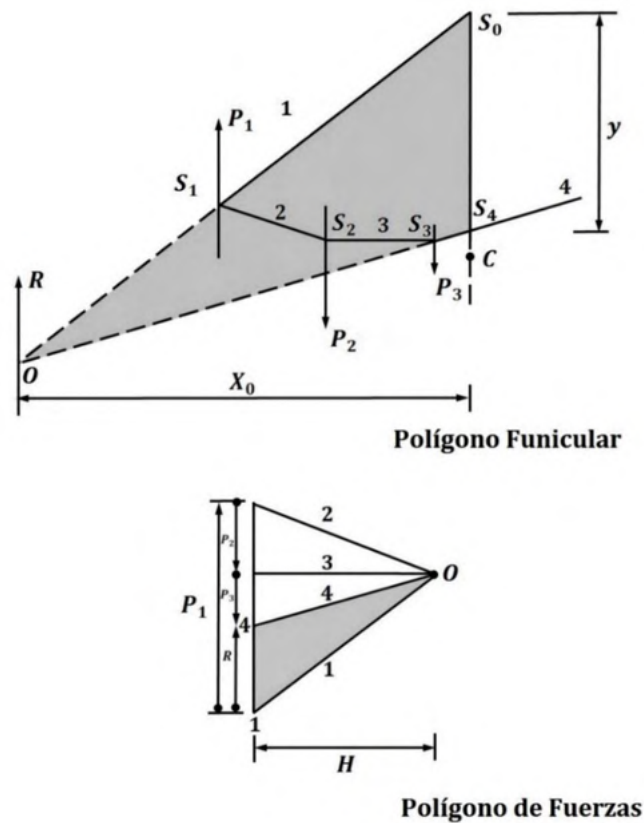


Figura 7. Momento estático de fuerzas paralelas

6. LA TRASLACIÓN DEL POLO.

En la figura 8, se presentan 3 fuerzas P_1, P_2, P_3 .

En el polígono de fuerzas se definen 2 polos O y O' con los radios correspondientes R_1, R_2, R_3, R_4 y R_1', R_2', R_3', R_4' y, además, con las respectivas paralelas, los polígonos funiculares S_1, S_2, S_3 ,

y S_1', S_2', S_3' .

Considerando, en el polígono de fuerzas, el tramo de unión de O y O' , $\overline{OO'}$ como una fuerza Q . Es claro que la resultante de las fuerzas R_1 y R_1' , por ejemplo, debe pasar por los puntos de intersección de los lados correspondientes del polígono funicular $S_i S_i'$, determinando así, los puntos S_i'' , al considerar las parejas $R_2 R_2', R_3 R_3'$ y $R_4 R_4'$.

Como la línea de acción de Q es una recta, los puntos S_1'', S_2'', S_3'' y S_4'' son colineales. La recta que los contiene se denomina “Eje Polar” de los 2 polígonos funiculares.

Conclusión: Los lados homólogos de dos polígonos funiculares, correspondientes a un sistema de fuerzas, con diferentes polos, se cortan en puntos situados sobre una recta paralela a la línea que une los puntos O y O' .

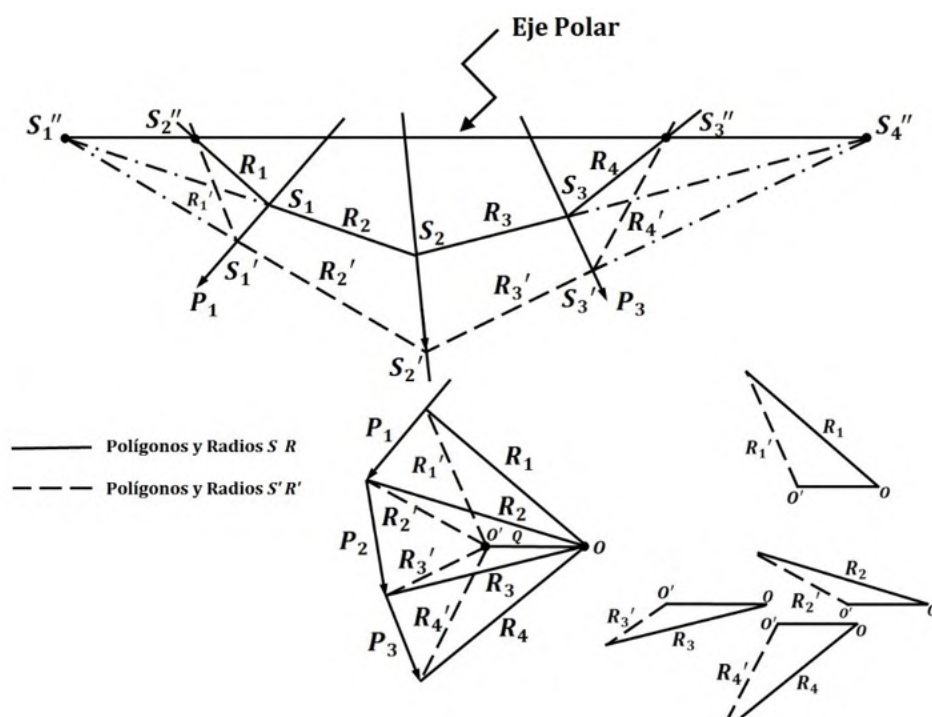


Figura 8. La traslación del Polo

7. EJEMPLOS. (Se adapta la presentación del libro *Estática Gráfica de Otto Henkel*)

Habiendo efectuado un repaso, muy somero, de la *Estática Gráfica*, se presentan unas aplicaciones en el análisis de vigas simples.

En la figura 9, se presenta una viga simplemente apoyada AB , sometida a la acción de las fuerzas

verticales P_1, P_2, P_3 y P_4 .

Se presenta el polígono de fuerzas $abcde$ con un polo O a una distancia H . Los radios polares 1, 2, 3, 4, 5 permiten trazar el polígono funicular 1, 2, 3, 4, 5 con lados paralelos a los radios del polígono de fuerzas.

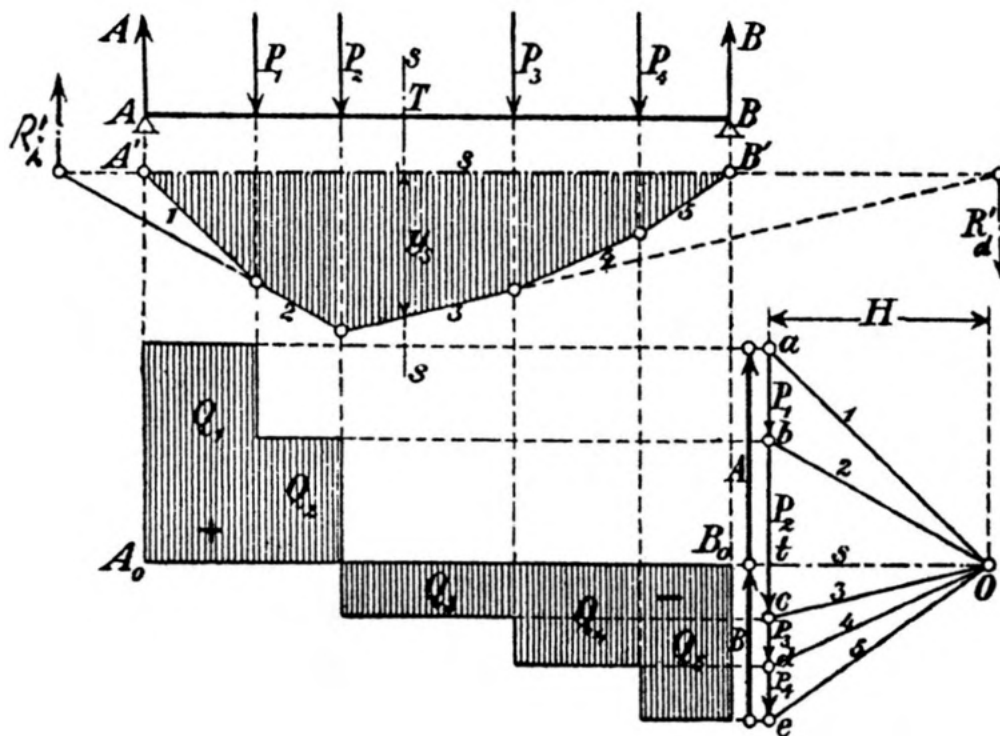


Figura 9. Viga simple con varias cargas

Las líneas extremas del Polígono funicular cortan a las líneas verticales trazadas por A y B en los puntos A' y B' . Uniendo estos puntos se obtiene la línea de cierre s . Si se traza, en el polígono de fuerzas, la paralela a s , ésta corta la línea ae en el punto t que determina los tramos $at = A$ y $te = B$ que son las reacciones de la viga en los puntos A y B . Equivale a descomponer a R en dos fuerzas paralelas que pasen por los puntos A y por B , como se ve en el aparte 3.

Considerando una sección $s - s$, punto T , de la viga, se trata de obtener en primera instancia el corte en esta sección. Claramente, se ve que la resultante de las fuerzas que actúan a la izquierda de ella es:

$$Q_s = Q_3 = A - P_1 - P_2$$

Claramente se ve que:

Tramo	Corte	Tramo en p. de fuerzas
$A \rightarrow P_1$	$Q_1 = A$	$\bar{ta}$
$P_1 \rightarrow P_2$	$Q_2 = A - P_1$	$\bar{tb}$
$P_2 \rightarrow P_3$	$Q_3 = A - P_1 - P_2$	$\bar{tc}$
$P_3 \rightarrow P_4$	$Q_4 = A - P_1 - P_2 - P_3$	$\bar{td}$
$P_4 \rightarrow B$	$Q_5 = A - P_1 - P_2 - P_3 - P_4 = -B$	$\bar{te}$

Estos segmentos pueden proyectarse ortogonalmente sobre las líneas de acción de las fuerzas formando una poligonal con el eje A_0B_0 , sombreada en la figura.

Se ve fácilmente que el valor de corte positivo corresponde a valores de la ordenada y crecientes y el corte negativo cuando dicha ordenada y decrece.

Considerando el Momento flector, y si se toman las fuerzas A, P_1, P_2 a la izquierda del corte, respecto al punto T dicho momento está dado por la expresión $M_s = HY_s$, si se tiene en cuenta la sección 5.

En la figura 9, se muestra R'_i izquierda del corte $s - s$, positiva para corte positivo. R'_i es la resultante de las fuerzas A, P_1, P_2 . Resulta prolongando las líneas s y 2 .

Haciendo lo mismo para la derecha del corte, la fuerza de corte es negativa, resultando R'_d , resultante de prolongar los lados s y 3 del polígono funicular.

Se ve, además que los puntos de quiebre del polígono funicular corresponden a las líneas de acción de las fuerzas.

Estas fuerzas R' , provocan momentos dextrógiros respecto al punto T y se consideran positivos.

Existe otra convención de signos que tiene en cuenta cual es el lado traccionado del elemento.

En este caso, producen tracción por el lado inferior, luego son positivos. El valor máximo del Momento flector se obtiene trazando una paralela a la línea de cierre del polígono que le sea tangente.

Otro ejemplo de interés, también tomado de la obra de Henkel, está ilustrado en la figura 10.

Se ilustra una viga AB cargada con las cargas $P_1 = 5.5t, P_2 = 4.0t, P_3 = 3.5t, P_4 = 3.0t$

En la utilización de los métodos gráficos, es absolutamente crucial, elegir las escalas de las diversas unidades, longitudes y valores de cargas, que permitan la fácil manipulación y lectura

de los resultados, como se observa en la figura 10.

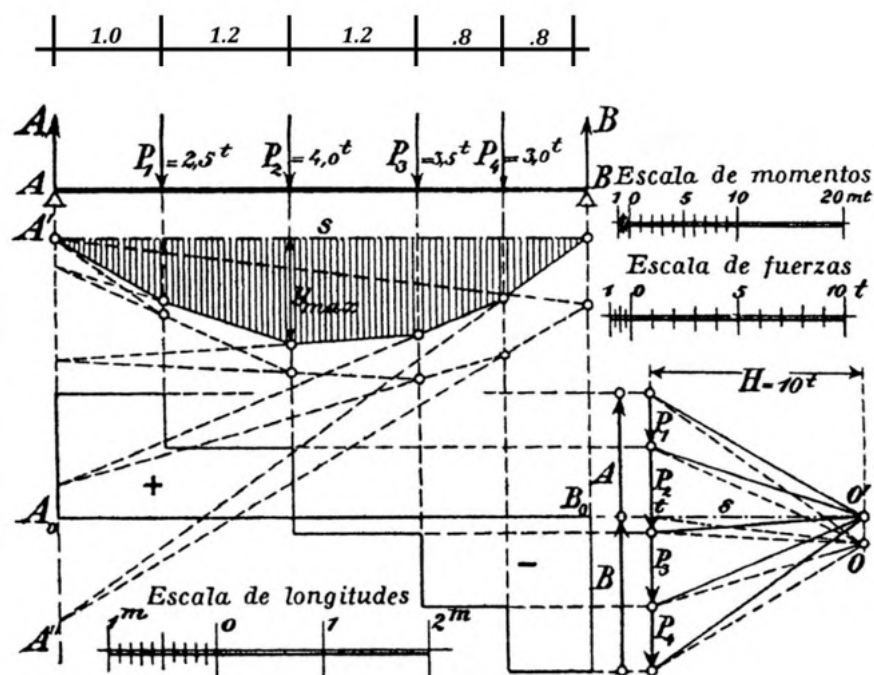


Figura 10. Viga simple con cargas concentradas.

El lector puede realizar el análisis. Para el efecto se dan los siguientes resultados:

Reacciones: $A = 5.85t$ $B = 7.15t$

Obtenidas construyendo el polígono de fuerzas, con un polo O se han trazado los radios polares, punteados en la figura. También se traza el correspondiente polígono funicular punteado. La línea de cierre s permite trazar una paralela por el polo O que corta al polígono de fuerzas en el punto t determinando las reacciones en los extremos A y B .

El Diagrama de las fuerzas de corte, se traza proyectando las fuerzas con la referencia del eje A_0B_0 , colocando los respectivos valores en las líneas de acción de las fuerzas.

El valor del momento flector está dado por las ordenadas y entre el polígono funicular y la línea de cierre.

Con frecuencia, interesa que la línea de cierre sea horizontal. Para ello se hace la siguiente construcción: como el punto t en el polígono de fuerzas es fijo, se traza por éste una horizontal δ que corta a la vertical por el punto O en el punto O' .

Con este nuevo punto O' se trazan los radios polares (línea llena) y el correspondiente polígono funicular (línea llena) que tiene la línea de referencia, la de cierre, horizontal.

Como se vio anteriormente (Sección 6), las intersecciones de las correspondientes líneas funiculares se encuentran sobre la vertical trazada por A . Como dato para comprobación del lector, el $M_{max} = H \cdot y_{max} = 9.9t \cdot m$.

Otro ejemplo interesante, tomado de la misma referencia, se presenta en la figura 11.

Se ilustra una viga AB de longitud 2.80 con voladizos de 1.0 m a la izquierda y 1.2 m a la derecha. La viga está cargada en el voladizo de la izquierda con carga P_1 de 2.8 t. En el centro de la luz se tiene $P_2 = 8.0 t$ y en el extremo libre del voladizo derecho una carga $P_3 = 2.5 t$.

El polígono de fuerzas con un polo O permite hallar las reacciones en A y B . Para ello se traza el polígono funicular correspondiente a las fuerzas P_1, P_2, P_3 dado por líneas s_3, s_1, s_2, s_3, s_4 cuyos extremos se prolongan hasta cortar las perpendiculares por A y B en los puntos $A'B'$ determinando las reacciones A y B , a ser comprobadas por el lector. Figura 12.

$$A = 6.7 t \quad B = 6.6 t$$

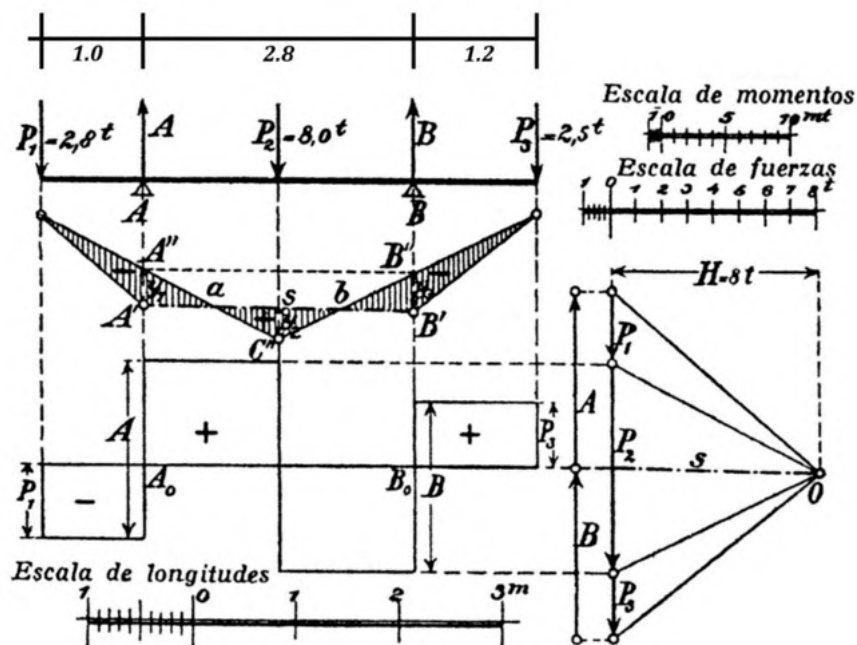


Figura 11. Viga simple con voladizos

Para mayor claridad se dibuja la figura 12. La línea de cierre s , punteada, define con el polígono funicular, el momento.

Los puntos PI , puntos de inflexión, corresponden a momentos nulos.

El momento positivo corresponde, a corte del polígono funicular por debajo de la línea de cierre, en caso contrario, corte por encima de la línea de cierre se tiene M^- . El diagrama de corte es inmediato.

Referencia para el lector

$$M_1^- = -2.8 t - m$$

$$M_2^+ = 2.3 t - m$$

$$M_3^- = -3.0 t - m$$

Es claro que para los voladizos los M^- son inmediatos

$$M_1^- = 2.8 \times 1 = 2.8 t - m$$

$$M_2^- = 2.5 \times 1.20 = 3.0 t - m$$

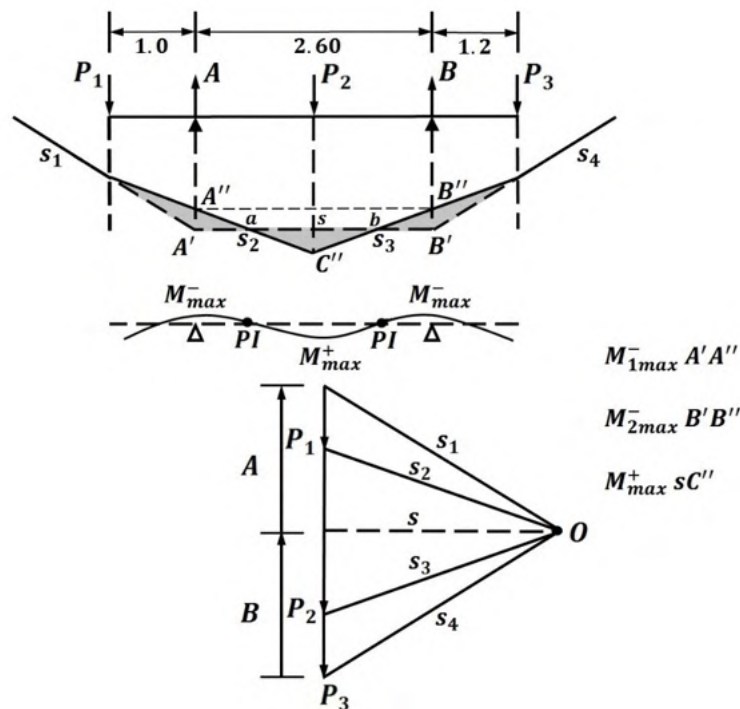


Figura 12. Viga con voladizos – Puntos de inflexión

La metodología utilizada para las cargas concentradas, puede utilizarse cuando se tienen cargas distribuidas. En la figura 13, se presenta una viga simple AB cargada con una carga uniforme

parcial total P entre los puntos C y D (fig. 13).

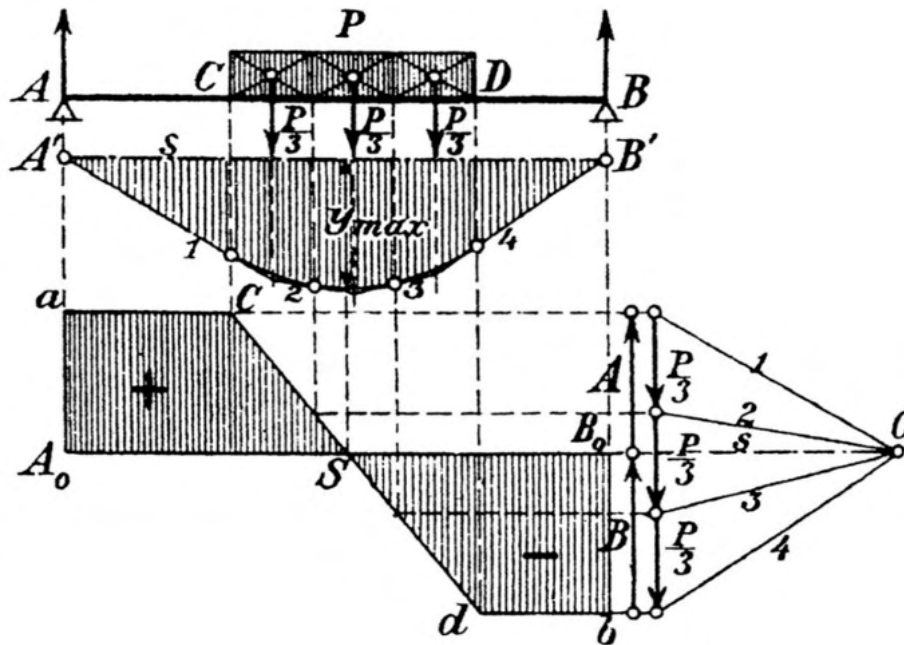


Figura 13. Viga simple con carga uniforme parcial

La carga parcial total P se divide en un número “suficiente” de cargas parciales. En la figura se ha dividido la carga en 3 partes. El polígono de fuerzas corresponde a 3 cargas iguales a $P/3$.

En el polígono de fuerzas con un polo O , se tienen los radios polares 1, 2, 3, 4 correspondientes a cada $P/3$. Se construye, además, el polígono funicular 1, 2, 3, 4.

El corte de las líneas 1 y 4 del polígono funicular con las verticales por A y B determinan la línea de cierre s cuya paralela en el polígono de fuerzas determina las reacciones A y B .

Para el diagrama de corte, es claro que, entre a y C es uniforme e igual a la reacción A ; entre C y d será escalonado, pero si se considera un número “grande” de subdivisiones será lineal. Similarmente se trata el polígono funicular para obtener la ordenada y , y, de paso, el diagrama de momento flector. Entre C y D se tiene una parábola de 2º grado de eje vertical.

Una extensión obvia la constituye el caso de una viga simple AB de longitud L sometida a una carga uniforme en toda la luz (fig. 14). Como se ilustra, se utiliza una sola carga P resultante de toda la carga.

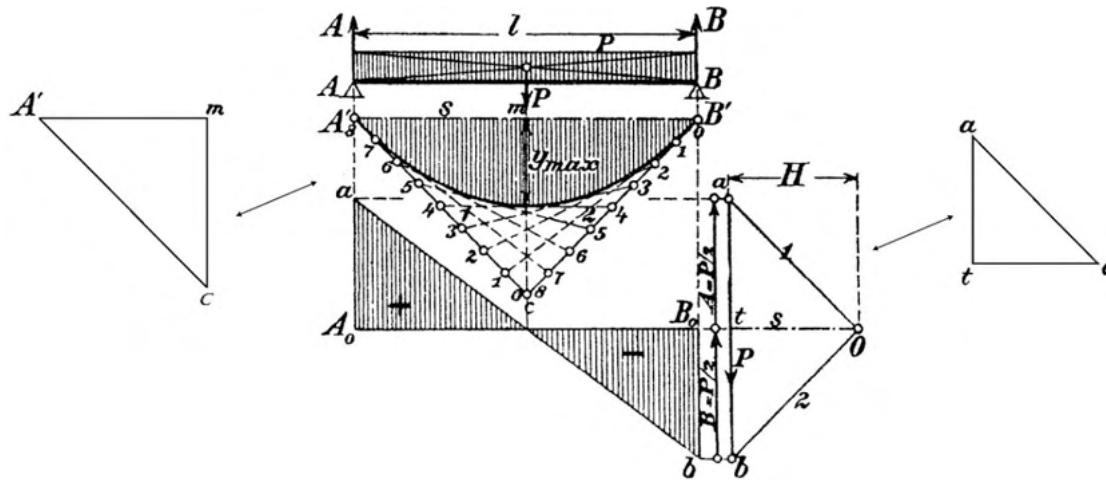


Figura 14. Viga simple con carga uniforme

Siguiendo el procedimiento descrito, se determinan las reacciones y el polígono funicular conformado por las dos tangentes 1 y 2 a la “parábola” funicular, cuya construcción se ilustra.

Considerando los triángulos atO del polígono de fuerzas y $A'mc$ del polígono funicular se ve que son semejantes por tener sus lados respectivamente paralelos. Entonces:

$$\frac{H}{\overline{at}} = \frac{\overline{A'm}}{\overline{mc}}$$

Pero

$$\overline{at} = P/2$$

$$\overline{A'm} = L/2$$

$$\overline{mc} = 2y_{max}$$

Luego

$$\overline{mc} \cdot H = \overline{at} \cdot \overline{A'm}$$

$$H \cdot y_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L}{2} = M_{max}$$

$$M_{max} = \frac{PL}{8}$$

Pero si q es la carga por unidad de longitud, $P = qL$ de donde se obtiene la conocida fórmula $M_{max} = \frac{qL^2}{8}$. El diagrama de corte es inmediato como se ve anteriormente.

Para mayor ilustración se presenta una viga simple sometida a una carga parcial uniformemente variada, o sea triangular. Figura 15

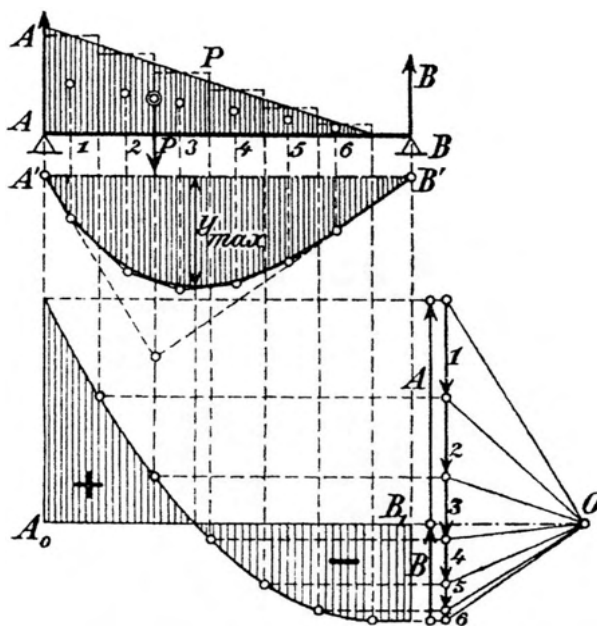


Figura 15. Viga simple con carga triangular parcial

Un caso adicional interesante, se presenta cuando se tiene una carga móvil P , y se trata de conocer la envolvente del Momento Flector.

En este caso, en lugar de desplazar la carga, se desplaza la viga de izquierda a derecha (Fig. 16). En el polígono de fuerzas, tanto los lados 1 y 2 como la carga P son constantes. Las líneas de cierre son diferentes para cada caso.

Se ilustran 2 posiciones. En la figura 17 se muestra para 5 posiciones. En el recuadro (a) está el polígono de fuerzas. En (b) se presenta la envolvente de los valores de y_{max} . Los momentos se obtienen de la relación $M = H \cdot y_{max}$.

Otro problema que se presenta en el caso de cargas móviles, es cuando se trata de obtener el momento flector en una sección predeterminada.

En la figura 18, la carga P se desplaza de derecha a izquierda y se trata de obtener el momento flector que se produce en la sección C .

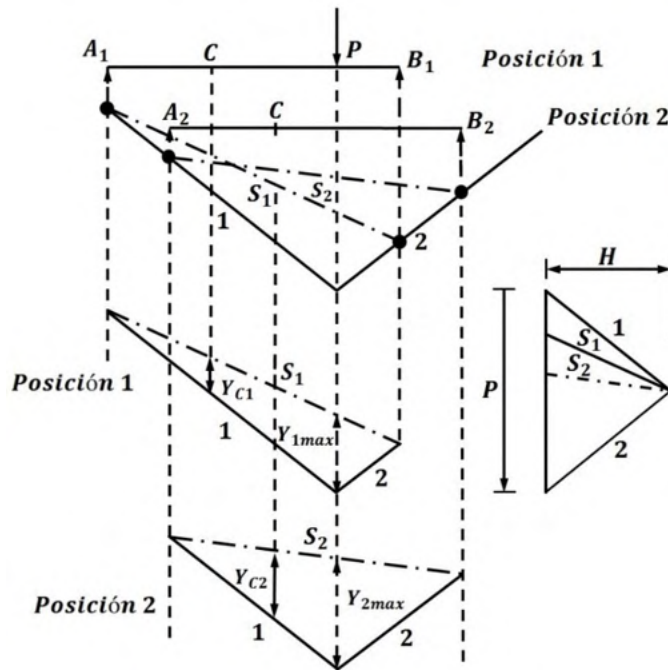


Figura 16. Carga Móvil. Envolvente de M_{max}

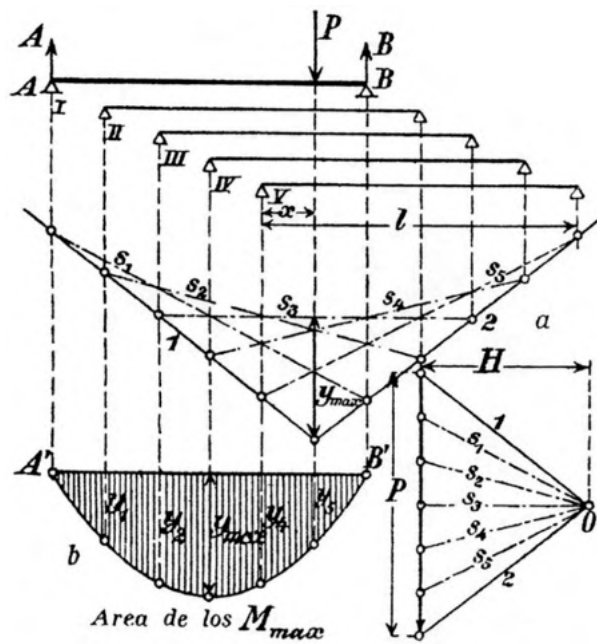


Figura 17. Carga móvil. Envolvente de M_{max}^+

Se procede de la misma forma, pero teniendo en cuenta que, al desplazar la viga, se mueve también la sección C . Deben tenerse en cuenta dos condiciones.

El valor del momento en C está dado por la ordenada y_c , entre los lados extremos del polígono funicular, 1 y la correspondiente s , cuando la carga está situada a la derecha del punto C .

Cuando la carga actúa a la izquierda de C se tiene que actúa sobre la sección considerada, una fuerza $A_6 - P$, negativa, y está aplicada por la intersección de las líneas 2 y S_6 y se obtiene y_6 (Fig. 18).

Llevando los valores obtenidos sobre un eje A_0B_0 se obtiene la línea $A_0C_0B_0$. Si se considera que $P = 1$ se obtiene, por definición, la Línea de Influencia del Momento Flector en el punto C .

Se ve que los métodos gráficos son muy prácticos para resolver muchos problemas simples. Basta tener un mínimo de destreza en el manejo de reglas paralelas, escuadras y escalas.

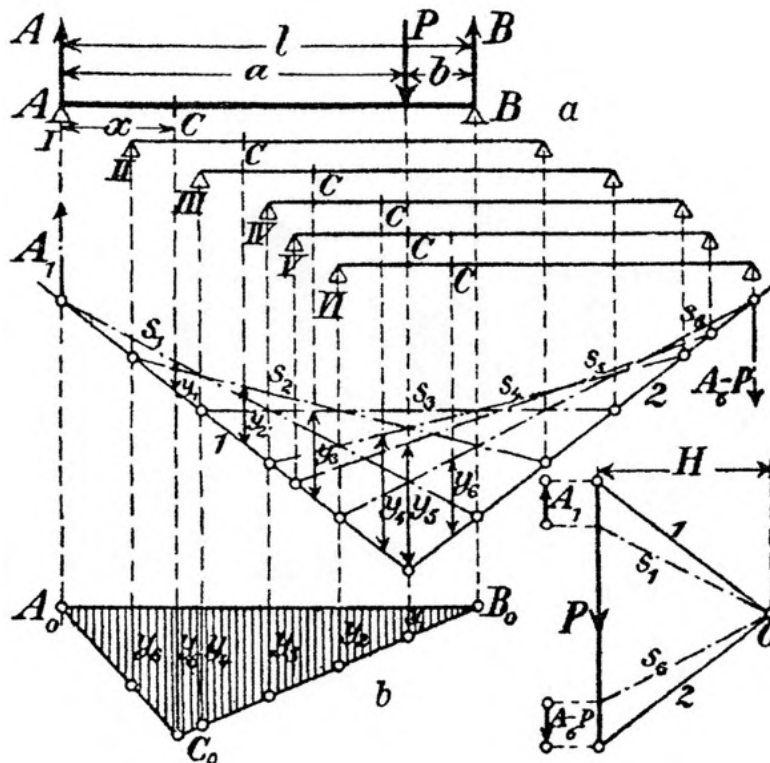


Figura 18. Carga móvil – Envolvente de M_c (específico)

REFERENCIAS:

1. Belluzzi O., Ciencia de la construcción. Aguilar, 1967
2. Castigliano C. A. P., Theory of Equilibrium of Elastic Systems and its applications. Dover publications Inc. N.Y.,1966
3. Henkel O., Estática Gráfica. Editorial Labor S. A.,1959
4. Norris Ch. H., Wilbur J. B., Elementary Structural Analysis. Mc Graw Hill Book Co. Inc. 1960
5. Rodón E., Lo que no encontré en los tratados de construcción. Editorial Reverté, 1957
6. Schleicher F., Manual del Ingeniero Constructor. Editorial Labor S.A. Barcelona. 1960
7. Timoshenko S.P., Young D.H., Theory of Structures. Mc Graw Hill Book Co. 1965
8. Timoshenko S.P., History of Strength of Materials. Dover Publications, Inc., New York. 1983
9. Westergaard H. M., Theory of Elasticity and Plasticity. Dover Publications, Inc. N.Y. 1964

CLAVES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALDERAS Y HORNOS INDUSTRIALES EN BÚSQUEDA DE LA EFICIENCIA INTEGRAL DE LOS PROCESOS

Jaime Ramiro Giraldo Salinas

Ing. Mecánico, Magister Ciencias y Especialista en Ingeniería Ambiental UPB

Jrgs2020n@gmail.com

Resumen: La escasez, el costo de los energéticos en Colombia y el Mundo, la contaminación emitida por el uso en calderas y hornos industriales con poco rigor y formalismo en la mayoría de los casos, hace necesario mejorar la comprensión del contexto para mejora de la eficiencia energética en estos equipos, pautas o claves para establecer criterios para hacer seguimiento, criterios para enfocar las mediciones para obtener buenos resultados para su posterior análisis y luego una evaluación o veredicto respecto a referenciales para establecer planes de mejora como la acción. El tema se centra en parámetros a medir y el porqué, la forma de calcular el exceso de aire, la eficiencia de combustión, así como las bases para el cálculo de la eficiencia total y criterios para orientar el plan de mejoras buscando disminuir pérdidas y eliminar o minimizar desperdicios, con gran aporte al control de procesos, a la economía circular y al ambiente. El contexto del análisis estructural básico, se hace, inicialmente, un repaso de la teoría de la Estática Plana relacionada con el denominado Polígono Funicular, para proceder a presentar algunas aplicaciones sencillas en el análisis previo al dimensionamiento de las vigas simples.

Palabras clave: Eficiencia de combustión, Medición, Mejoramiento, Parámetros de combustión, Mejoras de procesos, Buenas prácticas.

1. CONTEXTO INICIAL PARA CONOCER Y COMPRENDER LAS NECESIDADES DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El problema Energético

En el mundo y en Colombia el concepto de eficiencia energética de procesos no se maneja con rigor necesario para su monitoreo o seguimiento, para su medición y posterior análisis y evaluación del estado frente a referenciales, definición de planes de acción para mejorar o para mantener un estado posible con el fin de uso óptimo de los recursos energéticos que tienen demanda creciente, escasos y costosos y disminuir los impactos al ambiente.

En el marco de las acciones por reducir las emisiones atmosféricas tanto locales como globales, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), ha destacado la eficiencia energética como la acción de mayor impacto en la mejora de la calidad del aire y la reducción de emisiones de las emisiones de efecto invernadero [1]

La importancia y las ventajas de determinar de la eficiencia energética de calderas y hornos industriales

Se conoce desde hace muchos años la importancia y las ventajas de determinar de la eficiencia energética de calderas y hornos industriales, así como, su medición y cálculos en los procesos de combustión lo cual ha permitido en muchos casos determinar y ubicar las pérdidas y desperdicios para aplicar mejoras y ajustes o calibración de los diferentes tipos de quemadores, adicional con la mejoras, facilidad y disminución de costos de inversión la instrumentación para medición y ajustes en tiempo real facilidades en los equipos instrumentales actuales en la medición de gases en tiempo real permite un mejoramiento en cálculos y disminuir errores en los resultados obtenidos. Esto sin olvidar el tradicional ensayo Orsat, que permitía determinar el CO₂ de manera adecuada.

Este artículo presenta diferentes condiciones necesarias de aplicar para revisar la forma de medir la concentración de gases producto de la combustión, así como claves para calcular y determinar el exceso de aire, la eficiencia de combustión y la total en calderas y hornos industriales, con miras a de aumentar y asegurar la eficiencia energética de procesos térmicos, disminuir las emisiones de contaminantes y reducir el consumo de recursos naturales. buscando que estos equipos minimicen emisiones de gases efecto invernadero en especial CO₂, NO_x y material particulado SO_x, y otros como la perdida de combustibles en inquemados reduciendo el consumo de energéticos

Se parte de mejorar la compresión de lo básico que es control y mejora de la determinación del exceso de aire y la eficiencia de combustión, temas solicitados ampliamente en la Resolución 1371 AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá), para mejorar y asegurar la calidad de las mediciones hasta avanzar en la revisión de aspectos a tener en cuenta en la determinación de la eficiencia térmica total para buscar y encontrar las pérdidas y desperdicios de calor controlables y/o reducibles para ajustar los sistemas hasta sus eficiencias factibles y como una parte de tener el máximo rendimiento del equipo o del sistema donde esté operando.

Las calderas y los hornos son dispositivos que convierten la energía eléctrica o la energía química de un combustibles fósiles o biomasa en energía calorífica o térmica, que se utiliza para aumentar la temperatura mediante transferencia de calor, para el caso de calderas convertir fluidos en portadores de calor como son, entre otros: en agua caliente, aceites térmicos calientes, vapor de agua para luego utilizarlos en procesos industriales de transformación física o química de materiales. En los hornos esta energía se utiliza para aumentar la temperatura de materiales denominados carga del horno, que se ponen en su

interior, generándoles transformaciones también físicas o químicas. En la industria se tiene una gran la diversidad de hornos, tales como para secado, para transformaciones por aumento de temperatura controladas de la composición del material como ocurre en los hornos cementeros, o en los ladrilleros, o en los cerámicos y el conjunto en los que se funden hasta estado “líquido” que fluyen y los transforman, entre otros.

Los hornos y las calderas, como se planteó, consumen algún tipo de combustible y tienen o se tienen numerosas formas de quemadores de los combustibles, los que incrementan la diversidad y con esto tener muchos parámetros para medición, análisis y referencias para la valoración de la eficiencia y eficacia de la combustión y de otro lado tienen aislamientos térmicos: materiales refractarios, mantas para aislamiento térmico y disminuir desperdicios de energía calorífica. También hay diversidad de recuperadores de calor antes de que los productos gaseosos de combustión o de transformación salgan por las chimeneas.

Optimizar la eficiencia energética como tema crucial

Optimizar la eficiencia energética de sistemas donde se operan calderas y hornos industriales en conjunto con los procesos donde se usa la energía térmica generada es un tema crucial por varias razones:

- **Costos:** Medir de manera correcta, analizar, evaluar y ajustar la combustión periódicamente es la manera más fácil de reducir el consumo de combustibles costosos y escasos.
- **Asegurar la mayor eficiencia de combustión y total del sistema:** Desde la sostenibilidad y como política de costos en general es un compromiso y necesidad de todas las empresas. Así como la eficiencia integral de todos sus procesos.
- **Impacto ambiental.** La huella de carbono de una empresa está estrechamente ligada a la eficiencia energética de sus procesos. Por ello, es esencial reducir el consumo de gas natural o del combustible utilizado para ser ambientalmente responsables.
- **La sostenibilidad.** Plantea entre otros la necesidad de tener como focos: la economía circular, eficiencia integral de procesos, reducción de consumo de energéticos y materiales.

Necesidad definir los Rangos de Valores Esperados (RVE)

Rangos de Valores Esperados (RVE): Son los rangos típicos de valores esperados para la temperatura y composición de los gases producto de la combustión en el punto de medición, definidos por el fabricante del equipo o unidad o por una empresa competente para tal fin, rangos normalmente cambian al cambiar la carga o capacidad usada y se utilizaran como

punto de comparación y evaluación para los valores obtenidos en las mediciones con el fin de tener una referencia válida para buscar.

Se listan a continuación criterios para establecer los valores de referencia para la mejora energética y disminución de emisiones de los procesos con calderas, hornos y secadores (RVE), para cada unidad:

- Cada fuente debe tener sus Rangos de Valores Esperados RVE
- Certificado Capacidad y Condiciones de Operación
- Cálculo de la Eficiencia en la Utilización del Combustible % EUC en el quemador
- Medir y ajustar el exceso de aire de la combustión del quemador y del proceso
- Eficiencia de Combustión del Proceso o Unidad
- Establecer la frecuencia de calibración de los equipos de combustión
- Cambio de combustible por combustible más limpio
- Mejorar la tecnología o cambio de equipos: Ej. instalar quemadores de bajo o de ultra bajo NOx
- Análisis y evaluación de variables de operación y mantenimiento
- Acciones a desarrollar por las Autoridades Ambientales
- Eficiencia de combustión
- Eficiencia térmica
- Eficiencia de la caldera o equipo
- Eficiencia de consumos de combustible a generación de vapor

2. ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN

El proceso de combustión de combustibles fósiles y biomasas

Combustión es la transformación de la energía química primaria contenida en los combustibles fósiles o en biomasas en energía térmica secundaria mediante el proceso de la oxidación. Es decir, la combustión es el fenómeno técnico referente a la energía para la mezcla y la reacción del oxígeno del aire con los componentes inflamables de los combustibles durante la cual se libera energía térmica y lumínica, entre otros.

En el proceso de combustión se generan temperaturas elevadas (1000°C o más) con emisión de calor, energía luminosa y contaminantes. El oxígeno necesario para combustión completa se suministra como parte del aire de combustión. Al mismo tiempo se genera un volumen considerable de gases calientes como el nitrógeno que entra y que participa en el transporte y entrega de calor, así como los productos de combustión, así como cierta cantidad de sustancias residuales dependiendo del tipo de combustible (ceniza, escoria).

La combustión como un proceso químico y físico

Los átomos de Carbono (C), de Hidrogeno (H) y de Azufre (S) en el combustible se enlazan o reaccionan con átomos de (O) del aire de combustión formando gases de combustión CO_2 , CO, H_2O y SO_2 , también se tienen reacciones con el nitrógeno, liberando además energía en forma de calor. Para que esto ocurra se requiere desde la física suficiente aire (O_2), la mezcla “perfecta” con el combustible y la correcta temperatura de ignición.

En la generación de calor producto de la combustión y en el uso del calor y se tienen pérdidas y desperdicios de energía

La Figura 1, Diagrama de Combustión, representa de manera general y teórica lo que sucede en el proceso de combustión respecto al exceso o defecto de aire y a la formación de los principales gases de combustión, en % de volumen de gases secos, con relación al aire estequiométrico $\lambda = \text{cero}$.

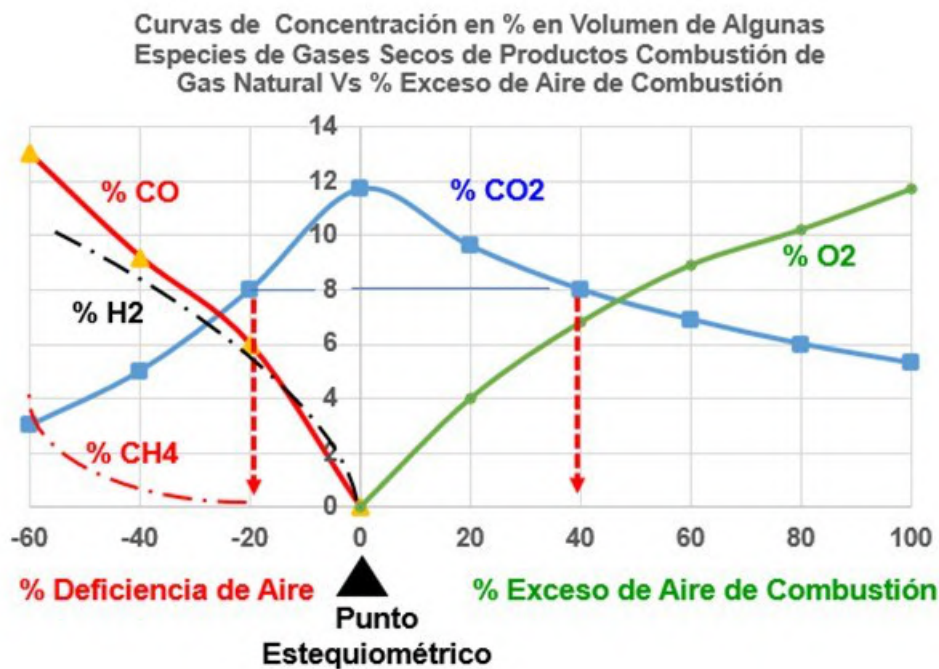


Figura 1. Diagrama de Combustión

Fuente: Elaboración propia con datos de diferentes fuentes y ecuaciones

En calderas para lograr una combustión completa se trabaja con exceso de aire $\lambda > \text{cero}$, valor que depende del tipo de quemador y del combustible utilizado. Valores que se deben controlar dependiendo el proceso para maximizar las eficiencias de combustión y total.

Con un exceso de aire muy alto se arrastra energía o calor a salir por la chimenea sin utilizar y se convierte no en una pérdida normal de energía si no en un desperdicio.

Se anota que en todo equipo hay pérdidas “técnicas” inevitables (leyes de la termodinámica) pero cuando se exceden, ya sea por falta de control, omisión y otros, se convierten en desperdicios que normalmente se puede evitar o minimizar.

Combustión estequiométrica: Mezcla perfecta. Todo el combustible reacciona con todo el oxígeno sin que sobre ninguno.

El Diagrama de Combustión de la figura 1 es característico para Gas Natural, porque el valor de CO_2 máximo es del orden 12% con $\lambda = 0\%$ de O_2 , punto de combustión estequiométrica. Cada combustible tiene su propia curva. Lo más importante en esta figura es leer cuidadosamente el comportamiento de la concentración del CO_2 , leyendo desde lado izquierdo hasta el punto de combustión estequiométrica, esa zona denominada de combustión incompleta, por deficiencia o falta de aire (O_2) para la combustión, conocida también como mezcla rica en combustible. Por la falta de oxígeno (O_2) aparecen gases combustibles en la composición como son monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2) y metano sin quemar (CH_4), en lado derecho de $\lambda = 0\%$ O_2 se muestra la combustión completa, con exceso de aire, y a medida que aumente el $\text{O}_2\%$, en el flujo de gases y disminuye el CO_2 , por dilución con el exceso de aire para la combustión y el O_2 libre, que no reacciona, aumenta, y el CO tiende a desaparecer.

En la Figura 1, se observa que para la misma concentración de CO_2 se pueden tener registros de dos valores de exceso de aire, como ejemplo para el mismo valor 8% de CO_2 se puede leer en la curva 20% de deficiencia de aire y 40% de exceso de aire. Por tanto, es necesario medir la concentración de CO y de O_2 adicional a la de CO_2 para confirmar el estado o condición del exceso o defecto de aire, si hay una concentración de CO “alta” se tiene mala combustión por falta de aire y la relación $\%\text{CO}/\%\text{CO}_2$ tiene una función importante en el análisis y definición del estado de combustión y para el caso el horno es denominado reductor.

Mezcla pobre o exceso de aire: Es lo normal en la combustión de calderas industriales para asegurar que no queden inquemados

Hoy en día, la medición de gases de combustión con exceso de aire (es decir, el caso normal para calderas y hornos) se prefiere generalmente la determinación mediante la medición del $\%\text{O}_2$. Las curvas son específicas del combustible, es decir, para cada combustible hay un diagrama individual y especialmente un valor propio para CO_2 máximo que es diferente para cada combustible.

Los hornos pueden trabajar con una llama oxidante y exceso de aire con uso en producción de cerámica, metalurgia y procesos térmicos, trabajan con exceso de aire y dejan O_2 libre,

queman todo el combustible, no extraen oxígeno de los materiales tratados. Algunos como los hornos para producir vidrio trabajan con aire enriquecido para mejorar el proceso aumentando la temperatura, entre otros.

Mezcla rica o defecto de aire: Se produce CO por combustión incompleta de igual manera combustible sin quemar, y también H₂. Esto se presenta en algunos tipos de hornos con atmósfera reductora para transformaciones químicas.

Los Hornos con llama reductora o carburante (con exceso de Combustible mezcla rica y bajo O₂) produce muchos inquemados de combustible en forma de carbono, y produce altas concentraciones de CO que puede intervenir el proceso que se realiza de manera controlada y por falta de O₂ el gas de combustión roba oxígeno de los materiales en proceso la cual puede ser usada en algunos tratamientos térmicos y fundición de ciertos metales con cambios químicos. Como es el caso de la fundición del Platino. Con formación de concentraciones altas de CO, con riesgos a la salud por peligro de intoxicación y a la seguridad industrial peligro de explosiones, también se usa en procesos cerámicos y alfarería

En la Figura 1 se observa la reducción del CO a valores con tendencia a cero, sin embargo, en la realidad de la combustión en calderas y hornos con exceso de aire hay presencia de esta especie, En las Tablas 1 y 2 para Gas Natural y Carbón Bituminoso se puede leer valores de este compuesto vs el exceso de aire. En la combustión del Carbón se genera mayor concentración, sin embargo, para los dos combustibles el valor de concentración de CO% es muy bajo por eso tiende a cero en la Figura 1

Tabla 1. Para combustible gas natural

% Exeso de aire	% Exeso de aire	% O ₂	CO ppm	%CO	%CO ₂
Fórmula EPA	De gráfico	Selección	De gráfica	Cálculo	De gráfico
1,99	2,50	0,50	800	0,080	11,40
4,38	4,00	1,00	200	0,020	11,10
6,78	7,50	1,50	130	0,013	10,80
9,29	10,50	2,00	95	0,010	10,50
11,93	12,50	2,50	85	0,009	10,20
14,74	15,00	3,00	50	0,005	10,00

Fuente: Elaboración propia con fórmulas y datos tomados de varias fuentes

Tabla 2. Para combustible carbón bituminoso

% Exeso de aire	% Exeso de aire	% O ₂	CO ppm	% CO	% CO ₂
Fórmula EPA	De gráfico	Selección	De gráfica	Cálculo	De gráfico
1,99	2,50	0,50	1500	0,1500	18,00
4,51	4,00	1,00	1100	0,1100	17,30
7,15	7,50	1,50	900	0,0900	17,10
9,86	10,50	2,00	790	0,0790	16,50
12,77	12,50	2,50	650	0,0650	16,20
15,76	16,00	3,00	510	0,0510	15,50

Fuente: Elaboración propia con fórmulas y datos tomados de varias fuentes

3. EVALUAR LA COMPOSICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN

Comentarios iniciales

El viejo analizador portátil de Orsat y su equivalente Fyrite, técnicas químicas y de operación manual, permite determinar la composición de los gases producto de la combustión midiendo la absorción volumétrica de los gases en base seca (sin vapor de agua). se usaba para determinar los porcentajes en volumen de Dióxido de Carbono (CO₂, Oxígeno (O₂), Monóxido de Carbono (CO) y por diferencia el Nitrógeno en los gases de combustión de cualquier combustible. Algunos equipos tenían un cuarto elemento para el análisis de SO₂

Luego se pasó a la medición denominada técnica instrumental portátil donde los equipos más utilizados por su bajo valor y simpleza de obtener resultados, mediante el conocimiento general del tipo de combustible y sus curvas o fórmulas internas, en el programa del equipo, permiten conocer de manera no medida el valor de %CO₂, basados en la medición de solo el %O₂. Algunos equipos de medición tienen celdas para medir el valor CO en ppm (v/v bases seca)

Como ejemplo en hornos o en calderas muy descalibradas un valor de 16% O₂, quemando Gas Natural, el exceso de aire da del orden del 500%, con este resultado no se puede conocer el estado de la combustión o la eficiencia de la combustión.

En hornos es necesario medir como mínimo CO, CO₂ y O₂ para poder determinar y conocer con mayor precisión el estado de la eficiencia de combustión. De otro lado es necesario conocer el estado o condición de operación del horno ya sea reductor u oxidante.

En calderas dependiendo de la necesidad y alcance de la medición se puede hacer midiendo O₂ y CO y con el tipo combustible deducir el CO₂. Lo ideal para esto es conocer la composición elemental del combustible para calcular el valor del CO₂ máximo.

Los analizadores de combustión portátiles o fijos actuales “completos” permiten medir de manera directa y en tiempo real CO, CO₂ y O₂, NO, NO₂, SO₂ y algunos miden la cantidad de combustible no quemado aumentando la precisión, así como la temperatura de la corriente de gases en el punto de medición.

El factor lambda es muy utilizado en los motores de combustión es aplicable a hornos y calderas se determina a partir de las concentraciones de los componentes de los gases de combustión CO, CO₂ y O₂, las correlaciones se muestran en lo que se denomina diagrama de combustión, figura 3. Si el combustible y el aire se mezclan perfectamente, hay un determinado contenido de CO (en el rango $\lambda < 1$) o un determinado contenido de O₂ (en el rango $\lambda > 1$) para cada contenido de CO₂. El valor de CO₂ por sí solo no es claro debido a que el transcurso de la curva va más allá del máximo de modo que es necesario una prueba adicional para establecer si además de CO₂ el gas también contiene CO u O₂.

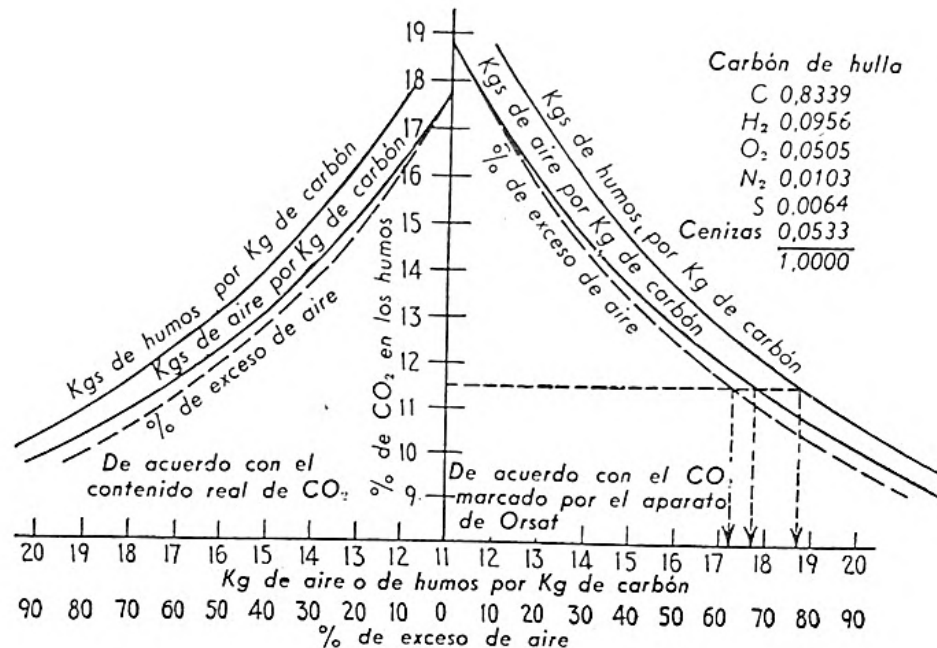


Figura 2. Ejemplo Grafico de Resultado de Medición con Orsat para combustión de carbón
Variación del %CO₂ con Exceso de Aire [2]

Hoy en día, en el servicio con exceso de aire (es decir, el caso normal) se prefiere generalmente la determinación inequívoca del O₂. Las curvas son específicas del combustible, es decir, para cada combustible hay un diagrama individual y especialmente un valor propio para CO₂ máx., véase la tabla 7. Las relaciones entre estos numerosos diagramas se resumen con frecuencia en la práctica en forma de un ábaco de fácil manejo ("triángulo de colores", sin representación aquí). Este se puede aplicar a cualquier tipo de combustible.

Cálculo del factor de combustión (Fo) para validación de datos cuando %CO₂, CO y %O₂ son medidos

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América [3], presenta la Ecuación 1 que permite calcular el Factor de Combustible Fo, con valores medidos o deducidos de %CO₂, CO y %O₂, y si el resultado está dentro del Rango presentado en la Tabla 3 para los gases del combustible medido se considera que la medición es correcta o válida.

Tabla 3. Factor de combustión Fo (EPA) rangos de referencia para validación y aceptación mediciones de %CO₂, %CO y % O₂ para diferentes combustibles

Tipo de Combustible		Fo Rango
Carbón	Antracita y lignito	1,016 a 1,130
	Bituminosos	1,083 a 1,230
Fuel Oil	Destilado ACPM	1,260 a 1,413
	Residual No. 6	1,210 a 1,370
Gas	Natural	1,600 a 1,836
	Propano	1,434 a 1,586
	Butano	1,405 a 1,553
Madera		1,000 a 1,120
Corteza de árbol		1,003 a 1,130

$$Fo = \frac{[20,9 - (\%O_2 - 0,5 \times \%CO)]}{(\%CO_2 + \%CO)} \quad Ec. 1$$

Donde:

- Fo = Factor de combustión.
- %O₂ = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de oxígeno, medido en el punto de medición.

- %CO = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de monóxido de carbono, medido en el punto de medición.
- %CO₂ = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de dióxido de carbono, medido en el punto de medición.

La conversión de ppm de CO a %CO para uso en fórmulas será la siguiente: 10.000 ppm CO = 1% de CO.

Si los resultados de la medición de los compuestos de los productos de combustión están el rango para el combustible medido se puede proceder a calcular el exceso de aire de la corriente gaseosa

4. DETERMINACIÓN DEL EXCESO DE AIRE: VALOR LAMBDA λ

Es el resultado del cálculo de la relación entre la cantidad de aire real introducida a un quemador, a un horno, o a una caldera vs la cantidad estequiométrica (teórica) de aire necesaria para una combustión completa de un combustible dado.

Determinación del exceso de aire, MÉTODO DIRECTO, para quemadores de gases combustibles

La determinación del valor del exceso de aire de manera directa se realiza mediante la relación matemática entre la medición o determinación del flujo volumétricos de aire de combustión (Q_a) suministrado a un quemador en determinado momento vs el flujo volumétrico de aire mínimo o estequiométrico o vs el flujo de gases de combustión generado en la combustión (Q_g). la ecuación Ec. 2 muestra la relación. Esto permite definir el estado de exceso de aire de cada quemador para hornos con varios quemadores o para quemadores de calderas.

Para realizar el cálculo es necesario determinan de manera experimental la condición de presión y temperatura de cada fluido que se introduce en cada quemador, si son varios. y mediante ecuaciones o graficas suministrados por el fabricante de los quemadores, se calculan los caudales de gas y de aire necesarios.

$$\lambda = \frac{Q_a}{Q_{a\min}} = \frac{Q_a}{Q_{gnat} \times V_{asm}} \quad Ec \ 2$$

Donde:

- λ valor lambda: Exceso de aire
- Q_a es el caudal de aire para la combustión entrando al quemador (Nm³ /seg.),
- $Q_{a\min}$: caudal de aire seco mínimo o estequiométrico (Nm³ /seg.),
- Q_{gnat} : caudal de gas natural suministrado (Nm³ /s), y

- Vasm: volumen de aire seco mínimo o estequiométrico para la combustión del gas del natural (Nm³ aire seco/ Nm³ gas natural).

La reducción del caudal de aire en exceso conduce a una disminución del consumo energético de un horno. Si bien esta maniobra de ajuste debe realizarse con cuidado, pues pueden verse alterados otros parámetros de funcionamiento del horno. Se ha comprobado, experimentalmente, que una reducción del 2% en el caudal de aire de combustión supone una reducción del orden del 5% del caudal de gas natural [4]

Determinación del exceso de aire mediante ecuaciones y medición de gases producto de la combustión

Cálculo Exceso de Aire Valor Lambda λ

Lambda representa la relación entre la cantidad de aire real introducida al equipo horno o caldera y la cantidad estequiométrica (teórica) necesaria para una combustión completa de un combustible.

$$\lambda = \frac{\%CO_2 \text{ máx}}{\%O_2 \text{ med}} \quad Ec \ 3$$

$$\lambda = 1 + \frac{\%CO_2 \text{ med}}{21 - \%O_2 \text{ med}} \quad Ec \ 4$$

Donde:

- %CO₂ máx: valor de CO₂ máximo específico cada combustible,
- %CO₂ med. y %O₂ med. valores medidos en el flujo de gases de combustión

Si se conoce la composición elemental del combustible utilizado, se puede calcular el valor del CO₂ máximo, mediante la ecuación Ec 5 típica, en la Tabla 4 se presentan valores de referencia para diferentes combustibles.

$$\text{Máx \% CO}_2 = \frac{(31.3 \%C + 11.5 \%S)}{(1.504 \%C + 3.55 \%H + 0.56 \%S + 0.13 \%N_2 - 0.45 \%O_2)} \quad Ec \ 5$$

Donde:

- %C = Valor determinado de Carbono en el combustible.
- %S = Valor determinado de Azufre en el combustible.
- %H = Valor determinado de Hidrogeno en el combustible.
- %N₂ = Valor determinado de Nitrógeno en el combustible.
- %O₂ = Valor determinado de Oxígeno en el combustible.

Tabla 4. Valores de referencia para diferentes combustibles.

Combustible	Valor de CO ₂ Máx. % V/V
Gas Natural	11.70
LPG	15.60
Bagazo	20.80
Madera	20.20

Fuente: Recopilación de datos de diferentes fuentes

Como valores de referencia adicionales la Figura 3 permite definir el %CO₂ Máx. para exceso de aire cero ($\lambda=0$) para el %CO₂.

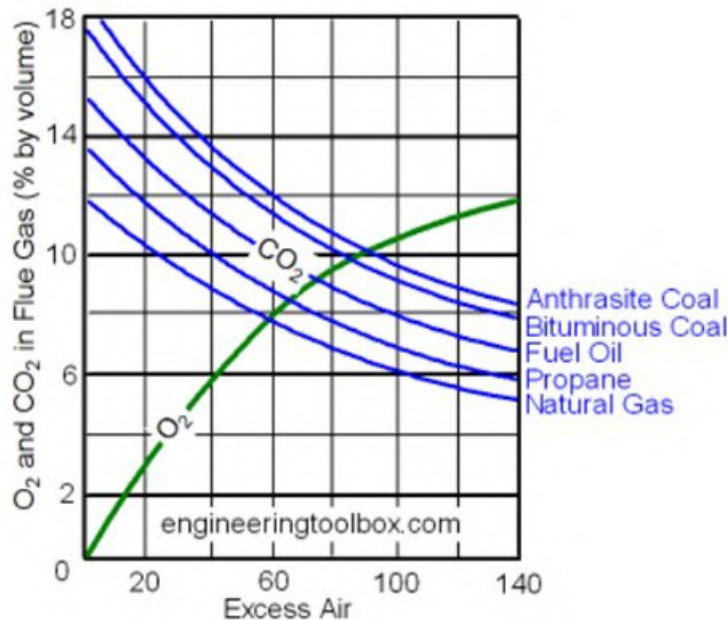


Figura 3. Valores de referencia para CO₂ Max y exceso de aire [5]

Cálculo del exceso de aire para calderas y calentadores de aceite térmico: Formula EPA

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América en su documento EPA 40 CFR Ch1 (7-1-09 Ed) pg156 [3], presenta la Ecuación 6, que aplica para calderas y calentadores de aceite térmico que queman combustibles gaseosos y/o líquidos midiendo la concentración de O₂%, %CO₂ y CO% (v/v) base seca

Aplica para combustibles gaseosos y/o líquidos midiendo la concentración de O₂%, %CO₂ y CO% (v/v) base seca y tienen poca infiltración de aire

$$\% \text{Exceso aire} = \frac{(\% \text{O}_2 - 0,5 * \% \text{CO})}{((0,2682 \times \% \text{N}_2) - (\% \text{O}_2 - 0,5 * \% \text{CO}))} * 100 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- % Exc. Aire = Porcentaje de exceso de aire calculado con base en los valores medidos del O₂% y CO%. V/V base seca.
- %O₂ = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de oxígeno, en el punto de medición La ecuación EPA asume que el O₂ para la combustión es aire ambiente. No aplica para aire enriquecido con O₂
- %CO₂ = Valor calculado con base al %CO₂ máximo para el tipo de combustible medido y el %O₂ medido, volumen/ volumen base seca, la concentración calcula de Dióxido de Carbono

$$\% \text{CO}_2 \text{ cal} = \frac{\text{CO}_2 \text{ max} * (21 - \% \text{O}_2 \text{ med})}{21} \quad \text{Ec 7}$$

- %CO = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de monóxido de carbono, o convertido de ppm a %, en el punto de medición.
- %N₂ = Valor calculado por diferencia en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de nitrógeno: con Ec 8 La ecuación EPA asume que el combustible no contiene cantidades apreciables de N₂

$$\% \text{N}_2 = 100 - \% \text{CO}_2 \text{ cal} - \% \text{CO med} - \% \text{O}_2 \text{ med} \quad \text{Ec 8}$$

Cálculo del exceso de aire para calderas y hornos las concentraciones de %CO₂ (v/v) y %CO base seca. Ecuación 9

%Exceso aire =

$$\frac{((21 - \frac{(21 * \% \text{CO}_2)}{\text{Máx CO}_2}) - 0,5 * \% \text{CO})}{((0,2682 \times \% \text{N}_2) - ((21 - \frac{(21 * \% \text{CO}_2)}{\text{Máx CO}_2}) - 0,5 * \% \text{CO}))} * 100 \quad \text{Ec 9}$$

$$\% \text{O}_2 \text{ cal} = 21 - \frac{(21 * \% \text{CO}_2 \text{ med})}{\text{Máx CO}_2} \quad \text{Ec 10}$$

$$\% \text{N}_2 = 100 - \% \text{CO}_2 \text{ med} - \% \text{CO med} - \% \text{O}_2 \text{ cal} \quad \text{Ec 11}$$

Donde:

- % Exc. aire: Porcentaje de exceso de aire calculado con base en los valores medidos del $\text{CO}_2\%$ y $\text{CO}\%$. V/V base seca.
- Máx. $\%\text{CO}_2$ = Valor máximo esperado para el combustible sin exceso de aire (exceso de aire = 0), volumen/volumen. Ver Ec 5.
- $\%\text{CO}_2$ = Valor medido en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de Dióxido de Carbono, en el punto de medición
- $\%\text{CO}$ = Valor medido en el punto de medición de la concentración de Monóxido de Carbono, si valor se medido en ppm se debe convertir a % de CO_2 volumen/ volumen base seca.
- $\%\text{O}_2$ = Valor calculado con base al $\%\text{CO}_2$ máximo para el tipo de combustible medido y el $\%\text{CO}_2$ medido, volumen/ volumen base seca, la concentración calcula de Oxígeno derivado Ec 10.
- $\%\text{N}_2$ = Valor aproximado calculado por diferencia en porcentaje, volumen/ volumen base seca, de concentración de Nitrógeno: Ec 11.

Tabla 5. Comentarios sobre exceso de aire

Condición	Comentarios
Alto exceso	Rico en aire pobre en combustible. ➤ Mucho nitrógeno altas pérdidas en chimenea, ➤ Alto costo de operación. ➤ Inestabilidad en la combustión Valores aprox. exceso de aire EA: (regla de dedo) 2% $\text{O}_2 \rightarrow \text{EA}$: 10% 3% $\text{O}_2 \rightarrow \text{EA}$: 15% 4% $\text{O}_2 \rightarrow \text{EA}$: 20%
Bajo exceso	Rico en combustible pobre en aire ➤ Formación inquemados sólidos, ➤ Altas cantidades de CO (mala combustión) ➤ Inestabilidad en la combustión Regla de dedo: Tener en cuenta CO debe ser menor a 400 ppm USAEPA para ciertos equipos 80 ppm
Adecuado exceso (set point)	Máxima eficiencia de combustión Debe regularse con base a los cambios de la caldera, mínimo para alta y baja carga

- La cantidad de exceso de aire requerida depende del tipo combustible

- Características del combustible y preparación del tipo y diseño del quemador
- Diseño del horno
- Diseño de la caldera
- Carga en el horno como % de la carga máxima
- Infiltraciones de aire

Rangos valores de referencia del Exceso de Aire

Tabla 6. Rangos valores de referencia del Exceso de Aire para diferentes combustibles y quemadores

Combustible	Tipo de quemador	Exceso de aire % w	% O₂ en los gases de combustión	Máx. Exceso de aire para bajos inquemados
Carbón	Pulverizado	10 a 20	2 a 3.6	10%
	Stoker lanzadera sobre parrilla viajera	20 a 90 Ideal 60	3.8 a 10.0	
	Stoker sobre parrilla viajera	20 a 80 Ideal 60	3.8 a 9.2	
	Manual			100%
	Pulverizado	10 a 20	2 a 3.6	10%
	Stoker lanzadera sobre parrilla viajera	20 a 90 Ideal 60	3.8 a 10.0	
Fuel Oil No 6	Quemador	5 a 20	1.5 a 3.8	15%
Gas Natural	Quemador	3 a 15	0.6 a 3	10%
ACPM		7 a 15 Con buen quemador	1.5 a 3	15%
Madera		20 a 25 Puede ser mayor depende de la humedad de la madera	3.6 a 4.3	
Bagazo		25 a 35	4.3 a 5.5	

En la tabla 6 se presentan algunos criterios dependiendo del combustible, el tipo de quemador, los valores son solo de referencia estos pueden cambiar.

5. EFICIENCIA DE HORNOS INDUSTRIALES Y CALDERAS

A menudo hay confusión de términos sobre la denominación de la eficiencia y rendimiento de un equipo y es necesario dar un grado de presión, los términos comúnmente usados los cuales en algunos casos aplican a calderas y/o a hornos:

Es necesario colocar apellidos o adjetivos que identifiquen claramente de qué alcance y el cómo se determina la eficiencia en cuestión, entre otros aspectos.

La lista siguiente presenta algunas denominaciones al tema de eficiencia en hornos y calderas y cada uno tiene alcances y magnitudes diferentes:

- Rendimiento de la caldera (Boiler performance)
- Eficiencia térmica
- Eficiencia de combustión en hornos y calderas
- Eficiencia total de una caldera con poder calorífico superior
- Eficiencia total de una caldera con poder calorífico inferior
- Eficiencia total de una caldera con poder calorífico inferior hasta condensación recuperando el calor sensible del vapor de agua en los gases.
- Eficiencia total de un horno

Rendimiento de una caldera (Boiler performance)

El tema del rendimiento va más allá de la eficiencia de combustión o de la eficiencia total de un equipo y es la sumatoria o conjunto del estado o rangos de varios aspectos, entre otros:

- Turndown ratio: turndown ratio (or rangeability) se entiende como la relación de apagado (o rangeabilidad) esta es la relación entre la capacidad máxima de un equipo y su capacidad mínima de funcionamiento, rango en el cual mantiene la precisión especificada
- Operación automática o manual
- Comportamiento exacto y repetible de la relación aire a combustible en el quemador, manejo adecuado del exceso de aire dentro de límites vs la capacidad usada
- Control de combustión y operación mediante lazos de control computarizados para garantizar eficiencia total del sistema
- Tamaño adecuado de la cámara de la combustión para su desarrollo de la llama y de la combustión misma
- Velocidad de paso de gases y de fluidos térmicos en rangos óptimos

- Áreas de transferencia de calor
- Recuperadores de energía
- Control de emisiones de contaminantes para mantener bajas emisiones
- Bajos costos de operación y mantenimiento

De lo anterior se puede concluir que las calderas entre sí son diferentes, aun teniendo la misma capacidad y apariencia y generen productos similares.

El tema de rendimiento también aplica para diversidad de hornos similares que se pueden ver similares. Como ejemplo, un horno túnel de una ladrillera puede ser muy diferente en rendimiento a otro similar. Algunos tienen sistemas de enfriamiento a la salida de la carga para recuperar energía otros no.

Por lo tanto, cuando se aplica o se usa el termino rendimiento de un equipo se debe aclarar de que se habla. Y es diferente a los diferentes tipos de eficiencias.

Eficiencia térmica

Es la efectividad del intercambiador de transferir el calor de la energía en los gases calientes del proceso de combustión al fluido térmico o al producto en proceso, no contabiliza pérdidas por radiación y convección.

Esta eficiencia en calderas corresponde a la capacidad del intercambiador de transferir calor del proceso de combustión al fluido térmico: agua, vapor aceite térmico y depende del diseño del intercambiador, del grado de ensuciamiento lado del fuego y de lado del fluido transportador del calor, entre otros.

En un horno sería la de entregar el calor de los gases de combustión de manera directa, o indirecta a través de aire calentado con los gases, de manera ordenada o correcta al producto o carga que se esté procesando.

Por lo tanto, la eficiencia térmica no es un indicador verdadero del uso total del combustible y no se debe utilizar en evaluaciones económicas.

Eficiencia de combustión:

Indica la capacidad del quemador para quemar completamente el combustible. Es un parámetro clave que debe ser garantizado por el fabricante del equipo y el proveedor del quemador, debido al alto costo del combustible y sus escases en muchos casos, así como la contaminación formada por desperdicio del combustible mal quemado.

Eficiencia de combustión desde la termodinámica:

La determinación de la eficiencia de un quemador está asociada a la energía química que es posible transformar en el calentamiento de los gases formados como producto de combustión, y sería el 100% si toda la energía química almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso.

Si se conoce la temperatura de los reactantes entrando al quemador y su entalpía $H_{\text{react}} @ T_{\text{entrando}}$ y la temperatura de los productos de combustión inmediatamente a la salida del quemador y su energía contenida $H_{\text{prod}} @ T_{\text{saliendo}}$, la eficiencia de combustión directa o real se puede definir como se muestra en la Ecuación 12 [5]:

$$\text{Eficiencia Comb} = \frac{p_{\text{cs comb}} - ((H_{\text{prod}} @ T_{\text{saliendo}}) - (H_{\text{react}} @ T_{\text{entrando}}))}{p_{\text{cs comb}}} \times 100 \% \quad \text{Ec 12}$$

La eficiencia de combustión se puede mejorar o se puede empeorar, entre otros por:

- Aumenta si la temperatura de los reactantes (aire para la combustión) aumenta.
- Disminuye si el exceso de aire aumenta, por ser una carga térmica que igualmente debe ser calentada. También aumenta la formación de óxidos de nitrógeno NOx. El control del exceso de aire y la formación NOx han contribuido al desarrollo tecnológico de quemadores de Gas Natural de baja y ultra baja formación de NOx y de %O2 saliendo del quemador del orden del 3%.
- La presencia de alta concentración de Monóxido de Carbono CO disminuye la eficiencia. La reacción para la generación de monóxido es endotérmica (consume energía), adicional es un indicativo de mala combustión y pérdida de combustible. En condiciones normales ninguna combustión tiene cero formación de este compuesto. Adicional pero no menos importante es un gas toxico y tiene riesgo de inflamabilidad.

Eficiencia de combustión desde la práctica común:

La Tabla 7, presenta de manera esquemáticas, como las mediciones de parámetros de los gases de combustión pueden mejorar la Exactitud en la Eficiencia Térmica y la Total. Su importancia radica en equipo es que se involucran la mayoría de las pérdidas controlables

En la práctica común de la ingeniería de combustión las mediciones para el análisis de productos de combustión, se determinan las concentraciones de CO2 y/o de O2, CO y NOx.

Tanto el Dióxido de Carbono CO2, como el Oxígeno O2, están relacionados con la eficiencia de combustión junto con la temperatura de los gases saliendo del equipo a la chimenea o a otro proceso como puede ser un economizador para calentamiento de agua.

Como la combustión completa no existe en la realidad debido a perdidas reales en los gases saliendo por la chimenea y a la ineficiencia en la transferencia térmica en el intercambiador de calor

Su determinación se realiza mediante mediciones, y permite conocer como o conque eficiencia el equipo está convirtiendo un combustible en energía útil, liberada. Y esta eficiencia incluye la mayoría de las perdidas controlables de un equipo

Tabla 7. Mediciones y exactitud en la eficiencia térmica y total

Equipos donde aplica	Parámetros a medir	MAYOR EXACTITUD	MENOR EXACTITUD
Hornos Industriales Calderas	- CO₂, CO, CxHy, O₂ - T ambiente, T gases - Composición combustible - O₂ se mide en calderas		
Calderas	- O₂, CO, CxHy, - T ambiente, T gases - Composición combustible - CO₂ se deduce por fórmula		
Calderas	- O₂, CO, - T ambiente, T gases - Composición combustible - CO₂ se deduce por fórmula		
Calderas	- O₂, CO, - T ambiente, T gases - Composición combustible - CO₂ se deduce por fórmula		

Calcular el Factor Fo EPA para verificar si la medición está en el rango aceptable

$$F_o = \frac{[20.9 - (O_2\% - 0.5 \cdot CO\%)]}{(CO_2\% + CO\%)}$$

La eficiencia de combustión se determina midiendo las perdidas en los gases saliendo por la chimenea, sin considerar las perdidas por radiación, convección o por conducción y las concentraciones de los gases producto la combustión.

La eficiencia de combustión se puede medir por medio de la concentración de Dióxido de Carbono en los gases de combustión, este parámetro representa la conversión teórica y real del Carbono de los compuestos combustibles, en Dióxido de Carbono que aparece en los gases. Luego se compara la reacción real con la reacción completa del combustible y el aire estequiométrico requerido en el que todo el Carbono y el Hidrógeno se queman.

El Modelo Empírico de Siegert es muy utilizado para la determinación de la eficiencia de combustión de una caldera o un horno. Este modelo está incluido en la mayoría de los analizadores comerciales que determinan de manera automática esta eficiencia. No es la eficiencia termodinámica del quemador, ni la global o total de la unidad, pero trabaja con el mayor porcentaje de pérdidas térmicas, lo que permite tener un buen indicador para evaluar la tendencia de estas pérdidas de manera fácil para buscar oportunidades de mejora.

Para los cálculos en los gases secos que salen por la chimenea, no se consideran las pérdidas por combustible no quemado, en las calderas a carbón puede ser importante por el carbón no quemado que sale en las cenizas o por la chimenea que son que es una pérdida de recursos energéticos y mayor material de residuos para disponer. Tampoco se tienen en cuenta las pérdidas por radiación y convección de las paredes debidas a la forma y al aislamiento del equipo, ni a las purgas de agua en calderas de agua o de vapor, debidas a la calidad del agua alimentada y a su tratamiento.

La eficiencia combustión determina en parte la capacidad del quemador para realizar la conversión del combustible a energía térmica, contenida en el flujo de gases de combustión y se determina mediante a medición de la composición los gases producto de la combustión, y adicional se determina la temperatura de gases saliendo de la unidad, que es un indicador de la eficiencia de transferencia de calor lograda.

Este modelo, asume que las únicas pérdidas que afectan la eficiencia son las debidas a los gases secos, sin considerar perdidas por combustión incompleta o combustible no quemado., por el calor latente del vapor de agua. Tampoco considera las perdidas por radiación, convección o conducción de la unidad. Pero se considera que sus resultados son un buen indicador de la tendencia de la eficiencia de combustión.

Modelo Siegert ecuación para obtener la eficiencia de combustión %EC para combustibles líquidos y gaseosos con O2% medido.

Para equipos de combustión externos como calderas de vapor y calentadores de agua, calentadores de aceite térmico y calentadores indirectos de aire para hornos o procesos, se aplica las Ecuación 13 para obtener la eficiencia de combustión %EC, la cual requiere medir la concentración en porcentaje de Oxígeno (%O2 v/v base seca),

Para tener completo el estado de la combustión se debe medir también el parámetro %CO y %CO2, como indicadores de mala o buena combustión, este resultado se debe comparar con valores de referencia dados o propios del quemador del equipo en cuestión.

$$\%EC = 100 - ((t1 - t2) ((\frac{A}{(21 - \%O2)}) + B)) \quad \text{Ec 13}$$

Donde:

- % EC = Eficiencia de Combustión
- t1 = temperatura de gases de combustión medido a la salida del equipo [°C]
- t2 = temperatura de aire combustión o temperatura ambiente [°C]
- %O2 = Concentración en % de Oxígeno, v/v base seca
- %CO2 = Concentración en % de Dióxido de Carbono, v/v base seca
- A, B y F: valores que dependen del combustible ver Tabla 8.

Modelo Siegert ecuación obtener la eficiencia de combustión %EC para para hornos con diversos combustibles líquidos y gaseosos basados en la medición CO2% y para combustibles solidos

Aplica para calcular la eficiencia de combustión en:

- Hornos y en especial para los que se requiere aire en exceso para arrastrar la humedad en procesos de secado de materiales, lo implica valores altos de %O2. La eficiencia se calcula con el resultado de la medición de CO2%, aplicando Ecuación 14.
- Para calderas o calentadores de aceite térmico o de aire que queman combustibles sólidos por el modelo de Siegert se aplica también la Ecuación 14.

Para estos casos con el Modelo de Siegert la EC% se obtiene midiendo el %CO2 de los productos de la combustión y la diferencia de temperaturas como se indica y calculando la eficiencia con la Ecuación 14. Para tener completo el estado de la combustión se debe medir también el parámetro %CO, como indicador de mala o buena combustión, este resultado se debe comparar con valores de referencia dados o propios del quemador del equipo en cuestión.

Para tener completo el estado de la combustión se debe medir también el parámetro %CO y %CO, como indicadores de mala o buena combustión, este resultado se debe comparar con valores de referencia dados o propios del quemador del equipo en cuestión.

$$\%EC = 100 - F \times \left(\frac{(t1 - t2)}{\%CO2} \right) \text{ Ec. 14}$$

Donde:

- % EC = Eficiencia de Combustión
- t1 = temperatura de gases de combustión medido a la salida del equipo [°C]
- t2 = temperatura de aire combustión o temperatura ambiente [°C]
- %O2 = Concentración en % de Oxígeno v/v base seca
- %CO2 = Concentración en % de Dióxido de Carbono v/v base seca

A, B y F: valores que dependen del combustible ver Tabla 14.

Tabla 8. Valores de constantes A, B y F

Combustible	A	B	F	Máx. CO ₂
Gas Natural	0,660	0,009	0.390	11,70 a 12,10
LPG (propano)	0,630	0,008	0.410	13,90
Butano			0.430	14.10
Gas de horno de coque	0,600	0.011		
Fuel No 2 ACPM	0,680	0,007	0.500	15,20
Fuel No 6	0,610	0,010	0.510	15,40
Coque			0,290	
Carbón Lignito			1,000	19.20
Carbón Antracita			0,683	18,50
Carbón Bituminoso			0,672	18,50
Madera seca			0,650	20.20

Comentarios, aclaraciones y puntos de referencia generales para %O₂, %CO₂ y %CO

La Normas de emisiones Res 909/2008 no plantean valores límites para %CO₂ o %CO, plantea de corrección para %O₂ para el cálculo de emisiones de diferentes procesos y combustibles.

Para el caso de la eficiencia, control y ajuste de la combustión los valores %O₂, %CO₂ y %CO medidos volumen/volumen y en base seca son el soporte para conocer el estado de la combustión y por ende la eficiencia de la combustión y se deben comparar analizando y evaluando el resultado con valores referenciales esperados para cada equipo dados por el fabricante o una empresa competente.

En esta resolución Res Metropolitana 1371/2022 Artículo 9 Parágrafo 1D (propuesto) y Artículo 10, se solicita que las organizaciones tengan los rangos con valores esperados de estos parámetros dados o suministrados por los fabricantes para cada equipo o por personal técnico de una empresa competente.

La Tabla 9 presenta los resultados para una caldera a Gas Natural de Valor Fo, Cálculo de Exceso de Aire y Eficiencia de Combustión

Tabla 9 Resultados para una caldera a gas natural

Situaciones		1	2	3	4	5	
Presión de vapor manométrico	psig	150	150	150	150	150	
Presión de vapor manométrico	psia	160,3	160,3	160,3	160,3	160,3	
Temperatura saturación de tablas	°C	184,24	184,24	184,24	184,24	184,24	
Temperatura adicional a la temperatura de salida de gases de la caldera	°C	20,00	30,00	50,00	30,00	60,00	Se asumen como ejemplo pero pueden ser reales bajo algunas condiciones
t1 = Temp gases combustión saliendo	°C	204,24	214,24	234,24	214,24	244,24	Medida en el punto de medición salida de la caldera, sin recuperador de energía
t2 = Temp aire comb	°C	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	
Factor F para comb. Gas Natural		0,390	0,390	0,390	0,390	0,390	Tabla 8. Valores de constantes A, B y F.
%CO2 Max		11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	
%CO2 (v/v) = Valor medido en %	%	11,64	10,50	10,50	9,47	9,47	Valor medido
%O2 (v/v) = Valor CALCULADO	%	0,11	2,15	2,15	4,01	4,01	Cálculo
%CO (v/v) = Valor asumido en %	%	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	Valor Máx. CO 400 ppm
%N2 (v/v) = Valor calculado en %	%	88,21	87,31	87,31	86,49	86,49	Cálculo
Validación por valor Fo Ec 1	Fo	1,7819	1,7805	1,7805	1,7789	1,7789	Rango 1,060 a 1,836 Tabla 3
Exceso de Aire	%Exc Aire	0,37	10,03	10,03	20,76	20,76	Cálculo Ec 9
t1 = Temp gases combustión saliendo	°C	204,24	214,24	234,24	214,24	244,24	Medida en el punto de medición salida de la caldera, sin recuperador de energía
Eficiencia de combustión de la caldera EC 14	%Ec	93,99	92,97	92,23	92,20	90,97	Debe ser la calculada con los datos medidos y con temperatura de salida de gases de la caldera

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia Total o Global de una Caldera

También conocida como eficiencia de combustible a fluido térmico, es la medición de la eficiencia total del equipo. Tiene en cuenta las pérdidas por radiación y convección, la efectividad del intercambiador de calor y otros aspectos.

Esta eficiencia total es la que se debe utilizar para evaluaciones económicas y comparativas entre calderas, pero es necesario y fundamental tener en cuenta en su reporte si la eficiencia se determinó con el valor (poder) calorífico superior VCS o con el inferior VCI.

Esto es que la expresión correcta es: eficiencia total utilizando el valor calorífico superior o eficiencia total con valor calorífico inferior, aclarando los resultados son diferentes y se presta a confusiones. En el fondo deben ser iguales.

Pero numéricamente hay una diferencia de unos 8% a 10% o más si la caldera tiene recuperador de calor de los gases y este va hasta recuperación de calor sensible por

condensación de la humedad contenida en los gases de combustión, donde la diferencia es en porcentaje mayor del orden del 15%.

Para el caso solo se presenta conceptos generales para mayor especificidad consultar los métodos planteados a continuación

Métodos para determinar la eficiencia por perdidas:

- ASME PTC 4.1 Power Test Codes: 1985 (reconfirmado en 1991)
- BS British Standard Shell boiler Part 11: Accetance test BS 12953- 11: 2003
- BS British Standard BS 845: Part 1 Concise procedure: 1987 Assessing thermal performance of boiler for steam, hot water and high temperature heat transfer fluids
- Instituto de Pesquisas Tecnologicas. Eficiencia no aproveitamento de um combustível num gerador de vapor, Basil 1982

Como ejemplo numérico para eficiencia total de una caldera:

- Eficiencia Total Valor Calorífico Superior: 80%
- Eficiencia Total Valor Calorífico Inferior: 90% sin recuperación de calor sensible de los gases de combustión
- Eficiencia total Valor Calorífico Inferior: 95% con recuperación de calor sensible de los gases de combustión

Nota: los numero son meramente ilustrativos, pero en la realidad en general son de ese orden de magnitud. Dependen combustible para el caso son con Gas Natural, para el carbón son menores

Todo lo anterior en una venta comercial de equipos puede ser significativo sí la persona que compra no entiende o conoce las diferencias.

Método DIRECTO para VCS: conocido también como Entradas Salidas

$$\text{Eficiencia directa VCS} = \frac{\text{Calor agregado al agua de alimentación}}{\text{Calor entrante por el combustible VCS}}$$

Calor agregado al agua de alimentación = (Flujo másico de vapor) * (Energía en Vapor – Energía en flujo de agua) - (Flujo másico de Purgas) * (Energía en Purgas – Energía flujo de agua)

Calor entrando: Flujo másico de combustible x Valor calorífico superior VCS

En resumen, este debería ser el método a emplear para determinar la eficiencia total de una caldera, pero históricamente ha tenido como limitación la exactitud de la medición de los diferentes flujos, sin embargo, las tecnologías actuales de medición en línea permiten su cálculo directo. Sin embargo, en las calderas los procesos no son constantes tienen variación segunda a segundo y adicional la medición tiene retardo y sus cálculos en tiempo real requiere de un manejo estadístico cuidadoso. Tiene la ventaja de que se requiere medir pocas variables.

Para la determinación con el valor calorífico inferior se procede de manera similar teniendo en cuenta reportar que su determinación es con este valor.

Método INDIRECTO por sumatoria de pérdidas y desperdicios

Por determinación o medición de pérdidas de calor o energía y permite el cálculo de la eficiencia total referido a valor calorífico superior o inferior, lo mejor es calcular las dos eficiencias y presentar especificado si la inferior va hasta condensación.

Eficiencia = 100 – pérdidas

$$\text{Eficiencia Total} = 100 - \frac{\sum \text{Pérdidas}}{VCS \text{ ó } VCI} \times 100$$

Pérdidas:

- Pérdidas de energía calorífica sensible el flujo de gases secos
- Pérdidas de energía calorífica sensible del agua del aire de combustión
- Pérdidas de energía calorífica sensible del agua del combustible
- Pérdidas de energía calorífica latente del agua en el combustible
- Pérdidas de energía calorífica latente de la combustión del H₂ del combustible
- Pérdidas de energía calorífica por combustible sin quemar
- Pérdidas de energía calorífica por radiación de la caldera
- Pérdidas de energía calorífica no determinadas (infiltraciones, transporte de combustible, otros no determinados)

Limitaciones del método:

- Análisis de combustibles
- Requiere mediciones en la salida de los gases

Como mejorar la eficiencia total: Mediante la reducción de las pérdidas denominadas controlables.

Las Pérdidas Incontrolables:

Las principales son:

- Calor latente: H₂ y H₂O son características de combustible y generan pérdidas
- Radiación de las paredes de la caldera
 - o Son función del diseño de la caldera y su aislamiento
 - o Del mantenimiento recibido al aislamiento (controlable)
- Pérdidas de calor no determinadas: “Margen de error de los diseñadores” del orden de 2 al 5% dependiendo del equipo

Eficiencia total de un horno:

Esta determinación es más compleja que en calderas y no está estandarizada debido a la diversidad de los hornos y procesos realizados.

En los hornos aplica el método indirecto teniendo en cuenta limitación y dificultad de mediciones o determinación de pérdidas, se puede decir que cada horno es individual

En cuanto a las Pérdidas de energía calorífica sensible, en el flujo de gases secos se debe considerar que la valoración de los gases de cambios se debe realizar mediante la medición directa de compuesto %CO₂ y el O₂ debe ser calculado como se verá adelante. Estas pérdidas pueden ir del 12% al 20% dependiendo del equipo.

Diagrama de Sankey Flujos de Energía

El diagrama de Sankey es un diagrama de flujo de energía, en el que el ancho de las flechas muestra de manera proporcional a la cantidad de flujo de energía, ilustra la distribución de energía entregada por el combustible, teniendo en cuenta que el combustible y el aire entran al proceso a temperatura ambiente y muestra las diferentes pérdidas desde el 100% de la energía entrando hasta llegar a la energía útil entregada para generar vapor o para el tratamiento o proceso de una carga en un horno.

La Figura 4 Muestra un diagrama de Sankey general, no proporcional, para una caldera con recuperador de energía, este también se puede ajustar y aplicar a hornos industriales. La Figura 5 presenta datos numéricos teóricos para una caldera con combustible carbón, sin recuperador, las flechas no son proporcionales de manera exacta para el caso.

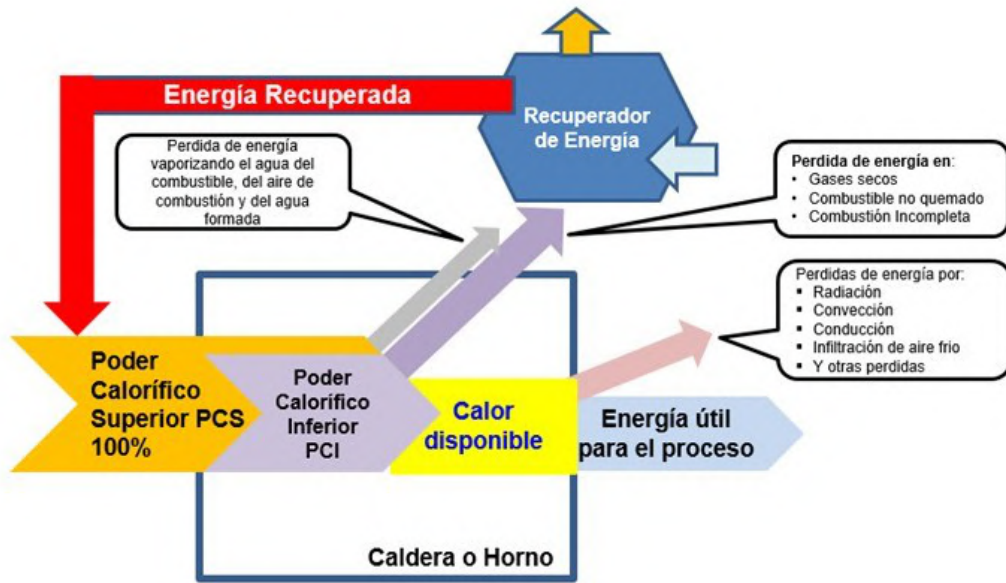


Figura 4. Diagrama de Sankey general, no proporcional, para una caldera con recuperador de pérdidas de energía [6]

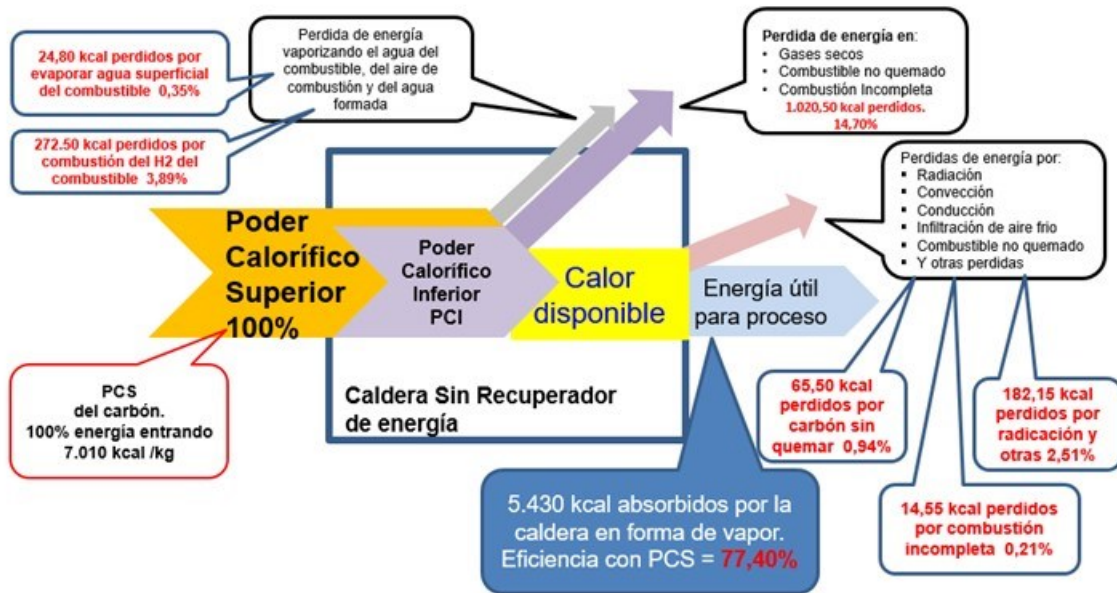


Figura 5. Diagrama de Sankey general, no proporcional, para una caldera a carbón sin recuperador de energía [6, 2]

Balance de masas y energía

Los balances de materia y energía son un proceso de conteo de entradas y salidas en un proceso industrial o sistema. Se basan en las leyes de conservación: la masa donde esta no se crea ni se destruye, y que la energía total permanece constante, solo se transforma de una forma a otra.

El análisis de eficiencia energética de un horno o de una caldera de contar con la determinación de las eficiencias que correspondan y debe ser complementado con el balance de masa y energía para el proceso en cuestión

6. FACTORES QUE PUEDEN ESTAR AFECTANDO LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Algunos elementos que pueden ser causantes de una baja eficiencia energética son:

- Pérdidas de calor en el proceso o sistema. Estas pérdidas pueden deberse a daños estructurales en el aislamiento o mala selección de espesores o tipo de aislante del horno o caldera. Para el vapor o fluidos térmicos transportados a los puntos de usos sin aislamiento o mal aislados y muy común la falta de mantenimiento
- En redes de vapor selección, mantenimiento inadecuado de trampas de vapor y más grave la falta de recuperación de condensados donde se pierde el calor y el fluido agua condensada y las pérdidas de dinero en el tratamiento y adecuación del agua usada
- Para hornos una distribución inadecuada del flujo de gases dentro del horno.
- Falta de recuperación de calor o energía térmica de los gases de combustión saliendo por falta de intercambiadores para calentar agua o aire
- Procesos de combustión ineficientes. Estos procesos ineficientes pueden ser causados por una proporción inadecuada entre el aire y combustible (operación con exceso de gas o de aire) o por una mala mezcla debido a daños internos en el quemador.

Claves Para Mejorar la Eficiencia Energética en Hornos

Algunos consejos ayudan a optimizar tus procesos de combustión son:

- Monitorear la temperatura en la cara fría del horno, o paredes de paredes las calderas pared de los aislamientos y revisa minuciosamente que no se tengan puntos o áreas calientes. La temperatura el rango de temperaturas debe un ideal de unos 40°C a máximo 60°C para disminuir pérdidas de calor y el factor de riesgo de quemaduras a personas
- Analizar periódicamente la composición de los gases de combustión del horno y caldera asegurándose mediante ajustes pertinentes al quemador de mantener los

valores recomendados esperados de Exceso de Aire según el proceso y la composición de gases en sus rangos oxígeno, CO₂ y CO. Verificando que se cumpla el factor de combustión EPA.

- Revisar periódicamente que el flujo de aire combustión y de combustible estén en una proporción buscando su cercanía al punto estequiométrica. Esto normalmente se verifica mediante el exceso de aire requerido para cada combustible, debido a la dificultad de medir el aire de entra y en algunos casos el combustible
- Revisar al menos dos veces al año que los quemadores estén en buen estado y no presenten daños. Establecer ventanas de mantenimientos al sistema de combustión.
- Evitar infiltraciones de aire frío al interior del horno que puedan afectar la eficiencia del proceso. Precalentar el aire de secado con gases de combustión saliendo

REFERENCIAS

1. Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Corantioquia; Universidad de Antioquia, 2019
2. Gaffert G. A. Centrales de Vapor Figura 157 Pg 204 Ed Reverte S. A.
3. EPA 40 CFR Ch1 (7-1-09 Ed) pg156
4. E. Monfort y Otros. Estudio de la combustión en hornos industriales de fabricación de baldosas cerámicas. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) España.
5. Consultado en 2026 en <https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficien>
6. CHAJNE F, Farid y HILL B, Allan. Proceso de la combustión y la metodología para la realización de masa y energía de algunos procesos. Cuadernillo 18. CIDI, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellin, 1992
7. Fuente base: Garcia Sanchez Luis E (lgarcia@cdtdegas.com) Mediciones para la evolución de la eficiencia de combustión en equipos generadores de vapor. , pg 10 Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas
8. Área Metropolitana del Valle de Aburra, Universidad Pontificia Bolivariana Propuesta de modificación resolución metropolitana 912 de 2017
9. RESOLUCIÓN METROPOLITANA 1371 del 23 junio de 2022, Área Metropolitana del Valle del Aburrá
10. ASME PTC 4-2013 Revision of ASME PTC 4-2008- Fired Steam Generators Performance Test Codes. American National Standard200
11. TESTO SE & CO. KGAA, Guía práctica Análisis de gases de la combustión industrial. Guía para la medición de emisiones y procesos, 3ª edición revisada 2018
12. ASME PTC 4-2013 Revision of ASME PTC 4-2008)
13. Área Metropolitana del Valle de Aburra, Universidad Pontificia Bolivariana, Análisis de potencial de ahorro por equipo, Contrato de ciencia y tecnología n° 1179 de 2018

14. ANDI, EEPP, M., & UPB. Guías Para El Uso Racional De Energía Por Procesos En La Industria, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín 1998.
15. SAACKE, Pocket Formula Guide
16. ÇENGEL, Yunus A . BOLES, Michael A, TERMODINÁMICA, The McGraw-Hill 7E 2012
17. AKZO ENERGY CONSULTANTS, Is good money going up in smoke? 1982
18. BAUKAL, C The John Zink, Combustion Handbook, CRC Press, 2001.
19. PAYNE W, THOMPSON R, Efficient Boiler Operations Sourcebook, TFP ed., 1996
20. <https://www.nutecbickley.com/es/newsroom/articulos/como-interpretar-analisis-gases-de-horno>
21. <https://askfilo.com/user-question-answers-smart-solutions/the-orsat-analysis-of-the-flue-gas-from-a-boiler-house-3431363637313036>

LA FACULTAD NACIONAL DE MINAS EN PERSPECTIVA HISTÓRICA Y DE FUTURO

Eva Cristina Manotas Rodríguez

Ingeniera administradora e industrial

ecmanota@unal.edu.co

Resumen: Estas notas, preparadas desde la decanatura de la Facultad, se ofrecen en la Revista SAI con motivo de la conmemoración de los 139 años de la Facultad Nacional de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Más que un aniversario, representa el reconocimiento a una historia de excelencia en la formación ética, técnica y social de ingenieros comprometidos con el desarrollo territorial y el bienestar colectivo del país.

Fundada bajo los principios de Pedro Nel Ospina y Tulio Ospina, la Facultad ha priorizado valores como la honradez, disciplina y compromiso con el bien común. Su comunidad académica —profesores, estudiantes, egresados y aliados— constituye su mayor fortaleza. Los docentes destacan por su rigor investigativo y formativo, los estudiantes por su talento y solidaridad (reforzada por iniciativas como Minas Contigo), y los egresados por su liderazgo profesional a través de ADEMINAS.

Con cerca de 7.500 estudiantes, 12 pregrados y 44 posgrados, la Facultad ha crecido notablemente manteniendo su vocación pública. Hoy proyecta una ingeniería sostenible, internacionalizada y conectada con los territorios, capaz de liderar transformaciones sociales responsables y construir un país más justo y solidario.

Palabras clave: Ingeniería, Universidad Nacional, Aniversario, Perspectivas, Futuro, Logros

139 AÑOS DE INGENIERÍA, TERRITORIO Y COMPROMISO SOCIAL.

La conmemoración de los 139 años de la Facultad Nacional de Minas de la Universidad Nacional de Colombia representa mucho más que un aniversario institucional. Es una oportunidad para reconocer una historia profunda de formación, ética, trabajo riguroso y compromiso con el desarrollo territorial y social del país, así como para proyectar el sentido de la ingeniería que demanda el presente y el futuro.

Desde su creación, la Facultad ha sido un actor fundamental en la construcción de infraestructura, conocimiento científico y capital humano, aportando de manera decisiva al progreso regional y nacional. A lo largo de más de un siglo, ha formado generaciones de

ingenieras e ingenieros que no solo dominan la técnica, sino que comprenden su papel como agentes de transformación social.

RAÍCES ÉTICAS Y LEGADO FUNDACIONAL

La historia de la Facultad Nacional de Minas se sustenta en una sólida base ética y cívica, impulsada por sus fundadores Pedro Nel Ospina y Tulio Ospina, quienes concibieron una institución en la que la formación técnica debía estar acompañada por valores como la honradez, la disciplina, la sobriedad y el compromiso con el bien común

En los estatutos fundacionales se promovió una filosofía educativa que trascendía el aula, orientando el comportamiento del estudiante tanto dentro como fuera de la institución. En palabras de Tulio Ospina, pronunciadas en 1888, el ejercicio digno de la ingeniería requería carácter, energía moral y disposición para enfrentar los desafíos naturales y sociales del territorio colombiano. Este ideario continúa vigente y constituye una guía para las generaciones actuales.

COMUNIDAD ACADÉMICA: EL CORAZÓN DE LA FACULTAD

La fortaleza de la Facultad de Minas reside, ante todo, en su comunidad académica. Profesores, estudiantes, egresados, personal administrativo y aliados estratégicos conforman una familia institucional unida por la rectitud, el trabajo colaborativo y la vocación de servicio.

Los profesores representan el patrimonio más valioso de la Facultad. Su rigor científico, liderazgo en investigación y compromiso con la docencia y la extensión han impactado a miles de egresados y han contribuido a la transformación de múltiples territorios del país. Su labor formadora deja huellas profundas que trascienden el conocimiento técnico, marcando vidas y proyectos profesionales

En reconocimiento a esta trayectoria, en 2025 y 2026 se otorgaron distinciones por docencia excepcional, investigación meritoria, excelencia académica, extensión solidaria y vida dedicada a la universidad. Destaca, entre ellas, el nombramiento como profesor emérito del profesor Farid Chejne, símbolo de una vida de compromiso con la educación pública y la sociedad

Los estudiantes son, asimismo, una expresión viva de esperanza y talento. Su creatividad, solidaridad y excelencia académica se reflejan en logros locales, nacionales e internacionales. Programas de acompañamiento entre pares, como Minas Contigo, han demostrado que la construcción de comunidad es una estrategia clave para reducir la deserción y fortalecer la permanencia estudiantil

EGRESADOS, ALIADOS E INTERNACIONALIZACIÓN

Los egresados de la Facultad constituyen su representación más visible y su legado en la sociedad. A través de organizaciones como ADEMINAS, mantienen un vínculo activo con la institución, aportando liderazgo profesional, acompañamiento a nuevas generaciones y compromiso con el desarrollo sostenible. Su impacto se reconoce no solo por su excelencia técnica, sino por su integridad humana y su capacidad de promover la vida, el trabajo colaborativo y la innovación social

La Facultad ha fortalecido de manera significativa su proyección internacional, estableciendo relaciones académicas con instituciones de Europa, Australia y América, y consolidando alianzas estratégicas con universidades y centros de investigación. Estas conexiones amplían horizontes, promueven la cooperación científica y permiten situar a la ingeniería colombiana en diálogos globales relevantes

De manera complementaria, el apoyo de fundaciones, entidades públicas y organizaciones privadas ha sido crucial para acompañar procesos de inclusión, reconciliación y superación de brechas sociales, económicas y culturales, reafirmando el carácter solidario de la Facultad

CRECIMIENTO, RESILIENCIA Y VISIÓN DE FUTURO

De recibir apenas 20 estudiantes en sus inicios, la Facultad Nacional de Minas pasó a albergar cerca de 7.500 estudiantes, con 12 programas de pregrado y 44 programas de posgrado, provenientes de todas las regiones del país. Este crecimiento ha estado acompañado de procesos de adaptación, resiliencia institucional y renovación constante frente a los desafíos de la sociedad contemporánea.

Hoy, la Facultad asume una visión clara: consolidar una ingeniería conectada con el territorio y el mundo, capaz de responder a problemáticas complejas con soluciones sostenibles, contextualizadas y socialmente responsables. Este enfoque reafirma el compromiso histórico de formar profesionales que lideren transformaciones significativas y contribuyan al bienestar colectivo.

Celebrar 139 años implica cerrar un ciclo y abrir una nueva etapa, con la convicción de que la ingeniería, cuando se fundamenta en valores, conocimiento y sentido humano, continúa siendo un motor esencial para la construcción de un país más justo, solidario y sostenible.

INSTRUCCIONES PARA PUBLICAR EN LA REVISTA SAI**Nombres y apellidos de los autores***Profesiones de los autores y afiliación**Correos electrónicos*

Resumen: Incluir un resumen de no más de 200 palabras

Palabras clave: Palabra Clave 1, Palabra Clave 2, Palabra Clave 3, Palabra Clave 4, Palabra Clave 5,

1. 1CONTENIDO**1.1 TIPO DE ARTÍCULOS**

Queremos publicar en cada edición:

- Artículos con opiniones, ensayos y reflexiones de fondo sobre temas esenciales y vitales para la ingeniería y la arquitectura, los proyectos importantes y los asuntos de importancia.
- Notas históricas, crónicas, notas sobre personajes importantes, sobre empresas y entidades, y sobre proyectos importantes, para registrar hitos de nuestras profesiones, de sus proyectos y de la actividad empresarial e institucional.
- Notas culturales que ilustren y amplíen la visión interdisciplinar e integral y que destaquen los ricos aspectos estéticos, artísticos, literarios, históricos que dan calidad de vida a la región y a las actividades de nuestras profesiones.
- Notas técnicas y científicas ilustrativas, que destaquen y divulguen los avances en la ciencia, en la tecnología, en el estado del arte de los temas que atañen a nuestras profesiones.
- Artículos técnicos y científicos que se refieran a estudios, investigaciones, avances, desarrollos, sean originales o de divulgación. En el primer caso, serán sometidos a revisión de pares.

Los trabajos deben ser originales de los autores.

Nuestra revista será publicada digitalmente, con la posibilidad futura de imprimir cantidades limitadas, en caso de lograr el patrocinio respectivo, para distribución limitada. Nuestra idea es evolucionar continuamente con la revista, registrarla dentro de los sistemas que acogen este tipo de revistas, para llevarla cada vez más a lograr una posición valiosa en nuestro medio, como un vehículo de expresión de todos aquellos que deseen compartir sus

conocimientos, experiencias valiosas y reflexiones en temas relacionados con nuestro gremio y nuestras profesiones y sus proyecciones y logros. Igualmente deseamos que sea un medio para divulgar a nuestros empresarios y a sus proyectos comerciales y negocios, a través de la publicidad, con la idea también de generar algunos recursos para la SAI, además de cubrir los costos que pueda tener este esfuerzo editorial.

1.2 INSTRUCCIONES VARIAS

El contenido debe elaborarse con este formato en tipo de letra Times New Roman, a un solo espacio.

Las figuras deben ir numeradas consecutivamente en el siguiente formato, colocado debajo de la figura

Figura xxx. Nombre origen (si no es de elaboración propia)

Las tablas deben ir numeradas consecutivamente en el siguiente formato, colocado antes de la tabla

Tabla yyy. Nombre origen (si no es de elaboración propia)

Las tablas deben entregarse en formato editable, para que los editores puedan revisar que su formato se alinee bien con la revista. No se aceptan tablas demasiado extensas (de más de una página) y deben caber en la disposición vertical que tiene la revista.

Si se desea señalar referencias numeradas y listadas en las referencias finales, usar [ZZ] este formato, vigilando que el número corresponda a la de la lista de referencias al final. En lo posible listar primero las referencias señaladas en el texto

Cada autor deberá firmar una autorización de derechos de autor según formato entregado por la SAI

2. CONCLUSIONES

Señalar las conclusiones significativas.

REFERENCIAS

Deben incluirse al menos tres referencias

[1] Autores, Título del trabajo, fuente.

[2] Para referencias basadas en internet y páginas web señalar la fuente, el enlace en versión corta y la fecha de consulta



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913



Medellín, Colombia - CRA 43B # 16-95 OF. 510-2



SAI@SAI.ORG.CO



@saiantioquia



saiantioquia.com