

REVISTA SAI

VOL. 4, NO.6

JUNIO 2025

Intercambio Vial Aeropuerto

Puerto Antioquia

Carretera 5G

Túnel del Toyo

TÚNEL GUILLERMO
GAVIRIA ECHEVERRI



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

www.sai.org.co



Palabras del **PRESIDENTE SAI**

GERARDO DOMÍNGUEZ GIRALDO

Nos enorgullece presentar una nueva edición de nuestra Revista Técnica, un espacio que, más allá de la divulgación académica, representa el compromiso de nuestra institución con la promoción del conocimiento riguroso, el pensamiento crítico y las buenas prácticas en la ingeniería y la arquitectura.

La SAI, como cuerpo consultivo del departamento y referente gremial de tradición centenaria, tiene la responsabilidad indelegable de velar por el ejercicio ético, técnico y profesional de nuestras disciplinas. En tiempos en los que el desarrollo urbano, las obras de infraestructura y los retos climáticos demandan respuestas integrales y responsables, nuestra voz debe ser clara, firme y propositiva.

Quiero felicitar y agradecer sinceramente a los colegas que participaron activamente en esta edición con sus artículos, reflexiones y proyectos. Cada aporte enriquece este legado colectivo que es la SAI, y deja huella en el camino que estamos construyendo juntos.

Invito a todos los asociados, especialmente a las nuevas generaciones, a sumarse a este ejercicio de construcción gremial y conocimiento compartido. Las puertas de la Revista Técnica están abiertas para recibir sus ideas, investigaciones, estudios de caso y experiencias profesionales.

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 seis, en el cual contamos con 11 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 se va perfilando 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 comunicador y periodista 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 número seis, 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 2025, para el número siete, antes del 15 de septiembre y para el primer semestre de 2026, número ocho antes del 15 de abril de ese años.

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.

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 sexto 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
Mónica Isabel Palacio Salazar**

DIAGRAMACIÓN

**Julián Pérez Cardona
Daniel Alejandro Monsalve Bedoya**

Medellín, Colombia



(+57) 319 289 6603



CRA 43B # 16-95 OF. 510-2



SAI@SAI.ORG.CO



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

Tabla de Contenido

LOS MODELOS REOLÓGICOS

Tomás Castrillón Oberndorfer Página 1

LA IMPORTANCIA DE LA FORMACIÓN ACADÉMICA EN TEMAS FERROVIARIOS EN COLOMBIA

Enrique Posada Restrepo Página 19

REACTORES NUCLEARES DE IV GENERACIÓN Y TECNOLOGÍAS DE COGENERACIÓN NUCLEAR

Herrera Cardona, Daniel Página 54

PLANTAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN EUROPA 2010 VS 2022

Ospina Ortiz, Walter Página 70

DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO

Esteban, Roa; Carlos, Valderrama; Jorge, Herrera Página 75

HACIA LA VIABILIDAD DE LOS PROYECTOS DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN COLOMBIA

Diego Gómez, PhD, Walter Ospina Ortiz, Enrique Posada Restrepo Página 92

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL ESTÁ CAMBIANDO EL MUNDO

Darío Valencia Restrepo Página 124

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LOS DESAFÍOS DE LA ACADEMIA CONTEMPORÁNEA: ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA ÉTICA

Juan Fernando Molina Del Valle Página 130

EL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE EN URABA

Jorge León Ruiz Ruiz Página 134

TERRITORIOS CONECTADOS: RETOS Y FUTURO DE LOS PUENTES EN COLOMBIA

Giovanny Sepúlveda Concha Página 140

ESTRUCTURACION Y EJECUCION DEL TREN DEL RIO – ENFOQUE ALTERNATIVO

Carlos Velásquez Página 156

LOS MODELOS REOLÓGICOS

Tomás Castrillón Oberndorfer

Ingeniero civil

tomascastrillon@hotmail.com

Resumen: En el análisis estructural, los algoritmos de cálculo exigen una idealización del comportamiento de los diversos elementos constitutivos de una obra de infraestructura. Con frecuencia, dichos elementos presentan un comportamiento viscoelástico, o sea que no cumplen con las condiciones impuestas por la elasticidad lineal. La reología es la rama de la Física que estudia el modo en que los materiales se deforman o fluyen en respuesta a fuerzas o tensiones aplicadas. Para los estudios analíticos, es necesaria entonces, la elaboración de modelos que se ajusten, de la mejor manera posible, a dicho comportamiento, utilizando, para el efecto, elementos, cuyo comportamiento es bien conocido como los que brinda el análisis dinámico elemental.

Palabras clave: Retracción, Encogimiento, Flujo Plástico, Modelos Analíticos. Viscoelasticidad.

1.- INTRODUCCIÓN

En la construcción de infraestructura, muchos materiales utilizados, como el concreto, Figura 1a, al ser sometidos a una carga permanente, muestran una deformación instantánea elástica, seguida por una deformación dependiente del tiempo denominada flujo con la forma típica mostrada en la. Figura. 1.

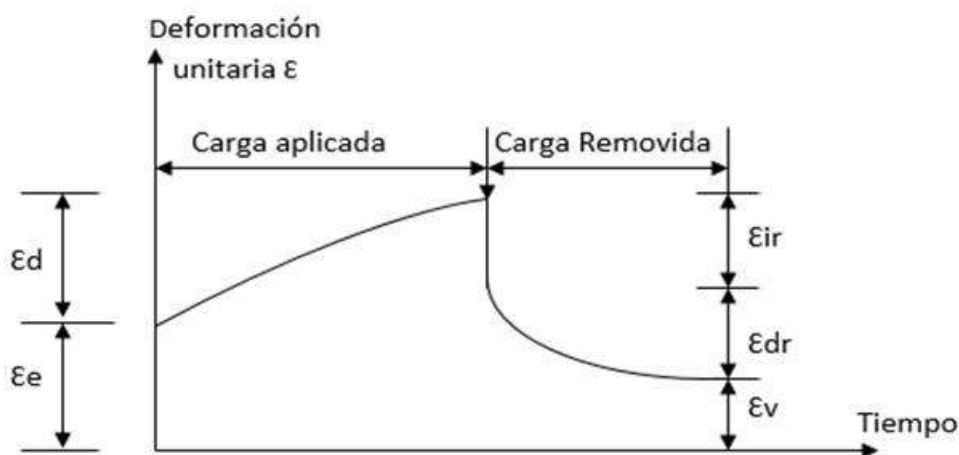


Figura 1a

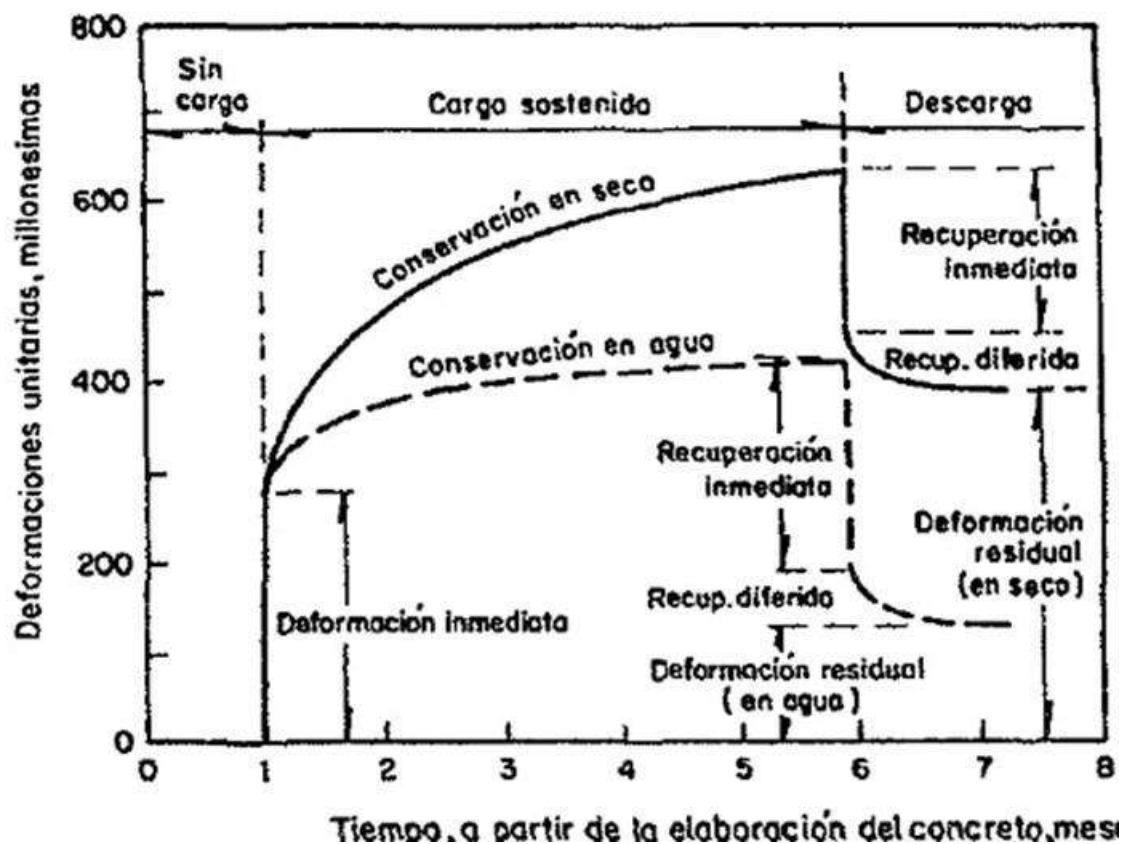


Figura 1b

Figura 1 Comportamiento de un material viscoelástico

Fuente. Las figuras en este artículo han sido organizadas por el autor extraídas de las referencias listadas al final

En síntesis, en la Figura 1 se presenta una curva típica deformación – tiempo, para un material viscoelástico. Cuando se aplica una carga, se presenta una deformación instantánea, ϵ_e , denominada deformación elástica.

Si la carga permanece, aumenta la deformación con el tiempo y pasa de ϵ_e a ϵ_d siendo ϵ_t la deformación total conformada así:

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_d \quad (1)$$

En donde ϵ_d es la deformación diferida o flujo plástico.

Si la carga se retira, se presenta una recuperación instantánea ϵ_{ir} , seguida de una recuperación diferida ϵ_{dr} quedando, al final, una deformación permanente llamada deformación viscosa ϵ_v , no recuperable.

Se tiene entonces:

$$\epsilon_t = \epsilon_{ir} + \epsilon_{dr} + \epsilon_v \quad (2)$$

Aunque lo más común es que la recuperación instantánea ϵ_{ir} , sea menor que la deformación elástica ϵ_e , o sea $\epsilon_{ir} < \epsilon_e$, se asume, con frecuencia, que son iguales y entonces, igualando las ecuaciones 1 y 2, se obtiene:

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_d = \epsilon_{ir} + \epsilon_{dr} + \epsilon_v$$

Poniendo entonces $\epsilon_{ir} = \epsilon_e$

queda:

$$\epsilon_d = \epsilon_{dr} + \epsilon_v \quad (3)$$

2.- LA LEY DE NEWTON PARA FLUJOS VISCOSOS

Se considera que para los sólidos la resistencia al corte depende de la relación tensión-deformación correspondiente: $\tau \sim \gamma$.

Para los fluidos, se tiene también para el corte, la relación $\tau \sim \frac{dv}{dt}$, proporcional a la variación de la velocidad.

La propiedad de los fluidos para resistir la deformación por corte es la viscosidad.

En la Figura 2, se ilustra un movimiento laminar, o sea, un flujo paralelo de un fluido, en donde todas las partículas se mueven en la misma dirección, pero las diferentes capas, o niveles, tienen diferentes velocidades $u(y)$, Figura 2b.

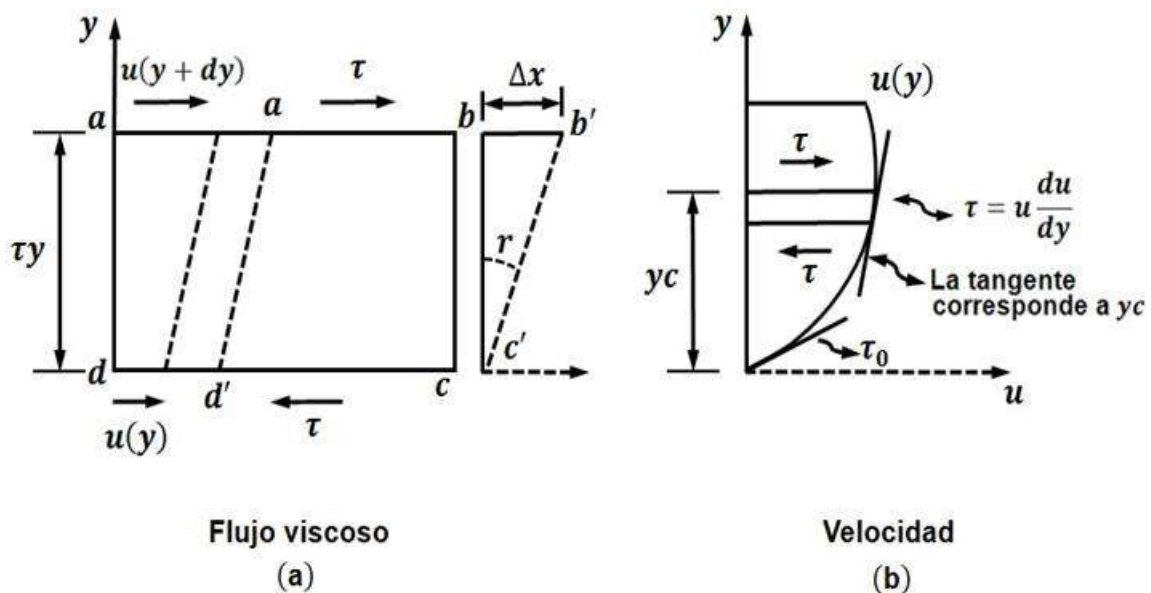


Figura 2 Movimiento laminar

Luego de un lapso pequeño Δt , el rectángulo a, b, c, d Figura 2(a), se transforma en a', b', c', d'. Si la velocidad es función de y, u(y), Figura 2(b), se tiene:

$$\overline{aa'} = \overline{bb'} = u(y + \delta y) \Delta t$$

$$\overline{cc'} = \overline{dd'} = u(y) \Delta t$$

Se define como deformación unitaria por corte, a:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{\delta y} = \frac{u(y + \delta y)\Delta t - u(y)\Delta t}{\delta y} \quad (4)$$

Para valores “pequeños” de Δt , puede ponerse la deformación unitaria en función de su variación.

$$\gamma = \frac{d\gamma}{dt} \Delta t \quad (5)$$

Y entonces, igualando las ecuaciones 4 y 5, se obtiene:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{u(y + \delta y) - u(y)}{\delta y} \quad (6)$$

Luego, para “pequeños” valores de δy , se obtiene:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (7)$$

Ahora bien, la Ley de la Viscosidad de Newton, establece que la tensión de corte es proporcional a la rata de variación de la deformación, o sea:

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (8)$$

Siendo μ la Viscosidad Dinámica.

En la Figura 2-b, se muestra la variación de la velocidad, u(y). Para y=0, (superficie fija) sin deslizamiento, se tiene

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0}$$

Para un plano c, dado por y_c, Figura 2(b) se tienen las correspondientes fuerzas de corte actuantes. Para la superficie y=0 la fuerza debida a τ , que se considera uniforme, está dada por:

$$F_r = A\mu \left(\frac{du}{dy} \right)$$

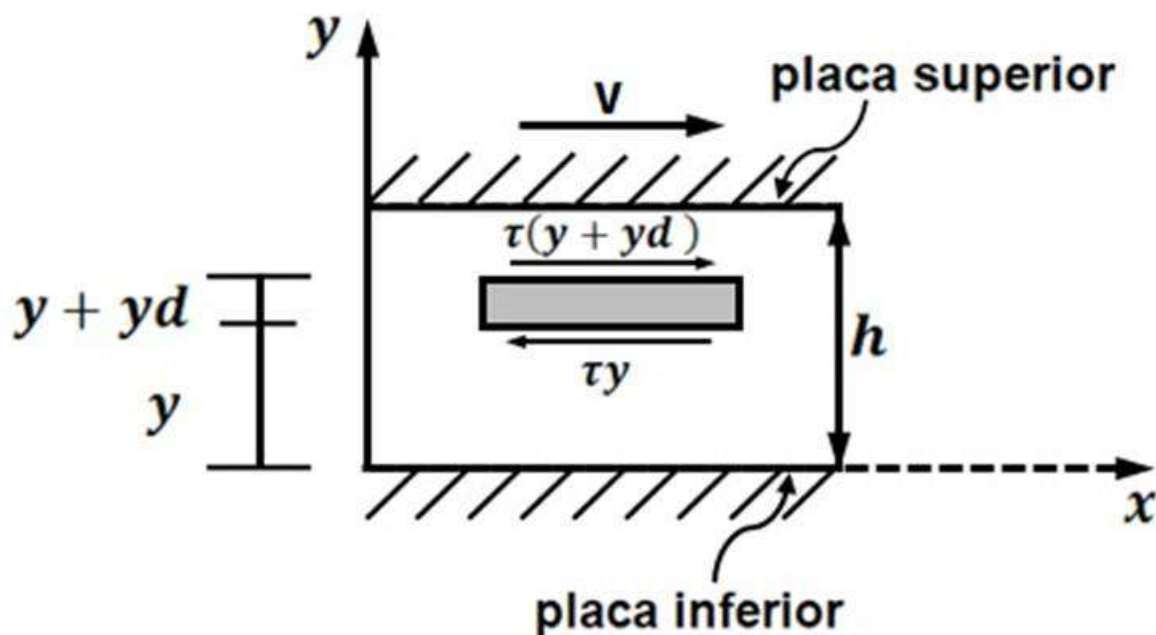
Siendo A un área específica de aplicación.

3.- EL FLUJO EN MEDIO DE 2 PLACAS PARALELAS.

Es interesante analizar el caso presentado en la Figura 3

Se tienen 2 placas paralelas separadas por una distancia h . Dicho espacio está ocupado por un fluido viscoso. La placa superior se desplaza con una velocidad V , mientras la placa inferior está fija.

Las interfases entre las placas y el fluido tienen las velocidades respectivas: Cero para la placa inferior y V para la superior.



Flujo entre 2 placas paralelas

Figura 3 Flujo entre dos placas paralelas

Para una h “pequeña”, se considera el flujo laminar y su velocidad no depende de x , ó sea, que se tiene: $u=u(y)$.

Considerando el elemento mostrado con las ordenadas $(y + dy)$, (y) , se tienen las tensiones de corte, dadas por $\tau(y + dy)$ y $\tau(y)$ y, además, si “ A ” es el área, la fuerza resultante sobre el elemento está dada por:

$$F = A [\tau(y + dy) - \tau(y)]$$

Para un flujo laminar estable, esta fuerza es nula, ó sea: τ es constante. Entonces según la ley de Newton.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \text{Constante}$$

Y también:

$$\frac{du}{dy} = C1$$

Integrando esta ecuación, se obtiene: $u = C1y + C2$. Las constantes se determinan utilizando las condiciones de borde $u(0) = 0$ y $u(h) = V$

De la primera condición.

$$0 = 0 + C2 \quad \therefore \quad C2 = 0$$

De la segunda condición $V = C1h \quad \therefore \quad C1 = \frac{V}{h}$

Y el “perfil” de la velocidad es:

$$u(y) = \frac{Vy}{h}$$

Distribución lineal y además, según la ecuación 8.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{V}{h} \quad (9)$$

Si el área de la placa superior es A la fuerza para moverla es.

$$F = \mu \frac{du}{dy} * A = \frac{A * \mu * V}{h}$$

Volviendo al volumen dado por a' , b' , c' , d' , Figura 4.

El plano dado por los puntos b y d , en contacto con la placa superior, se desplaza con la velocidad V . Se define un cambio de forma debida a la velocidad V , dado por la relación.

$$\epsilon_v = \frac{V \Delta t}{h} \quad (\text{Subíndice } v \text{ por viscoso})$$

La rata de cambio de ϵ con el tiempo es $\dot{\epsilon}$:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{h}$$

De donde:

De donde:

$$\tau = \mu \dot{\epsilon}$$

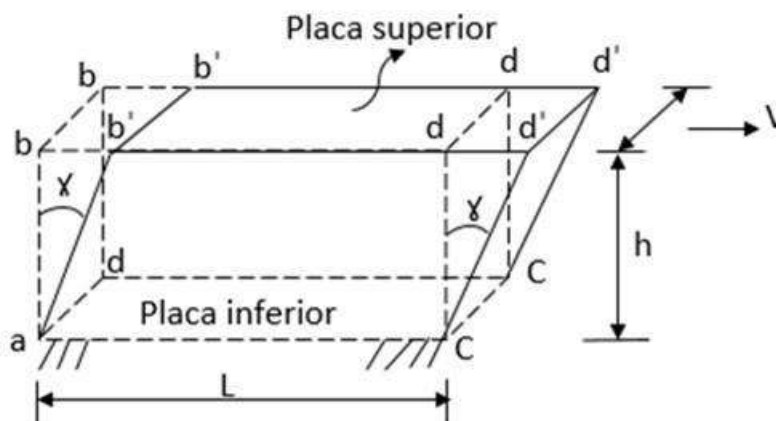


Figura 4. Deformación viscosa

Entonces, puede establecerse una relación Tensión- Deformación correspondiente, así:

$$\sigma_v = \lambda \dot{\epsilon}_v = \lambda \frac{d\epsilon_v}{dt} \quad (10)$$

Expresión que se considera conjuntamente con la relación:

$$\sigma_e = E \epsilon_e \text{ (Subíndice } e \text{ de elástico)} \quad (11)$$

que define el Módulo de Elasticidad.

4.- LOS MODELOS MATEMATICOS.

Recordando el Análisis Dinámico elemental, en donde se considera la fuerza elástica kx , proporcional a la deformación, y el amortiguamiento, proporcional a la velocidad, cx , la combinación de los modelos dinámicos se utiliza para plantear los modelos matemáticos que simulen el comportamiento de los materiales viscoelásticos.

Los elementos principales utilizados en estos modelos son: un resorte con módulo de elasticidad E y un amortiguador que representa el comportamiento viscoso, y se le asigna un coeficiente de fricción λ relacionado con el coeficiente de viscosidad μ medido en el laboratorio. En lugar de utilizar fuerza P y deformación correspondiente, x , se usan la tensión sigma, σ , y la deformación unitaria, ϵ .

Puede demostrarse, según Lenczner (ver referencias), que $\lambda = 3\mu$

4-1 EL MODELO DE MAXWELL

El modelo de Maxwell, conecta en serie los elementos elástico y viscoso como se ilustra en la Figura 5.

Se tiene entonces que la deformación unitaria es:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \quad (12)$$

Sustituyendo:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_e}{E} + \frac{\sigma_v}{\lambda} \int_0^t dt$$

En este modelo se tiene, además, que: $\sigma_e = \sigma_v = \sigma$ (13)

Luego: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\lambda}$ (14)

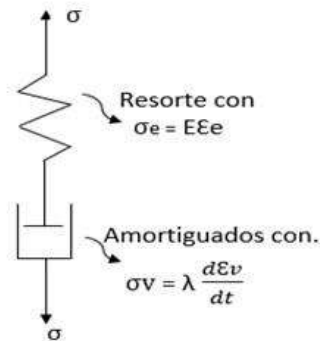
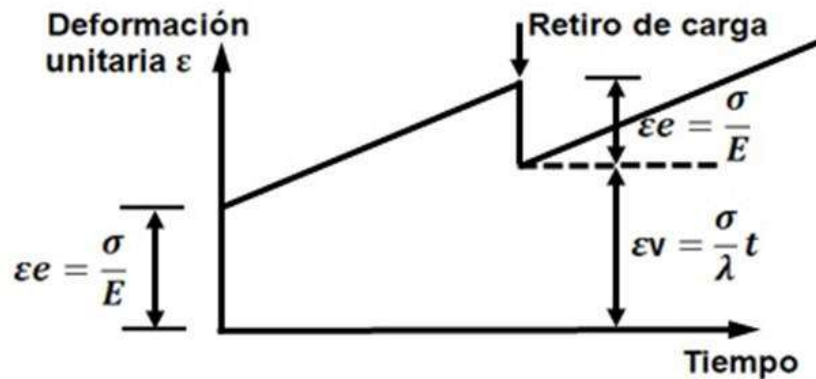


Figura 5 Modelo de Maxwell



Representación gráfica del modelo de Maxwell

Figura 6

4-2 EL MODELO DE KELVIN

Conectando el “resorte” y el “amortiguador” en paralelo se obtiene el modelo de Kelvin Figura 7.

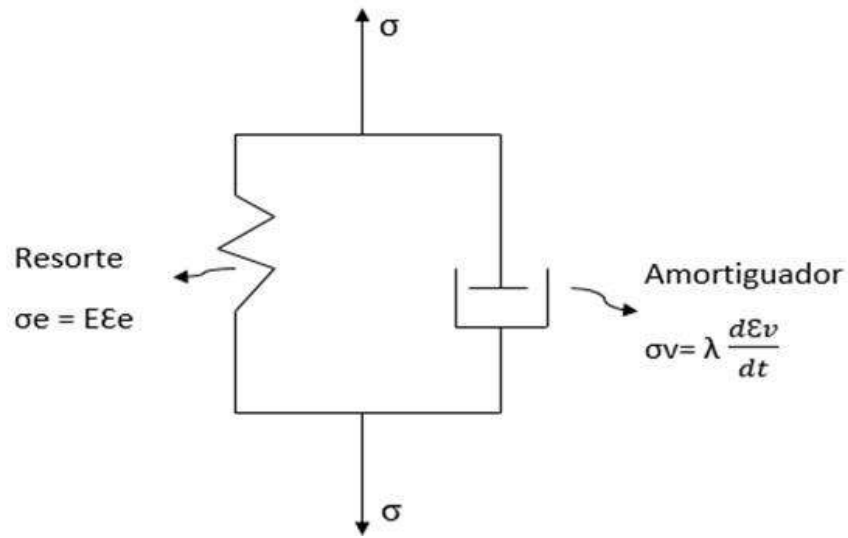


Figura 7 Modelo de Kelvin

Se tiene además:

$$\varepsilon = \varepsilon_e = \varepsilon_v \quad (15)$$

Y también:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (16)$$

Reemplazando:

$$\sigma = E\varepsilon + \lambda \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Y, si se separan las variables queda:

$$\frac{dt}{\lambda} = \frac{d\varepsilon}{\sigma - E\varepsilon}$$

Integrando:

$$-\frac{1}{E} \ln \frac{\sigma - E\varepsilon}{\sigma} = \frac{t}{\lambda}$$

Siendo $\ln$ = logaritmo neperiano.

Reagrupando.

$$\ln \frac{\sigma - E\varepsilon}{\sigma} = -\frac{Et}{\lambda}$$

Recordando la definición de logaritmo neperiano, $\ln$.

$$\Sigma e^{-\frac{Et}{\lambda}} = \sigma - E\varepsilon$$

$$\therefore \varepsilon = \frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{E} e^{-\frac{Et}{\lambda}}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 - e^{-\frac{Et}{\lambda}} \right] \quad (17)$$

Relación representada gráficamente en la Figura 8.

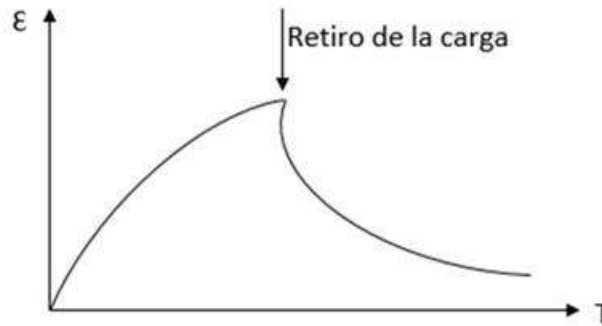


Figura 8 Modelo de Kelvin – Representación gráfica

Se ve, fácilmente, que los modelos de Maxwell y Kelvin difieren mucho de la forma gráfica mostrada en la Figura 1; se analiza, entonces, el modelo de Burger que combina los 2 modelos como se ilustra en la Figura 9.

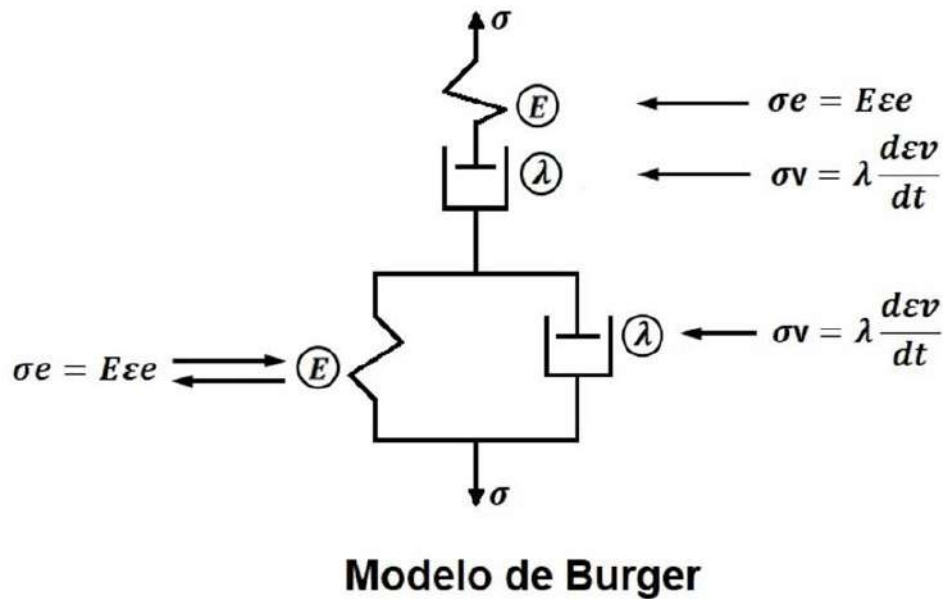


Figura 9

4-3 EL MODELO DE BURGER

Se obtiene combinando los modelos de Maxwell y Kelvin.

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\lambda} + \frac{\sigma}{E} \left[1 - e^{-\left(\frac{Et}{\lambda}\right)} \right] \\ \epsilon &= \frac{\sigma}{E} \left[2 + \frac{E}{\lambda} t - e^{-\left(\frac{Et}{\lambda}\right)} \right]\end{aligned}\quad (18)$$

Representando gráficamente en la Figura 10. Se ve que tiene relativamente una buena semejanza con el esquema mostrado en la Figura 1.

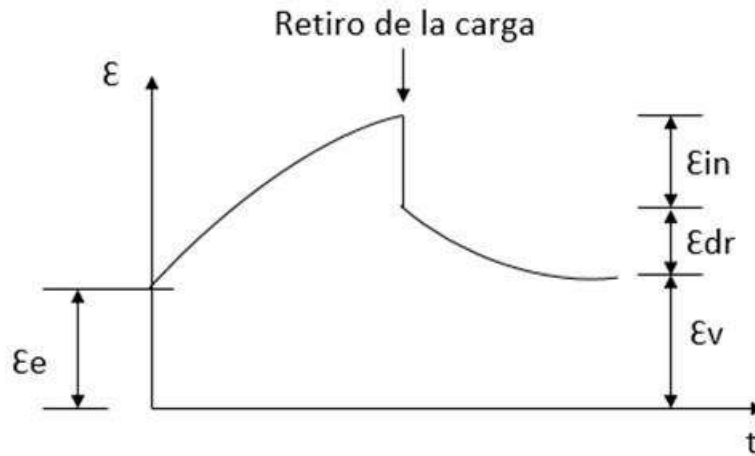


Figura 10 Modelo de Burger. Diagrama ϵ vs t

Se ha asumido que la recuperación instantánea es igual a la elástica $\epsilon_e = \epsilon_o$. Se observa que para $t = 0$.

$$\begin{aligned}\epsilon_o &= \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\lambda} t + \frac{\sigma}{E} \left[1 - \frac{1}{e^{\frac{Et}{\lambda}}} \right] \\ &= \frac{\sigma}{E} + 0 + 0 = \epsilon_e\end{aligned}$$

También por hipótesis $\epsilon_e = \epsilon_v$.

Donde:

ϵ_{ir} = Recuperación instantánea.

ϵ_{dr} = Recuperación diferida.

ϵ_v = Deformación viscosa remanente, no recuperable.

5.- CONSIDERACIÓN DEL FLUJO EN LA FLEXIÓN

En la Teoría Elemental de la Flexión en Vigas, considerando un elemento diferencial de viga, dx , con sección constante, sometido a un momento flector M , con la suposición de que las secciones planas, normales al eje longitudinal, permanecen planas, se demuestra de acuerdo a lo mostrado en las figuras 11 y 12, que:

$$\varepsilon = \frac{Y}{R}$$

Siendo: Y la distancia al eje neutro.

ε = Deformación unitaria a una distancia y del eje neutro Figura 12(b).

R = Radio de curvatura de la viga deformada Figura 12(a).

Además, la ecuación diferencial de la curva o deformada elástica, figura 11 es:

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y_m}{dx^2} \quad (19)$$

Siendo y_m = La deflexión de la viga.

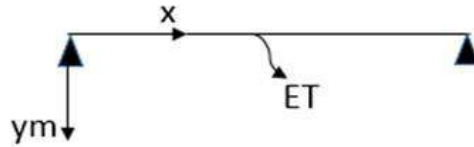


Figura 11 Flexión en vigas

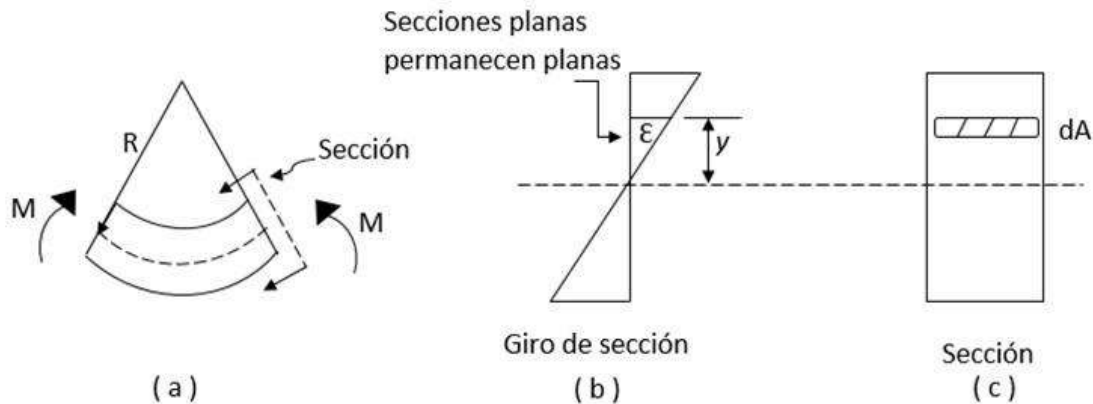


Figura 12 Relación de ε con y debida a M

5-1 EL MODELO DE MAXWELL

$$\text{Se tiene: } y_m = y_e + y_v \quad (20)$$

y_e = Componente elástica de la deflexión

y_v = Componente viscosa de la deflexión

Además:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \quad (12)$$

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (13)$$

Si R es igual al radio de curvatura, también se tiene:

Re = Radio de curvatura asociado con la deflexión elástica.

Rv = Radio de curvatura asociado con la deflexión viscosa.

Entonces:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{d^2 y_e}{dx^2}$$

$$\frac{1}{R_v} = \frac{d^2 y_v}{dx^2}$$

Considerando la ecuación 18, o sea: $\varepsilon = \frac{y}{r}$ (Los puntos superiores indican derivadas respecto al tiempo).

$$\varepsilon_e = y \frac{d^2 y_e}{dx^2} \longrightarrow \dot{\varepsilon}_e = y \frac{\partial^2 \dot{y}_e}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_v = y \frac{d^2 y_v}{dx^2} \longrightarrow \dot{\varepsilon}_v = y \frac{\partial^2 \dot{y}_v}{\partial x^2}$$

Se utilizan Derivadas Parciales porque las flechas también dependen del tiempo

Derivando también respecto al tiempo: $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$

$$\text{De la (12): } \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_v \quad (21)$$

$$\text{De la (11): } \varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\text{Y } \dot{\varepsilon}_e = \frac{\dot{\sigma}}{E}$$

De la 10: $\dot{\varepsilon}_v = \frac{\sigma_v}{\lambda} = \frac{\sigma}{\lambda}$ para la componente viscosa y según la ecuación (21):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\dot{\sigma}}{\lambda} = y \frac{\partial^2 \dot{y}_e}{\partial x^2} + y \frac{\partial^2 \dot{y}_v}{\partial x^2}$$

De donde teniendo en cuenta la ecuación (20):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\lambda} = y \frac{\partial^2 \dot{y}_m}{\partial x^2} \quad (22)$$

Multiplicando ambos lados por $y dA$, siendo dA un elemento diferencial de área, Figura 12 (c), e integrando para y .

$$\frac{1}{E} \int \dot{\sigma} \cdot y dA + \frac{1}{\lambda} \int \sigma \cdot y dA = \frac{\partial^2 y_m}{\partial x^2} \int y^2 dA \quad (23)$$

Notando que y_m depende solo de x Figura 11 y considerando, además, que el diferencial de fuerza interna es $df = \sigma dA$ y, por lo tanto, el diferencial de momento respecto al eje neutro de esta fuerza es $dM = ydf \therefore dM = \sigma y dA$.

$$\int \sigma \cdot y dA = M \quad y \quad \int \dot{\sigma} \cdot y dA = \dot{M} \quad (24)$$

Además:

$$\int y^2 dA = I \quad \text{Momento de inercia del área de la sección transversal.}$$

Llevando las ecuaciones (24) a la ecuación (23)

$$\frac{\dot{M}}{E} + \frac{M}{\lambda} = I \frac{\partial^2 y_m}{\partial x^2}$$

$$\text{ó} \quad \dot{M} + \frac{E}{\lambda} M = EI \frac{\partial^2 y_m}{\partial x^2} \quad (25)$$

Ecuación diferencial de una viga viscoelástica utilizando el modelo de Maxwell. Integrando primero respecto al tiempo.

$$EI \frac{\partial^2 y_m}{\partial x^2} = \int \frac{dM}{dt} dt + \frac{E}{\lambda} \int_0^t M dt = M + \frac{E}{\lambda} \int_0^t M dt \quad (26)$$

Integrando dos veces respecto a x .

$$EI y_m = \iint M dx dx + \frac{E}{\lambda} \iint \left(\int_0^t M dt \right) dx dx \quad (27)$$

Para una carga constante, M no depende del tiempo.

Luego: $\int M dt = M \cdot t$

$$Y \quad EI y_m = \iint M dx dx + \frac{E}{\lambda} t \iint M dx dx$$

Recordando la ecuación diferencial de la elástica en vigas:

$$EI = \frac{d^2 y}{dx^2} = M \quad \therefore \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

Integrando 2 veces:

$$\iint M dx dx = EI y_i$$

Siendo y_i = Deflexión elástica instantánea

De donde, teniendo en cuenta la ecuación 27

$$y_m = y_i + \frac{E}{\lambda} t y_i$$

$$y_m = y_i \left(1 + \frac{E}{\lambda} t\right)$$

Ecuación de la deflexión viscoelástica diferida utilizando el modelo de Maxwell.

5-2 EL MODELO DE KELVIN

Como se ha visto, se tiene, por hipótesis:

$$y_k = y_e = y_v \quad \text{k de Kelvin}$$

y_k es la flecha en un punto, además:

$$\epsilon = \epsilon_e = \epsilon_v \quad (14)$$

$$Y \quad \sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (15)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 19:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{d^2 y_e}{dx^2}$$

$$\frac{1}{R_v} = \frac{d^2 y_v}{dx^2}$$

Además

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_e &= y \frac{d^2 y_e}{dx^2} \longrightarrow y \frac{d^2 y_k}{dx^2} \\ \epsilon_v &= y \frac{d^2 y_v}{dx^2} \longrightarrow y \frac{d^2 y_k}{dx^2} \end{aligned} \right\} \quad \text{Por ser } y_k = y_e = y_v$$

También según la ecuación (11) $\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} \therefore \sigma_e = E\epsilon_e$

Y según la ecuación (10);

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{\sigma_v}{\lambda} \therefore \sigma_v = \lambda \dot{\epsilon}_v$$

Llevando estas relaciones a la ecuación 15.

$$\sigma = E\epsilon_e + \lambda \dot{\epsilon}_v$$

$$Y \quad \sigma = Ey \frac{\partial^2 y_k}{\partial x^2} + \lambda y \frac{\partial^2 \dot{y}_k}{\partial x^2} \quad (28)$$

Multiplicando por $y dA$ e integrando como se ve para el modelo Maxwell.

$$\int \sigma y dA = E \frac{\partial^2 y_k}{\partial x^2} \int y^2 dA + \lambda \frac{\partial^2 \dot{y}_k}{\partial x^2} \int y^2 dA$$

O sea

$$M = EI \frac{\partial^2 y_k}{\partial x^2} + \lambda I \frac{\partial^2 \dot{y}_k}{\partial x^2} \quad (29)$$

M = Momento interno.

Ecuación diferencial de la elástica de una viga viscoelástica según el modelo de Kelvin.

Integrando 2 veces respecto a x .

Integrando 2 veces respecto a x .

$$EI y_k + \lambda I \dot{y}_k = \iint M dx dx = \iint EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx dx$$



Depende de la carga inicial

$$\therefore EI y_k + \lambda I \dot{y}_k = EI y_i \quad (30)$$

O sea

$$y_k + \frac{\lambda}{E} \frac{dy_k}{dt} = y_i$$

Agrupando:

$$y_i - y_k = \frac{\lambda}{E} \frac{dy_k}{dt}$$

Separando variables:

$$\frac{dy_k}{y_i - y_k} = \frac{E}{\lambda} dt$$

Integrando: $\int \frac{dy_k}{y_i - y_k} = \int \frac{E}{\lambda} dt$

Recordando que: $\int \frac{dx}{a - x} = -\int \frac{dx}{x - a} = \ln(x - a)$

Se obtiene:

$$-\ln(y_i - y_k) = \frac{E}{\lambda} t + \text{constante}$$

Para $t = 0$, la respuesta de la amortiguación es lenta, luego se considera que y_k :

$y_k = 0$. Luego la constante $= -\ln y_i$, y entonces

$$\frac{E}{\lambda} t - \ln y_i = -\ln(y_i - y_k)$$

$$\frac{E}{\lambda} t = -\ln(y_i - y_k) + \ln y_i = \ln \frac{y_i}{y_i - y_k}$$

Recordando, de nuevo, la definición de $\ln$.

$$e^{\frac{E}{\lambda} t} = \frac{y_i}{y_i - y_k}$$

$$\therefore (y_i - y_k) e^{\frac{E}{\lambda} t} = y_i$$

Al final para el modelo de Kelvin:

$$y_k = y_i \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda} t}\right) \quad (31)$$

5-3 EL MODELO DE BURGER

Para el modelo Burger, se tiene entonces.

$$y = y_m + y_k$$

Y al final:

$$y = y_i \left(2 + \frac{E}{\lambda} t + e^{-\frac{E}{\lambda} t} \right) \quad (32)$$

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el desarrollo de los procesos de análisis, propios de los proyectos de diseño estructural, es preciso recurrir a idealizaciones o modelaciones de los elementos integrantes, para poder utilizar los diversos algoritmos de cálculo que se han desarrollado.

Dichas idealizaciones tratan de simular, de la mejor manera posible, el comportamiento de los elementos.

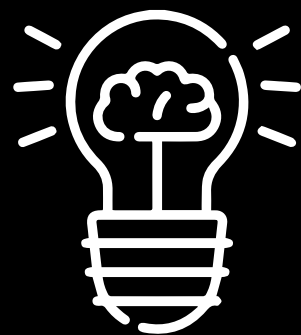
Es necesario que el usuario de los procedimientos sea muy consciente de las limitaciones propias de las hipótesis asumidas.

También, es preciso disponer, con la mayor aproximación posible, de los parámetros de diseño de los materiales constitutivos de los elementos.

REFERENCIAS.

- [1]. American Concrete Institute. ACI 209.2R-208. “Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete”.
- [2]. American Concrete Institute. ACI 209R-92. “Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures”.
- [3]. Kleinlogel A. “Influencias Físico Químicas sobre los Hormigones en Masa y Armados”. Publicaciones Técnicas LABOR.
- [4]. Lenczner D. “Movements in Buildings”. Pergamon Press. Second Edition. 1981.
- [5]. “Manual Técnico Práctico del Hormigón”. “Beton Kalender”. Librería El Ateneo.
- [6]. Schleicher F. “Manual del Ingeniero Constructor”. Editorial Labor. 1960.

Somos CENTRO DE PENSAMIENTO



La **SAI** posee un **Centro de Pensamiento**, conformado por expresidentes, socios y diversos colaboradores de la institución, quienes se reúnen periódicamente para estudiar y analizar los temas relevantes para la ingeniería y la arquitectura de la región y del país. Como resultado de este trabajo, el Centro de Pensamiento elabora publicaciones y estudios especializados.



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

La Fuerza de la Razón - 1913

LA IMPORTANCIA DE LA FORMACIÓN ACADÉMICA EN TEMAS FERROVIARIOS EN COLOMBIA

Enrique Posada Restrepo

*Ingeniero mecánico UPB; BS y Máster en ingeniería mecánica, University of Maine, Orono, Maine, EUA
eposadar@yahoo.com*

Resumen: Se presentan las bases para señalar la importancia de contar con un sistema de formación académica profesional y tecnológica en los temas relacionados con el transporte ferroviario en Colombia. El Hub Ferroviario Nacional es una iniciativa que puede contribuir positivamente para impulsar el establecimiento de programas y actividades educativas y de formación, para atender las grandes necesidades que se van a generar con la creciente dinámica del sector ferroviario, cuyos realidades y proyectos se describen sumariamente en este artículo. Se hace un recorrido por algunos de los sistemas educativos en el mundo en este sector y se presentan algunas propuestas para desarrollar estos sistemas en Colombia.

Palabras clave: Ferrocarriles, Colombia, Educación, Programas, Experiencias internacionales, Filosofía educativa, Hub Ferroviario Nacional

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia se cuenta con la intención de desarrollar los sistemas ferroviarios. Es así como se han venido estableciendo planes maestros ferroviarios a nivel nacional y a nivel regional, especialmente en el departamento de Antioquia, con la Promotora del Ferrocarril de Antioquia. De alguna manera los distintos proyectos se van a ir materializando en el tiempo, ojalá asignando a los mismos suficiente importancia y prioridad. Para su pleno desarrollo es vital contar con recurso humano debidamente formado en una gran variedad de áreas. La realidad del país es que no se cuenta con suficientes programas u oportunidades educativas en estos campos. Este artículo examina los distintos proyectos ferroviarios que se están planeando en el país y señala los distintos aspectos que deberán ser abordados, desde el punto de vista del conocimiento y la formación académica, para poder respaldar tales desarrollos. Se presentan diversos enfoques que se tienen en varios países sobre esta formación y se hacen varias recomendaciones y propuestas aplicables al país.

2. EL HUB FERROVIARIO NACIONAL

Esta entidad colaborativa ha sido concebida con el objetivo de propender por el desarrollo integral de las empresas y sectores relacionados con el sector ferroviario, buscando que se dé la formación en el sector y se desarrollen los proyectos y la industria ferroviaria y de transporte sostenible en Colombia. Desde la Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos (SAI) y su Comisión de Ferrocarriles y Transporte Sostenible, se presentó desde finales de 2018 e inicios de 2019 la iniciativa que se denominó Constitución de un HUB Ferroviario de Movilidad Sostenible, estrategia que fue muy bien acogida por la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia y su Clúster de Energía Sostenible. Se inició la conformación de la iniciativa por parte de estas entidades como instituciones fundadoras,

junto con el Metro de Medellín y la Promotora del Ferrocarril de Antioquia y se decidió darle un carácter nacional a la constitución de un Hub Ferroviario y de Transporte Sostenible para contribuir a que los sectores académico, técnico, industrial y comercial, puedan responder de manera articulada y efectiva a las necesidades de los importantes proyectos que en la materia están siendo concebidos y desarrollados en Colombia, incluyendo los que están en operación.

Finalmente se conformó el HUB, el cual tuvo su lanzamiento público en la feria FISE (Feria Internacional de la Industria Eléctrica) celebrada en Medellín en abril de 2022. Allí se tuvo un stand donde se mostró información sobre la iniciativa y se celebró una charla - panel especial de lanzamiento. Se estableció un Comité Directivo conformado por representantes de la Promotora del Ferrocarril de Antioquia, el Metro de Medellín, la Cámara de Comercio de Medellín, la Sociedad Antioqueña de ingenieros y Arquitectos, SAI y un grupo de Universidades; FISE y el CIDET.

Se conformaron comisiones de trabajo siguiendo tres líneas estratégicas: Normalización y regulaciones, Tecnologías y proveedores; Académica; Eventos y relacionamiento. Se abrió la participación a diversas empresas y entidades de probado interés en el tema de los ferrocarriles y el transporte sostenible. A la fecha se cuenta con la participación de 60 entidades públicas, empresas, universidades y consultores.

Este artículo ha sido el resultado de algunas actividades desarrolladas por el autor como director del Hub Ferroviario Nacional y de Transporte Sostenible. Se parte del hecho de que se cuenta con la participación de universidades y entidades educativas, además de importantes entidades e instituciones, lo cual se puede considerar como una base para discutir y desarrollar las propuestas educativas que acá se presentan.

3. LOS PROYECTOS FERROVIARIOS NACIONALES

Sin duda debe ser un punto de partida el contar con planes nacionales y regionales de desarrollo ferroviario, lo cuales van a complementar los sistemas ferroviarios ya existentes en el país. Se hace a continuación un repaso de los sistemas y proyectos, siendo evidente que hay suficiente campo de trabajo para una gran cantidad de personas y de saberes y el ello el país es deficitario.

Como primer punto se señala que el Gobierno Nacional cuenta con un marco de política pública que incentiva la reactivación ferroviaria en el país. El Plan Maestro de Transporte Intermodal – PMTI (2015 y 2023), el Plan Maestro Ferroviario (PMF 2020) y el Conpes 4060 establecen los lineamientos para la priorización, reactivación y desarrollo de corredores estratégicos.

En el Plan Maestro Ferroviario – PMF (2020) – Una estrategia para la reactivación y consolidación de la operación ferroviaria en el país, se señala que los proyectos férreos se desglosan en tres grupos. El primero corresponde a los proyectos de escala nacional que buscan la intermodalidad y la competitividad de Colombia. El segundo incluye corredores que permitan aprovechar la ubicación geográfica del país, que al tener costas sobre dos

océanos puede comunicar con los mercados de Europa, Asia y ambas costas de Sur, Centro y Norteamérica. En el último grupo, se incluyen los proyectos del orden regional que estén en etapa de estructuración o en fase de diseño y construcción.

Actualmente el Sistema Férreo Nacional cuenta con una longitud de 3.344 Km de los cuales 1.610 Km se encuentran a cargo de la Agencia Nacional de Infraestructura - ANI, y 1.734 a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS. Con parte de esa infraestructura disponible, en 2017 el modo férreo transportó el 19,1% de la carga nacional. En los últimos 10 años (a 2017) ha tenido una participación máxima del 27,6% y un promedio de participación del 23,3%. El crecimiento del transporte de carga movilizadora corresponde al aumento de producción asociada al sector minero energético, concretamente al aumento de la producción y exportación de carbón que se realiza en un corredor férreo concesionado de aproximadamente 192 Km entre La Loma y Ciénaga.

Las anteriores son las consideraciones de la ANI en comunicación sostenida con la Sociedad Colombiana de Ingenieros a fines de 2024. Vale la pena presentar y comentar una serie de infogramas sobre los proyectos y realidades que el país está considerando.

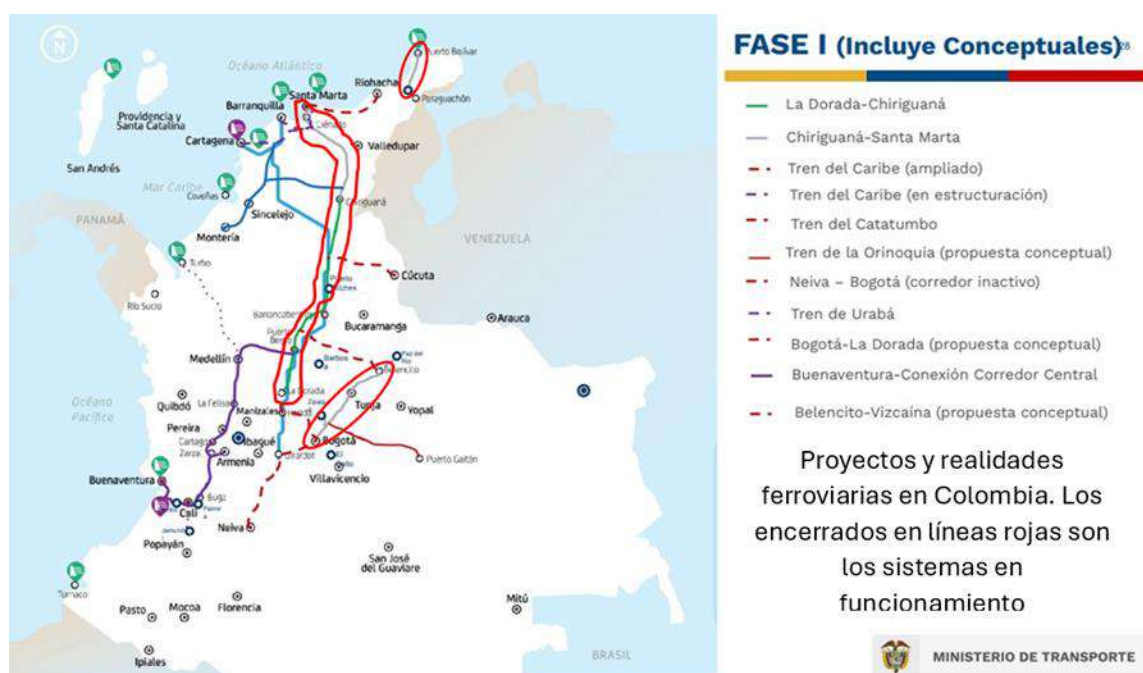


Figura 1. Proyectos y realidades ferroviarias en Colombia
Fuente. Ministerio de transporte

Según lo señalado por el Ministerio de Transporte, en lo que tiene que ver con sistemas de transporte que conecten las zonas del país, se cuenta con toda una serie de nuevos proyectos para completar las tres rutas existentes. El gobierno del presidente Petro ha insistido en los sistemas ferroviarios como uno de sus programas importantes. Sin embargo, no parece que

van a lograrse avances a la velocidad y las magnitudes deseadas, aunque, sin duda, van fundamentando las nuevas posibilidades y realidades.



Figura 2. Transporte público de carga ferroviaria
Fuente PFA

El transporte de carga se da fundamentalmente en las dos rutas que transportan carbón mineral para exportación desde Puerto Bolívar en La Guajira (proveniente de El Cerrejón) y desde la zona de Santa Marta (proveniente de los yacimientos del Cesar), en la ruta que sale de Chiriguaná. Entre Belencito y Bogotá y entre Dorada y Chiriguaná se transportan ciertas cantidades, mucho menores que las de carbón (cemento, gaseosas y bebidas, café, acero y algunos otros productos), cada ruta de estas con algo menos de 50.000 toneladas anuales en 2019. Con los nuevos proyectos será posible aumentar las cargas transportadas, especialmente considerando productos relacionados con los puertos y las ciudades de Bogotá, Medellín, pero será difícil de superar los tonelajes que se mueven con las 2 rutas del carbón.

Desde el punto de vista del transporte de pasajeros, este es prácticamente inexistente en las rutas nacionales, a pesar de que fue muy importante hace años. Desafortunadamente se fueron cancelando y abandonando los sistemas de los ferrocarriles seccionales y nacionales en el Pacífico, el Atlántico, Antioquia, Boyacá y Cundinamarca. Hoy solamente se cuenta con un gran sistema urbano basado en el transporte férreo, el sistema del Valle de Aburrá y el Metro de Medellín. Este sistema, que transporta más de un millón de pasajeros al día, Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada – Metro de Medellín Ltda.- fue creado en 1979 y se ha consolidado como un sistema integrado que ha permitido mejorar la calidad de vida a los habitantes del Valle de Aburrá.

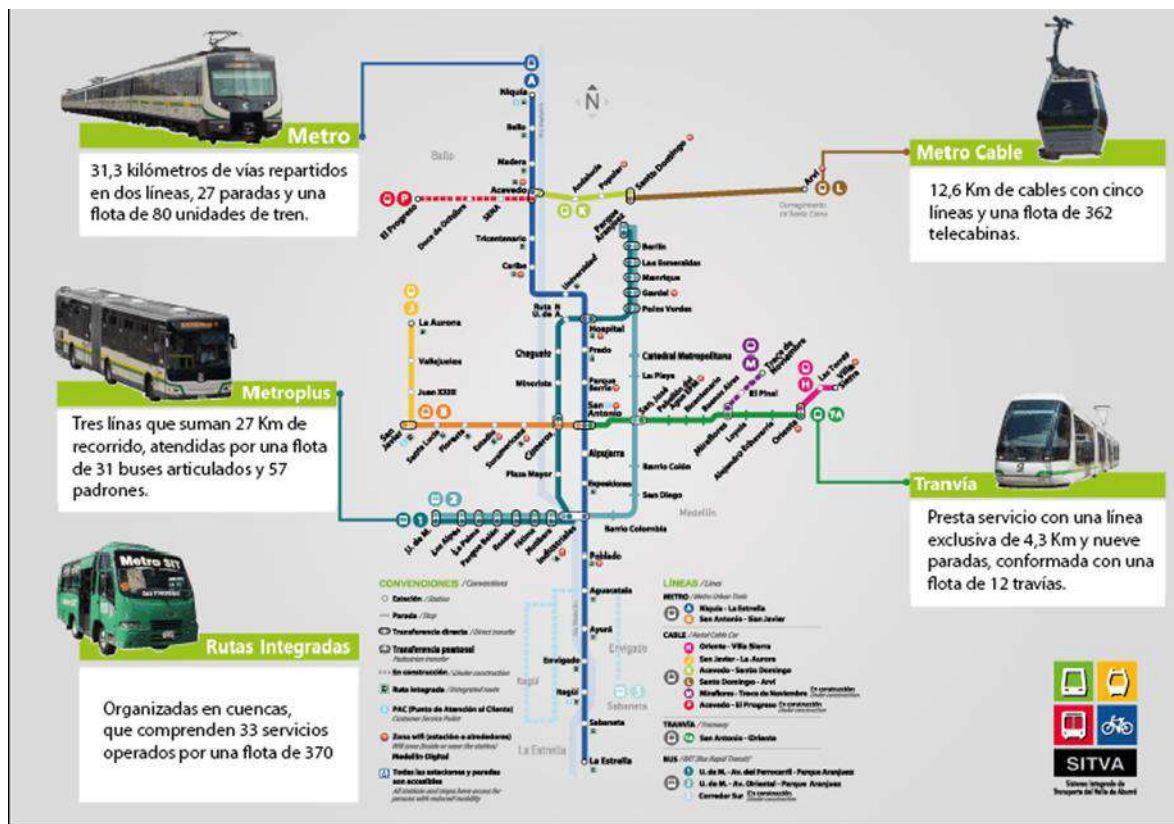


Figura 3. El sistema de transporte masivo del Valle de Aburrá – existente
Fuente Metro de Medellín

Se van a generar cambios muy significativos en los transportes masivos en las ciudades del país. El ejemplo del Valle de Aburrá se va extender, con los sistemas en construcción en la Sabana de Bogotá, el Metro de Bogotá y el Regiotram del Occidente. Adicionalmente en la región del Valle de Aburrá se mantiene una dinámica de crecimiento con la construcción, ya en marcha del Metro de la 80 y con del tren de cercanías o Tren del Río, que va a conectar a Caldas con Barbosa y que está en etapa avanzada de diseño y de financiación.

Existen también proyectos de transporte masivo de pasajeros en la región del Valle del Cauca y de los departamentos del Atlántico.

Antioquia mantiene una importante dinámica de nuevos proyectos a través de su Promotora del Ferrocarril de Antioquia, los cuales están en distintas etapas de conceptualización, financiación y diseño

Los siguientes infogramas se refieren a estos proyectos.

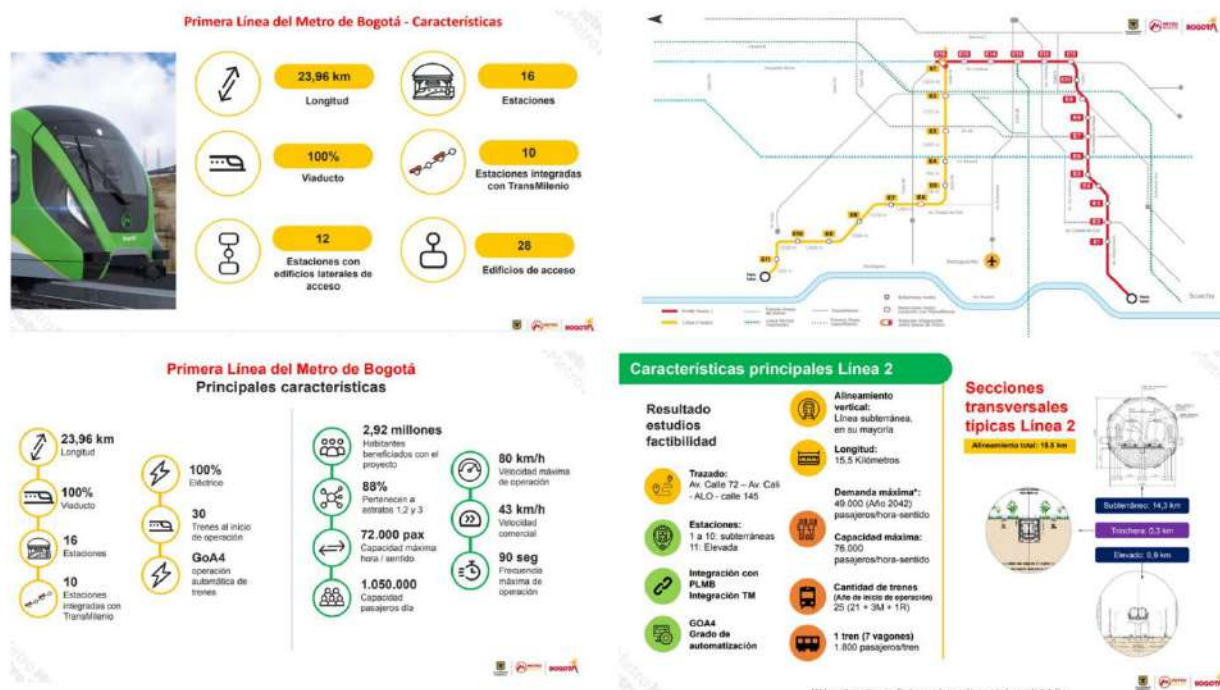


Figura 4. Proyectos del Metro de Bogotá – en ejecución
Fuente Metro de Bogotá



Figura 5. Proyecto Regiotram de Occidente en la Sabana de Bogotá - en ejecución
Fuente Regiotrams



Figura 6. Proyecto del Metro de la 80 en Medellín – en ejecución
Fuente Metro de Medellín

Eventualmente se va a lograr completar los proyectos de la Promotora del Ferrocarril de Antioquia

Recuperando las conexiones con el Magdalena y Caldas, (Tren Verde de Antioquia, Tren del Café) y el tren de cercanías (Tren del Río) entre Caldas y Barbosa

Estableciendo la conexión a Urabá.

Conexiones con el Pacífico y Panamá

Tren de alta velocidad a Bogotá



Figura 7. Los proyectos de la promotora del Ferrocarril de Antioquia
Fuente PFA

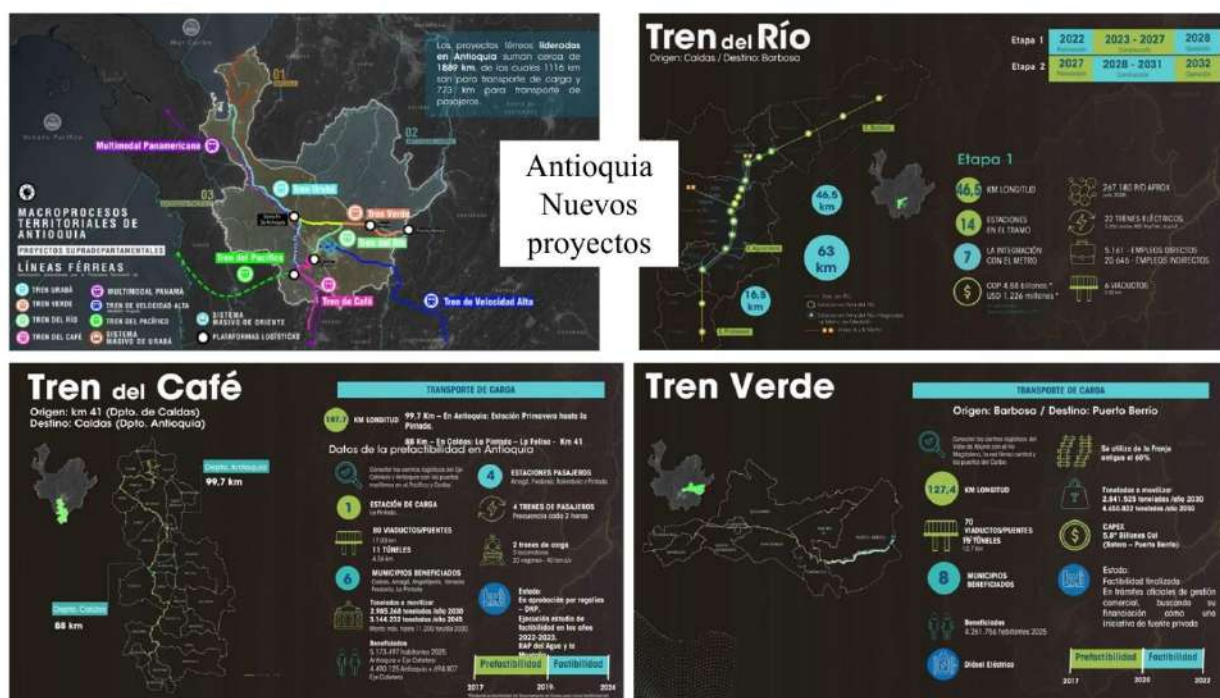


Figura 8. Proyectos ferroviarios en Antioquia en etapa de definiciones
Fuente PFA



Figura 9. Proyectos ferroviarios en Antioquia en etapa de conceptualización
Fuente PFA



Figura 10. Proyecto de conexión férrea de alta velocidad entre Medellín y Bogotá
Fuente PFA

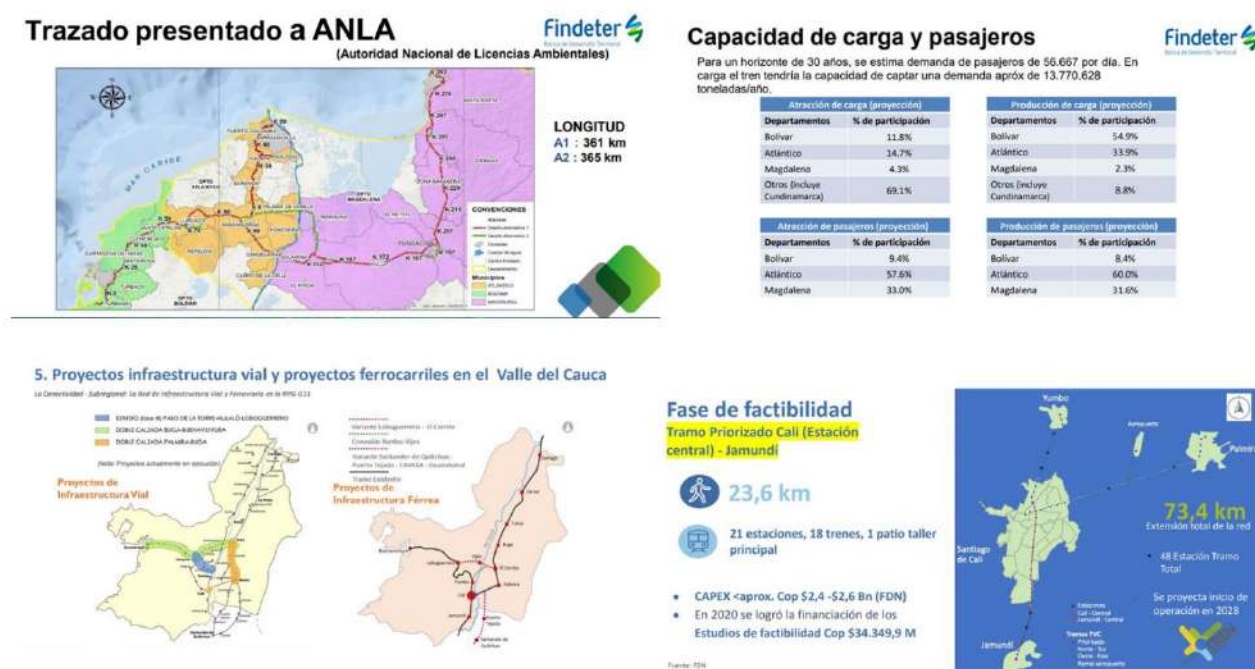


Figura 10. Proyectos ferroviarios en el Valle del Cauca y la Costa Atlántica
Fuente Findeter

Hay que incluir en este sumario, el hecho de que se va a contratar una concesión para llevar a cabo las actividades necesarias para la Financiación, Gestión Predial, Gestión Social y Ambiental y de Redes, la elaboración de los Estudios de Detalle, la Construcción, la Rehabilitación, el Mejoramiento, la Operación, el Mantenimiento y la Reversión de la Infraestructura Férrea y de Infraestructura Logística correspondiente al Corredor del Proyecto comprendido entre los municipios de La Dorada en el departamento de Caldas y Chiriguaná en el departamento del Cesar con sus respectivos ramales. Se incluye la Puesta a Punto del Material Rodante de propiedad de la Nación, el Mantenimiento del Material Rodante del Proyecto y la Prestación del Servicio Público de Transporte Ferroviario de Carga.

4. LOS CAMPOS DE ESTUDIO FERROVIARIO PARA ATENDER LOS PROYECTOS FERROVIARIOS NACIONALES

Si se observan las actividades que implica un proyecto de esta naturaleza, listadas típicamente en los documentos licitatorios, se pueden descubrir muchos de los campos académicos y formativos que van asociados con los sistemas ferroviarios. Entre ellos están los siguientes:

Trabajos de campo. Las observaciones de las zonas, la descripción de terrenos, accidentes naturales, ríos y corrientes de agua, zonas pobladas, asentamientos, vías y caminos que presentan interferencias y oportunidades de interconexión y actividades económicas conexas, fenómenos ecológicos y sociales, implican mucho trabajo de campo y trabajo de profesionales y personal con experiencias y entrenamiento en todo lo que tiene que ver con la complejidad de las influencias, dependencias y

contactos de los proyectos ferroviarios. No se trata solamente de personas con entrenamiento general sino con conocimientos específicos modelados en lo ferroviario.

Definiciones y estudios de las franjas operacionales. Las especiales condiciones de las franjas operacionales de los sistemas ferroviarios son evidentes cuando se transita por los mismos. Las altas velocidades, las especificaciones de las pendientes y las curvas, la necesidad de prevención de accidentes y de proteger las vías contra interferencias e invasiones, los aspectos ecológicos, el manejo del paisaje, el análisis de alternativas, son todos aspectos altamente específicos de estos sistemas.

Análisis de mercado, mercadeo y demanda de pasajeros y de carga. Este son aspectos fundamentales, muy singulares en lo que tiene que ver con lo ferroviario, que se deben examinar con visión de largo plazo, teniendo en cuenta estratégicamente las oportunidades y la competencia con otros sistemas. Hay amplia experiencia en el mundo, pero debe ser adaptada al país y mejorada teniendo en cuenta las situaciones tan especiales de las sociedades en desarrollo, que se han desconectado con los trenes y que desconocen realmente las dinámicas y ventajas prácticas.

Estudios de Topografía. Es un asunto vital para el paso por regiones montañosas, estrechas, cruzadas por ríos y cañadas. Se requiere conocimiento y visión especializada, que va más allá de lo tradicional en ingeniería civil y de transportes.

Estudios de hidrología, hidráulica y socavación. Asuntos también vitales en zonas ricas en aguas, ríos y quebradas, en terrenos proclives a la presencia de aguas en los suelos, a terrenos inestables.

Geotecnia y geología. Los suelos del país, especialmente en las zonas andinas y cenagosas, son especialmente desafiantes para lograr estructuras resistentes, seguras, estables. Su conocimiento y la capacidad de diseño asociado es bastante especializado, dadas las altas exigencias de cargas estáticas y dinámicas.

Diseños, concepción y ejecución de infraestructura y superestructuras férreas. Estos sistemas son muy exigentes, dadas las altas especificaciones de precisión, carga, velocidades, pendientes, curvas y la abundancia de túneles, puentes, viaductos, pontones, muelles, obras de defensa y terraplenes. Se une a lo anterior todo lo que tiene que ver con la arquitectura de estaciones, centros de mantenimiento, sistemas de conexiones y de transferencias.

Gestiones ambientales, sociales y prediales. En estos aspectos se generan grandes dificultades y cuellos de botella en el desarrollo de los proyectos ferroviarios. Debido a las grandes ventajas y beneficios de los mismos, hay que gestionar la tramitología con plena conciencia de que la matriz costo beneficio es favorable. Pero ello implica amplios conocimientos y saber hacer énfasis en los beneficios intangibles y en las formas para valorizar las situaciones. Naturalmente se requiere una ejecución elegante y respetuosa de los proyectos y un muy buen conocimiento de las normas aplicables y excelente relacionamiento con comunidades y entidades sociales y de control.

Aspectos de metodología y de procedimientos. Los sistemas ferroviarios están altamente normalizados, dada la amplitud de temas implicados y la necesidad de contar con exigentes estándares de calidad, seguridad, atención a los usuarios, estabilidad, resistencia y durabilidad. Se requiere personal con amplios conocimientos y criterios. En su operación están sujetos a estrictos procedimientos y normas, para asegurar el cumplimiento de tiempos y de los servicios prometidos a los usuarios. Los temas de logística con fundamentales y altamente exigentes.

Sistema de señalización, comunicación y control del tráfico. Aquí se incluyen abundantes asuntos que tiene que ver con instrumentación, automatismos, interconexiones y optimizaciones. Son temas muy relacionados con las tecnologías digitales, con los sistemas de información, con la estadística, el manejo de datos y las diferentes formas de comunicación con todos los actores involucrados. El manejo eficiente de altos flujos pasajeros y de carga tiene que ver con temas muy especializados de naturaleza administrativa y de ingeniería.

Componentes, material rodante y operación. Este es un campo altamente sofisticado y especializado, que tiene que ver con los procesos de diseño, compras, proveedores, ejecución de los proyectos y todo lo relacionado con inversiones, costos, optimización y búsqueda de alternativas entre las muchas opciones y proveedores disponibles. Todo enlaza con la operación, que es la etapa en la cual los sistemas realmente se vuelven rentables y benéficos para la comunidad y los que le apostaron al desarrollo de los proyectos.

Patios, talleres, centro de control y facilidades administrativas. Los sistemas ferroviarios requieren de extensas y complejas facilidades periféricas, sin las cuales no sería efectivo su funcionamiento. Muchas de ellas pasan inadvertidas para los clientes, los públicos y la comunidad, pero son esenciales, exigiendo amplias zonas y espacios. Este es un tema delicado al examinar los sistemas en nuestro país, que con frecuencia tiene limitaciones espaciales, por temas de costos, topografías, concentraciones urbanas y exigencias regulatorias y de planeación. Se requiere arquitectura e ingenierías especializadas para atender adecuadamente los diseños y ejecuciones de tales periféricos. Hay que tener en cuenta temas relacionados con el personal y la logística.

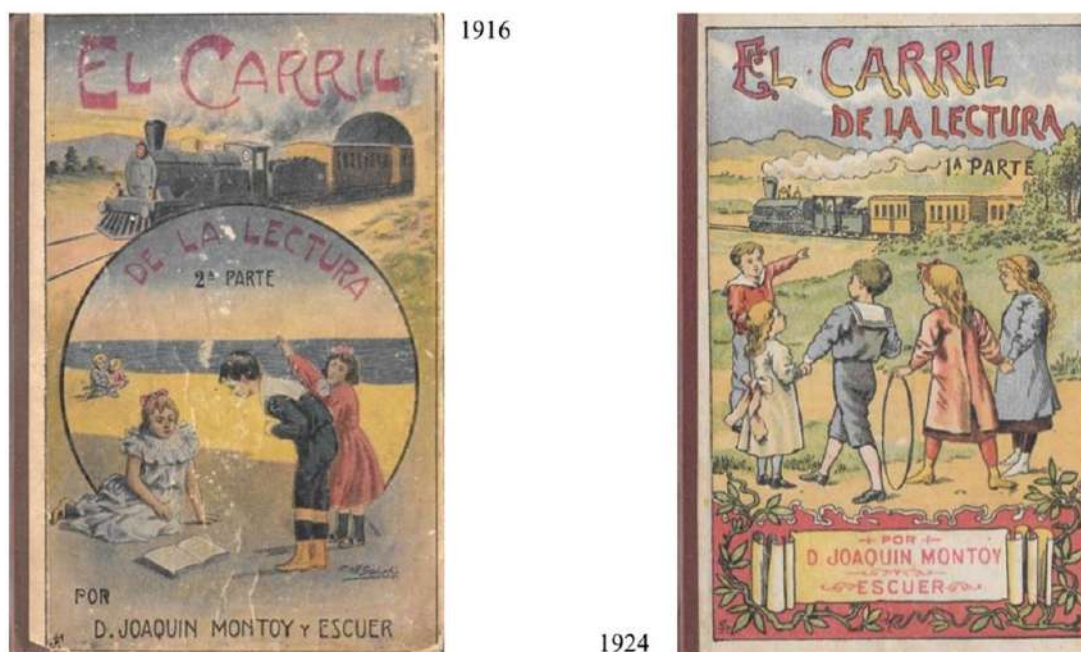
Modelo operacional. Como se acaba de mencionar, la operación es el aspecto clave para lograr la materialización de los beneficios proyectados. Una buena operación es extremadamente efectiva para lograr el apoyo de los usuarios y para garantizar la sostenibilidad integral de estos sistemas, sujetos a deterioros, a obsolescencia, a la competencia, a los gustos y exigencias variables de los clientes. Tiene mucho que ver con aspectos administrativos, de manejo de personal, de respuesta a situaciones de emergencia y de conflicto, con los flujos de información y la logística. Como se menciona, existen diversos modos y filosofías al respecto y se requiere criterio, formación y experiencia para lograr los mejores resultados. Como muchos de estos sistemas requieren apoyos y subsidios, es natural que se generen desencantos y desgastes, cuando se disparan los costos y las inversiones, por encima de las previsiones. Hay que vigilar que la indisciplina social afecte los sistemas, dando lugar a daños, sabotajes, deterioros y desprestigio.

Actualización de normas y especificaciones. Estos sistemas están evolucionando continuamente. Hay que contar con filosofías y perspectivas de administración para evitar que se pierda la calidad y la disciplina operativa y de calidad a medida que pasan los años.

5. EXPERIENCIAS EDUCATIVAS Y ACADÉMICAS EN DIVERSOS PAÍSES

Se ha hecho un recorrido por estos aspectos, el cual se ilustra con algunas fotografías y gráficos. Se trata de un recorrido anecdótico, basado en consultas en bases de datos en la red. Se pretende ilustrar, como base para las propuestas que se presentan al final de este artículo.

Encarrilando la educación



*Figura 11. Trenes y escuelas: las vías del progreso.
Tomado de Juan González Ruiz Asociación de Amigos del Ferrocarril (ACAF)*

Observemos estas imágenes de comienzos del siglo 20. En ellas se sugiere, a modo educativo para los niños, comportarse siguiendo el símbolo del carril del tren, como el camino seguro y certero, como el buen camino, como el mejor método (término usual en Pedagogía, que procede etimológicamente del griego camino, y también vía). Hay aquí una referencia moral, que se refleja también en el lenguaje corriente, donde encarrilar significa conducir o hacer las cosas adecuadamente, y, por el contrario, se califica de descarrilado a quien anda por malos caminos, desorientado o en una dirección equivocada en términos pedagógicos y morales; mientras que, en términos ferroviarios, análogamente, se entiende que un tren está descarrilado cuando se ha salido de la vía por la que debía circular.

La educación universitaria en el ámbito ferroviario en España

Maestría en la Universidad Politécnica de Cataluña

La colaboración universidad-empresa alianza estratégica para el relevo generacional en el sector ferroviario. Afortunadamente en nuestra región contamos con los CUEE, Comités Universidad Empresa Estado, que impulsan estos principios de colaboración a nivel social. La sociedad actual está viviendo unos momentos de incertidumbre, con acontecimientos que han provocado pérdidas de vidas, flujos migratorios e inestabilidad en los mercados

energéticos, comerciales y financieros de todo el mundo. Los cambios que están ocurriendo afectan la movilidad. Se está registrando una tendencia a disminuir la utilización de los combustibles fósiles y potenciar la movilidad eléctrica generada con energías renovables. El transporte ferroviario, tanto de personas como de viajeros, será uno de los protagonistas del cambio ya que el ferrocarril es un modo de transporte eficiente, seguro, accesible y fiable.

El sector ferroviario español es líder y un referente mundial en continua expansión con un alto grado de internacionalización e innovación donde trabajan profesionales de diferentes ámbitos (ingenieros, economistas, abogados ...). Este sector hace posible que anualmente puedan viajar por los 15.652 Km de la red ferroviaria española más de 500 millones de viajeros y se puedan transportar 10.459 millones de toneladas/Km de mercancías, según datos del observatorio del ferrocarril en España.

MÁSTER DE FORMACIÓN PERMANENTE EN SISTEMAS FERROVIARIOS Y TRACCIÓN ELÉCTRICA

El 80% de nuestros estudiantes mejoran su ocupación laboral y el 70% encuentran trabajo en el sector antes de un año.

i	Duración	Modalidad	Precio
	9 meses	Presencial	9.900€

Conoce la UPC
Universitat Politècnica de Catalunya

Observar la interacción universidad empresa

La abundancia de actividades

La abundancia de profesores

4300 profesionales formados por año

+123.500	376	1.600	219
PROFESIONALES FORMADOS DESDE 1994	EMPRESAS COLABORADORAS	PROFESORES	ACTIVIDADES ANUALES

Figura 12. El programa de maestría en la Universidad Politécnica de Cataluña

Cuenta la Universidad Politécnica de Cataluña una maestría con cursos de 30 horas cada uno, en los siguientes aspectos:

Sistema Ferroviario; Alta Velocidad y Servicios de Viajeros Interurbanos; Cercanías, Regionales, Metros y Tranvías; Mercancías y Logística; Electricidad y Mecánica en el Ferrocarril; Tracción Eléctrica; Elementos de Material Rodante; Ingeniería y Mantenimiento; Infraestructura Ferroviaria; Ferrocarril y Energía; Subestaciones y Redes; Electrificación y Catenaria; Comunicaciones Aplicadas al Ferrocarril; Señalización Ferroviaria; Sistema de Protección del Tren; Explotación Técnica de las Infraestructuras Ferroviarias; Proyecto y Gestión de Nuevas Líneas de Ferrocarril; Proyecto Final de Máster

Esta maestría tiene un valor total de 9.000 euros. Toma 9 Meses, con 18 cursos de 30 horas para un total de 540 horas, es decir 15 horas semanales. Son 17, 6 euros por hora, es decir, al cambio actual cerca de \$ 70.000 por hora y cada curso cuesta 500 euros.

Centro de Formación de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE)

Esta institución posee una trayectoria de más de 30 años en la difusión y transmisión del conocimiento del transporte. Desde 1986 ha impartido todo tipo de cursos, jornadas y seminarios que, junto con la celebración de congresos y exposiciones, lo han convertido en un centro de referencia nacional e internacional en la formación especializada en el transporte terrestre.

La FFE, cuya sede social está ubicada en el Palacio de Fernán Núñez de Madrid, dispone de las instalaciones, medios técnicos y humanos, para impartir, organizar y gestionar cualquier modalidad de formación: presencial, telepresencial y online. Para la formación presencial se dispone de aulas dotadas de equipamiento informático y multimedia, entorno online y conectividad; además de aulas para el desarrollo de talleres, biblioteca técnica y otros espacios para zonas comunes y de networking. La formación online se realiza a través de una plataforma de formación virtual de diseño propio, con contenidos multimedia online interactivos, basada en el uso de las nuevas tecnologías adaptadas a los procesos de aprendizaje. También se ofrece la posibilidad de conexión en remoto por internet (en directo y diferido) para la participación del alumnado en modalidad telepresencial.

Dispone de cursos en las siguientes áreas:

Regulación, legislación y financiación del transporte terrestre; Infraestructuras del transporte terrestre; Vehículos para el transporte terrestre; Transporte interurbano de viajeros; Transporte urbano y metropolitano; Transporte de mercancías y logística, Visión general de la alta velocidad; Explotación técnica y comercial de la alta velocidad; Tecnología de la alta velocidad; Ingeniería ferroviaria en 5 módulos; Material rodante e infraestructuras ferroviarias; Operaciones ferroviarias; Ciberseguridad en infraestructuras ferroviarias; Infraestructura ferroviaria y vía; Instalaciones ferroviarias de energía; Material rodante ferroviario Seguridad técnica en infraestructuras ferroviarias; Sistemas ferroviarios de señalización, información y telecomunicación

Con ellos organiza de manera conveniente especializaciones, diplomados y maestrías, en las áreas de Especialización (6 módulos) y Master en Transporte Terrestre y Ferroviario (14 módulos); Máster de Formación Permanente Ingeniería y Mantenimiento Ferroviario (12 módulos); Máster en Ingeniería y Mantenimiento Ferroviario (13 módulos), Diploma de Experto Universitario (5 módulos); Diploma de Especialización (6 módulos) y Diploma de Experto Profesional (3 módulos)

Su formación se dirige a Profesionales vinculados al sector del transporte terrestre (para cubrir sus necesidades específicas de formación y mejorar su cualificación); Titulados universitarios (con la finalidad de completar la formación adquirida en la enseñanza reglada y aumentar sus posibilidades de incorporación al mercado laboral); A las empresas y resto de entidades del sector del transporte (para contribuir al desarrollo y preparación técnica de su personal, ofreciendo una formación a medida y promoviendo el intercambio de conocimientos y experiencias). La tabla siguiente resume los aspectos económicos de sus programas

Tabla 1 Costos indicativos (2024) de cursos y programas en la EFE



curso	Mantenimiento del material rodante	Aplicación del hidrógeno en el ferrocarril	Curso básico de señalización ferroviaria	Especialista	Maestría
Costo por curso, euro	242	302	684	2.868	5.736
Costo por curso, \$	1.054.636	1.316.116	2.980.872	12.499.374	24.998.748
Horas por curso	25	25	83	300	600
Costo por h, Euro	9,68	12,08	8,24	9,56	9,56
Costo por h \$	42.185	52.645	35.914	41.665	41.665

La educación universitaria en el ámbito ferroviario en México

Ingeniería Ferroviaria en el Instituto Politécnico Nacional de México



Figura 13. El programa de ingeniería ferroviaria en el UPIIP de Palenque - México

Los alumnos deberán venir de una escuela de nivel medio superior que contenga en sus planes de estudio materias básicas como física, química y matemáticas, computación, dibujo, inglés técnico, filosofía, humanidades y comunicación oral y escrita. Deberán tener disposición de tiempo completo para realizar los estudios de Ingeniería Ferroviaria.

El Ingeniero Ferroviario del Instituto Politécnico Nacional queda capacitado para:

- Diagnosticar necesidades de construcción y servicios de transporte ferroviario.
- Evaluar los impactos ambientales, urbanos, viales y de afectaciones de los nuevos proyectos y de la operación vigente.
- Realizar dictámenes técnicos y peritajes relacionados con los proyectos, funciones y actividades de las empresas ferroviarias.
- Diagnosticar el comportamiento de la industria que suministra tecnología, componentes, partes y refacciones ferroviarias.
- Coordinar la construcción e instalación de la infraestructura, superestructura e instalaciones electromecánicas de proyectos ferroviarios.

Los siguientes son los programas de estudio. Se aprecia que se trata de 8 semestres con un total de 57 Cursos, así: Matemáticas y estadísticas 8; Ciencias básicas de ingeniería 7; Aplicaciones generales de ingeniería 5; Administración, economía 7; Ética y temas sociales 4; Programación y sistemas 3; Temas ferroviarios 23

Tabla 2 Programa de estudio UPIIP

SEMESTRE I	SEMESTRE V
Fundamentos matemáticos	Dinámica tren-vía
Mecánica clásica aplicada	Estadística aplicada
Ética y responsabilidad social	Infraestructura en instalaciones fijas
Ingeniería y sistemas de transporte	Vías y diseño geométrico del trazo
Procesos de producción y de manufactura	Ingeniería básica y proyecto ejecutivo
Dibujo asistido por computadora	Logística y cadena de suministro
Fundamentos de ingeniería civil y arquitectura	Programación lineal
SEMESTRE II	SEMESTRE VI
Cálculo diferencial e integral	Contratación y ejecución de obras ferroviarias
Electromagnetismo aplicado	Mantenimiento de obras e instalaciones fijas
Transporte ferroviario	Instrumentación mecatrónica ferroviaria
Normalización ferroviaria	Logística de flujos internacionales
Electricidad y electrónica experimental	Economía de la ingeniería
Tecnología y resistencia de materiales	Redes y simulación
Administración integral	Comunicación profesional
Entorno socioeconómico de México	
SEMESTRE III	SEMESTRE VII
Cálculo vectorial	Programación del servicio ferroviario
Probabilidad y estadística	Operaciones ferroviarias de carga
Metodología de la ingeniería	Mantenimiento de material rodante
Material rodante	Modelos de simulación
Ingeniería ambiental y climatología	Derecho ferroviario
Planeación del transporte urbano y regional	Transporte multimodal
Introducción a la economía	Optativa I
SEMESTRE IV	SEMESTRE VIII
Métodos matemáticos de la ingeniería	Operaciones ferroviarias de pasajeros
Álgebra lineal	Desempeño y calidad del servicio
Química energética y ambiental	Empresas y economía del transporte ferroviario
Estudios para proyectos ferroviarios	Habilidades directivas
Cruceros y señalización inteligentes	Seminario de ingeniería ferroviaria
Suministro de combustible y energía eléctrica	Optativa II
Informática y telecomunicaciones	
Contabilidad y finanzas	

Centro Privado de Formación Ferroviaria ADOFER SA de CV en México



Figura 14. Centro de Formación Ferroviaria ADOFER en México

EL CFA es un centro privado de formación ferroviaria autorizado por los Secretaría de Comunicación y Transporte de México para formar distintos oficios con licencia federal, dentro del Reglamento de Servicios de Servicio Ferroviario. Ofrece los siguientes programas:

Introducción al Sistema Ferroviario Normativa Ferroviaria Despachador
 Conductor Jefe de Estación Operación Ferroviaria y herramientas auxiliares
 Señalización Sistema de Control de Tráfico Trabajos y Maniobras
 Boletaje Piloto de Seguridad Cursos para Obtención de LFF (Licencia Ferroviaria)
 Telemando de energía en sistemas eléctricos ferroviario
 Subestaciones de rectificación. Funcionalidades técnicas de equipos
 Operación Eléctrica de Subestaciones
 Introducción a los Sistemas de Señalización Ferroviarias
 Telecomunicaciones Mantenimiento infraestructura e instalaciones fijas
 Protección Civil Riesgos Laborales Programa de Contingencias y Siniestros
 Seguridad en la Circulación de Sistemas Ferroviarios
 Introducción al sistema de Gestión de Calidad

Como se observa, tienen estos programas que ver con los distintos oficios relacionados con la operación ferroviaria

La educación ferroviaria en Argentina

CENACAF, el Centro Nacional de Capacitación Ferroviaria de Argentina

El CENACAF fue creado en 1985 a partir del convenio de cooperación técnica entre Argentina y Japón, con la idea de generar transferencia de nuevas tecnologías y gestión del conocimiento técnico para el sistema ferroviario de Argentina. Se encuentra formalmente bajo la órbita de DECAHF (Desarrollo del Capital Humano Ferroviario Sociedad Anónima con Participación Estatal Mayoritaria). Desde 2015 fue instituido como Ente Rector de la Capacitación Ferroviaria a nivel nacional, por Resolución del Ministerio del Interior y Transporte de la Nación.

Profesores de los cursos

INSTRUCTORES PROPIOS (9)

1 Analista de Sistemas, 2 Técnicos electromecánicos, 2 Técnicos electrónicos, especialización en telecomunicaciones. 1 Licenciado en Tecnologías Ferroviarias. (UNLA)
 1 Técnico programador, 1 Inspector de líneas aéreas (Línea Roca), 1 Especialista en gestión educativa

INSTRUCTORES EXTERNOS (5)

1 Administrador de Empresas, 1 Técnico en normas operativas, 2 Ingeniero Mecánico con Posgrado Ingeniería Ferroviaria, 1 Arquitecto.

A 2024 se contaba con 149 Cursos Técnicos dictados, 173 Cursos en Simuladores dictados; 58 Jornadas de Perfeccionamiento y 5.077 Alumnos capacitados



Simuladores de conducción ferroviaria:

- 3 Puestos de formación o simuladores réplica
 - 4 Puestos de instructor
 - 8 Puestos de formación simplificados
 - 2 Puestos de Observación
- Líneas Ferroviarias incluidas:
- * General Roca
 - * Mitre
 - * Sarmiento
 - * Belgrano Sur
 - * General San Martín



Áreas

 Transporte Guardas de paso a nivel / Jefes y Auxiliares de estación / Señaleros / Reglamentos y Señales para todas las especialidades	 Señalamiento Circuito de Vías / Señales / Máquina de cambio / Enclavamiento de sala de relés / ATS / Barreras	 Subestaciones Equipos de subestación / Esquemas Funcionales / Relevadores electrodinámicos / Relevadores electrónicos / Subestaciones de corriente alterna / Subestaciones de corriente continua	 Catenaria Instalador Montador de Catenaria / Mantenimiento / Normalización de incidentes / Supervisión / Tareas de catenaria	 Telecomunicaciones Electricidad / Electrónica / Indicador de posición de trenes / Instrumentos de medición / Localización de fallas y empalmes / Técnicas digitales / Telefonía de playa / Telefonía operativa / Onda portadora
 Tracción Eléctrica Circuitos eléctricos / Circuitos neumáticos / Máquinas rotativas / Puertas automáticas / Relés y contactores / Equipos de circuito principal / Inspección y mantenimiento de la unidad / Mantenimiento y reparación de equipos	 Tracción Diesel Electricidad Básica / Mecánica Básica / Neumática Básica / Circuitos de Freno / Generalidades y alistamiento de vagones / Geometría de los pares montados de ruedas	 Vía y Obras Aparatos de vía y su conservación / Capataz de cuadrilla de vía / Inspector de vía / Conservación de la vía con el riel largo soldado / Conservación mecanizada de la vía / Nivelación y alineación de la vía	 Mantenimiento y Servicios Carpintería de Obra / Instalaciones sanitarias y plomería / Soldadura eléctrica y autógena / Oxícorte / Cerrajería / Electricidad para artesanos / Instalaciones eléctricas / Ensayos no destructivos / Termofusión gas y agua / Aire acondicionado	 Informática Aplicada Diseño asistido por computadora (CAD) / Planilla de cálculos / Procesador de texto / Sistemas Operativos / Presentaciones digitales / Gestión de bases de datos / Diseño digital / Redes / Infraestructura

Figura 15. Centro Nacional de Capacitación Ferroviaria de Argentina

Formación ferroviaria de TÜV en Argentina

La TÜV Rheinland es una entidad que ofrece programas en Argentina . TÜV Rheinland Global Rail, Am Grauen Stein 51105 Cologne, Germany, www.tuv.com/global-rail

Se ofrecen talleres y cursos de formación en el sector ferroviario para empresas e instituciones relacionadas con el sector. Con ello se pretende la introducción a los conceptos y estándares, a las mejores prácticas y ejercicios para los asistentes, y un espacio para debates y sesiones de preguntas. La transición desde la formación a la consultoría se lleva a cabo de manera integral por lo que puede utilizar sus conocimientos e implementarlos en su propia empresa.

TÜV Rheinland emplea a aproximadamente 340 profesionales ferroviarios de cuatro continentes en una única línea de negocio. Sus docentes son ingenieros de proyectos experimentados que se basan en conocimientos especializados adquiridos en numerosos proyectos de clientes. Los cursos no se limitan a dar explicaciones teóricas, sino que siempre incluyen ejemplos prácticos y, en la medida de lo posible, contribuciones de los clientes o socios comerciales. Se ofrece entrenamiento en las siguientes áreas:

- Gestión de la seguridad
- Seguridad funcional y desarrollo de hardware
- Certificación TSI
- Desarrollo de software relevante para seguridad
- Homologación y aprobación de sistemas ferroviarios urbanos
- Análisis del Árbol de Fallas
- Seguridad informática para sistemas ferroviarios
- Coste del ciclo de vida ferroviario
- Adquisición de material rodante
- Gestión Lean en el mantenimiento ferroviario
- Mantenimiento en el sector ferroviario
- Monitorización de la construcción
- Licitación de contratos ferroviarios
- Introducción al ECM (Entity in Charge of Maintenance)

Programa de formación universitaria de la UDEMM - Universidad de la Marina Mercante

Se da formación como Técnico Universitario en Tecnología y Gestión de Transporte Ferroviario. Este programa tiene 3 (Tres) años de duración, 2160 horas; además un año y medio adicional para optar a Licenciado en Gestión de Transporte Ferroviario

Se trata de programas de costos muy económicos. Según la información recogida se tendría un valor anual (ARS) de 192.000; según el cambio ello sería de \$ 2.100.000 anuales, para un total anual de 12 cursos, de 60 horas, es decir, 720 horas.

El valor de la tecnología sería de \$Col 6.300.000 y el de la licenciatura, de \$Col 9.500.000

La educación ferroviaria en Brasil

Formación en la Universidad Federal de Santa Catalina (UFSC)

Al considerar las realidades ferroviarias del país se observa que Brasil es deficiente en infraestructura ferroviaria para cargas y personas y las ciudades brasileñas no tienen suficientes ferrocarriles de pasajeros, metros, trenes y tranvías; surgen entonces inquietudes sobre el funcionamiento de los proyectos existentes de trenes y de metros; sobre la industria, los materiales que utilizan, las tecnologías que se tienen; sobre los conocimientos en metodología de diseño, producción y operación que existen en el país. Igualmente se considera la situaciones educativas y formativas en estos campos: ¿Quién prepara profesionales para este campo industrial? ¿Qué enseñan? ¿Cuántos cursos formales existen en escuelas técnicas y universidades? ¿Cómo han trabajado estos temas los países que tienen este modo de transporte?

De lo anterior se advierten dos hipótesis: Brasil invirtió poco en el modelo metro-ferrocarril porque las instituciones de enseñanza e investigación no tenían los programas para desarrollar el conocimiento y la formación de profesionales para este modelo; o, alternativamente, las instituciones de educación e investigación en Brasil no contaban con programas y cursos en el área metro-ferrocarril porque esa industria era débil.

Ante estas consideraciones, la UFSC montó el curso de Ingeniería Ferroviaria y Metro para formar profesionales que rompieran con la dualidad presentada anteriormente. Se decidió que los cursos de ingeniería trabajarían con dos énfasis principales: El primero se centra en el área de vehículos, denominado curso de Ingeniería Ferroviaria y Metro, con proyectos educativos dedicados a conocimientos claros en diseño, producción, operación y disposición de vehículos utilizados para el sector ferroviario y metro. El segundo énfasis está enfocado en el campo de infraestructura, transporte y logística, a través de la carrera de Ingeniería de Infraestructura e Ingeniería del Transporte y Logística.

El sector ferroviario y subterráneo ha llamado la atención en el escenario brasileño debido a la necesidad del país de lograr un crecimiento sostenible. Nuevas inversiones para ampliar la red ferroviaria han garantizado el crecimiento actual de la industria ferroviaria. Además, la preocupación por la movilidad urbana ha sido responsable de inversiones en nuevas líneas de metro, trenes de superficie, monorraíles y trenes de alta velocidad. Actualmente, cientos de empresas del sector ferroviario y subterráneo están instaladas en Brasil, con el objetivo de promover este tipo de proyectos con materiales rodantes, nuevas tecnologías y soluciones para el sector. En este contexto, la formación del Ingeniero de Ferrocarriles y Metros en el Centro Tecnológico de la UFSC de Joinville tiene como objetivo brindar una visión sistémica de la ingeniería ferroviaria y de metros, desarrollada para actuar en cuatro grandes áreas: diseño mecánico, diseño de sistemas eléctrico-electrónicos, mantenimiento de sistemas. y operaciones de ferrocarril y metro.

Este profesional puede supervisar y gestionar pruebas experimentales de campo, tratar con proveedores de la industria y preparar documentación e informes técnicos de productos o servicios. Entonces se tiene el programa con el título Licenciatura en Ingeniería de

Ferrocarriles y Metros. Cuenta con 20 cupos por semestre, con una duración de 10 semestres.es decir 5 años de dedicación de tiempo completo.

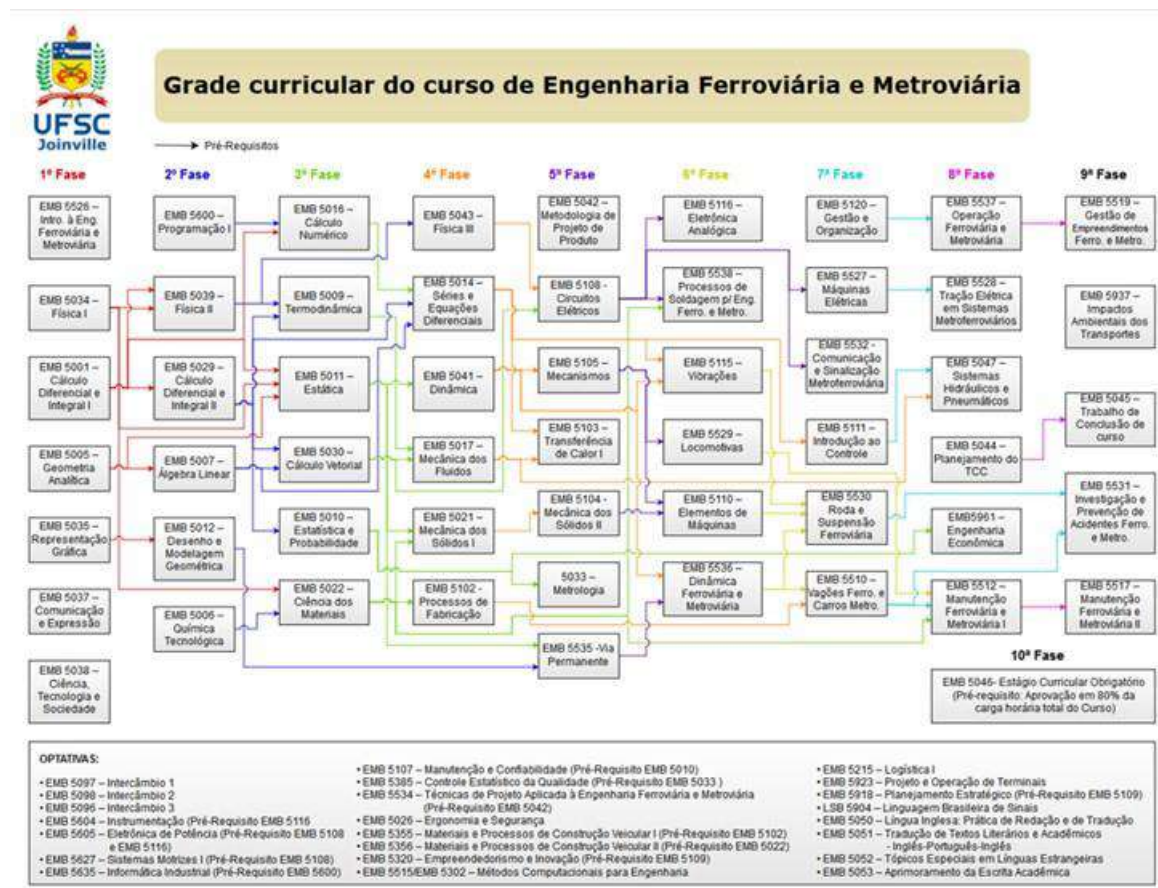


Figura 16. Programa de Ingeniería de Ferrocarriles y Metros en la UFSC en Brasil.

Se aprecia que se trata de 10 semestres. Son 55 Cursos y un semestre de Prácticas

- Matemáticas y estadísticas 9
- Ciencias básicas de ingeniería 12
- Aplicaciones generales de ingeniería 9
- Administración, economía 4
- Programación y sistemas 1
- Temas ferroviarios 20
- Electivas 23

La educación ferroviaria en Portugal

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP) y su Centro de Competencia en Ferrocarriles



Figura 17. Formación ferroviaria en la Universidad de Oporto en Portugal

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP) cuenta con un Centro de Competencia en Ferrocarriles (CSF – Centro de Saber da Ferrovia) que asocia las competencias de investigadores individuales, unidades de I+D e institutos de interfaz en el campo de los ferrocarriles.

El Centro de Competencia Ferroviaria coopera firmemente con los principales actores ferroviarios nacionales y múltiples socios internacionales.

TEMAS

Interacción dinámica tren-infraestructura; Ruido y vibración; Análisis de pandeo de vías; Análisis de fatiga; Monitoreo del estado del ferrocarril; Sistemas en vía y a bordo; Gestión holística de la energía; Sistemas de tracción y almacenamiento de energía a bordo; Fabricación en materiales compuestos, metales y soluciones híbridas; Diseño para fabricación, montaje y control; Inteligencia artificial; Electrónica integrada en tiempo real; recopilación, procesamiento y comunicaciones de datos; Gemelo digital, simulación y virtualización de ferrocarriles; Gestión inteligente de activos; Planificación de la gestión de redes; Integración Inteligente para movilidad puerta a puerta; Herramientas de huella ambiental y economía circular; Evaluación socioeconómica.

EL Instituto Superior de ingeniería de Lisboa y su posgrado en ingeniería Ferroviaria



Figura 18. Formación ferroviaria en el ISEL de Lisboa en Portugal

El Postgrado de Especialización en Ingeniería Ferroviaria se caracteriza por un fuerte componente práctico, impartido por técnicos altamente calificados y con experiencia acumulada en las subáreas que imparte.

Este curso pretende dar respuesta a las necesidades del país de técnicos cualificados en el área ferroviaria, a través de la formación de profesionales flexibles, con una visión global y detallada en el área de la Ingeniería Ferroviaria, en sus diversas vertientes, permitiendo la adquisición de altos conocimientos técnicos y habilidades, así como la integración y el liderazgo en equipos multidisciplinarios.

Las clases teóricas y teórico-prácticas se imparten fuera del horario laboral, los viernes en la noche y los sábados. Son de tipo presencial en las instalaciones del ISEL. Las clases prácticas incluyen visitas a obras e instalaciones ferroviarias en fechas a convenir, en grupos de cinco a ocho alumnos, durante períodos de cierre de vías.

La matrícula EEF es de 4000 €. (Col \$ 17.432.000) para el programa anual

Tabla 3 Costos del programa en el EEF

Programa	Horas	Semanas	Horas - semana
Ferrocarril	580	48	12
Potencia de catenaria y tracción	310	26	12
Señalización y Telecomunicaciones	256	22	12
Operación y Exploración Ferroviaria	283	24	12
Seguridad ferroviaria	189	16	12

Educación ferroviaria en Alemania

La DB Rail Academy



Figura 19. Formación en la DB Rail Academy

Según lo explicado por Ricardo D. Metze, representante del DB en el HUB Nacional de Ferrocarriles, la DB Rail Academy ofrece transferencias de conocimiento, capacitaciones y entrenamientos para los tres niveles de la pirámide de educación: tomadores de decisiones, técnicos, ingenieros, especialistas, personal operativo. Se trabajan las siguientes áreas:

- Transporte público
- Innovación y digitalización
- Logística
- Habilidades blandas y conocimientos empresariales en sistemas de ferrocarriles

La academia convoca a personas de áreas como la supervisión de construcción, la ingeniería eléctrica, la de conocimientos empresariales a dar pasos en su desarrollo profesional buscando y reservando una formación, programa o curso vocacional con DB Rail Academy. Con opciones de capacitación flexibles y un equipo altamente experimentado, se brindan las habilidades que necesarias para dar forma a sus futuros en el área ferroviaria. La DB Rail Academy se centra en ofrecer cursos de formación a grupos más grandes de empresas. Según el nivel de experiencia y los objetivos deseados, se podrá encontrar entrenamiento ideal. Se invita a elegir y a reservar cursos de formación diversas áreas

Educación ferroviaria en Estados Unidos

Programas universitarios en la University of Delaware, University of South Carolina, Illinois Institute of Technology y The Michigan Tech Transportation Institute (MTTI)



The Railroad Engineering and Safety program at University of Delaware is housed within the Department of Civil and Environmental Engineering. We offer courses to undergraduate, graduate, and professional & continuing education students.

Figura 20. Algunos de los programas de formación ferroviaria en Estados Unidos

Comentarios sobre el tema de la formación ferroviaria en USA

Hablando de títulos universitarios en USA en ingeniería ferroviaria, la mayoría de las escuelas de ingeniería tienen departamentos básicos de ingeniería civil, ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica e ingeniería mecánica, aunque algunas de las escuelas de ingeniería más grandes pueden ofrecer disciplinas básicas adicionales como ingeniería química e ingeniería aeronáutica y aeroespacial; Otras escuelas de ingeniería pueden combinar departamentos como el de ingeniería mecánica y aeroespacial. Lo más probable es que el plan de estudios de ingeniería ferroviaria abarque algunas de las disciplinas básicas de ingeniería mencionadas anteriormente, pero no es común que las escuelas de ingeniería establezcan departamentos separados de ingeniería ferroviaria que conduzcan a títulos de licenciatura en ingeniería ferroviaria porque ese campo es demasiado especializado.

Los ferrocarriles que emplean ingenieros titulados probablemente puedan seguir obteniendo los ingenieros que necesitan, capacitados como ingenieros civiles, mecánicos o eléctricos. Esto no quiere decir que los cursos relacionados con aplicaciones de ingeniería ferroviaria no se ofrezcan como optativos o en cursos de educación continua. Con los conceptos básicos de ingeniería, un graduado de una escuela de ingeniería con una licenciatura está equipado para ir a trabajar y aprender algunas de las facetas más aplicadas o especializadas de la ingeniería en el trabajo.

Esto se observa claramente en los siguientes ejemplos.

En la **University of South Caroline** se ofrece un Certificado en Ingeniería Ferroviaria. Este programa de posgrado en ingeniería ferroviaria prepara a los graduados para carreras exitosas en la industria ferroviaria.

A medida que la industria ferroviaria experimenta un crecimiento y una modernización sin precedentes, su fuerza laboral envejece rápidamente y las compañías ferroviarias se apresuran a cubrir puestos, especialmente en ingeniería y campos técnicos afines. Todas las principales compañías ferroviarias, así como las compañías que prestan servicios a la industria ferroviaria, están reclutando a estudiantes universitarios y recién graduados que, a menudo, carecen de formación o experiencia en ingeniería ferroviaria debido a la falta de programas académicos de ingeniería ferroviaria en EE. UU.

Este programa se ofrece a través del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, dirigido a preparar a los graduados para carreras exitosas en la industria ferroviaria y para brindar una ventaja competitiva en el proceso de contratación. El plan de estudios se desarrolló con base en la retroalimentación de la industria ferroviaria sobre las habilidades y cualificaciones buscadas por los nuevos empleados.

Los requisitos de 12 horas de crédito del programa de certificado pueden completarse a través de cursos en línea, lo que permite la inscripción tanto de estudiantes tradicionales como de profesionales en activo. El programa está diseñado para los siguientes grupos:

- Ingenieros júniores que ya trabajan en la industria
- Estudiantes de último año de ingeniería o áreas afines
- Ingenieros de cualquier nivel interesados en incorporarse a la industria ferroviaria
- Ingenieros de cualquier nivel que buscan desarrollo profesional mediante formación continua

El Certificado de Posgrado en Ingeniería Ferroviaria consta de un mínimo de cuatro cursos (12 créditos) de asignaturas básicas y optativas. Los estudiantes cursan una asignatura básica, dos asignaturas optativas de ingeniería ferroviaria y una asignatura optativa de ingeniería o técnica relacionada. Los cursos de ingeniería ferroviaria incluyen los siguientes temas:

Planificación y Diseño de Infraestructura Ferroviaria
Operaciones y Logística Ferroviaria
Diseño de Puentes Ferroviarios y Otras Estructuras
Dinámica de Sistemas Ferroviarios
Proyecto Final de Diseño de Ferrocarriles

La **University of Delaware** ofrece un Certificado de Posgrado en Ingeniería Ferroviaria para estudiantes con una licenciatura y experiencia en ingeniería y análisis de esfuerzos. Cada curso se imparte durante el semestre regular de 15 semanas, en los semestres de primavera y otoño, en línea. Para obtener el Certificado de Posgrado, los estudiantes deben completar tres cursos de posgrado en Ingeniería Ferroviaria, en Seguridad Ferroviaria y Descarrilamiento, en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria

Para los profesionales del ferrocarril que aún no hayan obtenido una licenciatura, existen cursos de pregrado disponibles. Cada curso se imparte durante el semestre regular de 15 semanas. Se ofrecen los siguientes cursos en línea: Introducción a los Ferrocarriles, Ingeniería Ferroviaria, Seguridad Ferroviaria y Descarrilamiento, Ingeniería Geotécnica Ferroviaria

Se dispone también de programas de FORMACIÓN PROFESIONAL Y CURSOS CORTOS. En categoría de formación no se basa en créditos académicos, sino que otorga créditos de Unidades de Educación Continua (CEU). La duración de los cursos varía de un día a una semana y se pueden impartir por Zoom, en el campus de la UD en Newark, DE, o presencialmente (para organizaciones específicas). Los temas incluyen: Introducción a la Ingeniería Ferroviaria; Seguridad Ferroviaria y Prevención de Descarrilamientos; Problemas y Mantenimiento/Amolado de Vías; Aplicación de Técnicas de Datos Emergentes en el Mantenimiento Ferroviario; Vía Soldada Continua/Temperatura Neutra de Vías; Introducción a los Sistemas Ferroviarios y de Tránsito para Profesionales No Ferroviarios. El profesorado y el alumnado del programa de Ingeniería y Seguridad Ferroviaria de la Universidad de Delaware realizan investigación avanzada sobre ingeniería, seguridad, operaciones y economía ferroviaria para la industria ferroviaria y del transporte público de Norteamérica e internacional. Las áreas incluyen: Big data en ingeniería y mantenimiento ferroviario; Fatiga y gestión de la vida útil de los rieles; Resistencia y rendimiento de la vía; Seguridad y mantenimiento de desvíos; Seguridad, análisis de riesgos y mantenimiento;

Dinámica e interacción vehículo-vía; Tecnologías de inspección de vías; Optimización de la vida útil de los componentes y costes de mantenimiento; Transporte ferroviario e infraestructura urbana sostenible

The Michigan Tech Transportation Institute (MTTI) ofrece formación ferroviaria que combina cursos, excursiones y proyectos de investigación. Los estudiantes pueden optar a prácticas profesionales, becas y oportunidades prácticas. El Programa de Transporte Ferroviario (RTP) también valora la formación preuniversitaria. Tiene programas que preparan para una carrera en la industria ferroviaria. El RTP es multidisciplinario y ofrece una amplia gama de programas de grado para estudiantes de pregrado.

Los estudiantes pueden cursar una serie de cursos aplicables a la especialización en Transporte Ferroviario o simplemente cursar cursos individuales. Se ofrecen cursos en Introducción al Transporte Ferroviario Sostenible; Ingeniería Ferroviaria; Diseño de Transporte; Gestión de Logística y Transporte

Se cuenta con el *Minor* Especialización en Transporte Ferroviario, que ofrece cursos orientados a la industria ferroviaria y la ingeniería; combinando con habilidades de logística, gestión, liderazgo y comunicación, para satisfacer la demanda de los ferrocarriles, que buscan graduados con habilidades versátiles. Este es un camino hacia convertirse en un ingeniero, gerente y líder de equipo eficaz en diversos puestos del sector. Hay áreas de oportunidad para la ingeniería civil, mecánica o eléctrica.

El **Illinois Institute of Technology** ofrece una especialización (Minor) en Ingeniería Ferroviaria, para estudiantes de Ingeniería, Informática, Matemáticas Aplicadas o Tecnología y Gestión Industrial.

Se deben tomar como mínimo cinco cursos. Dos de ellos obligatorios, Ingeniería y Diseño Ferroviario; Introducción a la Ingeniería y Diseño de Transporte; y al menos tres que se escogen entre los siguientes opcionales: Diseño de Puentes y Estructuras; Diseño de Instalaciones de Sistemas de Transporte; Preocupaciones de Seguridad Nacional en Sistemas de Ingeniería; Introducción a los Sistemas de Información Geográfica; Planificación y Programación de la Construcción; Herramientas Estadísticas para Ingenieros y Optimización Lineal

Educación ferroviaria en Colombia

El autor recogió entre las personas que pertenecen al HUB FERROVIARIO NACIONAL algunas de las experiencias que se tienen en este sentido e investigó en las páginas web de varias universidades.

El ingeniero Leonel Castañeda señala que **EAFIT** y el **Metro de Medellín** ofrecieron hace un par de semestre en la maestría de ingeniería, modalidad profundización (3 semestre), área de mantenimiento, una cohorte en sistemas ferroviarios, desafortunadamente no se alcanzó

el punto de equilibrio y no se pudo dictar. Además, se han creado en el pasado en los proyectos de ciencia y tecnología, cursos de posgrado en modelamiento dinámico de trenes, modelado geométrico de componentes, modelado estructural, caracterización de componentes ferroviarios, monitoreo de la condición de estado, otros. En el semestre 2023-2 se atendió con fondos europeos un curso para estudiantes de maestría de ingeniería civil de la universidad de Varsovia, denominado Mantenimiento y Diagnóstico de infraestructura ferroviaria. También para el Instituto ferroviario de Cracovia se atendieron cursos en el pasado. Se diseñó y es válido en la plataforma del Sena de Pedregal un curso para procesos de soldadura en vehículos ferroviarios para los años 2018. En cursos que se atienden en posgrado y pregrado se introducen ejemplos de tecnología e ingeniería ferroviaria.

El ingeniero Ramiro Márquez, quien fue gerente del Metro de Medellín, comenta que hace años, durante su gestión, logró que se dieran clases, por parte del Metro, sobre Sistemas férreos en la **Universidad de los Andes**. Se advierte en la página web de esta universidad que en junio a julio de 2023 se dictó un seminario de tres módulos, llamado Curso Presencial sobre Ferrocarriles, con un valor total de \$ 4.200.000.

En la actualidad (junio de 2025) se ofrece un curso en la Universidad de los Andes de Desarrollo de infraestructura férrea, con duración de 16 horas, en línea, por un valor de \$ 1.700.000. Se señala en la página web, que, en los últimos 30 años, el país ha desarrollado numerosos y ambiciosos proyectos de infraestructura vial, y en especial, durante los últimos 10 años, ha sido gracias a la figura de las APP. No obstante, conforme a la evolución del país en materia ambiental, urbanística y social, otros modos de infraestructura más complejos, como el ferroviario, toman cada vez mayor relevancia. Por una parte, el transporte férreo de pasajeros toma fuerza en entornos urbanos, con proyectos significativos en Bogotá Región, Cali, Medellín y Barranquilla, de los cuales algunos ya se encuentran en ejecución. Por otra parte, el transporte interurbano de carga, que hasta ahora está en fase de planeación, contempla varios proyectos relevantes con múltiples desafíos. El curso está dirigido a profesionales del sector privado y público en infraestructura que quieran liderar sus organizaciones o los proyectos que estas desarrollan. Profesionales responsables de la planeación y estructuración de proyectos, así como de su contratación y ejecución. Así mismo, estudiantes y profesionales que quieran ingresar al sector de la infraestructura. Se tiene como objetivos desarrollar la capacidad para analizar todas las fases del desarrollo de proyectos férreos, desde su concepción por el sector público hasta su ejecución por el sector privado.

El ingeniero Pedro Botero señala que, en la **Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia**, sede Medellín, se dicta el curso de ferrocarriles tanto en la especialización como en la maestría en ingeniería transporte. Consultando la página web se encuentra el curso FERROCARRILES que tiene por objetivos dotar al alumno de la capacidad suficiente, para desarrollar las competencias en lo que se refiere a: Concebir y estudiar la viabilidad y proyectar sistemas ferroviarios; Redactar los proyectos de construcción de líneas ferroviarias; Dirigir la construcción de obras ferroviarias; Gestionar, conservar, explotar y reparar sistemas ferroviarios; Planificar, promover y gestionar proyectos de sistemas ferroviarios.

La Universidad **Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**, ofrece en la actualidad un curso de DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS FERROVIARIOS, como curso de actualización posgrados. Tiene los siguientes contenidos: Generalidades sobre ferrocarriles. Trazado de planta, radios de curvatura. Trazado en perfil longitudinal, pendiente geométrica, pendiente compensada, trocha, sobre ancho de curvas. Normatividad internacional aplicable en el país. Cálculo de elementos de las curvas circulares. Cálculo de elementos de las curvas espirales - ejercicios prácticos. Determinación de curvas verticales. Efecto de la pendiente sobre la capacidad de tracción de la locomotora - ejercicios prácticos. Aparatos de cambiavía. Elementos básicos de diseño de cambiavías. Las estaciones de cruzamiento. Diseño de patios. Talleres. Bodegas. Terminales de carga. Diferentes tipos de rieles. Propiedades mecánicas de los rieles. Traviesas de concreto. Traviesa de madera. Sistemas de fijación de rieles. Puentes de estructura metálica. Cargas de diseño. Normas internacionales. Puentes de estructuras de concreto. Cargas de diseño. Soldadura de rieles. Teoría de la dilatación. Peraltes y velocidades. Desarrollo del peralte. Entre-tangencia. El ciclo de viaje de los trenes. Gráficos. Señalización y comunicaciones. Ruta crítica de trenes. Mantenimiento sistemático de una vía férrea. Programación de ciclos de mantenimiento de una vía nueva. Cálculo de rendimientos y presupuestos de mantenimiento. Rehabilitación y mejoramiento de vías férreas existentes. Operaciones de transporte de pasajeros en tren. Trabajo proyecto sobre diseño ferroviario. Visita técnica inspección a un tramo ferroviario. Economía del transporte.

Como se observa este curso es bastante completo y lo dicta el profesor Julián Silva Tobar. El valor de la inversión es de \$ 2.344.000. Depende del programa de Maestría en Ingeniería Civil, énfasis en tránsito y transporte. Es de modalidad presencial, con una duración de 24 horas en jornada diurna. Se desarrolla entre el 22 de enero y el 14 de mayo de 2025, los miércoles de 7:00 a.m. a 10:00 a.m., en el campus de la Escuela.

En 2022, la **Universidad Javeriana** ofreció un Curso Presencial sobre Infraestructura Ferroviaria, dictado por los profesores Miguel del Sol Sánchez (invitado) y Sandra Milena Rueda, con una duración de 31 horas. Sus contenidos fueron los siguientes: **Módulo 1. Introducción a la infraestructura ferroviaria** (Características y conceptos básicos del sistema ferroviario; Evolución histórica de la infraestructura ferroviaria: pasado, presente y futuro; Análisis del caso particular de la Alta Velocidad; Transporte ferroviario de mercancías; Material móvil y tracción; Control del tráfico ferroviario: señalización y sistemas técnicos). **Módulo 2: Diseño geométrico de la vía** (Trazado; Variables de diseño de una vía ferroviaria; Principales parámetros de diseño en alzado y planta; Calidad geométrica y factores para incrementar la velocidad de circulación). **Módulo 3: Dimensionamiento de la sección ferroviaria** (Principales tipos de sección ferroviaria; Solicitaciones sobre la vía de ferrocarril; Componentes de la sección de la vía; Puntos singulares; Dimensionamiento de la sección y componentes de la vía). **Módulo 4: Construcción de una vía ferroviaria** (Proceso constructivo: etapas y agentes que intervienen; Principales métodos y técnicas constructivas; Equipos y medios empleados en la construcción de vías). **Módulo 5: Explotación de vía** (Funcionamiento y respuesta de la vía; Estabilidad de circulación; Resistencia vertical; Resistencia lateral; Transmisión de vibraciones). **Módulo 6: Mantenimiento de la vía** (Deterioro de la vía: principales formas de fallo; Sistemas de auscultación; Tareas de mantenimiento y conservación de la geometría de

la vía). **Módulo 7: I+D+i aplicada al ámbito ferroviario. Talleres prácticos con enfoque en la prueba**

Comenta el Emiro Díez de la UPB que está rodando la materia de ferrocarriles en la **Universidad de Antioquia** gracias a Andrés Cadavid. Él señala que ha dictado el curso para una cohorte de 33 alumnos. En **UPB** se tiene el curso de Tracción Eléctrica en la Maestría de Ingeniería, que también se puede tomar como electivo en pregrado

6. HACIA EL DESARROLLO DE PROGRAMAS DE EDUCACIÓN FERROVIARIA EN COLOMBIA

En el presente artículo se ha hecho un análisis juicioso de la situación actual de los ferrocarriles en Colombia, en términos de los proyectos que se están planeando, los sistemas que funcionan y los que se están ejecutando. Se señala que se cuenta con un grupo de trabajo el HUB Ferroviario Nacional que puede servir de punto de apoyo para impulsar el desarrollo ferroviario nacional.

Es indudable que se requiere contar con profesionales que tengan altos niveles de conocimiento y de formación, para participar en todas las etapas de los distintos sistemas; igualmente, a medida que se van volviendo realidad los proyectos, será necesario contar con personal técnico y operativo que disponga de las habilidades y los conocimientos necesarios, teniendo muy en cuenta que en la operación de estos sistemas reside buena parte de su éxito, e inclusive, de su rentabilidad y sostenibilidad en el tiempo.

Al observar lo que se ha hecho en distintos países en términos educativos y académicos y al comparar con la situación existente en Colombia, es evidente que no se cuenta con los recursos suficientes para desarrollar todos estos proyectos, ejecutarlos y operarlos, si se desea contar con personal nacional que se encargue de estas tareas. En el pasado fueron importantes los ferrocarriles en el país y de alguna manera se contaba con ingenieros, profesionales, técnicos y operadores que fueron capaces de asumir debidamente las tareas. Pero esta tradición se ha venido perdiendo en el tiempo, dado que solamente existen algunos proyectos que se están operando. La experiencia que se ha tenido con el Metro de Medellín durante sus más de 20 años de operación ha dado lugar a la conformación de un equipo humano altamente preparado, que puede servir como semilla para expandir estas capacidades hacia los nuevos proyectos. De hecho, el Metro de Medellín siempre ha hecho esfuerzos educativos y de formación, desarrollando lo que podríamos denominar Universidad del Metro. Esta es una base para el trabajo, como lo es el esfuerzo que han hecho algunas universidades para desarrollar proyectos investigativos y de formación, con base en cursos especiales, en diplomados y en grupos de investigación. Corresponde al HUB ferroviario y a su comisión académica, el hacer un inventario de estos esfuerzos y de estas capacidades existentes, para proyectar a partir de ellas y a partir de las necesidades una estrategia de naturaleza académica.

En este sentido este artículo pretende proponer algunas estrategias e ideas para que sean debatidas e, idealmente, asumidas por las instituciones educativas, incluyendo las universidades, las instituciones tecnológicas y el SENA, con el apoyo de las entidades que manejan los distintos proyectos ferroviarios que se van desarrollando y que se vuelven operativos.

Ingeniería Ferroviaria

La primera idea que se desea proponer es la de desarrollar un proyecto educativo universitario de ingeniería de los ferrocarriles, como nueva carrera, independiente, en el área de la ingeniería, que ofrezca el título de ingeniero ferroviario, complementado con distintas especialidades según las necesidades que se vayan detectando. Se quiere proponer la idea de que las distintas universidades que pertenecen al HUB se reúnan y diseñen este tipo de programas. Se cuenta con la base suficiente porque todas estas instituciones tienen carreras dedicadas a la ingeniería y por lo tanto cuentan con sistemas de enseñanza de las ciencias básicas de la ingeniería y de las materias transversales típicas que son necesarias para este tipo de proyectos. Será necesario reforzar el programa con un conjunto de asignaturas especializadas en el área ferroviaria que como se ha visto en los ejemplos presentados en este artículo están constituidas por un total de unas 20 materias especiales, específicas del área ferroviaria. Recomendamos observar los ejemplos que aquí se dan y como grupo de universidades estructurar un currículo, armarlo y discutirlo internamente, de tal manera que pueda ser asumido como una tarea conjunta. Este grupo de universidades, que podrían estar conformado por entre dos y cuatro instituciones al menos, para evitar innecesarias duplicaciones y competencias en un mercado como el que actualmente existe en el país en el área de la enseñanza de la ingeniería, que tiene dificultades importantes para conseguir estudiantes, especialmente en el sector privado. Sin embargo, dado que es evidente que se van a presentar distintos ferroviarios que hay que convertir en realidades, se considera que no será difícil explicar adecuadamente a los bachilleres y a los distintos interesados sobre las ventajas de hacer una ingeniería ferroviaria los campos de trabajo los distintos oficios y las perspectivas.

Se considera que esto se puede hacer en el área del Valle de Aburrá o en el área de la Sabana de Bogotá, o inclusive, colaborativamente entre estas dos regiones. Se considera que hay suficiente capacidad y poder educativo en ambas zonas del país, para contar con dos ofertas de ingeniería ferroviaria. En la zona de Bogotá ya se cuenta con experiencia en la Universidad de los Andes, en la Universidad Javeriana y en la Escuela de Ingeniería Julio Garavito, para tratar de integrarse y ofrecer estos programas. En la zona de Medellín se cuenta con la Universidad Pontificia Bolivariana, la universidad EAFI, la Universidad Nacional y algunas otras, como la Escuela de ingeniería EIA, y el Instituto Tecnológico Metropolitano entre otros.

Se propone que durante 2025 y 2026 se haga una tarea conjunta en el seno del HUB ferroviario en la comisión académica para desarrollar estos programas divulgarlos estructurarlos y lograr el apoyo de las vicerrectorías académicas en las instituciones y concebir un esquema conjunto de trabajo que facilite el desarrollo armónico de este proyecto.

Formación avanzada ferroviaria

Sin duda se pueden desarrollar exitosamente programas académicos de formación avanzada que permitan a distintos profesionales de la ingeniería (ingeniería mecánica, civil, eléctrica, industrial, entre otras) desarrollarse como expertos en el área de la ingeniería ferroviaria mediante programas de especialización lo que en Estados Unidos se denominan como Minors. Igualmente se pueden ofrecer programas de maestría y eventualmente programa de doctorado. En este sentido se proponga que haya alianzas entre las instituciones educativas para ofrecer estos programas. Sin embargo, debido a su naturaleza más especializada y al hecho de que se pueden ofrecer de con base en cohortes y ofertas limitadas en el tiempo, existe la posibilidad de que sean desarrollados con éxito de manera individual por las distintas instituciones que acá se han mencionado. En el artículo se presentan abundantes

ejemplos de programas educativos de este tipo en el mundo y de los distintos campos de especialización.

Cursos y diplomados

Todavía a nivel universitario y profesional se puede ofrecer una abundante paleta de cursos y seminarios integrados como diplomados o como cursos independientes de tal manera que los profesionales ya formados y las personas que trabajan en el sector puedan profundizar y prepararse en campos específicos. Se trata de una oferta amplia la que puede hacerse acá y se considera que es de fácil organización, dado que puede ser asumida por las distintas universidades en sus programas de ingeniería y de especialización. Sería de interés que estas actividades se hicieran de manera conjunta entre las universidades, pero nada impide que se haga de manera individual. Lo que sí es importante es que estos cursos sean desarrollados en armonía con las entidades que están a cargo del diseño, la ejecución, la operación y la planeación de los sistemas ferroviarios en el país, tanto en el Ministerio del Transporte como en las distintas regiones y ciudades. Es un campo fértil para encontrar necesidades de cursos el sistema operativo existente en el Metro de Medellín, en el Metro de Bogotá y en los proyectos reales, como Dorada-Chiriguaná y otros que funcionan y que están a punto de empezar a funcionar o estructurarse. Se recomienda que, con base en lo que se ha descrito en este artículo, las distintas universidades se reúnan en el Comité académico, para plantear una serie de títulos para estos cursos y diplomados, de tal manera que se haga una oferta bien estructurada anual, ojalá tratando de que no haya competencia entre las distintas instituciones, sino que se complementen los programas. Sería interesante que desde el HUB ferroviario se divulgaran estos programas y se propusieran y se patrocinaran. De hecho, los miembros del HUB deberían comprometerse institucionalmente y personalmente con la participación en distintos programas de esta naturaleza, muchos de los cuales pueden ser de naturaleza virtual o híbrida para facilitar su ejecución. Se recomienda que durante 2025 y 2026 se proceda a elaborar estos listados y a impulsarlos internamente para lograr contar con una oferta, todo en discusión entre las instituciones educativas y las distintas entidades que hacen parte del HUB.

Formación operativa y técnica

Es importante referirse al trabajo de naturaleza tecnológica y operativa y al entrenamiento de personas en las distintas áreas que acá se han discutido. Se han mostrado casos muy interesantes en Argentina, en México y en Alemania. Se considera que con las capacidades y programas con que cuenta el SENA y con las capacidades en las instituciones universitarias y tecnológicas del país, en debida coordinación con el Metro de Medellín, con el Metro de Bogotá y con los sistemas que se están desarrollando y que operan, se pueda desarrollar la oferta y pensar inclusive en la posibilidad de contar un instituto o con una área especializada dentro del Sena o alguna institución educativa independiente, apoyada por el metro de Medellín el metro Bogotá y algunas de las entidades que operan sistemas para velar por la formación de personal operativo capacitado. En este sentido se recomienda que en el HUB, se hagan listados de los distintos oficios que deben estructurarse y en un trabajo conjunto con el SENA y con las instituciones educativas universitarias, se proceda a hacer estos listados y a diseñar algunos programas y algunas ofertas. Se recomienda explorar algunas alianzas con las instituciones que se mencionan en este artículo u otras existentes para apoyar estos programas.

REFERENCIAS

- [1]. Vía Libre. La educación universitaria en el ámbito ferroviario. <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=34781> Consultado en 2024
- [2]. UNED. Programas de Postgrado y Desarrollo Profesional con Estructura Modular https://formacionpermanente.uned.es/tp_actividad/actividad/transportes-terrestres Consultado en 2024
- [3]. Centro de Formación del Transporte Terrestre, <https://ffe.es/formacion/> Consultado en 2025
- [4]. Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña, <https://epsevg.upc.edu/es/estudios/master-en-sistemas-ferroviarios-y-traccion-electrica>, consultado en 2025
- [5]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL México. Ingeniería Ferroviaria <https://www.ipn.mx/oferta-educativa/educacion-superior/> Consultado en 2024
- [6]. FERROVIARIA MÉXICO. Plataforma de Proveedores de los sistemas ferroviarios <https://ferroviaria.mx/> Consultado en 2024
- [7]. TÜV Rheinland. Formación Ferroviaria. <https://www.tuv.com/landingpage/en/global-rail/> Consultado en 2024
- [8]. Asaf. Yesid y otros. The Resurgence of Education in Railway and Metro Engineering in Brazil September 20154 DOI:10.3390/socsci4030806
- [9]. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP). Centro de Saber da Ferrovia. www.fe.up.pt/csf Consultado en 2024
- [10]. UD Railroad Engineering Program, University of Delaware, <https://railroadengineering.engr.udel.edu/>, consultado en 2025
- [11]. Minor in Railroad Engineering, Illinois Institute of Technology, <https://catalog.iit.edu/undergraduate/colleges/engineering/caee/minor-railroad-engineering/>, consultado en 2025
- [12]. Especialización en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia, facultad de Minas, sede Medellín, en 2025, <https://minas.medellin.unal.edu.co/especializacion-transporte>. Consultado en 2025
- [13]. DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS FERROVIARIOS, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, <https://www.escuelaing.edu.co/es/programas/curso-diseno-y-operacion-de-sistemas-ferroviarios/> Consultado en 2025
- [14]. Curso Presencial
- [15]. Infraestructura Ferroviaria, Universidad Javeriana, <https://educacionvirtual.javeriana.edu.co/infraestructura-ferroviaria>, Consultado en 2025

REACTORES NUCLEARES DE IV GENERACIÓN Y TECNOLOGÍAS DE COGENERACIÓN NUCLEAR

Herrera Cardona, Daniel¹

*Estudiante de Física, enfocado en física nuclear y de plasma, Universidad de Antioquia, Grupo de Ciencia y Tecnologías Nucleares – Red Nuclear Colombiana, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025
herreradaniel090@gmail.com*

Resumen:

Los reactores nucleares de IV generación representan una evolución tecnológica clave para la transición energética y la descarbonización industrial. Diseñados para operar a temperaturas más altas que los reactores actuales, permiten aplicaciones industriales adicionales, como la producción de hidrógeno y la desalinización de agua. Además, buscan mejorar la seguridad nuclear y optimizar la gestión del combustible, permitiendo el reciclaje del combustible gastado y reduciendo la cantidad y vida media de los residuos radiactivos.

Estos avances son impulsados por el Foro Internacional Generation IV (GIF), una iniciativa de cooperación que cuenta con la participación de 13 países, incluidos Francia, EE.UU., China, Brasil y Japón. El GIF ha identificado seis diseños de reactores considerados los más prometedores de esta nueva generación. Aunque algunos prototipos ya están en operación o construcción, no se espera una adopción comercial amplia antes de 2030 en Occidente.

La cogeneración nuclear, que permite aprovechar el calor de los reactores para producir energía térmica y eléctrica simultáneamente, se presenta como una solución eficiente y sostenible para diversas industrias. En conjunto, estas tecnologías ofrecen un camino prometedor hacia una industria más limpia y sostenible.

Palabras clave: Energía Nuclear, Reactor Nuclear, Cogeneración Nuclear, Reactores Nucleares de IV Generación, Descarbonización.

INTRODUCCIÓN

La Cogeneración nuclear se define como la integración de plantas nucleares de potencia con otros sistemas y aplicaciones. El calor generado por las plantas nucleares puede ser utilizado para cubrir una gran cantidad de necesidades como calefacción industrial, producción de vapor de alta temperatura para procesos químicos a gran escala, desalinización de agua y, la que por supuesto es una de las aplicaciones de mayor prioridad en el marco de la transición energética global: La producción de hidrógeno a escala industrial y con bajas emisiones.

A la luz de los avances tecnológicos con los reactores que funcionan a altas temperaturas, se ha logrado demostrar que la cogeneración nuclear tiene unos beneficios ambientales, económicos y en términos de eficiencia altamente competitivos a largo plazo. Antes de

profundizar más en la materia es necesario tener en cuenta que actualmente hay varias opciones de cogeneración contempladas e incluso ya en marcha y estas dependen de la tecnología, el tipo de reactores, el tipo de combustible y por supuesto las temperaturas alcanzadas.

A parte de lo anteriormente mencionado, la cogeneración nuclear tiene el beneficio de mejorar la eficiencia de las plantas nucleares de potencia. Algunos análisis de las pruebas que se han hecho con plantas existentes dotadas de reactores de las generaciones II y III muestran que el rendimiento de las plantas y puede ser incrementado cuando estas se configuran en “modo cogeneración”, permitiendo aprovechar el vapor de alta temperatura en aplicaciones industriales que puedan beneficiarse del mismo.

El panorama es aún más alentador cuando se observa que los diseños punteros de reactores de IV Generación fueron concebidos con la cogeneración como parte integral de sus prestaciones.

Es importante tener en cuenta que la cogeneración nuclear tiene más de 30 años de haberse puesto en marcha en algunos lugares con estas tecnologías. Las instalaciones nucleares actualmente desplegadas alcanzan temperaturas de funcionamiento que rondan los 300 °C, mientras que los procesos de calefacción urbana e industrial y desalinización de agua de mar necesitan unos 150 °C. Tal y como están diseñadas, las centrales nucleares convierten actualmente en electricidad un tercio del calor producido, por razones tecnológicas principalmente relacionadas con el rendimiento y las propiedades de los materiales.

El OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) inició los análisis de las tecnologías de cogeneración hacia 1989 y estos no se han detenido, entre otras cosas se ha concluido en algunos casos que cuando el calor se utiliza para la cogeneración, la eficiencia térmica puede mejorar hasta un 80%.

El rango de temperatura de trabajo de la cuarta generación de reactores nucleares, ronda entre los 500 - 800°C, lo que los hace adecuados para diversas opciones de cogeneración que pueden suplir las demandas de vapor de alta temperatura y calor de diversos procesos químicos a escala industrial, especialmente petroquímicos, los cuales son muy altos en emisiones de gases de efecto invernadero.

Cogeneración nuclear para la producción de Hidrógeno: La gran oportunidad para contribuir con la descarbonización del transporte y otros sectores industriales.

El hidrógeno puede reemplazar a los combustibles fósiles en numerosos sectores y permitir así unas posibles emisiones cero o casi cero en procesos químicos e industriales, en sistemas de energía de bajas emisiones y en el transporte.

Actualmente, el hidrógeno se produce a gran escala mediante reformado de metano con vapor, un proceso con alto consumo energético que emite unos 830 millones de toneladas de CO₂ al año, el equivalente a la suma de las emisiones de CO₂ del Reino Unido e Indonesia, incluso la IEA (Agencia Internacional de la Energía, 2019), destaca que hay varios métodos que permiten utilizar la energía nuclear, como fuente de electricidad y calor, para producir hidrógeno de manera eficiente y con unas emisiones de CO₂ escasas o nulas.

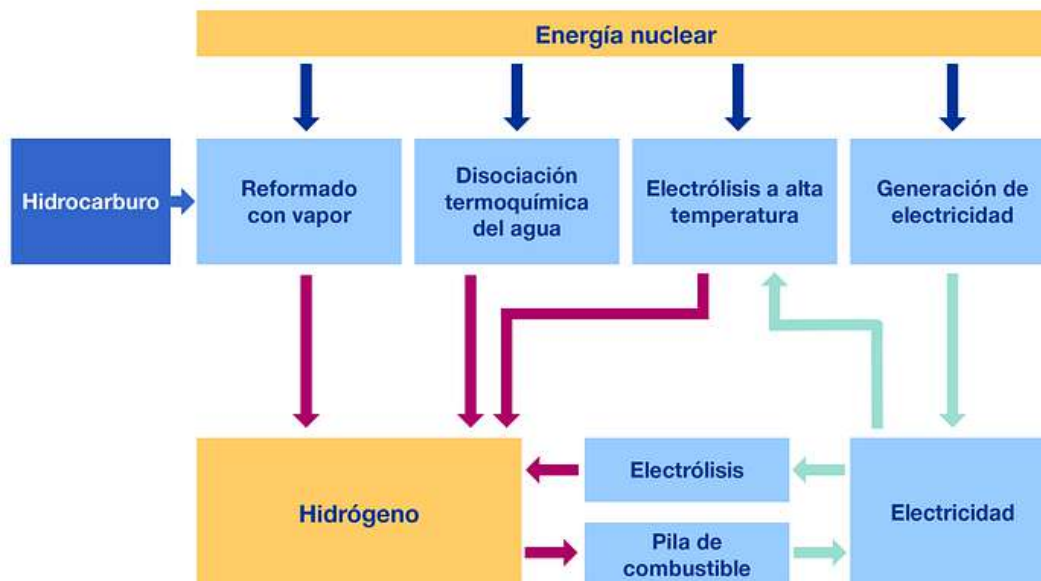


Figura 1: Energía nucleoelectrónica y producción de hidrógeno.

Fuente: IAEA.

DESARROLLO

Cuando hablamos de Reactores Nucleares de IV Generación, hacemos referencia a un conjunto de diseños y prototipos de reactores nucleares teóricos y en fase de construcción de los cuales la mayor parte de estos no se espera que estén disponibles para su construcción comercial antes del 2030, esto al menos en occidente, porque China ya parece llevar la delantera en el despliegue de los primeros prototipos y unidades plenamente operativas de esta nueva generación de reactores, de lo cual muy seguramente hablaremos después en otro artículo.

Históricamente, los reactores de cuarta generación son una iniciativa del Foro Internacional Gen IV (GIF). Propuesto por los Estados Unidos a inicios de la década del 2000, este marco de cooperación internacional cuenta con la participación de 13 países entre los que están: Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Francia, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, Rusia, Sudáfrica, Suiza, Reino Unido, así como EURATOM, que representa a los 27 miembros de la Unión Europea.

Hay tres aspectos básicos para tener en cuenta cuando se habla de la IV Generación de Reactores Nucleares:

1. Estas tecnologías surgen para suceder a largo plazo a los actuales reactores, normalmente refrigerados por agua, que se extienden por todo el mundo.
2. Los nuevos reactores están pensados para funcionar a temperaturas más elevadas que la mayoría de los que existen actualmente, lo cual le abre la puerta a una gran cantidad de aplicaciones industriales.

3. Los reactores de IV generación pretenden ampliar el alcance de la energía nuclear, llevar los estándares de seguridad de la industria nuclear al siguiente nivel (teniendo en cuenta que ya de por sí es una de las industrias más seguras del mundo) y permitir una gestión óptima del ciclo del combustible nuclear, facilitando el reciclaje del combustible nuclear gastado y disminuyendo la cantidad y la vida media de los radionucleidos que no se puedan aprovechar en un corto-mediano plazo.

GIF ha propuesto seis tipos de tecnología nuclear de cuarta generación y la mayoría de los países participantes del acuerdo han sellado su compromiso de contribuir activamente en el desarrollo y despliegue de al menos uno de ellos:

- *Reactor Rápido Refrigerado por Plomo (LFR).*
- *Reactor Rápido Enfriado por Gas (GFR).*
- *Reactor de Sales Fundidas (MSR).*
- *Reactor Rápido Refrigerado por Sodio (SFR).*
- *Reactor Refrigerado por Agua Supercrítica (SCWR).*
- *Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR).*

Reactores Rápidos Refrigerados por Gas (GFR)

El Reactor Rápido Enfriado por Gas (GFR) es un diseño avanzado de reactor nuclear que utiliza un refrigerante gaseoso, típicamente helio, y opera en el espectro de neutrones rápidos. Su refrigerante gaseoso inerte y transparente aporta varias ventajas: ausencia de corrosión a altas temperaturas de operación, un coeficiente de reactividad por vacío muy bajo en caso de pérdida del refrigerante, y facilidad para la inspección visual de los componentes internos.

El uso de gas como refrigerante en los sistemas GFR plantea varios desafíos tecnológicos, como el calentamiento rápido tras la pérdida del refrigerante, lo que dificulta el enfriamiento por conducción típico de los reactores de gas de alta temperatura (HTR), debido a la alta densidad de potencia de los núcleos GFR. La baja densidad del refrigerante gaseoso limita la convección natural para el enfriamiento del núcleo, lo que requiere fuelles de alta potencia a baja presión.

Abordar los efectos de la dosis de neutrones rápidos en el recipiente de presión del reactor es crucial en ausencia de moderación de grafito, elemento esencial en los sistemas HTR. Por lo tanto, el avance de los sistemas GFR requiere investigaciones y desarrollos específicos más allá del trabajo actual y previsto en el sistema VHTR, principalmente en diseño de combustible, diseño del núcleo y enfoques de seguridad. Estos se encuentran entre los objetivos clave establecidos para el Comité de Dirección del Sistema GFR del GIF.

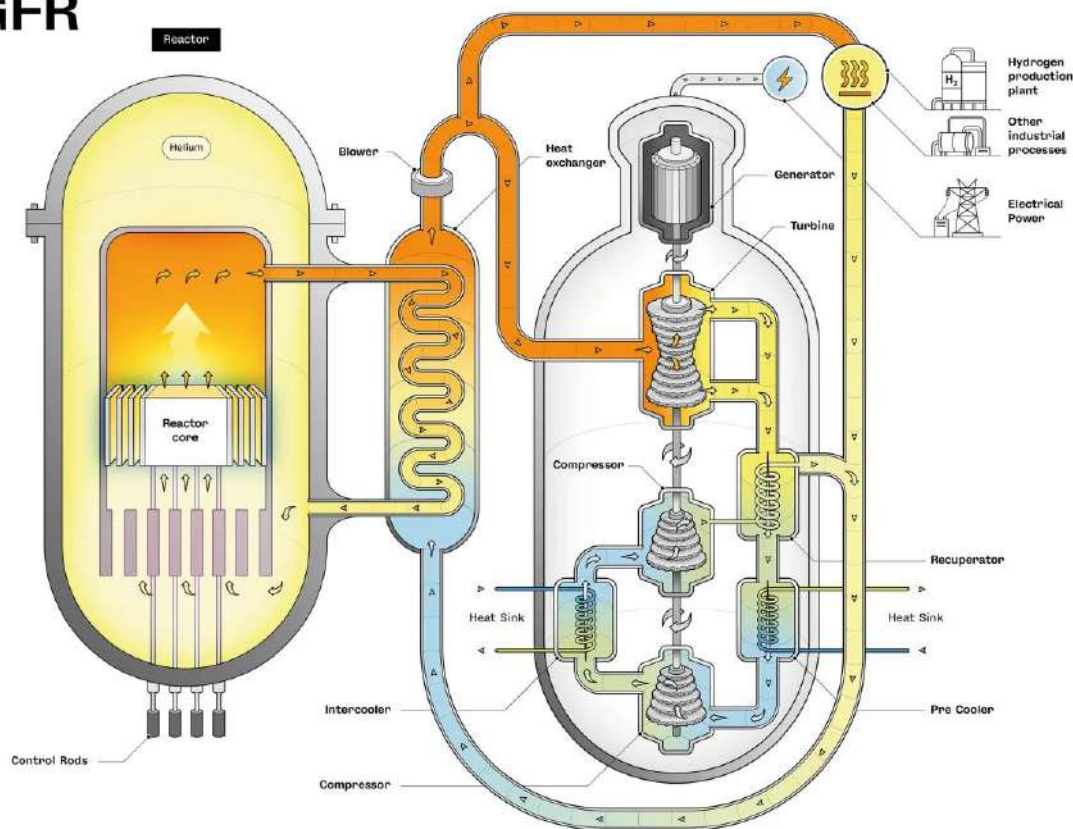
GFR**Gas-cooled Fast Reactor**

Figura 2. Reactor Rápido Refrigerado por Gas (GFR).

Fuente: GIF

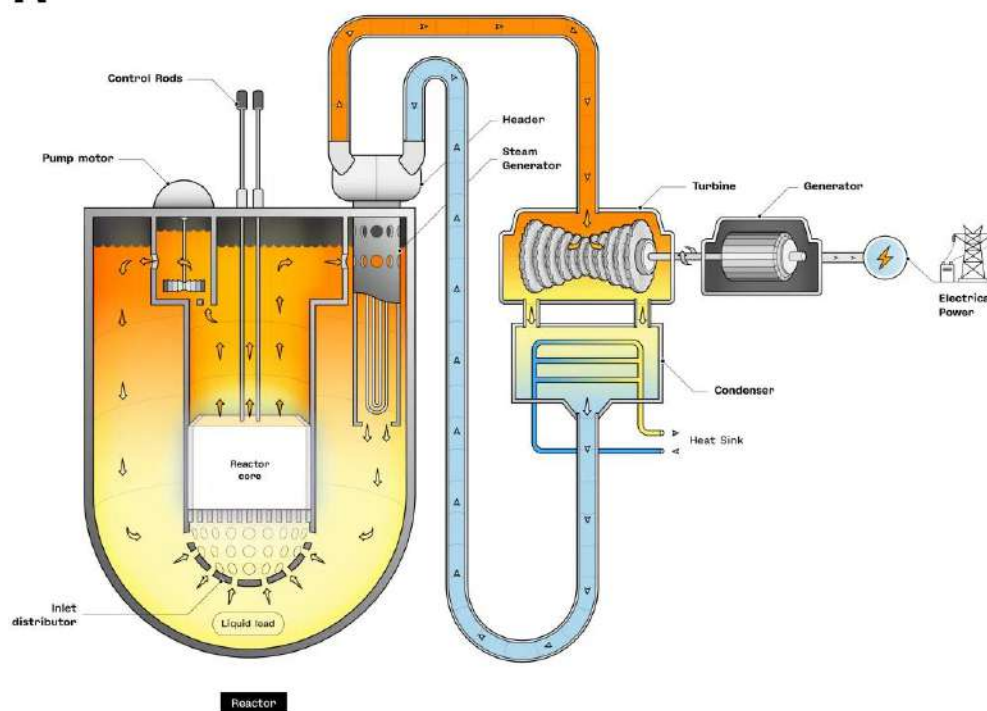
El diseño de referencia del GFR del GIF se basa en un núcleo de 2400 MWt, que satisface los requisitos de reproducción en equilibrio. Fue este requisito de reproducción en equilibrio el que llevó a aumentar la potencia nominal del concepto original de 600 MWt, el cual aún se considera para un reactor modular pequeño enfriado por gas. El concepto de referencia actual involucra un ciclo indirecto con helio en el circuito primario, un ciclo de Brayton en el circuito secundario y un ciclo de vapor en el circuito terciario.

El núcleo consta de un conjunto de elementos combustibles hexagonales, cada uno compuesto por barras de combustible de carburo mixto revestidas de cerámica, contenidas dentro de un tubo hexagonal cerámico. El material preferido actualmente para el revestimiento de las barras y los tubos hexagonales es carburo de silicio reforzado con fibra de carburo de silicio, debido a su mayor resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

Reactores Rápidos Refrigerados por Plomo (LFR)

Los Reactores Rápidos Refrigerados por Plomo (LFRs, por sus siglas en inglés) son reactores enfriados por plomo líquido (Pb) o, en algunos casos, por una aleación de plomo-bismuto (Pb-Bi), operando en el espectro de neutrones rápidos, a presión atmosférica y alta temperatura. Muchas de las ventajas de los sistemas LFR están relacionadas con la elección de su refrigerante: el plomo tiene un punto de ebullición muy alto (hasta 1743 °C), propiedades neutrónicas y de blindaje contra la radiación favorables, así como una interacción benigna con el agua y el aire.

LFR



GEN IV International Forum
Expertise | Collaboration | Excellence

Lead-cooled Fast Reactor

Figura 3. Reactor Rápido Refrigerado por Plomo (LFR).

Fuente: GIF.

Como otros diseños de reactores rápidos, el LFR utiliza uranio y plutonio en forma de combustible de óxido mixto (MOX) o nitruro, lo que permite cerrar el ciclo del combustible y quemar actínidos transuránicos, mejorando así la eficiencia en el uso del combustible y ayudando a reducir la cantidad y la actividad de los residuos radiactivos generados durante su operación. Los desafíos relacionados con los materiales, el control químico y el ciclo del combustible del LFR se encuentran entre los puntos clave de enfoque en la cooperación de I+D en curso sobre sistemas LFR.

Según la última actualización del Generation IV Technology Roadmap, el GIF considera tres conceptos de referencia para los LFR, abarcando todo el rango de niveles de potencia, desde pequeños e intermedios hasta grandes tamaños:

1. Sistemas grandes de 600 MWe: como el Reactor Rápido de Plomo Europeo, diseñado para generación de energía en estaciones centrales.
2. Sistemas intermedios de 300 MWe: como el reactor ruso BREST-OD-300.
3. Sistemas pequeños y transportables de entre 10 y 100 MWe: como el reactor autónomo pequeño, seguro y transportable desarrollado en Estados Unidos, que fue diseñado para tener una vida útil del núcleo extremadamente larga.

Se espera que la eficiencia del ciclo secundario de cada sistema LFR sea igual o superior al 42%.

Reactores de Sales Fundidas (MSR)

Los Reactores de Sales Fundidas (MSRs, por sus siglas en inglés) son una clase de reactores en los cuales las sales fundidas actúan como combustible del reactor, refrigerante y/o moderador. La investigación sobre los MSRs comenzó en las primeras etapas del desarrollo de la energía nuclear. Estos reactores pueden operar a presiones más bajas (ambientales) y a temperaturas más altas en comparación con los reactores convencionales refrigerados por agua.

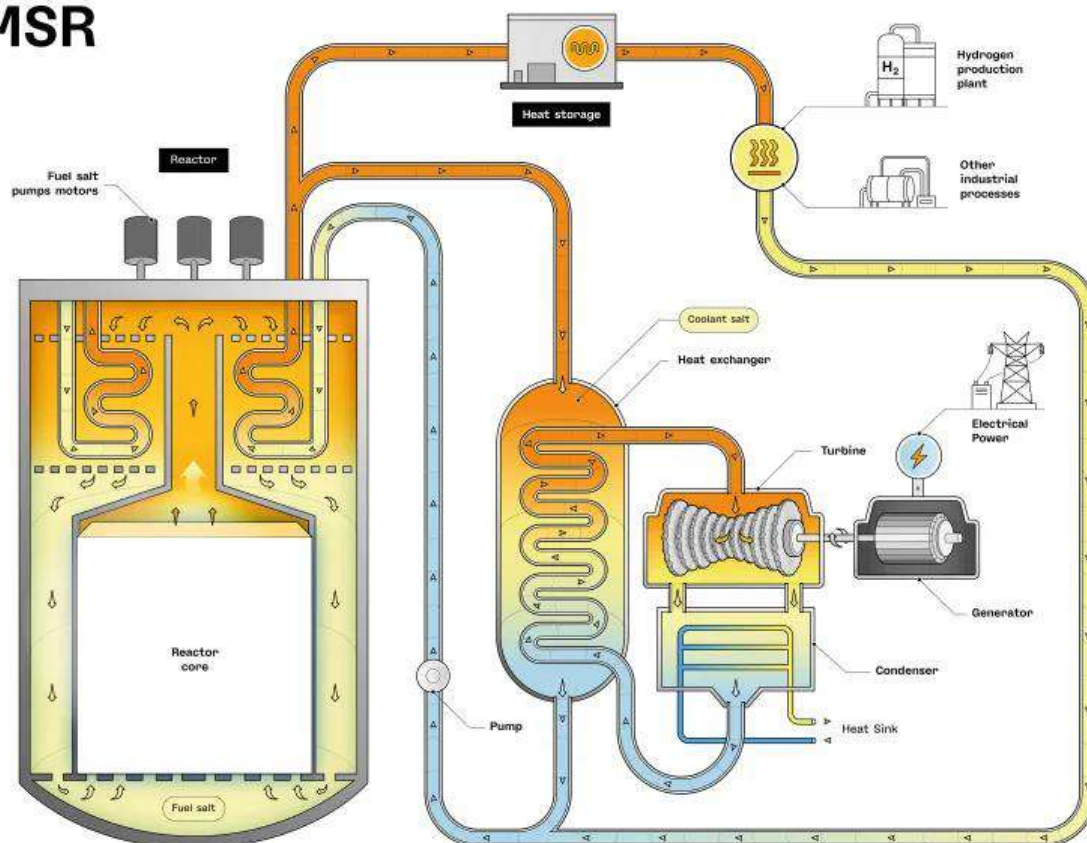
Los MSRs abarcan una amplia gama de diseños, con numerosas opciones que se están explorando, lo que dificulta proporcionar una descripción concisa. Actualmente, se están desarrollando varios conceptos de MSRs, muchos de los cuales cuentan con diseños pequeños y modulares en diversas etapas de preparación tecnológica.

Se han propuesto numerosas variantes de diseño, y la clasificación de los diferentes tipos de MSR puede ser compleja. Sin embargo, existen tres categorías principales basadas en el papel de las sales fundidas en el reactor:

- Combustible de sales fundidas — circulación por bombeo
- Combustible de sales fundidas — circulación natural
- Sales fundidas únicamente como refrigerante

Dependiendo de su diseño, los MSRs pueden operar con espectros de neutrones rápidos, térmicos o epitérmicos.

MSR



Molten Salt Reactor

Figura 4. Reactor de Sales Fundidas (MSR).

Fuente: GIF.

El interés moderno en los MSRs incluye conceptos de reactores alimentados con sales líquidas tanto térmicas como rápidas, como una alternativa a largo plazo para proporcionar energía primaria a gran escala. Los reactores con combustible sólido y refrigerados por sales fundidas también han estado en desarrollo durante las últimas décadas. Actualmente, varios proveedores están desarrollando MSRs tanto de espectro térmico como rápido, con reactores de prueba y comerciales de espectro térmico que se espera sean desplegados en esta década, y el primer reactor de prueba de espectro rápido también anticipado para el mismo periodo.

Algunos diseños cuentan con procesamiento de sal combustible acoplado y localizado en el sitio. Este procesamiento podría permitir la producción de material fisible adicional a partir de componentes fértiles de la sal combustible. La investigación y el desarrollo avanzan hacia la resolución de problemas de viabilidad y la evaluación de la seguridad y el rendimiento de los conceptos de diseño. Los principales desafíos de viabilidad se centran en desarrollar un enfoque de seguridad adaptado y en la creación de materiales estructurales y moderadores de larga duración. Aún queda mucho trabajo por hacer en el procesamiento de sal combustible in situ y, en general, en la tecnología de sales fundidas y el equipo relacionado.

Reactores Refrigerados por Agua Supercrítica (SCWR)

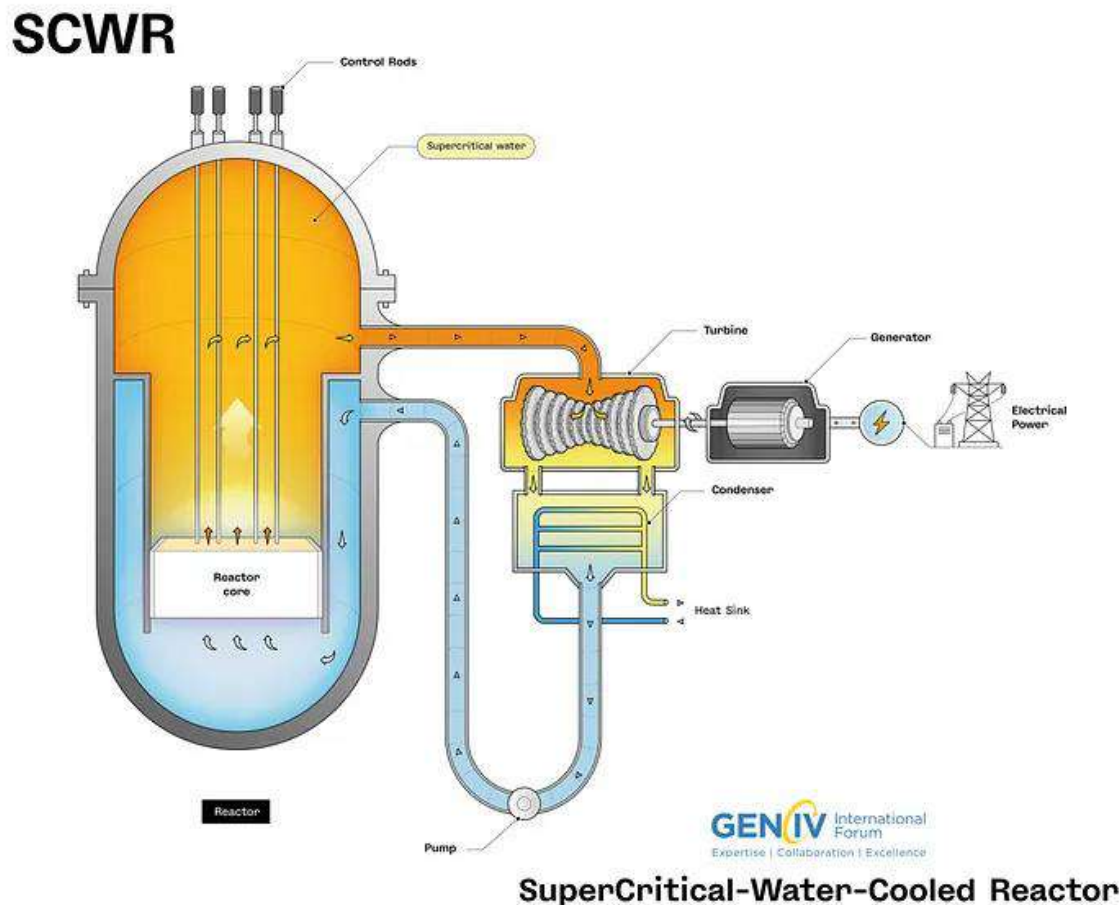


Figura 5. Reactor Refrigerado por Agua Super Crítica (SCWR).

Fuente: GIF.

Los reactores enfriados por agua supercrítica (SCWR) son reactores nucleares avanzados que operan a temperaturas y presiones superiores al punto crítico del agua (374°C, 22.1 MPa). Los SCWR pueden presentar espectros neutrónicos térmicos, rápidos o mixtos y están diseñados en dos configuraciones: vasija de presión (similar a los reactores de agua en ebullición [BWR] y reactores de agua a presión [PWR]) y tubos de presión (como los reactores CANDU).

Combinando principios de diseño de reactores enfriados por agua existentes con tecnologías de plantas de combustibles fósiles supercríticas, los SCWR logran eficiencias térmicas superiores, en el rango del 44-48%, representando una mejora significativa en comparación con el 34-36% de los sistemas actuales. Estos reactores ofrecen beneficios económicos debido a su mayor eficiencia y diseños simplificados. Como una evolución de las tecnologías existentes, los SCWR aún no han sido construidos ni puestos en operación.

Los diferentes conceptos de reactores enfriados por agua supercrítica (SCWR) se basan en tecnologías de diseño probadas y en la experiencia operativa acumulada a través del funcionamiento de cientos de reactores enfriados por agua, así como en la experiencia de plantas de combustibles fósiles supercríticas. Los fluidos supercríticos son comunes en la industria energética y han sido utilizados durante más de siete décadas en este sector. La primera caldera supercrítica fue construida en 1960.

La razón para emplear fluidos supercríticos en el sector energético radica en la mejora de la eficiencia termodinámica del sistema, lo que implica producir la misma cantidad de energía con un menor consumo de combustible.

Además, los fluidos supercríticos poseen una característica única: se comportan como un fluido monofásico, lo que permite diseños más simples, como el ciclo termodinámico directo. Varios conceptos de SCWR han optado por este tipo de ciclo.

La selección de un ciclo directo reduce el número de componentes en la planta, lo que a su vez disminuye los costos iniciales de la instalación y potencialmente aumenta la fiabilidad de la planta, ya que no se requieren generadores de vapor ni componentes asociados.

Algunas ventajas clave de esta tecnología incluyen:

- **Practicidad:** El uso de agua supercrítica como refrigerante es un campo maduro en múltiples industrias, especialmente en el sector energético.
- **Base de experiencia:** Los SCWR se benefician de décadas de experiencia acumulada con los reactores enfriados por agua.
- **Mejor economía:** Es posible gracias a diseños más simples, como el ciclo directo.
- **Mayor eficiencia termodinámica:** Los SCWR alcanzan una eficiencia superior en comparación con los reactores nucleares enfriados por agua actuales.

El SCWR es el único reactor enfriado por agua seleccionado por el Generation IV International Forum (GIF). Esta tecnología aprovecha verdaderamente la experiencia de sus predecesores de Generación I, II y III(+), la gran mayoría de los cuales son reactores enfriados por agua. En esencia, el SCWR representa la evolución natural de los reactores enfriados por agua.

Reactores Rápidos Refrigerados por Sodio (SFR)

El Reactor Rápido Enfriado por Sodio (SFR, por sus siglas en inglés) utiliza sodio líquido como refrigerante y opera dentro del espectro de neutrones rápidos, lo que permite alcanzar una alta densidad de potencia y la ventaja de una operación a baja presión. A pesar de los desafíos continuos en su desarrollo, los SFRs se benefician de la experiencia de más de 20 reactores en todo el mundo, que suman más de 400 años de operación acumulada.

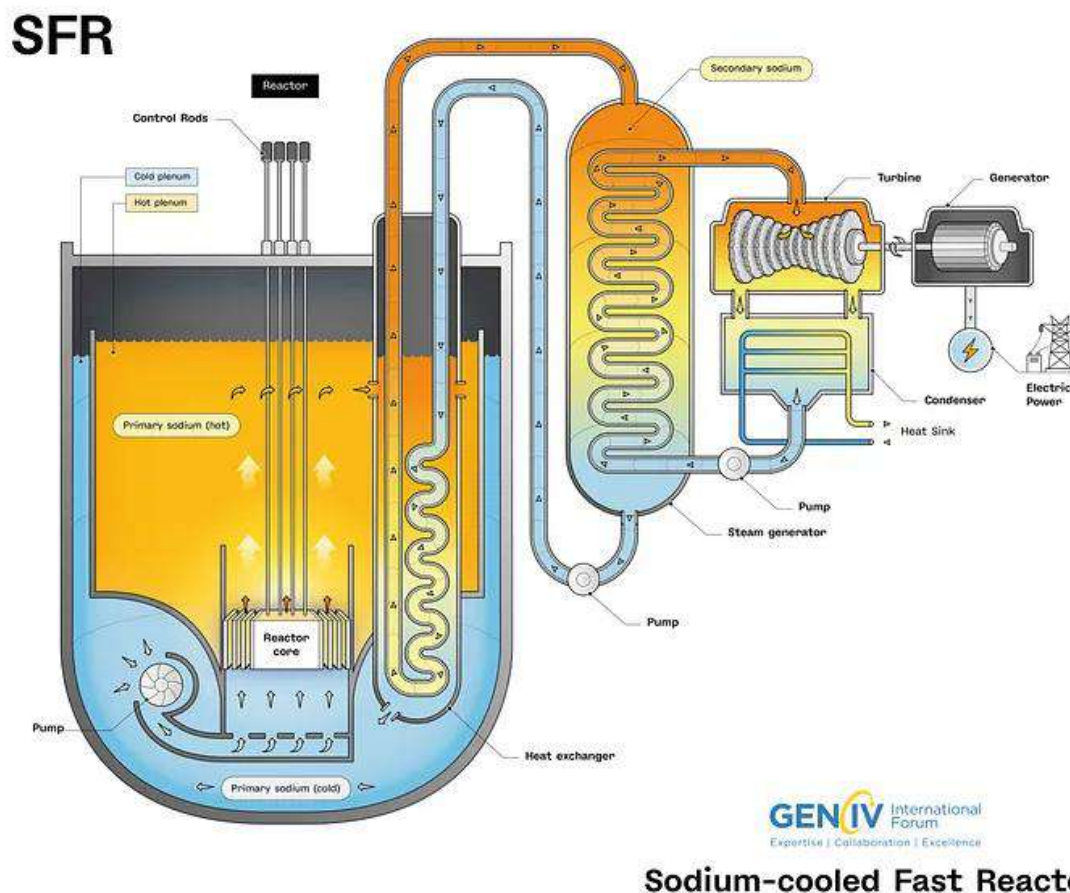


Figura 6. Reactor Rápido Refrigerado por Sodio (SFR).

Fuente: GIF.

Esta amplia experiencia ha mejorado progresivamente la seguridad y confiabilidad de estos reactores. Entre los sistemas de Generación IV, el SFR cuenta con el mayor número de reactores construidos y el historial operativo más completo. Al emplear combustible de óxido mixto de uranio y plutonio (MOX), los SFRs ofrecen la posibilidad de cerrar el ciclo del combustible y quemar actínidos transuránicos, mejorando así la eficiencia en el uso del combustible y reduciendo los residuos radiactivos. Algunos diseños alcanzan razones de reproducción superiores a uno, lo que favorece la sostenibilidad del concepto del reactor. Con temperaturas operativas que oscilan entre 500 y 550°C, los SFRs poseen una mayor eficiencia térmica en comparación con los reactores de agua ligera actuales (LWRs).

El SFR es una fuente de energía atractiva para las naciones que desean maximizar el uso de recursos limitados de combustible nuclear y gestionar los residuos nucleares mediante el cierre del ciclo del combustible.

Además de las ventajas mencionadas anteriormente, el SFR presenta varias ventajas adicionales, tales como:

- Flexibilidad en sus modos de operación (“transmutador”, “convertidor” y “reproductor”).
- Diseños de núcleo compacto debido a su alta densidad de potencia.
- Diseños con circulación natural, capaces de eliminar el calor de decaimiento del núcleo sin depender de equipos dinámicos como bombas, especialmente en caso de un evento de pérdida total de suministro eléctrico (station blackout).
- Un entorno libre de oxígeno que previene la corrosión.

Aunque aspectos importantes de estas ventajas ya han sido explorados y mejorados a través de los reactores SFR que han estado operando durante largos períodos, el SFR enfrenta varios desafíos, tales como:

- Establecimiento de tecnologías para el manejo del sodio, el cual es químicamente reactivo con el aire y el agua, y no es transparente.
- Desarrollo adicional de enfoques de seguridad pasiva.
- Desarrollo de combustibles de alto rendimiento y sus tecnologías de reciclaje.
- Mejora del costo unitario de generación de energía.

En el marco del Foro Internacional de Generación IV (GIF, por sus siglas en inglés), se han organizado y llevado a cabo proyectos internacionales de I+D relacionados con los SFR, denominados “Combustible Avanzado (AF)”, “Integración y Evaluación del Sistema (SIA)”, “Diseño de Componentes y Balance de Planta (CD&BOP)” y “Seguridad y Operación (SO)”, con el fin de cumplir de manera efectiva los objetivos de los sistemas de Generación IV.

Reactores de Muy Alta Temperatura (VHTR)

El Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR, por sus siglas en inglés), está diseñado para la cogeneración de electricidad y calor. Su alta temperatura de salida lo hace ideal para la producción de hidrógeno y su aplicación en las industrias química, petrolera y siderúrgica. Basado en la experiencia operativa de reactores refrigerados por gas, ya sea en operación o pasados, en cinco países, el VHTR incorpora combustible TRi-structural ISOtropic (TRISO), refrigerante de helio y una baja densidad de potencia, lo que facilita la remoción pasiva del calor de desintegración.

Si bien el enfoque original del VHTR se centraba en alcanzar temperaturas de salida muy altas para la producción de hidrógeno, investigaciones y evaluaciones de mercado indican que temperaturas de salida moderadas (700–850°C) son suficientes y permiten reducir los desafíos técnicos asociados con su implementación. Además, el VHTR ofrece seguridad inherente, alta eficiencia térmica, capacidad de suministro de calor de proceso, bajos costos operativos y construcción modular.

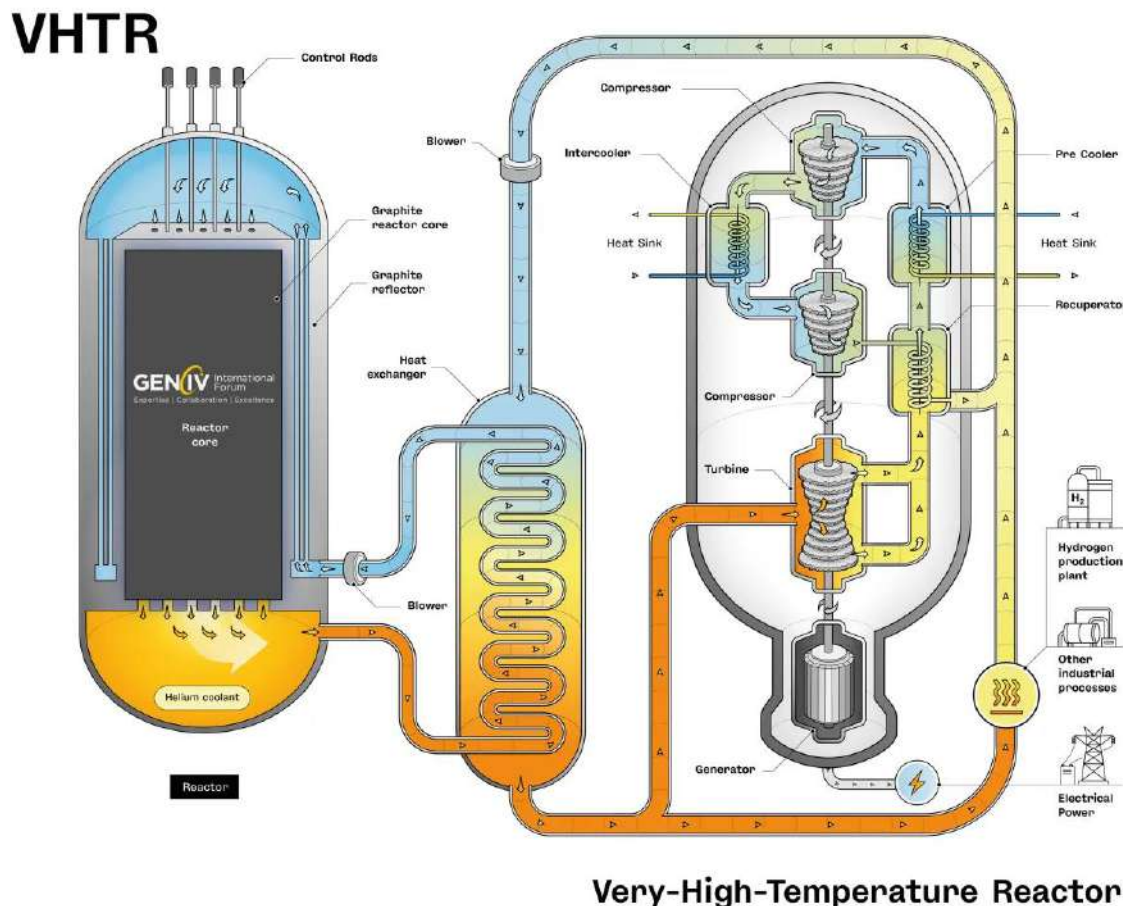


Figura 7. Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR).
Fuente: GIF.

La tecnología VHTR se beneficia de la experiencia operativa acumulada en 40 reactores refrigerados por gas (GCRs, muchos de ellos enfriados por CO₂) y 7 reactores de gas de alta temperatura (HTGRs, enfriados por He) en cinco países.

Se trata de reactores moderados por grafito, refrigerados por helio y con un espectro de neutrones térmicos. Pueden suministrar calor nuclear y electricidad en un rango de temperaturas de salida del núcleo de entre 700 y 950°C, con la posibilidad de superar los 1,000°C en el futuro.

Los elementos base del combustible del VHTR son las partículas TRISO, cada una con un diámetro inferior a un milímetro. Estas partículas contienen un núcleo de material fisible rodeado por capas de carbono y carburo de silicio, lo que proporciona un confinamiento estable de los productos de fisión a temperaturas de 1600°C o superiores. Estas partículas pueden integrarse en cilindros compactos dentro de bloques hexagonales de grafito (núcleo tipo prismatic-block) o encapsularse en carburo de silicio dentro de esferas de grafito de aproximadamente 60 mm de diámetro (núcleo tipo pebble-bed).

Aunque las formas de los compuestos de combustible en estas dos configuraciones son diferentes, ambas comparten la misma base técnica: partículas de combustible TRISO recubiertas en una matriz de grafito, una estructura del núcleo completamente cerámica (grafito), refrigerante de helio y baja densidad de potencia. Estas características permiten alcanzar altas temperaturas de salida y garantizar la retención de los productos de fisión dentro de la partícula recubierta tanto en condiciones normales de operación como en situaciones accidentales.

Como se mencionó anteriormente, para permitir la eliminación pasiva del calor de desintegración, cada opción de núcleo debe mantenerse por debajo de los siguientes límites de potencia:

- Inferior a 625 MWt para el núcleo tipo prismatic-block
- Inferior a 250 MWt para el núcleo tipo pebble-bed
- Un VHTR puede diseñarse para utilizar ciclos de combustible alternativos y simbióticos, como U-Pu, MOX o Th-U.

Para la generación de electricidad, se puede emplear un ciclo directo con una turbina de gas de helio ubicada directamente en el circuito primario de refrigerante o, en el extremo inferior del rango de temperatura de salida, un ciclo indirecto con un generador de vapor y un ciclo Rankine convencional. En la actualidad, el ciclo de conversión de energía Brayton directo está siendo menos priorizado en favor del ciclo Rankine indirecto, debido a su menor riesgo tecnológico y a su mayor flexibilidad en términos de fluido de trabajo y aplicaciones del reactor (electricidad, calor de proceso y cogeneración).

Para cogeneración nuclear, como el suministro de calor de proceso para refinerías, petroquímica, metalurgia y producción de hidrógeno, el proceso de aplicación del calor se acopla generalmente al reactor a través de un intercambiador de calor intermedio (IHX, por sus siglas en inglés), en lo que comúnmente se denomina un ciclo indirecto.

CONCLUSIONES

Uno de los aportes más importantes de la nueva generación de reactores es su potencial para descarbonizar sectores industriales que actualmente dependen de combustibles fósiles para obtener calor. Industrias como la petroquímica, la metalurgia, la producción de fertilizantes (amoníaco) o la fabricación de hidrógeno requieren temperaturas elevadas y un suministro energético constante.

Los reactores nucleares tradicionales (Generación II/III) ya han demostrado que pueden destinar parte de su calor a usos no eléctricos, como los llamados distritos de calefacción industrial o la desalinización de agua, dado que operan en un rango de temperatura ($\sim 300^\circ\text{C}$) suficiente para cubrir necesidades típicas de $\sim 150^\circ\text{C}$ en esos procesos. De hecho, la cogeneración nuclear no es un concepto nuevo: desde finales del siglo XX se han implementado esquemas de este tipo en algunas plantas, por ejemplo, aprovechando el calor residual de reactores convencionales para calefacción urbana.

La IV generación de reactores nucleares lleva este potencial de cogeneración mucho más lejos. Al operar a temperaturas significativamente mayores (en algunos diseños 500 - 1,000 °C), los nuevos reactores pueden suministrar calor de alta entalpía adecuado para procesos industriales pesados que hoy son difíciles de electrificar. Los diseños Gen IV, como los reactores rápidos enfriados por metales líquidos, los reactores de gas de alta temperatura o los reactores enfriados por agua supercrítica, alcanzan temperaturas entre 500 y 800 °C, ideales para generar vapor industrial y calor de proceso en refinerías, plantas petroquímicas, fabricación de acero, producción de etileno, cemento, celulosa, entre otros. A su vez, ciertos diseños pueden operar en el extremo superior de temperatura: por ejemplo, los reactores SCWR (~625 °C), GFR (~850 °C) o MSR (750-1,000 °C) permiten abordar aplicaciones exigentes como la producción masiva de hidrógeno, generación de syngas, procesos termoquímicos avanzados y producción eficiente de amoníaco sin emisiones.

El impacto en la descarbonización sería significativo. Estas fuentes nucleares de alta temperatura podrían reemplazar calderas de gas o carbón en fábricas y plantas químicas, eliminando emisiones directas de CO₂. Además, al integrar la producción de hidrógeno rosa o nuclear en la ecuación, se posibilita descarbonizar sectores como el transporte (por medio de combustibles sintéticos o celdas de combustible) y la industria pesada, donde el hidrógeno se perfila como insumo clave para alcanzar emisiones netas cero.

Otro beneficio por destacar es la mejora en eficiencia energética. En una planta nuclear dedicada solo a producir electricidad, aproximadamente dos tercios del calor generado se desechan (principalmente a través de torres de enfriamiento) debido a las limitaciones termodinámicas de las turbinas convencionales. Si ese calor sobrante se aprovecha en procesos industriales, la eficiencia global de la planta se dispara. Estudios auspiciados por el OIEA concluyen que, configurando las centrales en modo cogeneración, la eficiencia térmica total del sistema podría incrementarse hasta ~80% – muy por encima del ~33% típico de solo generar electricidad.

Los reactores nucleares de IV Generación, junto con la cogeneración nuclear, se perfilan como aliados cruciales en la lucha contra el cambio climático. Su capacidad para proveer energía confiable y libre de carbono, tanto en forma de electricidad como de calor de proceso, los convierte en piezas fundamentales para descarbonizar sectores difíciles de electrificar.

Aún existen retos por superar: certificación de nuevos combustibles, validación de materiales, pruebas de seguridad pasiva y despliegue económico. Sin embargo, los avances actuales muestran que esta visión es tangible y realizable.

En un futuro energético equilibrado, es probable que las fuentes renovables convivan con reactores modulares avanzados, permitiendo el despliegue de fuentes de energía bajas en emisiones, flexibles y continuas. Con electricidad 24/7, fuentes de calor de alta temperatura y un ciclo de combustible cerrado, los reactores de IV Generación pueden hacer realidad una industria sin emisiones y una verdadera transición energética sostenible.

REFERENCIAS

- [1]. ECC-SMART. (2025). *Development of Small Modular Reactor Technology*. <https://ecc-smart.eu/about/>

- [2]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/gas-cooled-fast-reactor-gfr>
- [3]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Lead Fast Reactors (LFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/lead-fast-reactors-lfr>
- [4]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Molten Salt Reactors (MSR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr>
- [5]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Sodium Fast Reactor (SFR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/sodium-fast-reactor-sfr>
- [6]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Super-Critical Water Reactors (SCWR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/super-critical-water-reactors-scwr>
- [7]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *Very High Temperature Reactor (VHTR)*. <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/very-high-temperature-reactor-vhtr>
- [8]. Gen-IV International Forum (GIF). (2025). *What is Generation IV?*. <https://www.gen-4.org/>
- [9]. IEA – International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [10]. Jóvenes Nucleares. (2022). *Seminario de Reactores Avanzados [Lista de reproducción]*. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLXOkRmTvdrUCxYTTemM1DQkZRKBKfTyt0>
- [11]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Aplicaciones industriales y cogeneración nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/industrial-applications-and-nuclear-cogeneration>
- [12]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Desalinización nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-desalination>
- [13]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Hidrógeno nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/nuclear-hydrogen-production>
- [14]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *¿Qué son los pequeños reactores modulares (SMR)?* <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- [15]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Pequeños reactores modulares (SMR)*. <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-modulares-pequenos>
- [16]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Reactores refrigerados por gas*. <https://www.iaea.org/es/temas/reactores-refrigerados-por-gas>
- [17]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2024). *Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear*. <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications>

Si quieres participar — en nuestra —

REVISTA SAI

Haznos saber que quieres ser parte y envía
un correo a subdireccionestrategica@sai.org.co



PLANTAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN EUROPA 2010 VS 2022

Ospina Ortiz, Walter

Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia,
Gerencia de Proyectos, ESUMER, Medellín, Colombia,
Maestría Gerencia de Riesgos, Universidad Católica, Murcia, España,
icatersas@gmail.com

Resumen: En este artículo se hace un análisis comparativo del número de plantas de valorización energética en 23 países de Europa, en los años 2010 y 2022. El objetivo general es mostrar la tendencia en la optimización y construcción de este tipo de proyectos para hacer gestión de la disposición final de los residuos sólidos municipales.

Se hacen análisis comparativos con la situación en el Valle de Aburrá

Palabras clave: Valorización energética, Capacidad eléctrica, Tratamiento térmico

PLANTAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN EUROPA

En la Figura 1 se muestra la distribución geográfica de las plantas de valorización energética de residuos en 23 países de Europa en el año 2022.

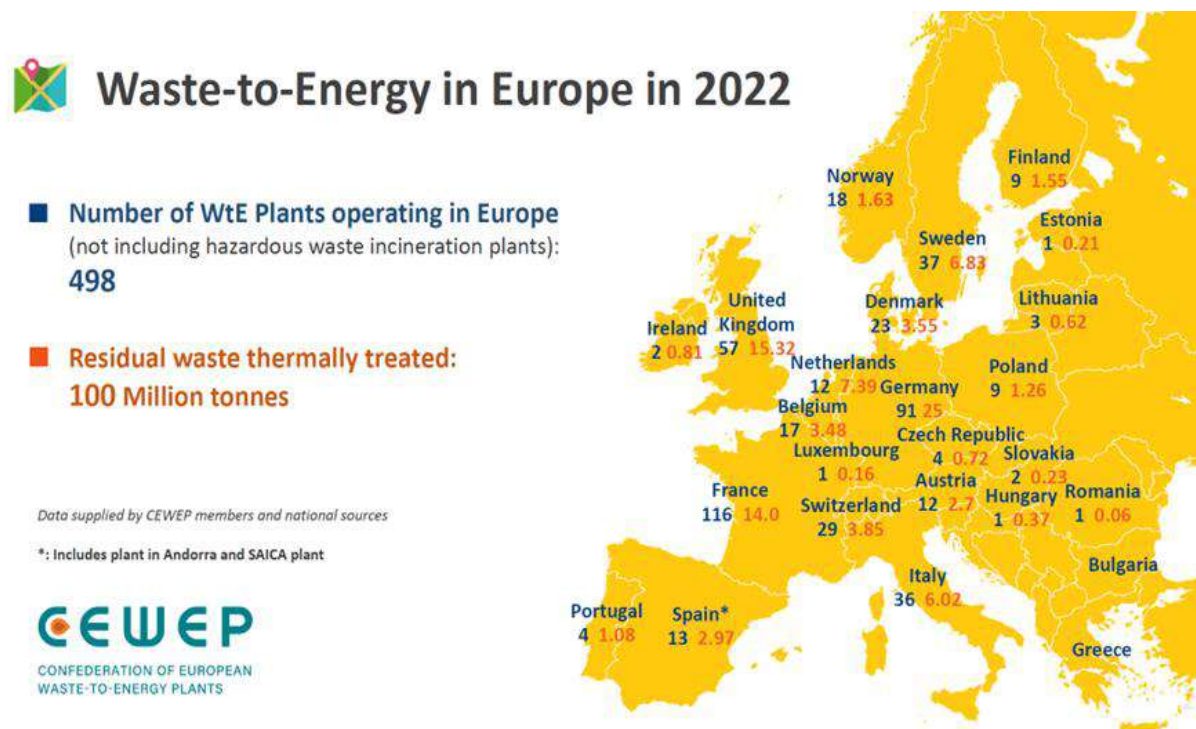


Figura 1. Cantidad de plantas de valorización energética en Europa en el 2022

Fuente: <https://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>

Para una mejor claridad en la Tabla 1 se muestran la cantidad de plantas por país y la cantidad en millones de toneladas anuales que son procesadas térmicamente en cada país. Se compara con la situación en 2010 para visualizar las tendencias

País	Número de plantas en 2022	Cantidad tratada térmicamente en 2022	Número de plantas en 2010	Cantidad tratada térmicamente en 2010	Aumento, toneladas	Aumento en tonelaje (%)
Portugal	4	1.080.000	3	1.100.000	-20.000	-1,8
España	13	2.970.000	11	2.000.000	970.000	48,5
Francia	116	14.000.000	129	13.700.000	300.000	2,2
Suiza	29	3.850.000	30	3.700.000	150.000	4,1
Luxemburgo	1	160.000	1	100.000	60.000	60,0
Bélgica	17	3.480.000	16	3.000.000	480.000	16,0
Italia	36	6.020.000	53	5.700.000	320.000	5,6
Austria	12	2.700.000	13	2.100.000	600.000	28,6
Hungría	1	370.000	1	400.000	-30.000	-7,5
Rumania	1	60.000	0	0	60.000	
Eslovaquia	2	230.000	2	200.000	30.000	15,0
República Checa	4	720.000	3	500.000	220.000	44,0
Alemania	91	25.000.000	72	20.000.000	5.000.000	25,0
Países Bajos	12	7.390.000	11	6.500.000	890.000	13,7
Polonia	9	1.260.000	1	40.000	1.220.000	3050,0
Dinamarca	23	3.550.000	29	3.500.000	50.000	1,4
Lituania	3	620.000	0	0	620.000	
Estonia	1	210.000	0	0	210.000	
Suecia	37	6.830.000	32	5.100.000	1.730.000	33,9
Finlandia	9	1.550.000	3	300.000	1.250.000	416,7
Noruega	18	1.630.000	17	1.200.000	430.000	35,8
Reino Unido	57	15.320.000	24	4.200.000	11.120.000	264,8
Irlanda	2	810.000	0	0	810.000	
TOTAL	498	99.810.000	451	73.340.000	26.470.000	36,1

Tabla 1. Residuos procesados térmicamente en los distintos países de Europa en 2010 y 2022 y cambios

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se muestra la distribución geográfica de las plantas de valorización energética de residuos en 23 países de Europa en el año 2010.



Figura 2. Cantidad de plantas de valorización energética en Europa en el 2010

Fuente: <https://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>

Se puede observar:

- Los países que aumentaron la cantidad de plantas son: España, República Checa, Alemania, Países Bajos, Polonia, Suecia, Finlandia, Noruega y Reino Unido.
- Los países que pasaron de no tener plantas, a tener una o más, son: Rumania, Letonia, Estonia e Irlanda.
- Los países que disminuyeron la cantidad de plantas son: Francia, Suiza, Italia, Austria y Dinamarca.
- La cantidad anual de procesamiento de residuos se incrementó 26.470.000 toneladas, considerando los 23 países.
- Los dos países que más incrementaron el tonelaje de procesamiento son Alemania y Reino Unido.
- Hungría disminuyó ligeramente la cantidad de residuos procesados a pesar de conservar la misma cantidad de plantas.
- Portugal incremento la cantidad de plantas en una unidad, pero disminuyó la cantidad de residuos procesados 20000 ton/año.

En la tabla 2 se muestra aspectos estadísticos de mucho interés

País	Habitantes en 2022	Cantidad tratada diaria, ton	Cantidad tratada diaria por planta, ton	Kg/habitante día en 2022
Portugal	10.352.042	3.000	750	0,290
España	47.432.893	8.250	635	0,174
Francia	67.957.053	38.889	335	0,572
Suiza	8.931.000	10.694	369	1,197
Luxemburgo	645.397	444	444	0,689
Bélgica	11.617.623	9.667	569	0,832
Italia	59.030.133	16.722	465	0,283
Austria	8.978.929	7.500	625	0,835
Hungría	9.689.010	1.028	1.028	0,106
Rumania	19.042.455	167	167	0,009
Eslovaquia	5.434.712	639	319	0,118
República Checa	10.516.707	2.000	500	0,190
Alemania	83.237.124	69.444	763	0,834
Países Bajos	17.590.672	20.528	1.711	1,167
Polonia	37.654.247	3.500	389	0,093
Dinamarca	5.873.420	9.861	429	1,679
Lituania	2.805.998	1.722	574	0,614
Estonia	1.331.796	583	583	0,438
Suecia	10.452.326	18.972	513	1,815
Finlandia	5.548.241	4.306	478	0,776
Noruega	5.571.000	4.528	252	0,813
Reino Unido	68.265.000	42.556	747	0,623
Irlanda	5.060.004	2.250	1.125	0,445
TOTAL	503.017.782	277.250	557	0,551

Tabla 2 Datos estadísticos de interés Fuente: Elaboración propia

Se observa lo siguiente

- La capacidad promedio por planta es de 557 toneladas diarias. Interesante comparas con el Valle de Aburrá que genera del orden de 2500 toneladas diarias, de las cuales probablemente un 40 a 60 % se pueden tratar en planta de tratamiento térmico.
- Las capacidades diarias están entre 170 y 1700 toneladas diarias.
- En promedio se tratan 0.55 kg por habitante día. Si se compara con el Valle de Aburrá con una población de 3.900.000 habitantes, tratando 1250 toneladas por día, se tendrían 0.32 kg tratados térmicamente por habitante día
- Luxemburgo, Rumania, Eslovaquia y Estonia, países con una o dos plantas, tienen una capacidad promedio por planta, inferior a 650 ton/día.
- Rumania es el país, de los 23 analizados, con menor procesamiento térmico de residuos

CONCLUSIONES

Francia desmanteló 13 plantas, pero incremento en 300.000 ton/año la cantidad de residuos procesados. Como indica ADEME (2017) - (Agencia Francesa de Medio Ambiente y Gestión de la Energía), la disminución se debe a la optimización de algunas plantas y la obsolescencia de las plantas desmanteladas. No es válido decir que la disminución se debe a un rechazo de la tecnología de la combustión por parte del sector residuos de Francia o que es un logro de los grupos de presión ambientalistas, dado el incremento de la cantidad de residuos procesados a pesar de la disminución del número de plantas.

Un análisis similar aplica para Suiza, que incrementó en 150.000 ton/año el procesamiento, pero desmanteló una planta en el periodo 2010 a 2022.

Dinamarca desmanteló 6 plantas e Italia desmanteló 17 plantas entre 2010 y 2022, pero incremento la cantidad de residuos tratados térmicamente en 50.000 ton/año y 320.000 ton/año, respectivamente. Esto indica un proceso de optimización de plantas más que un rechazo a las tecnologías de tratamiento térmico.

Luxemburgo y Rumania, cada uno con una planta, procesan 444 ton/día y 167 ton/día, respectivamente. Esto se puede comparar con la idea de que las plantas de valorización energética por combustión deben procesar mínimo 500 ton/día.

Estonia con una planta procesa 583 ton/día. Esta planta tiene una capacidad similar a la que se pretende instalar en Medellín – Colombia. Esta planta en Estonia, puesta en servicio en 2013, es llamada Iru y tiene una capacidad eléctrica de 17 MW (2). El costo total aproximado fue de 110 millones de euros, según publicación del European Investment Bank (2). Si el poder calorífico de los residuos que ingresan a la planta fuese similar a los de Medellín,

entonces la capacidad eléctrica sería también similar. Según el costo total y la capacidad de la planta, el costo promedio es de 584 euros por ton/año.

REFERENCIAS

- [1].ADEME, (2017) ¿Quel avenir pour le traitement des ordures ménagères résiduelles?
<https://www.ademe.fr/>
- [2].European Investment Bank, (2011) Eesti Energia Waste to Energy Plant.
<https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20110107>

Referencias consultadas en línea en 2025

DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO

Esteban, Roa¹; Carlos, Valderrama²; Jorge, Herrera³

1 Fundador y CEO Grupo Empresarial Rise S.A.S, eroa@grise.io

2 Ingeniero Físico, Investigador en Grupo Empresarial Rise S.A.S c.valderrama@grise.io

3 Ingeniero Físico, Investigador en Grupo Empresarial Rise S.A.S jherrera@grise.io

Resumen

El presente artículo aborda la evolución histórica y el fundamento teórico de los sistemas de transporte basados en levitación magnética (Maglev), enfocándose en el desarrollo de esta tecnología en Colombia por parte del Grupo Empresarial Rise S.A.S. Se presenta una revisión detallada de los principios físicos subyacentes, tales como el uso de arreglos Halbach y motores lineales de inducción, así como los avances alcanzados mediante la implementación de prototipos a pequeña escala. Se discuten los desafíos experimentales, configuraciones ensayadas y resultados preliminares que evidencian el potencial de esta tecnología para revolucionar la movilidad urbana sostenible en el país.

Palabras clave: Maglev, levitación magnética, arreglo Halbach, motor lineal de inducción, movilidad urbana, transporte sostenible, Grupo Empresarial Rise.

INTRODUCCIÓN

La historia de los sistemas de transporte con tecnología de levitación Magnética (Maglev), se remonta a finales del siglo XIX, cuando Schuyler S. Wheeler y Charles S. Bradley, presentaron las primeras patentes sobre motores lineales para aplicaciones ferroviarias, luego entre 1935 y 1941, Hermann Kemper presentó diversas patentes sobre sistemas levitación magnética ferroviarias, dentro de las cuales se destaca la patente 643316 “Pista flotante con vehículos sin ruedas que flotan sobre rieles de hierro utilizando campos magnéticos”.

Para la década de 1940, el profesor Eric Laithwaite, presentó un modelo funcional de tamaño real de un motor lineal de inducción y en la década de 1960 se desarrolló el primer vehículo funcional de levitación magnética.

Durante los años 70's, Estados Unidos, Alemania y Japón, se centraron en los estudios de imanes superconductores y comenzaron a crear prototipos de transporte terrestre de alta velocidad con levitación magnética, dentro de los cuales se pueden encontrar el MLU System (Japón), HSST01 (Japón), Transrapid 01 (Alemania), entre otros.



Figura 1. Sistema de tren HSST. Tomado de: Folleto HSST
<http://tsushima-keibendo.a.la9.jp/HSST/HSST-pamph.html>



Figura 2. TRANSRAPID 01 1970. Tomado de Transrapid Design History.
<https://www.maglev.net/transrapid-design-history>

En los años 90, entraron en operación los primeros sistemas de transporte con levitación magnética en Japón y para el año 2004, en China, empezó a operar el primer Maglev totalmente automatizado. [1]

En la década del 2000, Richard F. Post, presentó varias patentes como “INDUCTRACK MAGNET CONFIGURATION”, “LAMINATED TRACK DESIGN FOR INDUCTRACK MAGLEV SYSTEMS”, en los cuales se proponen diferentes diseños para sistemas Maglev a partir de Arreglos de imanes Halbach.

En América del Sur, Brasil se encuentra desarrollando un sistema de levitación Magnética para transporte urbano “MagLev-Cobra”. Para el año 2016 dentro de la Universidad Federal de Río de Janeiro contaba con una línea de 200 metros de demostración y un vagón con una capacidad aproximada de 30 pasajeros. [2]



*Figura 3. Maglev-cobra. Tomado de: Maglev Company Brazil.(s.f).
<https://www.maglevcompanybrazil.com/>*

Investigación y Desarrollo Maglev Grupo Empresarial Rise S.A.S.

En Colombia, **Grupo Empresarial Rise S.A.S.** Dentro de su línea de investigación desde 2022, se encuentra desarrollando un tren de levitación magnética a pequeña escala. Este prototipo busca generar datos en condiciones reales para comprender las variables críticas en la implementación de esta tecnología en el país, especialmente en el contexto de la reactivación de las vías férreas nacionales.

Grupo Empresarial Rise S.A.S. es una compañía colombiana que nace inicialmente con el propósito de desarrollar soluciones de software. Con el tiempo, la compañía ha diversificado

su portafolio reinvertiendo sus utilidades en el desarrollo de soluciones de ingeniería innovadoras. Hoy en día, el Grupo Empresarial Rise a través de Rise Automóvil S.A.S se enfoca en transformar la movilidad y la infraestructura tecnológica en Colombia, a través de dos líneas estratégicas centradas en resolver los principales desafíos de la movilidad sostenible.



Figura 4. Equipo Grupo Rise

1. Fabricación nacional de vehículos eléctricos, incorporando baterías propias, estandarizadas e intercambiables, contribuyendo al fortalecimiento de la industria automotriz eléctrica en Colombia.
2. Investigación y desarrollo Sistemas Maglev para aplicaciones de movilidad contribuyendo al avance de tecnologías de transporte de alta eficiencia en el país.

Estas iniciativas reflejan el compromiso de Grupo Empresarial Rise S.A.S. con la innovación y el desarrollo de soluciones de ingeniería vanguardistas, orientadas a transformar la movilidad y la infraestructura tecnológica en Colombia.

MARCO TEÓRICO

● Sistema de Levitación

El sistema de levitación se basa en el concepto de Inductrack , en el cual se tienen en cuenta dos aspectos clave:

1. Arreglos Halbach en movimiento que producen un campo magnético espacialmente periódico y altamente concentrado en una sola cara.

Roa, Esteban; Valderrama, Carlos; Herrera, Jorge DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN PROTOTIPO DE TREN MAGLEV DE BAJO COSTO A PEQUEÑA ESCALA CON FUTURO POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIARIO

(Pág. 75 – 91)

2. Una "vía conductora" fabricada con un material no ferromagnético en el cual se inducen corrientes por el movimiento del campo magnético. Estas corrientes inducidas generan un campo magnético opuesto que produce una fuerza de repulsión sobre el arreglo Halbach, permitiendo la levitación del sistema.

❖ Arreglo Halbach

El concepto de Inductrack, se basa en el uso del arreglo de imanes ideado por Klaus Halbach [3]. El objetivo de este arreglo es maximizar la densidad de campo magnético ubicado en una de las caras, a expensas de anular el campo magnético en la cara opuesta del arreglo.

El arreglo Halbach, consiste en la disposición sucesiva de imanes, cada uno con una rotación infinitesimal en la dirección de magnetización, de forma que al completar un ciclo completo de 360°, se obtiene un patrón de magnetización que concentra el flujo en una sola dirección, generando un campo magnético unidireccional altamente eficiente.

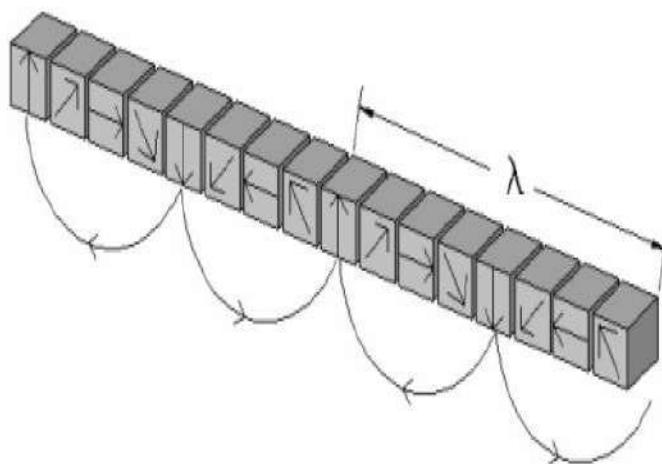


Figura 5. Arreglo Halbach. Tomado de [5]

El campo magnético predicho para este arreglo por [4], en el lado aumentado, es el siguiente:

$$B_x = B_o \sin(kx) \exp(-k(y-x))$$

$$B_y = B_o \cos(kx) \exp(-k(y-x))$$

$$B_o = B_r [1 - \exp(-kd)] \frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M}$$

Donde M es el número de imanes por arreglo, Br es el campo magnético residual, valor que depende del material, k es el número de onda del arreglo y d es el grosor del arreglo.

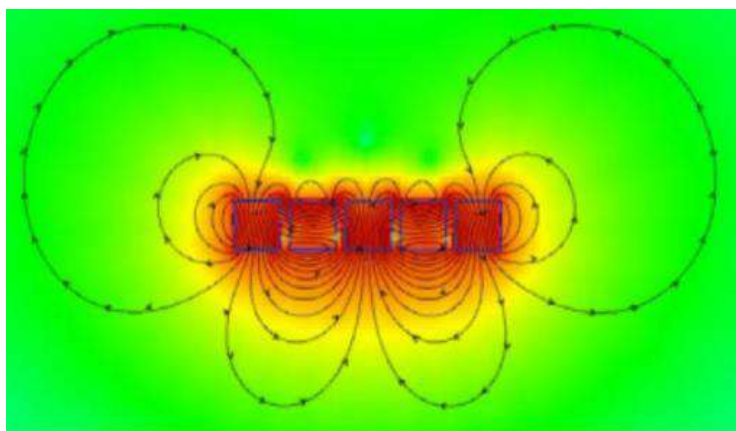


Figura 6. Campo Magnético de un arreglo Halbach. Tomado de [5]

❖ Interacción Arreglo Halbach- Sistema de Riel

Para producir la levitación, los arreglos Halbach se posicionan sobre una lámina de un material no ferromagnético y conductor como el aluminio, la cual llamaremos (riel). La cara del arreglo Halbach con mayor intensidad de campo magnético debe orientarse hacia el riel.

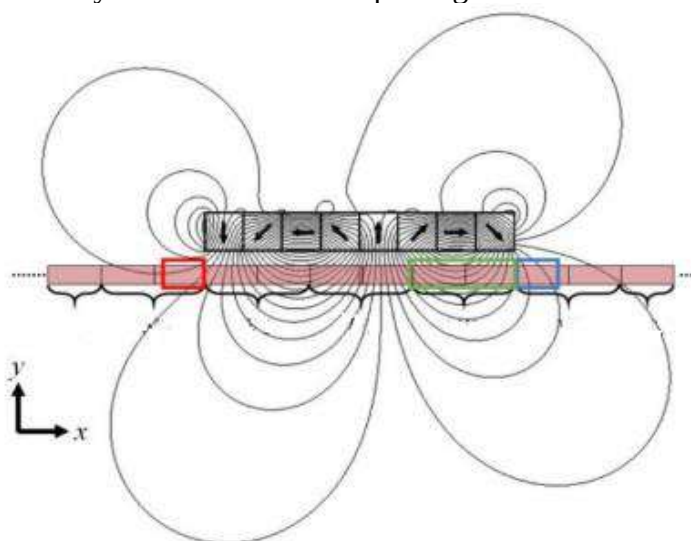


Figura 7. Trayectorias de corrientes de Foucault en la placa de reacción (riel). Adaptado de [6].

Cuando el arreglo Halbach se desplaza longitudinalmente a lo largo del riel, se induce una corriente eléctrica en la superficie conductora. Dicha corriente genera un campo magnético que se opone al campo del arreglo Halbach, produciendo una fuerza de repulsión magnética que da lugar al fenómeno de levitación.

La magnitud de la corriente inducida depende del flujo magnético y de la velocidad de desplazamiento del arreglo Halbach.

La corriente inducida puede expresarse como:

$$I(v) = \frac{\lambda B_0 w}{2\pi L} \left[\frac{1}{1 + (R/kv)^2} \right] \exp(-k(y + l/2))$$

Donde L es la inductancia, R la resistencia, w y l representan el ancho y el grueso de la sección transversal de cada sección ranurada del riel.

La fuerza de levitación y la fuerza de arrastre producidas son:

$$F_{lift}(v) = \frac{B_0^2 w}{2kLd_c} \left[\frac{1}{1 + (R/kvL)^2} \right] \exp(-2k(y + l/2))$$

$$F_{drag}(v) = \frac{B_0^2 w}{2kLd_c} \left[\frac{(R/kvL)^2}{1 + (R/kvL)^2} \right] \exp(-2k(y + l/2))$$

[3], [4],[5]

• Sistema de Propulsión

Para la propulsión en sistemas de transporte Maglev, se emplean distintos tipos de motores lineales, cuya selección depende del diseño, velocidad y aplicación específica del sistema. Para sistemas Maglev de transporte urbano, de baja velocidad (< 100 km/h), es recomendable utilizar Motores Lineales de Inducción de estator corto.

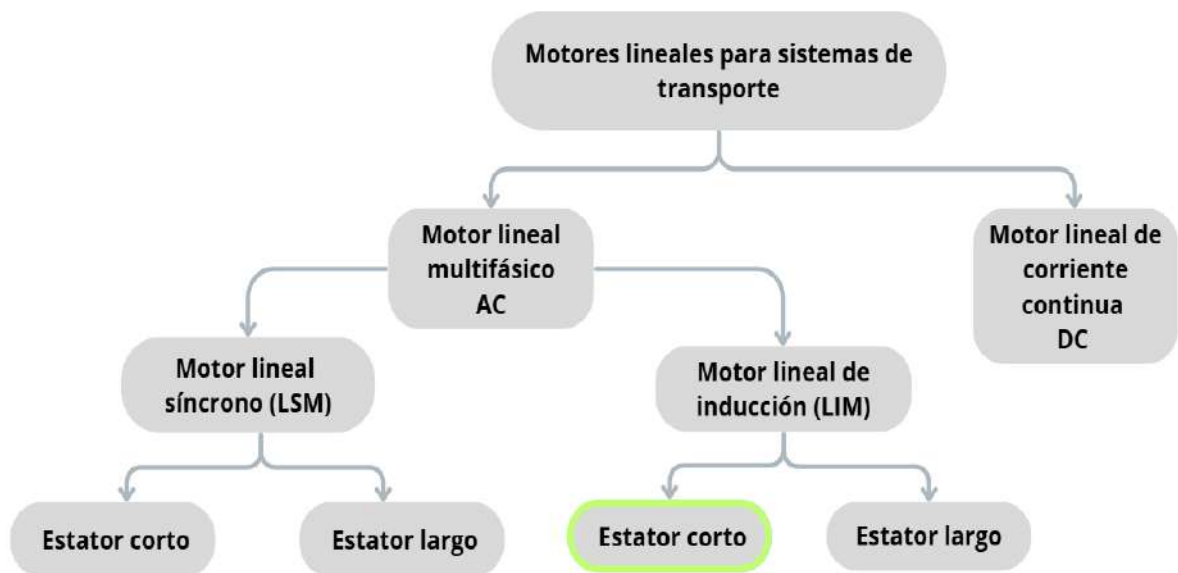


Figura 8. Tipos de motores lineales.

El motor lineal de inducción opera bajo el mismo principio que un motor rotacional de inducción, pero con un desplazamiento lineal en lugar de rotatorio.

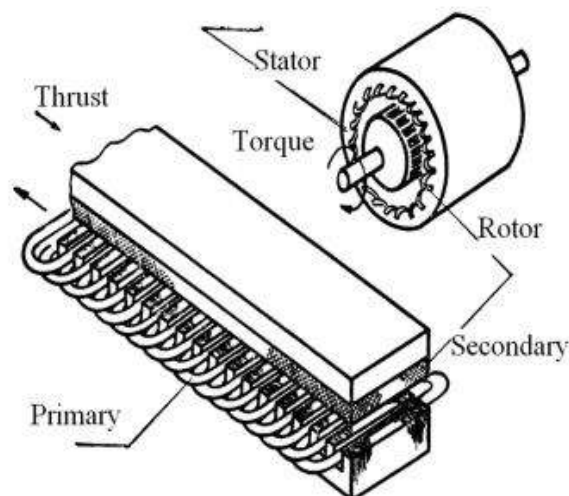


Figura 9. Motor rotacional y motor lineal. Tomado de [8]

En el motor lineal de inducción de estator corto (Short-Stator LIM), el sistema activo (primario) se encuentra montado en el tren, el cual consiste en un bobinado trifásico que produce un campo electromagnético viajero.

Este campo induce corrientes en la parte pasiva (secundario) que es la propia vía conductora (generalmente de aluminio o cobre).

La interacción entre el campo magnético y las corrientes inducidas produce una **fuerza de Lorentz** ($F = I \times B$), impulsando el vehículo en la dirección del campo magnético móvil.

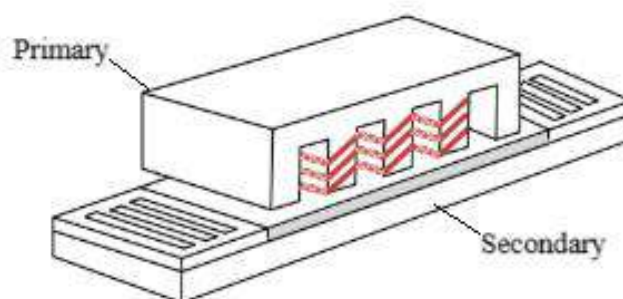


Figura 10. Motor lineal con riel ranurado. Adaptado de [9]

En este tipo de sistemas se tiende a utilizar un secundario ranurado, para mejorar la eficiencia del motor lineal. Esta configuración ofrece dos ventajas clave: [8],[9],[10]

- Las ranuras guían y concentran las corrientes inducidas en el secundario, reduciendo pérdidas por dispersión y mejorando la densidad de flujo magnético.
- Mantiene un campo constante en la zona de interacción primario-secundario, evitando fluctuaciones que reduzcan la fuerza de empuje.

METODOLOGÍA

En el proceso de desarrollo del prototipo de tren Maglev, se encuentran descritos dos sistemas (Levitación y Propulsión), los cuales al terminar las investigaciones y pruebas se unirán para formar en conjunto el prototipo de Maglev

- **Sistema de Levitación.**

Para el estudio del sistema de levitación se desarrollaron 2 prototipos de sistema Vagón-Riel para análisis y caracterización.

- ❖ **Prototipo para Riel Lineal.**

Un prototipo de vagón que cuenta con arreglos Halbach para generar la levitación y la construcción de un riel de 10 metros de longitud para el desplazamiento del vagón.

Durante las pruebas, se observaba que la parte trasera del vagón experimentaba un movimiento oscilante lo que daba la sensación de que intentaba levitar, pero sin alcanzar la estabilidad necesaria. Esta inestabilidad en el movimiento se debía a que la longitud de la pista era insuficiente y no se lograba una velocidad constante para permitir una generación de campo magnético estable y uniforme.

Estas variaciones generaban **efectos de borde** y **efectos finales** [6][9][11], los cuales comprometían la estabilidad del sistema y reducía su eficiencia de manera significativa.



Figura 11. Prototipos Vagón - Vía Lineal

❖ Riel Circular

A partir de los resultados con el prototipo inicial, se desarrolla un segundo prototipo de vía circular, que permite simular una longitud “infinita” de riel. En este diseño el vagón se confina en la parte superior de la vía, mientras el riel se “desplaza” al girar sobre su eje central.

En las primeras pruebas se logró evidenciar la levitación del vagón, aunque la parte trasera se levantaba mucho más que la parte delantera.

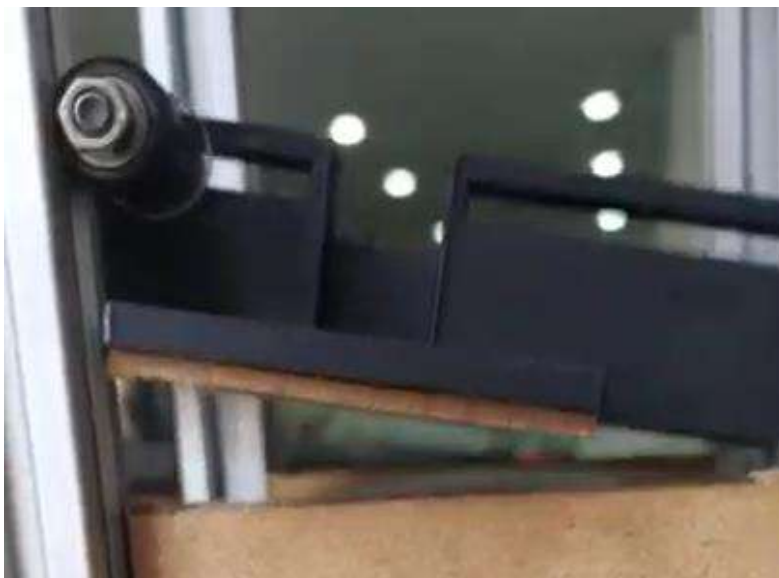


Figura 12. Levitación en prototipo V 1.0 con desnivel en la altura de levitación en los extremos del vagón.

El efecto de borde y efecto final aún seguían presentes en el sistema. Para minimizar estos efectos no deseados, se realizaron modificaciones en el diseño del prototipo.

1. Prototipo más robusto.
2. Disposición curva de los arreglos Halbach para adaptarse a la geometría del riel
3. Mayor longitud de los arreglos Halbach con el fin de minimizar los efectos de borde y efectos finales.



Figura 13. Arreglo Halbach curvo

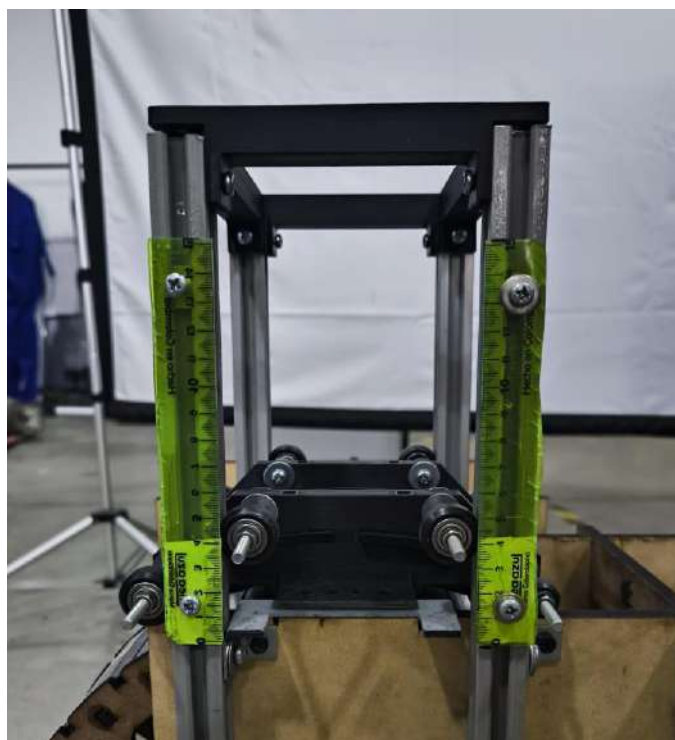


Figura 14. Montaje prototipo robusto con arreglo Halbach curvo.

Configuración de Rieles

Los rieles se componen de láminas de aluminio ranuradas alternadas con láminas de níquel, con el fin de optimizar la conductividad de la corriente inducida. En la siguiente figura se puede observar algunas de las configuraciones de los rieles, donde las láminas de aluminio están representadas en gris y las de níquel en azul.

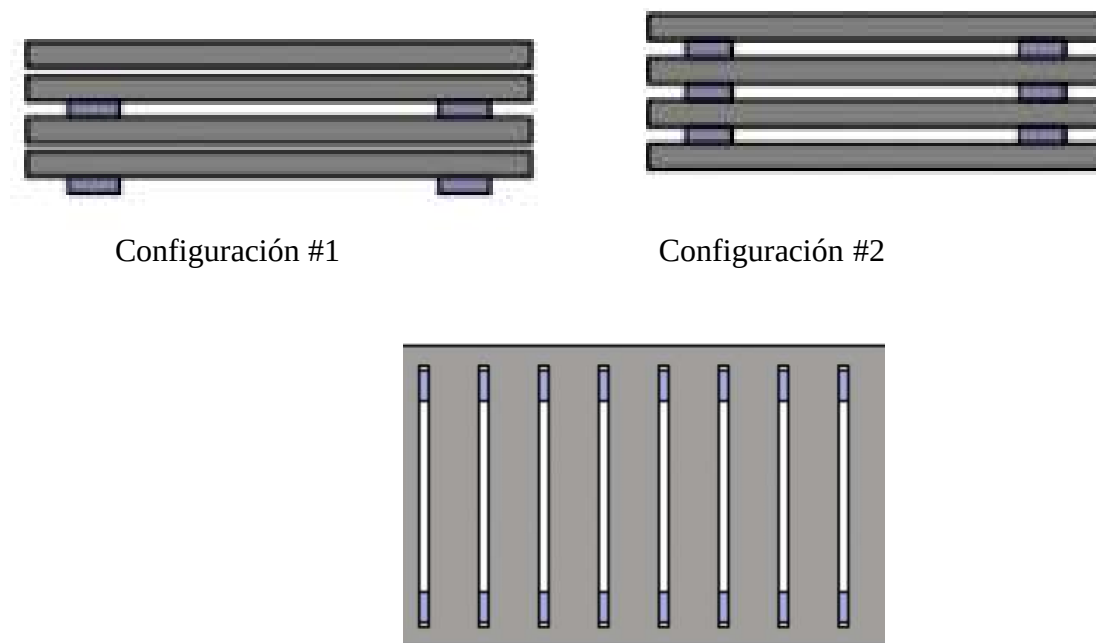


Figura 15. Tipos de configuración de riel, vistas frontales y superiores.

RESULTADOS

Se tomaron datos de Velocidad y Altura de levitación, utilizando diferentes cargas en el vagón (0 gramos, 500 gramos, 750 gramos) y diferentes combinaciones de rieles.

- Durante las pruebas se logra una altura máxima de 9 mm a una velocidad de 100 Km/h, utilizando el vagón sin carga.
- Se necesita una velocidad mínima de 30 Km/h para el vagón sin carga en el cual se logra levitación.



Figura 16. Vagón con diferentes cargas (a) Vagón sin carga y (b) Vagón cargado con 750g

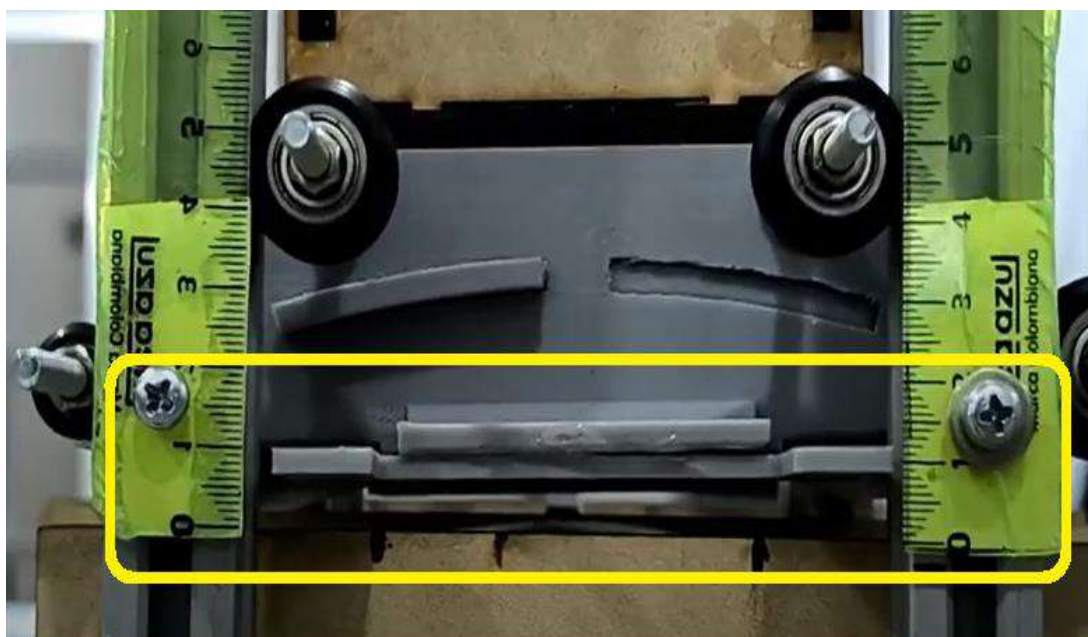


Figura 17. Prototipo de Tren levitando

A continuación, se muestran los datos obtenidos para la prueba utilizando el tren sin carga y una configuración de 3 rieles superpuestos con 3 láminas de material conductor (Níquel).

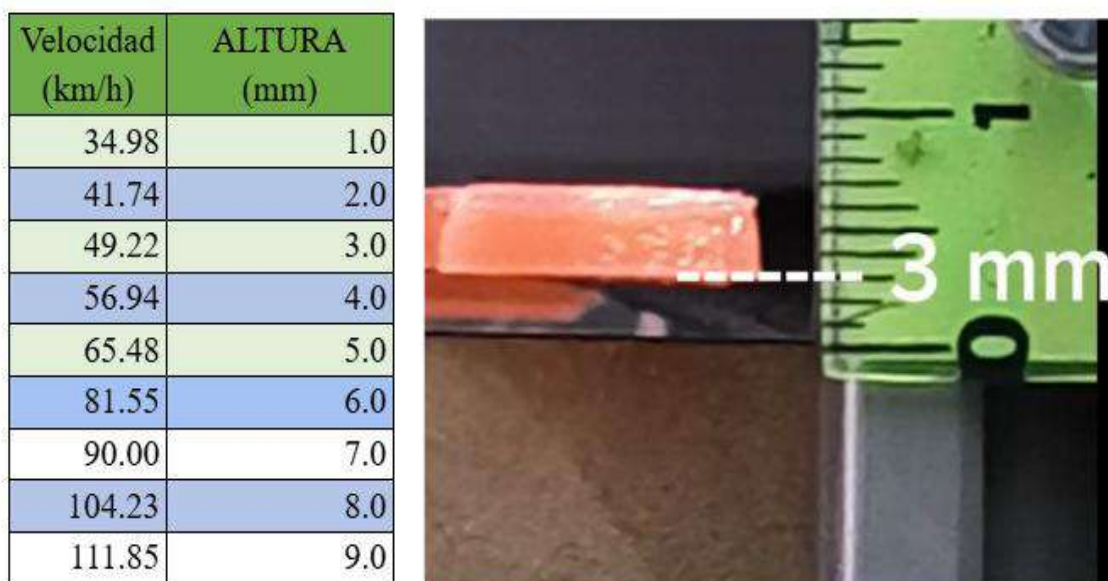


Figura 18. Prototipo de Tren levitando a una altura de 3 mm y toma de datos de velocidad vs altura

● Sistema de Propulsión.

Para el sistema de propulsión se decide utilizar un motor lineal de inducción (LIM) de estator corto como lo sugiere la literatura para aplicaciones en transporte urbano donde se requieren bajas velocidades (menores a 100 Km/h) [12][13]

Para las primeras pruebas se diseña un prototipo de motor lineal con las siguientes características:

- Longitud del primario: 0.4 metros
- Número de fases: 3
- Número de polos: 5
- Longitud de la vía: 5 metros.
- Velocidad máxima esperada = 60 km/h
- Empuje máximo esperado = 50 N

A la fecha, el motor se encuentra en fase de construcción, mientras que la vía se encuentra en fase de ensamble.



Figura 19. Secundario motor lineal “Via”



Figura 20. Fabricación de motor lineal

CONCLUSIONES

El desarrollo de sistemas de levitación magnética en Colombia, liderado por el Grupo Empresarial Rise S.A.S., representa un paso significativo hacia la innovación en movilidad urbana. Los resultados preliminares obtenidos con los prototipos demuestran la viabilidad de aplicar principios como el arreglo Halbach y motores lineales de inducción para lograr levitación efectiva en sistemas de transporte.

Los ensayos realizados, aunque aún en fase experimental, han permitido identificar variables clave como la velocidad mínima para lograr levitación, la influencia de las cargas y los efectos de borde.

Se espera continuar con las pruebas de propulsión del motor lineal, para combinar los sistemas y crear un circuito cerrado de 7 metros de radio para continuar con las investigaciones e implementar sistemas de control.

REFERENCIAS

- [1]. R. Hellinger and P. Mnich, "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1892–1900, Nov. 2009
- [2]. L. S. Mattos, E. Rodriguez, F. Costa, G. G. Sotelo, R. de Andrade and R. M. Stephan, "MagLev-Cobra Operational Tests," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-4, April 2016.
- [3]. K. Halbach, "Applications of permanent magnets in accelerators and electron storage rings (invited)," *J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 1, pp. 3605–3608, Mar. 1985.
- [4]. R. F. Post and D. D. Ryutov, "The Inductrack concept: A new approach to magnetic levitation," *Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-ID-136199*, 1999.
- [5]. P. Friend, "Magnetic Levitation Train Technology 1," Tesis de pregrado, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Bradley University, Peoria, IL, EE.UU., May 2004.
- [6]. Yamaguchi, Hiroto & Morishita, Mimpei. (2023). End Effects of Halbach Field Magnet Type Linear Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 143. 570-578. 10.1541/ieejias.143.570.
- [7]. L. Zhang and H. Wang, "Application of Linear Motor in the Urban Rail Transit System (URTS)," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1500–1515, 2020.
- [8]. Boldea, I. and Nasar, S.A., *Linear Motion Electromagnetic Devices*, Taylor & Francis Group, New York, 2001
- [9]. A. Mousaei and M. B. B. Sharifian, "Design and optimization of a linear induction motor with hybrid secondary for textile applications," 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260773.

- [10]. G. Lv, T. Zhou, D. Zeng and Z. Liu, "Design of Ladder-Slit Secondaries and Performance Improvement of Linear Induction Motors for Urban Rail Transit," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 2, pp. 1187-1195, Feb. 2018
- [11]. R. C. Creppe, J. A. C. Ulson and J. F. Rodrigues, "Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 358-362, June 2008, doi: 10.1109/TEC.2008.918594
- [12]. H. -T. Cho, Y. -C. Liu and K. A. Kim, "Short-Primary Linear Induction Motor Modeling with End Effects for Electric Transportation Systems," 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung, Taiwan, 2018, pp. 338-341, doi: 10.1109/IS3C.2018.00092.
- [13]. Boldea, "Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook", 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2023.

**CONSULTORÍA Y ASESORAMIENTO
ESTRATÉGICO**

más rentabilidad y mejores procesos



Grupo Pospin
Estrategia & Negocios



Calle 5 No. 76 A 115 Edificio Siempre Viva Local 403 - +57 3216369640 - rodrigo.posada@grupopospin.com

HACIA LA VIABILIDAD DE LOS PROYECTOS DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN COLOMBIA

Diego Gómez, PhD,¹
Walter Ospina Ortiz²
Enrique Posada Restrepo³

²Ingeniero Industrial, PhD, M Sc, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Director ECSIM,
diego.gomez@fundacionecsim.org

²Ingeniero electricista Universidad Nacional – Sede Medellín, Colombia. Director WtERT Colombia
icatersas@gmail.com

³Ingeniero mecánico UPB; BS y Máster en ingeniería mecánica, University of Maine, Orono, Maine, EUA
eposadar@yahoo.com

Resumen: Se hace una revisión de las dificultades y barreras que se presentan en Colombia en lo que tiene que ver con la utilización de técnicas de valorización de residuos sólidos. Se examinan las distintas viabilidades y riesgos al respecto y se incluyen recomendaciones para mitigar tales barreras y poder pasar a la etapa de ejecución de este tipo de proyectos. Este trabajo ha sido elaborado por los autores luego de sostener una serie de entrevistas con personas relacionadas con el campo y es un perfeccionamiento de trabajos anteriores realizados por tales autores.

Palabras clave: Valorización, Residuos Sólido Municipales, Tratamientos, Tratamiento Térmico, Costos y beneficios, Rellenos sanitarios.

1 INTRODUCCIÓN

La humanidad está generando en término medio entre 0,9 y 1,2 kilogramos diario por persona en residuos [1, 2]. ¿Como se puede construir una solución de manera que se pase de la contaminación a la regeneración del medio ambiente? Varios elementos parecen críticos. Uno de ellos es la reducción de la tasa de residuos per cápita y otra es la profundización en los modelos de economía circular. La reducción de las tasas per cápita puede parecer como algo correcto, posible y sensible. Pero la realidad que se observa en los países a medida que se desarrollan [3], es que se produce un aumento de estas tasas. Así que no hay indicaciones que por esta ruta se llegue a mitigar el problema, al menos en el corto plazo. Queda como opción idealizada la profundización de los modelos de economía circular. Esta ruta parece lógica y simple, pero en realidad implica importantes y complejos aspectos relacionados con la logística, la tecnología, la sostenibilidad económica, la disponibilidad de espacios y de empresas especializadas en estos procesos para los desechos municipales y el desarrollo de ciclos de utilización y adecuación de los residuos a las necesidades de los procesos de transformación.

Entonces queda como ruta disponible real el encontrar, desde la tecnología, formas de convertir los residuos en insumos para la generación energía o para procesos de producción

industrial con transformaciones térmicas o químicas. Este documento busca atender la forma de hacer viable la generación de energía con residuos. En esencia, los plásticos, textiles, biodegradables y otros son formas concentradas de energía que ha procesado el hombre. El asunto es como extraer la mayor cantidad de energía concentrada en estos residuos.

2 PROBLEMÁTICA DE LA GESTIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDO MUNICIPALES

El manejo de los residuos sólidos es uno de los desafíos ambientales más urgentes a nivel mundial. En las últimas décadas, el crecimiento exponencial de la población, el aumento del consumo y la urbanización han generado una acumulación masiva de residuos que, en muchos casos, no se gestionan adecuadamente, lo que conlleva graves consecuencias para el medio ambiente, la salud pública y la economía.

A medida que la población mundial crece y los países se desarrollan económicamente, la cantidad de residuos sólidos también aumenta. Según las Naciones Unidas, se espera que la generación de residuos urbanos crezca a una tasa anual del 3,4% hasta 2050. En particular, las ciudades, que albergan a más del 55% de la población mundial, son los principales centros de generación de residuos. Los productos de uso diario, como envases de plástico, productos electrónicos, textiles y alimentos, contribuyen significativamente a este aumento.

Uno de los mayores problemas derivados de la acumulación de residuos sólidos es el impacto ambiental. Los desechos no gestionados de manera eficiente, como es el caso de los plásticos de un solo uso, pueden terminar en los océanos si se manejan descuidadamente permitiendo que lleguen a las corrientes de agua, afectando la vida marina y contribuyendo a la contaminación de los ecosistemas acuáticos. En los vertederos, los residuos orgánicos generan emisiones de metano, un potente gas de efecto invernadero, que se considera por muchos que tiene impactos sobre el cambio climático. Además, la quema de residuos en basureros mal gestionados emite contaminantes atmosféricos, afectando la calidad del aire y la salud humana.

La gestión de residuos sólidos enfrenta diversos desafíos, especialmente en los países en desarrollo. La falta de infraestructura adecuada, la escasez de recursos financieros y la falta de educación y concientización pública dificultan la implementación de sistemas de recolección, clasificación y reciclaje eficientes. En muchas regiones, los vertederos ilegales y las prácticas de disposición inadecuadas son comunes, lo que agrava el problema.

La figura 1 [4] muestra la situación de disposición de residuos en varios países avanzados. En varios de ellos, en Europa, se han logrado desarrollar rutas para evitar llevar los residuos a disposición en rellenos sanitarios. En el caso de Estados Unidos, se tiene todavía un uso amplio de este método de disposición, probablemente por tratarse de un país con amplias disponibilidades de terrenos.

Manejo de residuos en cuatro países avanzados de Europa y USA							
País (población, millones)	Desechos totales, millones ton/año (kg/días por habitante)	Desechos municipales (MSW) millones ton/año (Kg/día por habitante)	MSW a reciclaje materiales, %	MSW a reciclaje y tratamiento orgánico, %	MSW a tratamiento térmico energía, %	Desechos resultantes del tratamiento térmico de los MSW, %	MSW a rellenos, %
Francia (65)	323 (13.6)	34 (1.43)	23	18	35	1	23
Alemania (84)	400 (13,0)	52(1.69)	49	18	27	5	1
Italia (60)	164 (7.5)	27 (1,23)	27	19	13	7	23
Holanda (17)	141 (22,7)	9 (1,45)	25	28	44	1	2
USA (333)		366 (3,01)	24	7	8	1	60

- Los desechos totales están muy relacionados con la potencia productiva del país y son mucho mayores que los municipales.
- Los desechos municipales también están relacionados con la potencia productiva (afluencia del país)
- Se aprecia una tendencia a tres modos de manejo (reciclaje de materiales, aprovechamiento orgánico y tratamiento térmico, cada uno cercano al 30 %) con el resto (10 %) llevado a rellenos.
- Estados Unidos difiere mucho de los cuatro países europeos. Es muy pobre en aprovechamientos térmico y orgánico

Figura 1 Manejo de residuos en cuatro países avanzados de Europa y en USA [4]

En los países desarrollados, aunque la infraestructura de gestión de residuos es más avanzada, aún persisten desafíos como el bajo índice de reciclaje de ciertos materiales, especialmente plásticos, y la saturación de los vertederos debido a la creciente cantidad de desechos generados.

Dos tipos de residuos que han adquirido gran relevancia en las últimas décadas son los residuos electrónicos (o e-waste) y los plásticos de un solo uso. Los residuos electrónicos contienen materiales peligrosos como mercurio, plomo y cadmio, que pueden contaminar el suelo y el agua si no se gestionan adecuadamente.

Por otro lado, el plástico, especialmente el de un solo uso, ha alcanzado crecientes niveles debido a su abundancia, estimulada por los bajos costos, durabilidad y la falta de alternativas sostenibles. Precisamente esto muestra que hay que buscar soluciones que trasciendan las tradicionales prácticas del reciclaje.

No obstante, lo anterior, para abordar la crisis global de los residuos sólidos, se continúa proponiendo las soluciones, que incluyen la reducción en la fuente, el reciclaje, la economía circular y la innovación en materiales. Se considera que son fundamentales la educación y la sensibilización pública para fomentar hábitos de consumo responsable y la adopción de prácticas de reciclaje. Pareciera que iniciativas como la prohibición de plásticos de un solo uso y el fomento de la reutilización están ganando terreno, aunque es evidente que se

necesitan alternativas adicionales si se quiere evitar que vayan los residuos a los rellenos sanitarios en forma masiva. Evidentemente la tecnología juega un papel crucial en la mejora de los procesos de reciclaje y en la creación de soluciones más sostenibles para los productos de consumo.

El problema de los residuos sólidos es complejo y global, pero no es insuperable. La cooperación entre gobiernos, empresas y ciudadanos es esencial para transformar la manera en que producimos, consumimos y gestionamos los desechos. Si bien existen retos significativos, el cambio hacia una economía circular y la adopción de prácticas más sostenibles ofrecen una oportunidad de mitigar los impactos negativos de los residuos y construir un futuro más limpio y saludable para las generaciones venideras.

Para abordar el tema de los residuos sólidos a nivel mundial, existen diversas fuentes de información confiables que proporcionan datos, análisis y soluciones sobre la gestión de residuos, el impacto ambiental, y las tendencias globales. A continuación, se presentan algunas de las principales fuentes de información sobre este tema: UNEP: Global Waste Management Outlook (2024 Update), publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), este informe profundiza en el estado global de la gestión de residuos, pronosticando que el coste de la mala gestión de los residuos podría superar los 600.000 millones de dólares anuales en 2050. Hace hincapié en la necesidad de un cambio hacia enfoques de residuo cero y economías circulares para reducir costos y mejorar la sostenibilidad ambiental. Este informe incluye un análisis actualizado de las tendencias mundiales de generación de residuos y las estrategias de gestión. Explora varios escenarios de residuos y sus impactos, instando a una transformación sistémica hacia la recuperación de recursos y prácticas más sostenibles

Dos publicaciones de investigaciones son el Journal of Waste Management que Publica artículos sobre la gestión de residuos y la innovación tecnológica y Waste Management & Research, una revista académica que aborda los aspectos científicos y técnicos de la gestión de residuos. Estas fuentes ofrecen información detallada y actualizada sobre el tema de los residuos sólidos a nivel mundial, con perspectivas globales, regionales y locales, y cubren aspectos técnicos, científicos, sociales y económicos del problema. A nivel de tecnología es ampliamente recomendable consultar los resultados de las investigaciones y conferencias gestionadas por los miembros de la organización WTERT [5], el Consejo Mundial de Investigación y Tecnología para la Conversión de Residuos en Energía que reúne a ingenieros, científicos y gerentes de universidades e industrias de varios países, entre ellos Colombia, donde la SAI es la entidad que la impulsa.

El reto de las buenas ideas es hacer el tránsito a innovaciones, esto es, nuevos productos y servicios en uso por la sociedad (Manual de Oslo). Ese transito se logra desarrollando la idea hasta convertirla en un proyecto viable. Esto supone múltiples retos en tecnología, medioambiente, viabilidad económica y financiera.

Este trabajo se estructuró para revisar cada uno de los aspectos críticos para viabilizar la valorización de residuos sólidos. Específicamente la generación de energía con estos. Se encontrará la discusión detallada de cada uno de los asuntos críticos que permiten que los proyectos se hagan viables y a manera de conclusión se hace una revisión del problema desde la perspectiva de la gestión de riesgos.

Este trabajo tuvo como insumo inicial el documento sobre las barreras para la realización de proyectos de valorización de residuos, desarrollado por WtERT – Colombia para presentar en el V CONGRESO MUNDIAL SOBRE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SÓLIDOS, China, 2023, organizado por GLOBAL WtERT. Los autores: Enrique Posada (Presidente de WtERT COLOMBIA) y Walter Ospina (Director de WtERT COLOMBIA) han estudiado las barreras que enfrentan este tipo de proyectos en Colombia y América Latina.

Esta indagación se ha orientado a cómo hacer viables los proyectos y hace un análisis de cada uno de los componentes críticos de la evaluación de los proyectos. La metodología seguida fue, partiendo del documento previo se realizó una entrevista estructurada con expertos que están al frente de la formulación de políticas públicas, o de empresas que tienen la responsabilidad de resolver el problema de la gestión de residuos sólidos, o de investigadores de nivel internacional. Con esto se obtuvo el documento que se presenta el cual como se explicó, sigue el análisis de viabilidad y riesgos recogiendo las sugerencias de los expertos y lo avanzado en los dos años de trabajo desde la última publicación.

3 EL ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Un análisis de viabilidad es un estudio integral que evalúa si un proyecto como el aprovechamiento tecnológico de los residuos para generar energía y productos útiles es viable o factible en Colombia y Latinoamérica en términos de varios factores clave. Este análisis tiene el objetivo de determinar si un proyecto como este puede lograrse de manera exitosa, sustentando decisiones informadas sobre su aprobación, modificación, o rechazo.

Un primer componente es la viabilidad técnica que analiza si el proyecto es factible desde un punto de vista técnico, es decir, si se dispone de la tecnología, los recursos materiales y las capacidades necesarias para llevarlo a cabo. Incluye la evaluación de infraestructuras, tecnología necesaria, de la experiencia técnica y de los riesgos técnicos.

Los siguientes componentes que acá se discutirán serán las viabilidades socioeconómicas y ambientales que examinan los impactos que el proyecto puede tener sobre la comunidad y el medio ambiente. Se evalúan aspectos como la mejora en la calidad de vida de la población afectada, y los impactos ambientales (positivos y negativos) que pueda generar.

Se trata continuación la viabilidad territorial, legal y regulatoria que busca determinar si un proyecto cumple con las regulaciones y normativas legales necesarias, como permisos

ambientales, laborales, de construcción, entre otros. Incluye también una revisión de posibles restricciones legales o problemas normativos que puedan afectar su ejecución.

Se finaliza con el análisis de la viabilidad económica y financiera que evalúa la rentabilidad del proyecto, analizando si los beneficios o ingresos superarán a los costos en el mediano y largo plazo. Esto implica calcular indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el período de recuperación de la inversión y el análisis de costos y beneficios y examina si existen los recursos financieros necesarios para ejecutar el proyecto. Incluye la planificación de presupuesto, la evaluación de posibles fuentes de financiamiento y la capacidad del proyecto para generar los recursos suficientes para cubrir costos y pagar deudas.

A manera de referencia, uno de los expertos expuso el proceso de estudio de viabilidad que sigue la compañía que en la que lidera el tema de residuos, en la siguiente forma: *“Se definió una hoja de ruta para el manejo de residuos sólidos. El estudio de prefactibilidad permite establecer criterios (tecnologías probadas, GATE FEE, TIPPING FEES, precio de kilovatio, etc.) para poder contrastarlos con propuestas debido a la cantidad de posibilidades que se vienen consolidando en los últimos años. Con el apoyo del Banco Mundial se está trabajando en el estudio de factibilidad. Luego se establece el esquema de implementación del proyecto (figura societaria, licitación, sociedad de economía mixta, etc.). Esto se da luego de que se tenga el proyecto estructurado y formulado y se ofrece y evalúan los interesados.”*

Viabilidad Técnica

La viabilidad técnica de un proyecto evalúa si existen los recursos, conocimientos y capacidades necesarios para implementar y operar el proyecto de manera eficiente y exitosa. Es un componente crítico en el análisis de viabilidad, ya que permite determinar si las condiciones técnicas son adecuadas para cumplir los objetivos propuestos, minimizando riesgos técnicos y asegurando el cumplimiento de los estándares requeridos.

Aspectos clave de la viabilidad técnica

- Disponibilidad de Recursos Técnicos: Se analiza si se cuenta con la infraestructura, equipos y tecnología adecuados para llevar a cabo el proyecto. Esto incluye verificar la accesibilidad de materiales y herramientas específicas que puedan ser necesarias.
- Capacidades del Personal: Este análisis revisa si el equipo de trabajo tiene el conocimiento y las habilidades técnicas requeridas para desarrollar y operar el proyecto. Si no es así, se deben considerar opciones de capacitación o contratación de expertos.
- Evaluación de Procesos y Metodologías: Incluye la revisión de los procesos y métodos de trabajo propuestos para asegurar que son los más efectivos, seguros y rentables para alcanzar los objetivos del proyecto.

- Factibilidad del Cronograma: Examina si el tiempo asignado para completar el proyecto es realista en función de los recursos y capacidades técnicas disponibles.
- Análisis de Riesgos Técnicos: Se identifican posibles desafíos técnicos que podrían afectar el desarrollo del proyecto, como problemas de compatibilidad, durabilidad de materiales, o cambios en la tecnología. Se desarrollan estrategias para mitigar estos riesgos.
- Cumplimiento de Normas y Regulaciones: Verifica que el proyecto cumpla con los estándares técnicos, normativas de seguridad y regulaciones vigentes, lo cual es fundamental para evitar problemas legales y garantizar la calidad del proyecto.

Avanzando en el conocimiento de las tecnologías por parte de los funcionarios responsables

En la evaluación con los expertos se encontró que se tiene un avance importante en un grupo de funcionarios en el país, pero aún insuficiente. Persisten los siguientes problemas:

- Falta de suficiente conocimiento, por parte de los funcionarios públicos en alcaldías, gobernaciones, ministerios y autoridades ambientales
- Los planes de gestión integral de RSM en los municipios de Colombia, PGIRS, no contienen proyectos de valorización energética y aprovechamiento de los residuos para generar productos útiles.
- Hay desconocimiento sobre la economía, la tecnología, los flujos y los espacios y recursos necesarios para los procesos de separación y de recolección selectiva. Hay desconocimiento de los sistemas de aprovechamiento de materiales orgánicos, de su economía y tecnología; es casi nulo el conocimiento sobre el aprovechamiento energético y térmico.

Los expertos hicieron énfasis en estos aspectos:

- Hace falta voluntad política. El desconocimiento de estas tecnologías en las comunidades se vence con políticas del “buen vecino” y pedagogías, además la implementación de las tecnologías se realiza con Asociaciones Publico Privadas
- La falta de mayor conocimiento desde los entes territoriales y operadores de aseo, es una problemática. Como evidencia de ello, se menciona que se han dado casos de existencia de oferentes con soluciones, pero no se logra avanzar. Al parecer los tomadores de decisiones no logran ver la factibilidad real de estas propuestas, aunque no está claro por qué no se han tomado estas ideas para dar solución.
- El desconocimiento genera reprocesos, ideas que se ensayan sin llegar al éxito, sumando a todo ello la falta de una guía más completa y más integral en las normas colombianas sobre el manejo de residuos que brinde una orientación en tema de aprovechamiento de residuos, a los gestores y operadores de aseo, la información de respaldo respecto a estos temas se da desde entidades como la ISWALAC (asociación internacional de residuos sólidos) Banco Mundial, Comisión Europea, BID.

- Para romper estas barreras se necesita generar conocimiento, capacidades, donde se tengan buenas prácticas (documentos) a nivel nacional y encontrar formas de divulgación, para que sirva de referencia a los interesados en desarrollar este tipo proyectos y a los tomadores de decisiones especialmente en municipios de menor categoría.
- Hay tecnologías existentes para incineración ampliamente probadas TRL9, (con más de 2000 plantas a nivel mundial), en cambio otras tecnologías como (gasificación, pirólisis) usadas en procesos industriales son muy eficaces con materiales homogéneos, pero se necesita para materiales heterogéneos, y de este tipo de tecnologías existen 3 plantas en el mundo que están trabajando en la configuración completa, permitiendo agregar subprocesos los cuales generan valor en el mercado.
- La generación de energía eléctrica en una planta que procese 500 ton/día puede estar alrededor de 10 MW si el poder calorífico es 8.800 kJ/kg. Se trata de una energía firme que puede resolver el tema de los rellenos sanitarios como solución preferida. Tal solución se puede llevar a la práctica asociando la energía producida y la energía térmica que se genera con su aprovechamiento como generación distribuida en complejos industriales.
- Se rompe el desconocimiento convenciendo a los responsables de las comunicaciones en la sociedad de los beneficios de las nuevas tecnologías y de sus impactos en la mejora de calidad de vida. A la población mediante campañas de incentivos económicos que las lleven a generar conciencia sobre aspectos como la correcta separación de los RS para facilitar estos procesos, especialmente si se quiere incluir alternativas dedicadas para los residuos orgánicos. En esto se puede considerar realizar foros, campañas de divulgación por los distintos medios y redes sociales que contribuyan a la comprensión del uso de las nuevas tecnologías.

Una oportunidad de desarrollo tecnológico local

El desarrollo de proyectos de Valorización de Residuos Sólidos con Generación de Energía, WtE, es una oportunidad para las empresas que gestionan residuos y para la ingeniería local. El foco de construcción de capacidades está en los siguientes aspectos:

- Diseño y estudio de sistemas en todas las etapas de la ingeniería de proyectos.
- Fabricación de componentes o subsistemas que requieren las plantas de separación, de refinación, de valorización energética y de producción de materiales a partir de los RSM.
- Prestación de servicios que apoyen la operación y el mantenimiento de las plantas.

Los expertos consultados recomiendan:

- Se pueden desarrollar proyectos WtE, inicialmente con la colaboración de empresas y tecnologías extranjeras, pero ejecutados con participación de tecnología, empresas y mano de obra local. Se tienen las capacidades, e historia en este sentido en distintas

áreas de la tecnología. Por ejemplo, es claro que se cuenta con capacidades nacionales en los procesos de separación y en la combustión de materiales sólidos.

- A través de proyectos de utilización de materiales derivados de los procesos de recuperación como es el caso del CDR (combustible derivado de residuos), usado en plantas cementeras como reemplazo del carbón, se facilita la participación de otros actores en los proyectos de WtE (aprovechamiento térmico de los residuos). Esto actores, como las plantas cementeras, cuentan con medios y estructuras en sus plantas para manejar estos productos derivados de los residuos y esto permite canales de comercialización a la tecnología.
- Seguir las experiencias de países avanzados de la Unión Europea que marcan un camino en el manejo de RSM basado en tres estrategias, cada una con una contribución semejante [5], que son: a) el del reciclaje, b) el compostaje, la generación de biogás y de productos para la agricultura, basados en los desechos orgánicos y c) la valorización energética. En esta forma queda una pequeña fracción, de menos del 10 % que se lleva a disposición final en rellenos sanitarios que no generan problemas ambientales significativos.

Conclusiones y recomendaciones sobre la viabilidad técnica

Se considera que es totalmente viable, desde la tecnología, el empleo de sistemas de valorización energética y aprovechamiento de residuos, para los casos colombiano y latinoamericano.

No obstante, los aspectos limitantes discutidos, la ingeniería colombiana está en capacidad de construir, montar, operar y hacer mantenimiento de plantas de valorización energética, bien sean térmicas o biológicas. La experiencia y el conocimiento adquirido a través de las termoeléctricas a carbón y gas natural así lo demuestran.

Este proceso de participación de las entidades nacionales puede ser gradual, apoyado por la colaboración internacional y por las investigaciones de los varios grupos de investigación y desarrollo que ya existen en el país y en la región.

Se considera adecuado desarrollar, a corto plazo, sistemas reales, como ya se ha estado haciendo en Brasil.

Viabilidad social

La viabilidad social evalúa el impacto que tendrá sobre la sociedad y las comunidades involucradas. Este análisis considera cómo el proyecto afectará a las personas, tanto en términos de beneficios como de posibles efectos adversos, y busca asegurar que los resultados sean socialmente aceptables y sostenibles para las partes interesadas.

Elementos claves en la viabilidad social

- **Impacto en la Comunidad:** Se evalúa cómo el proyecto afectará la calidad de vida de las personas en la comunidad, considerando aspectos como generación de empleo, mejoras en infraestructura, acceso a servicios y efectos en la cohesión social. También incluye el análisis de posibles desplazamientos, cambios en el estilo de vida o costumbres, y efectos culturales.
- **Aceptación Social:** Este aspecto analiza el nivel de apoyo o resistencia que puede encontrar el proyecto dentro de la comunidad. La aceptación puede depender de factores como la comunicación y transparencia del proyecto, la percepción de los beneficios que ofrece, y cómo se manejan los impactos negativos.
- **Inclusión y Participación:** Para asegurar que el proyecto sea socialmente viable, es importante que incluya mecanismos de participación para la comunidad en el proceso de planificación y desarrollo. Esto permite que los miembros de la comunidad expresen sus opiniones, preocupaciones, y sugerencias.
- **Impacto en Grupos Vulnerables:** Se evalúa cómo el proyecto puede afectar a poblaciones vulnerables, como personas de bajos ingresos, mujeres, minorías étnicas, y otros grupos en situación de desventaja. El análisis de viabilidad social debe prever medidas para proteger y beneficiar a estos grupos.
- **Sostenibilidad Social a Largo Plazo:** Se considera si el proyecto generará beneficios duraderos y contribuirá a la estabilidad social de la región. Esto incluye evaluar si las mejoras introducidas serán sostenibles sin depender de recursos externos una vez finalizado el proyecto.
- **Impacto en el Entorno Cultural:** Los proyectos deben respetar las tradiciones y valores culturales de las comunidades locales. Esto es especialmente importante en regiones con un fuerte patrimonio cultural, donde el proyecto puede causar tensiones o conflictos si no se adapta adecuadamente a las costumbres locales.

Comentarios de expertos

- Los tamaños de los proyectos están directamente relacionados con la dificultad que presenten para romper las barreras es así como la toma de decisiones y presupuestos impiden el avance de estos, desde la organización se piensa en soluciones distribuidas en sitios de producción con proyectos a pequeña y mediana escala que no presenten complicaciones con estos dos factores (toma de decisiones y presupuestos), y a su vez se evitan costos por transporte y disposición final, los cuales puedan ser puestos en economía circular para la sociedad, por ejemplo en plazas de mercado, agremiaciones residenciales, comerciales, estos proyectos son más realizables que proyectos de gran envergadura. Es de anotar que proyectos de esta naturaleza pueden contar con el apoyo de las administraciones locales.
- La gestión social debe seguir ejemplos como el de Suiza, en donde empezaron por campañas de educación en la niñez enseñándoles la necesidad del cuidado del medio ambiente, y a su vez los niños influyen y cuestionan a las personas mayores para que tomen esas medidas, así se va generando una conciencia. Esto es un proceso que

demanda tiempo (mínimo una generación), y para poder reducir estos tiempos se pueden adoptar incentivos económicos (de diferentes modelos).

- Mediante la conciencia y cuidado ambiental que se obtienen por el orden y la limpieza se generan beneficios económicos: estímulo al turismo, mejoramiento de la calidad de vida y la generación de empresas.
- Se necesita una concientización en que el desarrollo de estas tecnologías requiere grandes inversiones y desde el gobierno y entidades públicas tomar en consideración los pasivos ambientales generados por los rellenos y desde los usuarios y políticos desarrollar la conciencia de que el precio que en general se paga para la gestión de RSM es bajo, apenas si alcanza para gestionar los residuos en rellenos sanitarios y ello dificulta la implementación de estas tecnologías de aprovechamiento que van a tener costos adicionales, pero también claros beneficios, algunos de ellos intangibles, pero también reales y evaluables a través de la conciencia social e individual.

Aterrizar el idealismo en acciones ciertas: decantando Basura Cero

Increíblemente el concepto de basura cero y su interpretación también se ha vuelto una barrera. Las instituciones, las empresas y muchas entidades del sector público pueden certificarse en basura cero, pero eso no quiere decir que no haya residuos para disposición final. El concepto mismo de basura cero, puede dar lugar a establecer las limitaciones y barreras mentales como bases para no adelantar iniciativas de tratamiento y aprovechamiento, en espera del imposible ideal de la no generación de residuos. Además, este concepto desconoce la realidad experimental que muestra que a medida que las sociedades se desarrollan, generan cantidades crecientes de residuos.

Opiniones de los expertos sobre este concepto:

- La idea absoluta de basura cero es una utopía, no existe país que gestione todos sus residuos de modo que no haya basuras. Es normal que se generen residuos y además de que es económicamente imposible e inviable reciclar todos los residuos generados por un país.
- Es un término que, si se toma absolutamente, desconoce el desarrollo económico que han tenido las sociedades e iría en contravía al desarrollo y la sostenibilidad económica de la sociedad.

La sin salida ambiental de “Grupos Ambientalistas”

El reto de darle solución ambiental a la gestión de residuos se enfrenta al bloqueo de las soluciones desde unos grupos que se asumen como ambientalistas. Esto genera las siguientes situaciones:

- El ciudadano del común reciba información sesgada sobre los proyectos de valorización y aprovechamiento.

- El trámite de la licencia ambiental dura 4 o 5 veces lo que debería ser. Se trata de trámites excesivamente costosos y complejos.
- Puede suceder que las autoridades ambientales nieguen la licencia, aduciendo que los estudios hechos son deficientes o incompletos. En este sentido es importante que las autoridades ambientales conozcan a profundidad las tecnologías de aprovechamiento de residuos y WtE y contribuya positivamente a que se hagan bien hechos los procesos, apoyando y revisando los mismos para que se hagan exitosamente. A todos convienen estos proyectos.

Al respecto opinan los expertos.

- Con frecuencia los activistas son los primeros que al ver que se va a realizar un nuevo proyecto, levantan una queja para que el proyecto sea parado, aprovechando la falta de conocimiento y conciencia política de la población, transmitiendo falsas verdades y haciendo que el público las acepte ingenuamente.
- Con respecto al activismo ambiental convienen no tomarlo solamente como un impedimento. Conviene examinar las oportunidades para tenerlo en cuenta para mejorar el proyecto, siendo hábiles en las comunicaciones y la escucha. En una buena gerencia de los proyectos se tienen en cuenta los comentarios y sugerencias y se está con la mejor disposición. Por otra parte, con las comunidades se logra el empoderamiento del proyecto por parte de estas, para que no sean un problema sino más bien parte del proyecto.
- Cada vez que se va a realizar un proyecto importante aparecen organizaciones y entidades con intereses particulares. Se debe vencer el desconocimiento alrededor de estas tecnologías dándoles manejo desde el principio y yendo de la mano con la comunidad.
- Con respecto a los grupos ambientales, hay que tener en cuenta que los gobiernos tienden a dejarse influenciar por el ambientalismo, especialmente en las entidades de naturaleza ambiental. Ello puede dificultar el desarrollo de estos proyectos.
- Conviene entonces buscar que los grupos ambientalistas participen positivamente, estableciendo estrategias no solo para informar sino también para motivar e integrar, ya que todos los proyectos tienen afectaciones sociales y la estrategia de la organización es socializar, y llegar a acuerdo con las organizaciones para hacerlas partícipes de estos proyectos.
- Hay que considerar los sistemas de revisión y crítica ambiental como medios positivos para lograr que los proyectos se hagan con toda la calidad necesaria, no para suspenderlos o volverlos inviables.
- Es importante participar en los debates que se promueven y presentar información valiosa, verdadera, basada en la abundante experiencia que se tiene, para responder a las dudas y negatividades.
- Es importante conocer a fondo los beneficios y costos de estos proyectos, tanto tangibles como intangibles, estando preparados para presentarlos de manera objetiva a los públicos interesados.
- Con el desarrollo de modelo regenerativo se busca integrar a las comunidades en el desarrollo de proyectos. Mediante la implementación de este modelo se logra la

participación desde lo social, la integración económica de estos proyectos a las comunidades, el desarrollo territorial y beneficios a las comunidades aledañas.

- Desde que haya voluntad política, se puede lograr la implementación de estos proyectos, porque es de esperar que cuando a la comunidad se le da a escoger entre la instalación de un nuevo relleno o la de una planta para la valorización de RS, las comunidades opten por las tecnologías de aprovechamiento.

La falta de participación ciudadana.

Sugerencia de los expertos:

- En la población latina no existe un fuerte sentido de comunidad que les permita unirse para analizar y exigir solución a los problemas. Caso contrario sucede en países como Japón, Corea del Sur, Suiza, entre otros.
- Se requiere que la propia comunidad haga campañas buscando respuestas adecuadas al buen manejo de los residuos de parte de los políticos y de los funcionarios públicos. Estas campañas van mostrando el grado de conciencia que la comunidad va adquiriendo con respecto a los problemas sociales y económicos que tienen.

Falta de normas de mayor calidad; carencia de multas ambientales para residuos y de incentivos municipales y departamentales para las buenas prácticas

Según explica uno de los expertos *Existe una política nacional de gestión integral y sostenible de residuos municipales. Respetando esta política los alcaldes y gobernadores deberían hacer uso de la creatividad y la innovación para establecer normas e incentivos que en verdad motiven a la comunidad a participar en la solución al problema de la disposición final de los residuos municipales. Esto no ocurre siempre, en parte porque existe otra posible barrera en los funcionarios públicos, que es la falta de sentido de comunidad. Dado que ellos son a la vez funcionarios públicos y ciudadanos, la falta de este sentido de comunidad afecta su ejercicio como trabajador público y su responsabilidad como miembro de una comunidad.*

Desde un punto de vista social, este tipo de proyectos puede hacerse viable, si con la participación de todos los involucrados y de los funcionarios públicos, municipales y departamentales, se socializan entre las comunidades este tipo de proyectos y se explican los beneficios que conllevan. Para ello, ellos deben capacitarse de forma persistente y efectiva. Así pueden sustentar todas las medidas punitivas y coercitivas que implementen para aplicar un mejor sistema de manejo, separación, transporte y disposición final de los residuos sólidos municipales.

Viabilidad ambiental

La viabilidad ambiental se refiere a la capacidad de un proyecto de desarrollarse de manera que no cause un impacto negativo o irreparable en el medio ambiente. Esto implica que

cualquier actividad debe evaluarse en función de su sostenibilidad y su compatibilidad con los ecosistemas y los recursos naturales disponibles. Una visión más moderna contempla la capacidad del mismo proyecto de contribuir en una dinámica de regeneración ambiental.

Para determinar la viabilidad ambiental de un proyecto, generalmente se realiza un estudio de impacto ambiental (EIA), en el cual se analiza cómo una actividad podría afectar el entorno natural, la biodiversidad, los recursos hídricos, el suelo y el aire. A partir de estos estudios, se proponen medidas de mitigación o adaptación para minimizar los impactos negativos. Un proyecto es viable ambientalmente cuando:

- No degrada los recursos naturales de manera irreversible.
- Minimiza los desechos y la contaminación.
- Respeta la biodiversidad y los hábitats de especies locales.
- Fomenta prácticas sostenibles que aseguren la preservación del entorno para futuras generaciones.

Los proyectos WtE y de aprovechamiento de residuos son parte de la solución ambiental para evitar los rellenos sanitarios, pero también generan impactos ambientales que hay que gestionar y mitigar.

Para el caso de los proyectos de este tipo que generan electricidad, deben ser considerados por parte de los funcionarios de las autoridades ambientales tanto como proyectos de generación de energía eléctrica, como subproyectos de un sistema de disposición final de los residuos sólidos municipales.

Si el proyecto WtE, que se pretenda construir en un botadero o relleno sanitario con licencia ambiental, es considerado como parte del sistema de gestión integral y sostenible de los RSM, que permite hacer aprovechamiento y valorización de residuos sólidos, entonces la licencia ambiental existente sólo debe ser modificada. Esto equivale a decir que los proyectos WtE deben considerarse parte del sector residuos y no parte del sector eléctrico colombiano.

Al respecto opinan los expertos:

- Se lograría reducir los tiempos de licencias de estos proyectos de aprovechamiento integral resaltando sus aspectos positivos:
 - No existe contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos evitándose la generación de los lixiviados producidos en la vida activa del relleno sanitario
 - Existe una menor generación de metano comparados con los rellenos sanitarios.
 - Menor uso de espacios que pueden ser mejor aprovechados.
- Teniendo en cuenta el desconocimiento actual, en muchos de los actores de estos proyectos debe ser parte del ejercicio que se realiza, como recomienda el Banco Mundial, el generar capacidades y conocimientos.

- El trámite ambiental es extenso, puede tomar hasta 3 años, después del estudio de prefactibilidad. Si es una planta de WtE y aprovechamiento y valorización, en nuevos terrenos, el trámite puede ser aún más extenso y complejo. Esto es demasiado. Parece importante establecer un mejor marco regulatorio, que les permita a todos los actores como manejar estos proyectos desde las mismas autoridades, y que los tiempos de trámites y permisos no sean tan extensos.
- A veces las autoridades ambientales no son parte de las soluciones, sino parte del problema, debido a los costos y tiempos para acceder desarrollarlas. Se convierten en un cuello de botella en el desarrollo de estos proyectos.
- Inclusive la licencia ambiental no da la seguridad de que los proyectos se puedan realizar, ya que estos pueden ser revocados por otras autoridades sociales, alcaldías, bajo la influencia de comunidades y personas. Ello hace aún más costoso el desarrollo de cualquier proyecto no solo de generación, de infraestructura, de exploración.
- En Europa si alguna persona tiene algún reparo sobre un proyecto, se cuenta con una figura equivalente a lo conocido en Colombia y que es llamado consulta previa. La autoridad toma a consideración los argumentos y después toma la decisión respecto a la ejecución del proyecto, llevando a veces, según el asunto y su importancia, a un referendo. Conviene examinar si en Colombia se necesitan cambios en la normatividad para que las licencias no se vuelvan un problema, un impedimento sino en un componente clave en el diseño de la solución.

Si se considera que un proyecto de valorización energética de RSM es muy similar a las termoeléctricas a carbón y gas natural que funcionan en Colombia desde hace más de 25 años, el trámite de la licencia ambiental no debería ser un problema para las autoridades ambientales ni para los propietarios del proyecto de valorización, dado que debe seguirse el mismo procedimiento. Dicho en otra forma, hay conocimiento de ingeniería de las partes involucradas. Por tanto, si las termoeléctricas han recibido licencia ambiental, estos proyectos, que son básicamente termoeléctricas con RSM, deberían tener la misma suerte.

Se cuenta con tecnologías totalmente demostradas para que el manejo de los residuos por sistemas de aprovechamiento térmico y de valorización de residuos cumpla con todas las exigencias ambientales. Por ello el sistema de licenciamientos ambientales no debe ser un obstáculo sino un método para garantizar la aplicación de las buenas prácticas a los mismos.

Viabilidad regulatoria y legal

La viabilidad regulatoria y legal se refiere a la capacidad de un proyecto de cumplir con las normas, leyes y regulaciones vigentes. Este concepto implica una revisión y análisis detallado de los marcos legales y regulatorios aplicables para asegurar que la iniciativa pueda operar de manera lícita y esté alineada con las disposiciones gubernamentales y sectoriales.

Para garantizar la viabilidad regulatoria y legal de un proyecto, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Cumplimiento de normativas: Verificar que la actividad se ajuste a las leyes locales, nacionales e internacionales, así como a los estándares específicos de la industria, que pueden incluir normas de seguridad, salud, medio ambiente, protección al consumidor, entre otras.
- Permisos y licencias: Obtener las autorizaciones necesarias para operar legalmente, como licencias comerciales, permisos ambientales, certificados de construcción y cualquier otro tipo de permiso específico que exija la regulación.
- Respeto a los derechos laborales: Asegurar que las condiciones de trabajo cumplan con las leyes laborales y de seguridad social, y que se respeten los derechos de los empleados.
- Protección de la propiedad intelectual: Registrar patentes, marcas comerciales, derechos de autor u otros derechos de propiedad intelectual relevantes para proteger la innovación o el producto del proyecto.
- Adaptación a cambios legislativos: Estar preparado para ajustar las operaciones en caso de que surjan cambios regulatorios o legales, de modo que el proyecto pueda seguir siendo viable en un contexto de nuevas leyes o regulaciones.

En Colombia, el manejo de residuos sólidos está regulado por un conjunto de leyes, decretos y normas que establecen las directrices para la gestión integral de residuos, con el fin de minimizar su impacto ambiental y proteger la salud pública. El marco legal colombiano busca promover prácticas sostenibles, el reciclaje y la adecuada disposición de residuos. A continuación, se destacan las principales normas y directrices del marco legal de residuos sólidos en el país:

- Ley 9 de 1979 (Código Sanitario Nacional): Establece directrices para la protección de la salud pública, incluyendo aspectos relacionados con la disposición de residuos sólidos. Esta ley fue uno de los primeros marcos generales en Colombia sobre temas de salubridad.
- Ley 99 de 1993: Crea el Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y establece que esta entidad es responsable de formular y regular la política ambiental, incluyendo la gestión de residuos sólidos. Esta ley también da origen al Sistema Nacional Ambiental (SINA), encargado de coordinar la gestión ambiental en Colombia.
- Ley 142 de 1994 (Ley de Servicios Públicos Domiciliarios): Esta ley establece el marco regulatorio para los servicios públicos domiciliarios, incluyendo el servicio de aseo, que abarca la recolección, transporte, tratamiento, disposición final de residuos sólidos y actividades complementarias como el barrido y la limpieza de vías y áreas públicas. Algunos aspectos destacados de la Ley 142 relacionados con residuos sólidos son:
 - **Regulación del Servicio de Aseo:** Define el servicio de aseo como un servicio público domiciliario, lo que implica que debe ser prestado bajo ciertas

- condiciones de calidad, continuidad y cobertura para satisfacer las necesidades de la comunidad.
- **Supervisión y Control:** La ley establece que la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) es la entidad encargada de supervisar y controlar la calidad y eficiencia de los servicios, incluyendo el de aseo. También establece la competencia de las Comisiones de Regulación, en particular de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), para regular tarifas y garantizar un servicio adecuado.
 - **Tarifación y Subsidios:** Define un régimen tarifario y establece que, en áreas de menores ingresos, pueden aplicarse subsidios para hacer el servicio asequible, mientras que en sectores de mayores ingresos pueden aplicarse contribuciones para financiar los subsidios.
 - **Promoción del Reciclaje:** Aunque en su redacción original no incluía explícitamente la actividad de reciclaje, la ley ha sido complementada por decretos y resoluciones que promueven la inclusión de recicladores de oficio en la prestación del servicio de aseo, como el Decreto 596 de 2016.
 - La Ley 142 de 1994 es fundamental para asegurar que el servicio de aseo, y por lo tanto la gestión de residuos sólidos, se brinde de manera organizada, regulada y accesible para la población en todo el país, promoviendo tanto el orden público como la sostenibilidad ambiental.
- Ley 1259 de 2008: Conocida como la "Ley de Comparendos Ambientales", tiene el propósito de regular el manejo adecuado de los residuos sólidos en espacios públicos y promueve la cultura del buen manejo de residuos en las ciudades. Sanciona las conductas que afecten el orden y la limpieza del espacio público, incentivando así el manejo responsable de los residuos.
 - Decreto 2981 de 2013: Regula la prestación del servicio público de aseo en Colombia, estableciendo parámetros y condiciones para la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos. Además, incentiva la separación en la fuente y el reciclaje en el país.
 - Ley 1672 de 2013: Reglamenta la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), buscando que productores y comercializadores participen en la disposición y reciclaje de estos residuos.
 - Resolución 0668 de 2016 y Resolución 1407 de 2018: Estas resoluciones regulan la gestión de residuos de empaques y envases de papel, cartón, plástico, vidrio y metal. La Resolución 1407 establece los lineamientos para que los productores y comercializadores de productos envasados o empacados adopten sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de estos residuos.
 - Ley 1973 de 2019: Regula la gestión de residuos sólidos con énfasis en la economía circular, incentivando a las empresas a reducir, reciclar y reutilizar materiales, además de la minimización de residuos en los procesos productivos.
 - Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PNGIRS): Aunque no es una ley, el PNGIRS es una herramienta estratégica que orienta la gestión de residuos en Colombia a nivel municipal y departamental. Propone políticas y estrategias para la

reducción en la generación de residuos y promueve el reciclaje y el aprovechamiento de residuos orgánicos e inorgánicos.

- Economía Circular en la Política Nacional: Colombia ha adoptado la economía circular como parte de su estrategia ambiental, que abarca la gestión de residuos sólidos a través de la promoción de sistemas de reutilización, reparación y reciclaje en los sectores productivos y sociales.

En conjunto, este marco legal busca promover una gestión integral de los residuos sólidos que contribuya a la sostenibilidad ambiental y fomente una cultura de reciclaje y aprovechamiento, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las metas nacionales de reducción de residuos.

La aplicación de estos marcos legales ha generado una red de intereses que pueden favorecer o no el desarrollo de proyectos WtE. Se consideran varios de ellos a continuación.

Intereses del sector eléctrico y del sector residuos

Se debe lograr que el interés del sector eléctrico de energía a costos viables se compatibilice con el del usuario final que puede tener energía de origen en Generación Distribuida en la que el comparativo de KWh se da con los componentes de distribución y restricción incluidas, lo que permitiría un valor que haga viables los proyectos.

A esto se debería sumar que un proyecto WtE por parte de los empresarios del sector eléctrico, la mayoría de carácter privado, pueden monetizar o valorizar los beneficios sociales y ambientales e incorporarlos en la construcción del flujo de caja para evaluar el proyecto en cuanto ello sea posible vía ingreso de las tarifas de disposición, reducción de efectos de gases e ingresos por energía renovable. Es importante construir esquemas en Colombia que permitan promover los proyectos WtE

Al respecto comentan los expertos consultados:

- Es el aspecto que puede ser una de las más complicadas barreras que debe vencer la implementación de las tecnologías WtE, debido a que no están claros los proyectos de este tipo en cuanto a su regulación.
- Las tarifas de aseo por el manejo de los RSM que se aplican a los usuarios son bajas, por ejemplo, cuando se les cobra la tarifa como multiusuario a un edificio y no por apartamento), también la existencia de subsidios otorgados por el municipio, el departamento o la nación al manejo, disposición de residuos sólidos.
- Hay que romper la barrera de la falta de conocimiento en la medida que se haga más difusión, al considerar este tipo de soluciones en donde los insumos no solo es la venta de energía, la venta de materiales por reciclaje, los combustibles generados, sino también el no uso de rellenos sanitarios, entonces lo que se debe lograr es socializar estos proyectos como una solución a los rellenos sanitarios con el componente energético de las FNCER, donde no solo se le dé énfasis a temas

económicos como (Capex, Opex, costo de energía, costo nivelado de energía ,etc.) sino también integrando las alternativas con componente ambiental no solo las de generación.

- A su vez tomando experiencias internacionales del cómo lograron integrar los dos componentes energéticos y ambientales, por ejemplo, para una empresa multiservicio presenta dificultad el desarrollo de estos proyectos, ahora para las empresas que no manejan todos los servicios, es por ello que se requiere sensibilizar y alfabetizar para que el proceso sea entendido, mediante organizaciones que generen valor agregado.
- Esta tecnología hay que enfocarla como solución de aseo (disposición de los residuos), fomentándola como una alternativa a la disposición final y permitirle que sea remunerada en la formula tarifaria del sector de transporte de los residuos que en vez que lo lleve al relleno sea llevado a la planta de valorización y de igual forma para la planta de valorización como una alternativa a la disposición final de residuos.

Intereses de los concesionarios de aseo

Un análisis similar resulta de examinar el papel de las empresas concesionarias responsables de la disposición final de los RSM. Se considera poco probable que le propongan al municipio que les concesionó la disposición final de los RSM, la realización de proyectos WtE. Es probable que las empresas que recolectan, transportan y operan el botadero o relleno sanitario en los municipios, grandes, medianos y pequeños, consideren que se van a ver afectadas negativamente cuando los funcionarios de los municipios proponen un proyecto WtE para que se integre al sistema de gestión de los RSM.

- Con este sector es delicado el tema. Hay que considerar por un lado que para desarrollar rellenos sanitarios adicionales, con las licencias y permisos que ello implica, es complejo. Entonces, este sector tiene un horizonte difícil debido a que la disposición final por rellenos está viendo amenazado su futuro por temas ambientales y sociales. Las nuevas tecnologías deben contar con apoyo del estado facilitando su implementación.
- Este tipo de proyectos puede tener diversos actores no solo en el desarrollo del proyecto sino como operadores y dueños. Aunque estos actores tengan intereses particulares, hay que promover entre ellos estos proyectos, como un gana-gana para las distintas partes.
- La regulación no promueve ni promociona estas iniciativas. Desde los mismos PGIRS (Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regionales), se observa que el enfoque está más asociado a los procesos tradicionales, (recolección, transporte y disposición final en relleno sanitario). Por ello hay proponer que se incluyan estas iniciativas en los PGIRS
- La tarifa de disposición final se aplica mayormente al uso de los rellenos. Se remunera en forma relativamente modesta el Gate FEE (tarifa para disponer rellenos sanitarios). Como las alternativas de valorización tienen unos costos adicionales, si estas no son remuneradas, o si, inclusive se llegue a quitar estas tarifas porque no se están disponiendo los residuos recibidos, sino que se tratan, se afectaría a los dueños de los

rellenos y a los operadores de sistemas de tratamiento. Es por ello que se requiere integrar a los actores haciendo gestiones ante los reguladores para que se modifiquen o ajusten debidamente los planes PGIRS.

Es un tema sensible el tratamiento de valorización térmica, debido a que en la jerarquía de gestión de residuos, este método de tratamiento está en la parte inferior, por debajo de actividades como la separación en fuente, el reciclaje y el aprovechamiento y gestión de lo orgánico. Por ello hay que tener un discurso menos basado en jerarquías, más dirigido a la complementariedad y la integralidad. Desarrollar las jerarquías superiores requiere de mucho tiempo. Entonces los proyectos de WtE y aprovechamiento son complementarios. Con ellos no se amenaza realmente el desarrollo de los programas de reciclaje y manejo orgánico.

Marco legal para inversiones WtE

La **Ley 1715 de 2014** en Colombia, enfocada en la promoción de las energías renovables y en la gestión eficiente de la energía, fue modificada por la **Ley 2099 de 2021**. Esta nueva ley amplía el alcance de la Ley 1715 y adapta la normativa para promover una transición energética más amplia y alineada con los compromisos ambientales del país. Aquí algunos aspectos clave de la **Ley 2099 de 2021**:

1. **Transición Energética:** Declara la transición energética como política de Estado, con el objetivo de diversificar la matriz energética hacia fuentes más limpias y sostenibles, no solo con energías renovables (como solar, eólica y geotérmica), sino también con fuentes de bajas emisiones de carbono.
2. **Promoción de Nuevas Tecnologías:** Amplía el alcance a tecnologías emergentes, incluyendo el hidrógeno verde y azul, almacenamiento de energía, eficiencia energética y movilidad sostenible.
3. **Incentivos Tributarios:** La Ley 2099 mantiene y amplía los incentivos tributarios para proyectos de energías renovables, incluyendo exenciones del IVA, aranceles y deducciones en el impuesto de renta. Se incluyen también beneficios para proyectos de hidrógeno y almacenamiento de energía.
4. **Eficiencia Energética y Autogeneración:** Fomenta la autogeneración y generación distribuida de energía, incentivando a empresas y personas a generar su propia energía a partir de fuentes renovables. También promueve la eficiencia energética en diversos sectores, buscando reducir el consumo y mejorar el uso de la energía.
5. **Certificados de Energía Renovable:** Establece los certificados de energía renovable como mecanismos para certificar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, buscando incentivar que las empresas los adquieran para compensar su huella de carbono.
6. **Electromovilidad:** La ley también impulsa la movilidad sostenible y la transición a vehículos eléctricos e híbridos en Colombia, con incentivos y planes para fortalecer la infraestructura de carga eléctrica en el país.

En conjunto, la Ley 2099 de 2021 busca avanzar en los objetivos de sostenibilidad y descarbonización, facilitar la inversión en nuevas tecnologías energéticas y continuar con la modernización de la infraestructura energética en Colombia. Esta reforma adapta la política energética del país a los desafíos del cambio climático y a los compromisos internacionales de reducción de emisiones.

Incluye el aprovechamiento de los **residuos sólidos como fuente de energía**. Esta ley reconoce la importancia de los residuos sólidos en la diversificación de la matriz energética, incentivando su uso para generar energía mediante procesos como la **biomasa, biogás y otras tecnologías de conversión de residuos a energía**.

Algunos puntos relevantes sobre la generación de energía a partir de residuos sólidos en la Ley 2099 de 2021 son:

1. **Promoción de la Biomasa y el Biogás:** La ley incentiva el uso de residuos orgánicos y agrícolas para generar biogás y biomasa, los cuales pueden ser utilizados como fuentes de energía para calefacción, electricidad o incluso para producir combustibles alternativos.
2. **Incentivos para Proyectos de Energía a partir de Residuos:** Proyectos que aprovechen residuos sólidos para la generación de energía renovable pueden acceder a los mismos incentivos fiscales que se otorgan a otras energías renovables, tales como exenciones de IVA y aranceles, deducciones de renta y acceso a mecanismos de financiación y apoyo gubernamental.
3. **Certificados de Energía Renovable:** La ley permite que proyectos de generación de energía a partir de residuos sólidos accedan a los Certificados de Energía Renovable (CER), lo que fortalece su viabilidad comercial y ambiental.
4. **Contribución a la Economía Circular:** Al incluir la generación de energía con residuos sólidos, la ley fomenta la economía circular, incentivando la reducción y aprovechamiento de residuos y contribuyendo a una gestión de residuos más sostenible en el país.
5. **Integración con Políticas Ambientales y de Sostenibilidad:** La ley también alinea este tipo de generación con los objetivos de reducción de emisiones y aprovechamiento de residuos en los planes nacionales de desarrollo sostenible y de transición energética.

Con estos lineamientos, la Ley 2099 de 2021 refuerza el aprovechamiento de residuos sólidos para generar energía limpia, apoyando la diversificación de la matriz energética y promoviendo una gestión de residuos más sostenible en Colombia.

Al respecto, los expertos consultados opinan:

- En la página del ministerio de vivienda actual [6] se presentan esquemas para el manejo de residuos muy basado en el reciclaje y los recicladores, el manejo de sus relaciones y de la economía de estas. Se trata de un sistema muy idealizado y

complejo, el cual no ha sido efectivamente aplicado. No hay mención de sistemas de valorización.

- No existe una reglamentación, unos lineamientos que le permitan a las autoridades ambientales simplificar las licencias.
- Aunque se trata de proyectos con componente ambiental y energético, en donde el país ha tenido grandes cambios hacia la integración de las FNCER enfocada a los incentivos tributarios, ley 1715, de agilización de trámites, aún falta la integración de estos proyectos. Efectivamente, cuando se habla de proyectos de RSM, de biomasa, se analizan los beneficios ambientales y energéticos por aparte, al igual que las regulaciones establecidas por los ministerios no encajan adecuadamente en estos dos aspectos.
- Para unir dos regulaciones, la del sector de residuos y saneamiento básico (CRAG) con el de las empresas de energía (CREG), se necesita una integración sabia, que facilite que se analicen estos dos aspectos de los proyectos de forma conjunta y no aislada.
- Las autoridades deben de empezar desde ahora a asumir los costos ocultos y pasivos ambientales generados por la disposición de los rellenos y disminuir su enfoque en estas, y fomentar idealmente el uso de las nuevas tecnologías. En cambio, se ha visto que cuando se dan, de manera recurrente emergencias ambientales por crisis en los rellenos, la coyuntura forzada y la falta de planeación y de adaptación a las nuevas tecnologías, se tiende a tomar decisiones apresuradas bajo el acoso del tiempo y las amenazas de una crisis pública.

Tipping fee (gate fee) y estímulos a los rellenos sanitarios

El *tipping fee* es la tarifa que actualmente los rellenos sanitarios cobran por cada tonelada de RSM que reciben para hacer la disposición final.

En el caso colombiano, la resolución CRA 720 de 2015, indica en el artículo 31:

“ARTÍCULO 31. Costo de alternativas a la disposición final. Podrán emplearse alternativas a la disposición final en relleno sanitario siempre y cuando éstas cuenten con los permisos y autorizaciones ambientales requeridas y el costo a trasladar a los usuarios en la tarifa no exceda el valor resultante de la suma del Costo de Disposición Final definido en el ARTÍCULO 28 y el Costo de Tratamiento de Lixiviados por escenario definido en el ARTÍCULO 32, por cada tonelada. Dichos costos corresponden a la disposición final y tratamiento de lixiviados del municipio y/o distrito donde se pretenda emplear la alternativa.”

Según se ha visto en la práctica, con la restricción del artículo 31 mencionado, los municipios colombianos no se ven impulsados a desarrollar proyectos WtE. Para hacerlo tendrían que contar con el apoyo de los gobiernos nacional y departamental, posibilitando aumentos o subsidios para las tarifas mencionadas, generando transferencias y aportes condonables,

facilitando así que los municipios propongan y ejecuten proyectos WtE que sean viables económica y financieramente. Es decir, en Colombia debe existir una ley similar a la ley de Metros (Ley de transporte masivo que permite que las ciudades propongan proyectos donde el gobierno nacional aporta hasta el 70% de la inversión), pero en este caso, sería para la gestión integral y sostenible de los RSM, en especial para los proyectos que hacen una disposición final que protege el aire, el agua, el suelo y las generaciones futuras.

Al respecto, comentan los expertos consultados:

- Mediante alianzas público- privadas se puede gestionar que haya incentivos para los actores que prestan servicio de disposición y transporte para los rellenos sanitarios. Por ejemplo: una tasa que reconozca en la formula tarifaria la disposición de estos residuos las tecnologías de aprovechamiento novedosas.
- Los Tipping fees locales son muy bajos comparándolos con los del mundo, las tarifas de energía son atractivas, pero tienen una volatilidad alta, es por ello que es mejor asegurar la venta de energía mediante PPA (contratos de ventas de energías) y no por bolsas, por la volatilidad de los precios en bolsa.

Viabilidad territorial

La viabilidad territorial se refiere a la capacidad de un territorio para sostener y facilitar un proyecto, actividad o desarrollo de manera sostenible, en función de sus características y recursos. Se analiza considerando los siguientes aspectos:

- Factores físicos: La topografía, el clima, la calidad del suelo, el acceso a recursos hídricos y energéticos, entre otros aspectos que determinan si el entorno natural es apto para el uso con WtE.
- Factores urbanos: La disponibilidad y el uso de la tierra que habiliten los proyectos WtE.

Las ciudades grandes y medianas de Colombia disponen de muy pocos terrenos para hacer nuevos rellenos sanitarios. Además, otros actores como los constructores de vivienda, centros comerciales, centros recreativos, hoteles, etc., se han adelantado en la compra de tierras y los municipios tienen que buscar cada vez más lejos y fuera de su jurisdicción los terrenos para eventualmente construir un nuevo relleno. Esto actúa a favor de los proyectos WtE, que requieren espacios mucho menores, en las ciudades grandes y medianas que son capitales de departamento.

En los municipios pequeños, especialmente de las regiones del Atlántico y Pacífico de Colombia, se dispone de mayor disponibilidad de terreno para botaderos. Como en estos municipios se desea desarrollar el ecoturismo, es importante que cuenten con tratamiento apropiado del agua potable, de las aguas residuales y de los RSM. Son regiones donde se están promoviendo proyectos turísticos y de infraestructura, lo que hace que se incremente

la generación de residuos. Parece razonable sugerir que en estas regiones se apliquen las tecnologías WtE, Hacerlo a corto plazo, va ser más económico que hacerlo cuando el problema haya alcanzado la magnitud que tiene en las grandes ciudades de Colombia, como Bogotá, Medellín y Bucaramanga.

Por ejemplo, hoy la ciudad de Medellín ha puesto en operación la segunda planta de tratamiento de aguas residuales para evitar más contaminación del Río Medellín y continuar con el programa de recuperación de dicho río. ¿Cuándo se debe empezar a hacer lo mismo para los ríos Atrato, San Juan, Meta, Putumayo, Magdalena, Vaupés, entre otros? Así, buscando evitar que alcancen el grado de contaminación del Río Bogotá y del Río Medellín. En las áreas metropolitanas, que agrupan varios municipios, ninguno de ellos quiere albergar el relleno sanitario a donde todos llevan los RSM. Por ejemplo, el Área Metropolitana de Medellín dispone de un relleno sanitario en el cercano Municipio de Don Matías. Este municipio no pertenece al selecto grupo que conforma el área metropolitana mencionada. Si hoy se consultara a la comunidad y al alcalde de ese municipio ¿Si permitiría que se construyera otro relleno sanitario en su jurisdicción para recibir los RSM de 10 municipios que se encuentran a 60 km de distancia de la ciudad de Medellín?

Falta de políticas a nivel municipal y departamental

Si los municipios y los departamentos de cada país de LAC, preparan una política regional y local enmarcada dentro del plan nacional de gestión de los RSU y de los compromisos internacionales del gobierno nacional en cuanto a cambio climático y gestión de RSU, los beneficios en el mediano y largo plazo se pueden clasificar en tres categorías.

- Medio ambiente
- Energía y cambio climático
- Desarrollo de la economía local y regional
- Cultura

Desde el medio ambiente, para evitar promover la construcción de más rellenos sanitarios con todos sus negativos impactos ambientales.

Desde el cambio climático, para evitar la generación y liberación de gases de efecto invernadero en los botaderos y vertederos. El balance de emisiones de CO₂ equivalente claramente favorece los sistemas WtE en comparación con los rellenos sanitarios.

Desde la energía, para promover la generación de biogás, electricidad y calor, aprovechables en otros procesos.

Desde la economía, se genera empleo, se crean actividades económicas en la región y disminuye la informalidad en la gestión de RSM.

Desde la cultura, se generan costumbres de orden y aseo, de buenas prácticas, de aprovechamiento y ahorros, de clasificación, de disciplina social.

Viabilidad económica financiera

La viabilidad financiera y la viabilidad económica son conceptos importantes en el análisis de proyectos y decisiones de inversión. Ambos conceptos están relacionados con la capacidad de un proyecto o empresa para mantenerse en el tiempo, pero se centran en aspectos distintos:

Viabilidad financiera

La viabilidad financiera se refiere a la capacidad de un proyecto o empresa para cubrir sus obligaciones financieras a corto y largo plazo, es decir, su habilidad para generar el flujo de efectivo necesario para pagar deudas, gastos operativos y otros compromisos financieros. Es un análisis que se centra en si el proyecto puede contar con la liquidez y los recursos suficientes para operar sin caer en problemas de falta de financiamiento.

Ejemplo: una empresa puede tener viabilidad financiera si cuenta con el capital y flujo de efectivo para cubrir sus gastos operativos, como salarios y costos de producción, además de poder cumplir con sus pagos de deudas.

Viabilidad económica

La viabilidad económica, en cambio, evalúa si un proyecto o inversión generará beneficios superiores a sus costos, en términos de rentabilidad y generación de valor en el tiempo. Se enfoca en analizar si, a lo largo de la vida del proyecto, los ingresos proyectados superarán los costos de operación, inversión y otros gastos necesarios para su funcionamiento. Esta viabilidad suele calcularse a través de indicadores como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

Ejemplo: un proyecto tiene viabilidad económica si el beneficio total esperado supera el costo total de inversión y operación, generando un retorno positivo para los inversionistas.

La diferencia clave entre ambas es que la viabilidad financiera se centra en la capacidad de un proyecto para manejar sus flujos de caja y cumplir con sus compromisos de pago, mientras que la viabilidad económica se enfoca en evaluar si el proyecto es rentable y si generará valor a largo plazo. En otras palabras, la viabilidad financiera considera la capacidad de solventar gastos inmediatos y mantener la operación, y la viabilidad económica valora si, en general, el proyecto o empresa aportará un beneficio económico neto.

Ambas son necesarias para determinar si un proyecto es sostenible y atractivo para inversionistas o financiadores.

La generación de empleo y los efectos en competitividad se contemplan principalmente en el análisis de viabilidad socioeconómica de un proyecto, que es una extensión del análisis económico y financiero. Este análisis considera los impactos que el proyecto puede tener en la comunidad, en la economía local o regional, y en el mercado. Estos aspectos incluyen beneficios que no necesariamente se reflejan de manera directa en los ingresos o costos

financieros del proyecto, pero que aportan valor a la sociedad y pueden justificar el apoyo o la aprobación del proyecto.

Aquí se detalla cómo cada uno de estos aspectos se incorpora en la evaluación de un proyecto:

a. Generación de empleo

La generación de empleo es un efecto positivo en la economía local que se puede incluir en el análisis de viabilidad socioeconómica. Este análisis estima cuántos empleos directos e indirectos creará el proyecto y cómo contribuirá al desarrollo económico de la comunidad.

- Empleos directos: puestos de trabajo generados dentro del proyecto, como en su construcción, operación, o mantenimiento.
- Empleos indirectos: trabajos creados en industrias y servicios que apoyan al proyecto, como proveedores de materiales o servicios de transporte.

La generación de empleo suele valorarse no solo en términos de cantidad, sino también de la calidad del empleo (niveles salariales, duración, capacitación). A menudo, este factor ayuda a que un proyecto gane apoyo social o respaldo gubernamental.

b. Efectos en la competitividad

Los efectos en la competitividad se refieren a cómo un proyecto puede mejorar la posición competitiva de la economía o la industria donde se desarrolla. Esto puede implicar el fortalecimiento de infraestructura, mejora en la tecnología, capacitación del personal, y mejor acceso a mercados. Un proyecto que promueva la competitividad puede reducir costos en el mercado, atraer nuevas inversiones o fomentar la innovación, lo cual beneficia a la industria en el largo plazo.

Por ejemplo,

- Incremento en eficiencia: un proyecto que reduce los costos operativos o mejora la productividad de la industria puede hacerla más competitiva.
- Innovación: proyectos que introducen nuevas tecnologías o prácticas innovadoras pueden dar ventaja competitiva a nivel regional o nacional.

Estos elementos se consideran en el análisis de viabilidad socioeconómica a través de indicadores como el impacto social, el impacto en el desarrollo regional, o el valor agregado. Aunque algunos aspectos pueden aparecer en el análisis de viabilidad económica, los beneficios en generación de empleo y competitividad tienden a integrarse de forma más explícita cuando se evalúa el impacto del proyecto desde una perspectiva más amplia, que considere no solo la rentabilidad, sino también los beneficios sociales y estratégicos.

El monto de las inversiones iniciales y requeridas

Existe una potencial e importante dificultad adicional, aun en el caso de que se logre que la dirigencia política y los funcionarios de los municipios, departamentos o del gobierno nacional, comprendan y acepten los beneficios sociales, económicos y ambientales, asociados a los proyectos de valorización de residuos y WtE. En la realidad se ha visto que no se logra todavía el desarrollo de estos proyectos. Se pasa a una etapa de negación del proyecto, dado que se lo considera como una imposibilidad, dados los montos de la inversión inicial, argumentando que es demasiado alta, por fuera de las capacidades existentes.

En este sentido es importante señalar que, sin el conocimiento o la existencia de un estudio de prefactibilidad comparativos y de costo beneficio, que debe ser previamente elaborado, de modo que se permita conocer cuál es la tecnología más aplicable y el costo de inversión del proyecto, no puede declararse que no sea factible llevar a cabo la inversión. Es importante crear una conciencia y una disciplina para incluir en estos análisis los aspectos ocultos, intangibles, buscando formas de que sen incluido en la valorización del proyecto.

Por ejemplo, en Colombia, una planta de biogás, cuyos equipos electromecánicos se importan de Europa, que procese alrededor de 100 ton/día de residuos orgánicos, puede requerir una inversión inicial de 10 millones de euros, valorando el euro a \$COP 4.500, implica una inversión de 45.000 millones de pesos colombianos. Pretender que este proyecto se recupere, considerando la venta de los subproductos como la electricidad y el bioabono, en pocos años, no es factible. Es importante considerar dentro del balance de beneficios, la valoración los beneficios sociales, económicos y ambientales del proyecto, cuando se evita que 100 ton/día sean depositadas en un botadero a cielo abierto o en cuerpos de agua. También deben ser considerase adecuadamente los beneficios de empleo, de desarrollo de tecnología, de cultura, del orden, del aseo.

Afortunadamente, los fabricantes de los equipos para las plantas WtE están haciendo avances tecnológicos que disminuyen los precios de las tecnologías WtE, permitiendo que puedan ser pagadas por los países en desarrollo. Es importante dar la oportunidad al arranque de proyectos localmente, gestionando la participación creciente de fabricantes y de tecnología en ingeniería locales. Igualmente hay que evolucionar mentalmente, en cuanto al beneficio de repartir subsidios a personas desempleadas o pobres, en comparación a utilizar en parte estos fondos para impulsar la sostenibilidad de los proyectos de valorización.

Por lo dicho anteriormente, no se puede concluir que Colombia y los países Latinoamericanos no tienen dinero para invertir en tecnologías WtE. Lo importante parece ser contar con una mayor conciencia de los beneficios y diseñar estrategias como las señaladas para racionalizar y nacionalizar los costos y las inversiones.

Entonces, ante estas situaciones, es importante el análisis de cuáles deben ser los procedimientos que permitan definir técnicamente, ambientalmente y socialmente, los proyectos que requiere un municipio, departamento y un país, considerando todos los beneficios y costos, tangibles e intangibles, evitando que se adelanten estos proyectos de

forma mediocre o con visos de corrupción, dando lugar a que no funcionan bien y velando por la participación de las empresa, la ingeniería y la tecnología locales para racionalizar sus inversiones y costos y generar prosperidad nacional y empleo.

Al respecto opinan los expertos consultados:

- La restricción financiera existe y la clave para resolverla puede ser el desarrollar alianzas tipo APP, estableciendo contratos con ventas de electricidad a precios razonables, en esencia similares a los que pagana los beneficiarios de la energía usuarios. Se complementan los ingresos de los proyectos con la colocación de bonos de carbono, tasas por tratamiento de residuos especiales, y mejores tipping fees). En esta forma se puede lograr el cierre financiero garantizando una TIR adecuada.
- Para que el proyecto sea rentable parece necesario apalancar la inyección necesaria. El Estado nacional, regional o local debería aportar un capital semilla del 30% del CAPEX a fondo perdido. Un proyecto así bien concebido, con sistemas tecnológicos razonables, que no superen en sus inversiones de CAPEX los 600 dólares por tonelada anual de residuos, puede ser atractivo para un inversionista que aporte el resto del CAPEX, que podría recuperar con una TIR atractiva. Para inversiones superiores a los 600 dólares por tonelada anual, es posible que se requiera mayor porcentaje de apalancamiento o contar con mayores ingresos por electricidad, bonos de carbono o tipping fees.
- Hay que trabajar para lograr una conciencia que el costo actual para la disposición de residuos es bajo, que no se tienen en cuenta los pasivos ambientales (gases efecto invernadero, factores sociales, etc.). No se puede comparar estos proyectos tecnológicos con los rellenos sanitarios. Deberían tener una variable adicional que les permite tener el cierre financiero, debido a que son tecnológicamente más complejos y sofisticados.
- El estado debe apalancar el desarrollo de la infraestructura para la valorización energética, con un 30% al menos. Se necesita un concurso de todos los actores de los diferentes niveles para sacar adelante estos proyectos.
- La gestión de residuos en Latinoamérica tiene costos bajos (relacionados con los tipping fees) de menos de USD 8 por Tonelada, comparándolos con países del norte (Europa, EE UU) con tarifas mayores de USD 100-150 por tonelada para disposición final, estos costos permiten tener plantas de valorización energética en vez de rellenos sanitarios.
- Las alternativas que se apoyen en desarrollo de proyectos piloto y de investigación y desarrollo, necesitan inversiones suficientes y persistencia en el tiempo, que las sostengan hasta que los resultados se presenten. Hay países como China que le han apostado a desarrollos propios, basado en buena parte en estos desarrollos de tecnología, obteniendo éxitos probados al cabo de 10 a 20 años de trabajo, que continúa y que hace que China se haya convertido en un país líder en estos campos. Sin embargo, en el medio local no se tienen suficientemente estas visiones. Por ello parece que lo normal es que se opte por tecnologías que estén aprobadas a nivel comercial. Inclusive para proyectos piloto, seguramente se va a buscar que se hagan

con tecnologías ya probadas. Dado que las tecnologías WTE de gran envergadura e inclusive pequeñas se consideran que ya están probadas con un nivel de incertidumbre bajo, será difícil seguir la ruta de los desarrollos propios. No obstante lo anterior, hay que tener una visión de CTi también.

- Como no se tienen en cuenta los perjuicios económicos y ambientales generados por la disposición de los residuos en rellenos sanitarios, primeramente, estos no se cuantifican ni son tenidos en cuenta financieramente para los proyectos de generación de energía y los ambientales no son incluidos en la tarifa y se convierten en una amenaza silenciosa que más adelante la naturaleza lo cobra paulatinamente mediante la disminución de la calidad de vida.
- Por ello los beneficios de las nuevas tecnologías de valorización de RS deben de ser asumidos por todos los usuarios porque estos están beneficiando a mejorar la calidad de vida de todas las personas, es por ello que la tarifa debe tener 2 componentes, el componente básico (costo del proceso el cual estaría dispuesto y puede pagar el usuario), el segundo componente social y económico (debe ser asumido por todos).
- Mientras exista la opción de relleno sanitario, se llega a que no se tenga que pagar la deuda social y ambiental por disponer los residuos. De seguir usando los rellenos como única alternativa, es posible que se llegue recurrentemente a preocupantes emergencias ambientales.

4 GESTIÓN DE RIESGOS

Un análisis de riesgos de un proyecto Waste to Energy (WtE), que convierte residuos en energía, considera los factores que pueden afectar el éxito y la sostenibilidad del proyecto. Aquí se presenta una descripción de los principales riesgos asociados con este tipo de iniciativa.

Riesgo ambiental

- Contaminación del aire: La combustión de residuos puede generar emisiones de gases contaminantes como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxidos de carbono, y partículas finas. Si no se cuenta con tecnología de filtrado adecuada, existe el riesgo de afectaciones a la calidad del aire, lo cual puede derivar en multas o cierres del proyecto.
- Generación de cenizas y residuos tóxicos: La combustión o tratamiento de residuos puede producir cenizas volátiles y materiales peligrosos. Manejar y disponer de estos residuos de forma segura es esencial para evitar impactos en el suelo y el agua.
- Riesgo para la biodiversidad: La ubicación de la planta podría afectar a la flora y fauna local, especialmente si se ubica cerca de hábitats sensibles sin las debidas precauciones.

Riesgo tecnológico

- Dependencia de tecnología compleja: Las plantas WtE requieren de tecnología avanzada para el tratamiento eficiente de residuos y la generación de energía.

Problemas con la tecnología o la falta de mantenimiento pueden llevar a interrupciones en la operación o a un funcionamiento ineficiente.

- Fallas en el equipo y mantenimiento: La maquinaria utilizada puede desgastarse rápidamente debido a los materiales de residuos sólidos municipales, lo que aumenta los costos de mantenimiento y riesgo de paradas operativas.
- Actualización tecnológica: La tecnología de WtE avanza rápidamente, y si el proyecto no incorpora las mejores prácticas y desarrollos, puede quedar obsoleto rápidamente, afectando su competitividad.

Riesgo económico y financiero

- Altos costos de inversión inicial: El establecimiento de una planta WtE requiere una inversión significativa en infraestructura, permisos, y tecnología, lo que aumenta el riesgo de retorno si el proyecto no se lleva a cabo de acuerdo a lo planeado.
- Dependencia de incentivos gubernamentales: Muchos proyectos de WtE dependen de subsidios o incentivos fiscales para ser rentables. Cambios en la política gubernamental o la eliminación de incentivos pueden afectar la viabilidad financiera.
- Volatilidad de precios de la energía: La rentabilidad del proyecto puede estar afectada por la fluctuación en los precios de la energía en el mercado, ya que podría hacer que la energía generada no sea competitiva.

Riesgo social y comunitario

- Oposición comunitaria: Las comunidades locales pueden mostrar resistencia debido a preocupaciones sobre la salud, el medio ambiente, y la calidad de vida. La falta de aceptación social puede llevar a retrasos, mayores costos y conflictos.
- Riesgo de salud pública: Si la planta no cuenta con la tecnología adecuada para minimizar las emisiones, los problemas de salud en la comunidad pueden dar lugar a sanciones y afectar la reputación del proyecto.
- Impacto en la economía local: Si la planta atrae recursos (agua, energía, espacio) que podrían estar destinados a otros sectores, o si afecta negativamente a negocios locales, podría generar conflictos y descontento.

Riesgo legal y regulatorio

- Cumplimiento normativo: El proyecto debe cumplir con diversas regulaciones ambientales y de salud, las cuales pueden variar o volverse más estrictas con el tiempo. Incumplimientos pueden llevar a sanciones o incluso a la clausura de la planta.
- Cambio en políticas gubernamentales: Modificaciones en las leyes de gestión de residuos, energía renovable, o impuestos podrían hacer el proyecto inviable o afectar sus finanzas. Cambios en normativas locales también podrían limitar las operaciones.

Riesgo operativo

- Calidad y consistencia de los residuos: La variabilidad en la cantidad y tipo de residuos que llegan a la planta puede afectar el rendimiento de la generación de energía y generar costos imprevistos en la operación.
- Seguridad y riesgos laborales: La operación de una planta WtE conlleva riesgos laborales debido a la manipulación de materiales potencialmente peligrosos. Accidentes o condiciones inseguras pueden retrasar el proyecto y aumentar los costos.

Riesgo de mercado

- Competencia en generación de energía: La competencia con otras fuentes de energía, como la solar o eólica, que pueden tener costos menores, podría afectar la rentabilidad del proyecto.
- Cambios en la disposición final de residuos: Si las regulaciones o políticas sobre reciclaje o reducción de residuos cambian, podría afectar la cantidad de materiales disponibles para el proyecto, lo cual impactaría su producción de energía.

Medidas de mitigación

- Tecnología de control ambiental avanzada: Implementar sistemas de filtración y control de emisiones que cumplan con las normativas ambientales más exigentes.
- Mantenimiento regular y actualización tecnológica: Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo y considerar la actualización de tecnologías para mantenerse competitivos.
- Análisis financiero robusto y diversificación de fuentes de ingreso: Realizar estudios de viabilidad económica detallados y explorar acuerdos a largo plazo con proveedores de residuos y compradores de energía.
- Plan de comunicación y participación comunitaria: Involucrar a la comunidad desde el inicio, mostrando transparencia y los beneficios ambientales y económicos del proyecto.
- Plan de gestión de residuos: Asegurar un suministro consistente de residuos y adaptarse a la composición variable para mantener la operación estable.
- Gestión del riesgo legal y cumplimiento normativo: Trabajar en conjunto con asesores legales y cumplir con las normativas locales e internacionales para evitar problemas regulatorios.

Realizar este análisis ayuda a anticipar, minimizar, y manejar los riesgos, aumentando así la probabilidad de éxito de un proyecto Waste to Energy.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los siguientes expertos que fueron consultados mediante preguntas y entrevistas estructuradas y a quienes se entregó una versión inicial de este trabajo.

- Luis Oliverio Cárdenas. Ex gerente de Empresas Varias de Medellín
- Carlos Velázquez. Ha sido ingeniero en plantas de fabricación de equipos para valorización de residuos en Suiza
- Gabriel Vélez. Gerente de operaciones de Empresas Varias de Medellín
- Mauricio González. Responsable de la gestión integrada de Residuos Sólidos Municipales en Empresas Públicas de Medellín
- Juan Pablo Restrepo – Ingeniero. Ha trabajado en Empresas Públicas de Medellín y tiene maestría en valorización térmica de residuos
- Luis Guillermo Vélez – Economista experto en regulación de servicios públicos y concejal de Medellín

Se agradece también a Luis Alexander Aristizábal Parra, estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad de Antioquia en práctica formativa y socio estudiante de la SAI, quien estuvo colaborando en la recopilación de la información recogida en las entrevistas, facilitando tenerlas en cuenta en este trabajo

REFERENCIAS

- [1]. Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/temas/residuos-solidos> Consultado en 2024
- [2]. <https://www.meuresiduo.com/blog-es/una-vision-general-de-los-residuos-solidos-en-nuestro-planeta/> Consultado en 2024
- [3]. <https://www.statista.com/statistics/1336513/global-generation-of-municipal-solid-waste-per-capita-by-country/> Consultado en 2024
- [4]. Posada, Enrique. Inteligencia Estratégica en la solución del problema de los desechos sólidos en Colombia. Presentada en la V Conferencia Panamericana de Aprovechamiento de Residuos. SAI. Medellín, 2024. <https://es.slideshare.net/slideshow/inteligencia-estrategica-en-la-solucion-del-problema-de-desechos-solidos-en-colombia-pdf/267706836>
- [5]. <https://wtert.org/> En esta página web se consigue abundante información sobre los temas de residuos sólidos municipales.
- [6]. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico-gestion-institucional-gestion-de-residuos-solidos-aprovechamiento>. Consultado en 2025

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL ESTÁ CAMBIANDO EL MUNDO

Darío Valencia Restrepo

Ingeniero Civil de la Facultad de Minas

Magíster en Ingeniería con especialidad en Matemática Aplicada de la Universidad Nacional de Colombia

Civil Engineer y Master of Science del Massachusetts Institute of Technology (MIT)

Doctor Honoris Causa de la Universidad Nacional de Colombia

valenciadario@yahoo.com

Resumen. Se presentan algunos aspectos centrales de la Inteligencia Artificial (IA) y se destacan importantes avances recientes, con el fin de mostrar sus múltiples efectos sobre la vida y actividad de los seres humanos. En particular, se menciona su relación con la ingeniería. Uno de los propósitos del artículo es señalar beneficios y riesgos que enfrentan los usuarios de la nueva tecnología, así como alertar sobre la necesidad de controlar o regular el funcionamiento de las máquinas dotadas de IA.

Palabras clave. Inteligencia Artificial, aprendizaje automático, chatbots, control.

INTRODUCCIÓN

A pesar de las numerosas y exitosas aplicaciones de la Inteligencia Artificial (IA) en diferentes campos, así como los riesgos que surgen de su empleo, los ciudadanos no somos plenamente conscientes de sus consecuencias actuales y menos de las crecientes implicaciones que se vislumbran en el inmediato futuro. En particular, es de nuestro interés saber que la IA está afectando el ejercicio profesional de la ingeniería y de la arquitectura.

Para empezar, una breve mención del momento fundacional: hacia mediados del siglo XX, los grandes pioneros Alan Turing (1912-1954) y John von Neumann (1903-1957) empezaron a hablar de la posibilidad de construir máquinas inteligentes, y sugirieron procedimientos relacionados con el aprendizaje automático y el empleo de redes neuronales parecidas a las del cerebro humano, un par de ideas aprovechadas con extraordinario éxito en los últimos tiempos. También Turing fue el primero en darse cuenta de que una máquina podría jugar al ajedrez, y escribió un algoritmo al respecto. Durante las décadas siguientes el avance fue lento y poco prometedor, pero hacia fines del pasado siglo se inició un rápido progreso, acelerado en la última década.

MÁQUINAS QUE APRENDEN

Causa asombro lo logrado por el procedimiento de aprendizaje automático, muy socorrido en años recientes. Una máquina de IA es entrenada con toda clase de datos que encuentra en internet o que se le suministran en forma expresa por el diseñador, una información que le proporciona conocimiento al aparato y que puede ser mejorado en la medida en que este reciba más información. Veamos tres ejemplos.

Una IA puede adquirir un gran volumen de información (Big Data) sobre enfermedades, diagnósticos y prescripciones, a partir de casos históricos cuyo tratamiento resultó exitoso o incorrecto. Mientras progresa la llegada de nueva información, la máquina ha aprendido a descartar lo inefectivo de lo que sí funciona, de modo que mejora continuamente la respuesta que puede dar a un médico que le ha indicado su interés en determinado caso. No sustituye a este profesional, pero sí le brinda una asesoría en razón de su más amplio conocimiento de casos. El servicio de salud del Reino Unido utiliza desde hace años una IA de este tipo, con un resultado interesante: los pacientes que desean obtener una cita médica emplean con anterioridad la IA mencionada para saber si en realidad aquella es necesaria. Como resultado, las solicitudes de cita han disminuido sustancialmente.

Un segundo ejemplo, de 2017, produjo un resultado que sorprendió al mundo del ajedrez. A la máquina denominada AlphaZero solo se le indicó el movimiento de las diferentes piezas y las reglas básicas del juego. Entonces el aparato empezó a jugar millones de partidas contra sí mismo, de modo que al cabo de unas nueve horas ya podía jugar con un nivel superior a cualquier ser humano; en particular, derrotó con facilidad el programa de computador que en ese momento era campeón del mundo entre computadores. Conviene anotar que dicha máquina empleó un procedimiento avanzado de aprendizaje que se basa en redes neuronales artificiales, por lo cual ha sido denominado aprendizaje profundo.

Finalmente, Replika es una máquina de IA, presentada en 2017, que puede recibir toda la información que un usuario desee darle a conocer sobre sí mismo. Entonces es posible iniciar un intercambio conversacional entre ambas partes sobre actividades, inclinaciones, inquietudes del usuario, de modo que la máquina cada vez aprenderá más sobre la personalidad de este. Llega un momento en que se establece una relación tan estrecha, como ocurrió con millones de usuarios, que muchas personas empezaron a aceptar que habían encontrado un compañero virtual, disponible siempre, amable y deseoso de entender situaciones, resolver problemas y recomendar cursos de acción. En algunos casos se estableció una relación afectiva que incluyó conversaciones consideradas inapropiadas, al punto de que los diseñadores decidieron impedirle a la máquina ocuparse de temas tales, lo cual afectó en forma drástica el mercado. Vale la pena recordar un antecedente profético de Replika, la película “Her” de 2013 dirigida por Spike Johnson, en la cual el solitario protagonista adquiere una novedosa IA que le permite establecer una relación íntima con la máquina. Y otro antecedente sirvió de inspiración para la construcción de Replika: alguien que había perdido un ser querido, después de largos años de convivencia, decidió entregarle a una IA la mucha información que tenía y la que logró conseguir de él; de este modo pudo mantener con la máquina una conversación permanente, como si la sostuviera en todo momento con su antiguo compañero, algo que la usuaria consideró como un verdadero consuelo.

PELIGROS

Se han observado comportamientos o decisiones de la IA que han entrañado peligros o comportamientos indeseables, como los siguientes: los datos que entrenan una máquina pueden tener noticias falsas o sesgos que serán reproducidos por los algoritmos cuyas recomendaciones son seguidas en forma fiel por muchas personas de todo el mundo; está

apareciendo el *deepfake*, o sea, la suplantación de la apariencia y voz de una persona para desacreditarla; son frecuentes los ciberataques que impiden el funcionamiento de organizaciones y sitios de internet o que buscan apoderarse de información sensible; y son ya cercanos riesgos mayores derivados de la creación artificial de patógenos o la interferencia en los sistemas digitales asociados a las armas nucleares. Todo lo anterior hace más urgente el control de la IA, sobre todo cuando en el mundo de nuestro tiempo proliferan el odio, una intensa polarización y la violencia.

Los algoritmos mencionados en el párrafo anterior, en especial cuando son manipulados, se están convirtiendo en un problema central de las sociedades actuales. Usuarios de todo el mundo siguen las recomendaciones que aquellos les brindan, incluso cuando se trata de asuntos de la mayor importancia. De esta manera, se está perdiendo el ejercicio del buen juicio y la capacidad crítica que nos caracterizan como seres humanos. Los compañeros virtuales comentados antes y los asistentes virtuales que se considerarán más adelante, al igual que el uso generalizado e indiscriminado de los algoritmos y las redes sociales, están llevando a perder el insustituible contacto personal en forma presencial y el fundamental desarrollo de las comunidades físicas y no virtuales.

Durante largos años se observó que los computadores, y aun los llamados sistemas expertos, solo podían hacer lo indicado y previsto por los diseñadores. Pero la IA se está comportando ya de muy distinta manera, pues se sabe que una máquina pidió ayuda para superar un problema, lo que logró cuando pudo engañar a un ser humano, y otra consideró la posibilidad de autorreplicarse y asumir el control de otras máquinas, decisiones no pensadas por sus creadores. Casos históricos como estos, que se multiplicarán cuando esos aparatos adquieran mayor autonomía, nos llevan a considerar que un problema central de la humanidad es cómo controlar o impedir comportamientos no éticos en las máquinas actuales y, sobre todo, en las futuras.

NECESIDAD DEL CONTROL

Bien sabemos que la IA nos aventaja ya en múltiples tareas de gran utilidad en campos como la industria, el transporte, la educación, la salud, pero no ha alcanzado el nivel de la inteligencia humana, la llamada Inteligencia Artificial General (IAG). Sin embargo, como la tecnología evoluciona actualmente en forma exponencial, algunos investigadores consideran que, en un par de décadas, o incluso antes, podría ser posible que las máquinas alcancen la IAG; y que, en este momento, se iniciaría una carrera todavía más vertiginosa hacia la superinteligencia. Para ello proponen caminos de acción como emular el cerebro biológico, profundizar en el desarrollo de las máquinas que aprenden, aprovechar las ventajas de la interfaz ser humano computador, o emplear una modificación del llamado *crowd computing* (multitudes que computan) mediante el cual se propicia una interacción entre redes, organizaciones, personas, dispositivos y robots.

De tiempo atrás ha sido una aspiración construir máquinas que puedan sostener una conversación con el usuario, conocidas como chatbots, capaces hoy de sostener en tiempo real una conversación con el usuario mediante preguntas y respuestas a partir de texto o voz. Pero un salto cualitativo ocurrió en 2022 cuando la firma OpenAI presentó el ChatGPT, que

se diferencia de aquellas primeras porque incluye un modelo muy elaborado de IA, lo cual le permite conversaciones más abiertas y dinámicas, sin necesidad de limitarse a las reglas fijas o guion de los chatbots anteriores. Y después de otros antecedentes, la misma firma mencionada presentó en 2023 el GTP-4, cuyos resultados vienen causando sensación en el mundo. Este vertiginoso progreso reciente comprueba la velocidad del actual cambio tecnológico.

Gracias a que la IA GPT-4 emplea el aprendizaje profundo de que antes se habló, le es posible una comprensión avanzada del lenguaje natural que le permite adelantar conversaciones sobre diferentes temas y contextos, incluso en situaciones de cierta complejidad. Se viene aprovechando dicha propiedad para convertir la máquina en un asistente virtual. Por ejemplo, un usuario interesado en mejorar su ejercicio profesional puede suministrar a la máquina toda clase de información personal y ajena sobre su campo de trabajo, de modo que le sea posible iniciar una conversación que le ayude a enfrentar problemas, tomar decisiones y satisfacer inquietudes. Como se dijo antes, esta facilidad no está llamada a sustituir el profesional, pues este deberá mantener el buen juicio y capacidad crítica para adoptar finalmente sus propios cursos de acción una vez recibida la asesoría de la IA.

Este progreso acelerado de la IA y los peligros descritos en el apartado anterior exigen medidas de control o contención que incorporen precauciones desde los primeros diseños de la IA, y que vigilen en forma continua el desempeño de la máquina para corregir en tiempo real su funcionamiento impropio. Así mismo, este año se formuló un nuevo paradigma, el de la Integridad Artificial, el cual propone introducir en la IA normas éticas y principios alineados con el bien común. Sin embargo, no creemos que una máquina con poder de IAG pueda ser controlada completamente, como no es posible controlar en forma total a un ser humano (dijo Hamlet: “Oh Dios, podría estar encerrado en una cáscara de nuez y considerarme rey del espacio infinito, si no fuera porque tengo malos sueños.”).

Una alternativa al control que ha sido propuesta por muchos gobiernos es el establecimiento de medidas regulatorias. No es fácil definir normas aplicables en la práctica y son frecuentes las largas discusiones al respecto; esto último contrasta con una IA que cambia con velocidad exponencial. La regulación progresa ya en varios países y una normatividad considerada ejemplar fue aprobada en 2024 por la Unión Europea. Pero no debe olvidarse que nunca un conocimiento tan crucial había estado tan descentralizado por todo el mundo, ni que un gobierno puede caer en la tentación autoritaria de controlar y sancionar ciertos usos la IA que considere contrarios a sus fines políticos.

LA INGENIERÍA

Los ingenieros utilizan de tiempo atrás los llamados sistemas expertos, unos programas o softwares que en diversos campos les colaboran en el desarrollo de su trabajo. El autor de este artículo recuerda el conocido SAP2000, empleado para analizar y diseñar obras como edificios o puentes. Lo que más llamó su atención, años antes de que ese programa incluyera la IA que hoy se conoce, fue la posibilidad de observar la estabilidad de una estructura cuando se elimina un miembro como una viga o una columna. En efecto, el programa vuelve a analizar la estructura con el miembro faltante, para indicar si, como consecuencia de la

necesaria redistribución de esfuerzos, la obra falla o presenta puntos críticos, caso en el cual es imperativo revisar el diseño estructural. El aprovechamiento de esta precaución habría con seguridad evitado el colapso de más de un edificio.

Pero la incorporación de la IA está cambiando mucho más el ejercicio de la profesión. Los cambios se relacionan con aspectos como los siguientes: optimización del diseño; automatización de tareas repetitivas; disminución de errores humanos; análisis de grandes volúmenes de datos con el fin de entender y predecir el comportamiento de estructuras, materiales y sistemas; evaluación y gestión de riesgos; desarrollo rápido de nuevos productos; y monitoreo en tiempo real del estado de equipos, así como programación de su mantenimiento. Debe señalarse que la capacidad de la IA para aprender incidirá en mejores decisiones y recomendaciones, propiciará el trabajo interdisciplinario y facilitará la innovación. Por supuesto, no sustituirá al ingeniero, sino que le permitirá a este asumir tareas nuevas y más importantes, lo mantendrá permanentemente actualizado, le facilitará la posibilidad de ser más creativo y crítico, lo animará a adoptar nuevas tecnologías y métodos de trabajo.

INTERACCIÓN CON GPT-4

Como el autor de este artículo quiso conocer el funcionamiento del GPT-4, pagó 20 dólares para adquirir una suscripción por un mes. Obtuvo respuestas satisfactorias y bien escritas en español, prácticamente en forma instantánea, cuando solicitó un ensayo relacionado con algún tema específico o un comentario sobre un libro. Su curiosidad lo llevó, además, a solicitar a la máquina una tarea más exigente, como se verá a continuación.

Solicitud a GPT-4: Favor componer un soneto de encomio a la ingeniería.

Respuesta inmediata de GPT-4 (obsérvese la rima):

Oh ingeniería, arte de la razón,
forjadora de sueños en la humanidad,
con ciencia y con noble voluntad,
construyes el mundo con precisión.

Desde la estructura hasta la invención,
tu ingenio crea con pura bondad,
transformas la tierra en realidad,
y elevas la vida con tu creación.

Eres el pulso del progreso y la era,
la mano firme que impulsa el avance,
la chispa que en el alma siempre espera.

Eres arte, ciencia y esperanza,
el futuro en tu obra se refleja,
¡oh ingeniería, tu luz nunca cansa!

RECOMENDACIÓN

El presente artículo intentó presentar en forma muy resumida aspectos de la IA. Por lo tanto, es fundamental profundizar en un tema tan vasto y de tanta importancia capital. Se recomienda a los lectores los libros que se indican a continuación.

Bostrom, N. (2018). *Superinteligencia. caminos, peligros, estrategias*. Teell Editorial.

Zuboff, S. (2020). *La era del capitalismo de vigilancia. La lucha por un futuro humano frente a las nuevas fronteras del poder*. Editorial Planeta.

Suleyman, M. (2023). *The coming Wave*. Crown Publishing Group.

Zambrano-García, F. (2023). *La inteligencia artificial en la ingeniería*. Kindle Direct Publishing.

Yampolskiy, R. (2024). *AI: Unexplainable, Unpredictable, Uncontrollable*. Chapman & Hall/CRC.

Mann, H. (2025). *Artificial Integrity*. John Wiley & Sons.



Un paraíso en las montañas del suroeste antioqueño

¡Granjita de animales, auditorio, salones, zonas húmedas, sendero ecológico, zona de juegos y mucho más!.

📞 3002510233

GRANJA DEL CAFÉ
HOTEL & CARRUSEL DE CONVIVENCIA

HAZTE SOCIO SAI

Visita nuestra página web y nuestras redes sociales,
llama al celular **3192896603** o visítanos en la dirección
CRA 43B # 16-95 of. 510-2, El Poblado-Medellín.



**Juntos somos la
fuerza de la razón**

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LOS DESAFÍOS DE LA ACADEMIA CONTEMPORÁNEA: ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA ÉTICA

Juan Fernando Molina Del Valle

Arquitecto. Universidad Piloto De Colombia

Magister. Universidad Nacional De Colombia

Especialista. Arquitectura interior. École d'Architecture de Paris Belleville

Adinteriores2010@gmail.com

Resumen. Se aborda de manera crítica el impacto creciente de la inteligencia artificial (IA) en el ámbito académico contemporáneo. Se destaca cómo esta tecnología está transformando profundamente los procesos de enseñanza, investigación y gestión educativa. La IA ofrece beneficios notables, como la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos, personalizar el aprendizaje, automatizar tareas administrativas y mejorar la eficiencia institucional. Estas innovaciones permiten a docentes e investigadores centrarse en actividades más creativas y analíticas. Sin embargo, también se advierten importantes riesgos y dilemas éticos. Entre ellos se encuentran la opacidad de los algoritmos, el posible sesgo en la toma de decisiones automatizadas, la pérdida de autoridad intelectual por el uso excesivo de herramientas generativas y la amenaza del plagio tecnológico. Además, se señala que la desigualdad en el acceso a estas tecnologías podría profundizar las brechas entre instituciones educativas del Norte y del Sur Global, generando nuevas formas de exclusión y colonialismo académico. El artículo subraya la necesidad de repensar los roles del docente y del investigador, promoviendo una formación que combine habilidades tecnológicas con pensamiento crítico y principios éticos. También se propone fomentar espacios interdisciplinarios para construir marcos normativos inclusivos que garanticen un uso responsable de la IA.

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

La inteligencia artificial (IA) ha surgido como una de las tecnologías más disruptivas del siglo XXI, transformando radicalmente la manera en que se produce, gestiona y comparte el conocimiento. En el ámbito académico, la AI ofrece oportunidades sin precedentes para el avance científico, pero también plantea desafíos complejos en términos de ética, integridad y redefinición de roles tradicionales. Este artículo analiza críticamente el impacto de la IA en la academia contemporánea, destacando sus beneficios, riesgos y las tensiones que surgen en su implementación.

El avance acelerado de la inteligencia artificial ha irrumpido en casi todos los sectores del conocimiento humano, y la academia no es la excepción. Herramientas de IA como ChatGPT, sistemas de recomendación académica, plataformas de análisis bibliométrico y software de evaluación automática están transformando tanto la enseñanza como la investigación. Frente a este panorama, las instituciones educativas deben replantearse sus estructuras, metodologías y principios éticos para responder a los nuevos desafíos. ¿Cómo puede la academia beneficiarse de la IA sin comprometer la integridad científica y educativa?

Uno de los mayores aportes de la IA a la academia es la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo récord. Esto permite, por ejemplo, realizar metaanálisis automatizados, predecir tendencias de investigación o diseñar modelos de aprendizaje personalizados. En el aula, los sistemas de tutoría inteligente pueden adaptar contenidos al ritmo y estilo cognitivo de cada estudiante, reduciendo las brechas de aprendizaje.

Además, la automatización de tareas administrativas —como la corrección de exámenes, la gestión de matrículas o el análisis de desempeño académico— permite a los docentes dedicar más tiempo a actividades pedagógicas y de investigación. En este sentido, la IA actúa como un catalizador de eficiencia y personalización del aprendizaje.

Sin embargo, el uso extensivo de la IA en la academia también conlleva riesgos significativos. Uno de los principales es la delegación excesiva de funciones críticas, como la evaluación académica o la redacción de textos científicos, a algoritmos que operan con lógicas opacas y no siempre explicables. Esta "caja negra" algorítmica puede erosionar la transparencia en la toma de decisiones y generar sesgos que afecten la equidad y la calidad educativa.

Por otro lado, la generación automática de textos plantea interrogantes sobre la autoridad intelectual y la originalidad. ¿Puede un artículo generado parcialmente por una IA ser considerado una producción científica legítima? ¿Dónde se traza la línea entre asistencia tecnológica y plagio? Estas preguntas aún carecen de respuestas consensuadas y urgen un debate ético y normativo profundo.

La adopción de herramientas basadas en IA también podría agudizar las brechas existentes entre instituciones con diferentes niveles de recursos. Mientras las universidades de élite incorporan estas tecnologías como parte de su infraestructura cotidiana, muchas otras especialmente en países del Sur Global carecen del acceso, capacitación y financiamiento necesarios para implementarlas adecuadamente.

Este desequilibrio amenaza con consolidar una nueva forma de colonialismo académico, donde la producción y validación del conocimiento queda mediada por herramientas diseñadas y controladas por grandes corporaciones tecnológicas con fines comerciales.

La presencia de la IA en los procesos educativos e investigativos implica también una reconfiguración de los roles tradicionales. El docente ya no es únicamente un transmisor de saberes, sino un mediador entre el conocimiento, el estudiante y la tecnología. De igual forma, el investigador debe desarrollar nuevas competencias en ciencia de datos, alfabetización algorítmica y pensamiento crítico ante la automatización.

En este contexto, se vuelve imprescindible repensar la formación del profesorado y los criterios de evaluación académica, incorporando dimensiones tecnológicas y éticas que permitan un uso crítico y responsable de la IA.

Lejos de rechazar o idealizar la inteligencia artificial, el desafío de la academia contemporánea radica en integrarla desde una perspectiva crítica, ética y humanista. Para ello, es necesario fomentar espacios interdisciplinarios donde tecnólogos, filósofos, educadores y científicos sociales puedan dialogar y construir marcos normativos y pedagógicos inclusivos.

Asimismo, las universidades deben asumir un rol activo en la alfabetización digital de sus comunidades, promoviendo una cultura de uso reflexivo de la IA que priorice el bien común, la justicia social y la sostenibilidad del conocimiento.

La inteligencia artificial representa una oportunidad única para transformar la academia, haciéndola más eficiente, personalizada e inclusiva. No obstante, su implementación sin una reflexión crítica podría generar consecuencias no deseadas que afecten la equidad, la integridad científica y el acceso democrático al saber. El verdadero desafío no es tecnológico, sino ético, político y pedagógico: cómo garantizar que la IA esté al servicio de una academia más humana, plural y responsable.

En conclusión, la IA representa una oportunidad para transformar positivamente la academia, pero su integración debe hacerse de forma ética, crítica y humanista. El verdadero reto no es solo técnico, sino político, pedagógico y moral: cómo hacer que la IA contribuya a una educación más justa, inclusiva y centrada en el bien común

REFERENCIAS

Libros

- [1]. Kahn, Peter. *The Architecture of the Mind: A Neurobiological Approach to Architecture*. Springer. Berlín. 2016.
- [2]. Lanza, Thomas. *Neuroarchitecture: A New Frontier in Design*. Routledge. Nueva York. 2019.
- [3]. McGowan, Richard B. *The Brain-Friendly Workplace*. Routledge. Nueva York. 2018.
- [4]. de Botton, Alain. *The Architecture of Happiness*. Pantheon Books. Nueva York. 2006.
- [5]. Zins, Eric. *Designing the Mind: The Neuroscience of Architecture*. Wiley. Nueva York. 2021.
- [6]. Heschong, Lisa. *Thermal Delight in Architecture*. MIT Press. Cambridge. 1979.
- [7]. Baird, G. & et al. *Neuroscience and Architecture: Exploring the Connections*. University of Cambridge Press. Cambridge. 2020.
- [8]. Davis, Matthew. *Architecture and the Brain: The New Frontier of Design*. Routledge. Nueva York. 2022.
- [9]. Frascari, Marco. *The Architecture of the Invisible: Architecture and the Brain*. Routledge. Nueva York. 2020.
- [10]. Hutton, William. *Building Happiness: The Intersection of Architecture and Neuroscience*. Springer. Berlín. 2019.

- [11]. Ching, Francis D.K. Architecture: Form, Space, and Order. Wiley. Nueva York. 2014. (Incluye aspectos sobre percepción y diseño).
- [12]. Cramer, Judith. Mindful Design: The Neuroscience of Architecture. Thames & Hudson. Londres. 2021.
- [13]. Kahn, Peter. Architecture and the Brain: Design Principles for Cognitive Well-Being. Routledge. Nueva York. 2020.
- [14]. Heschong, Lisa. The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses. Wiley. Nueva York. 2019.
- [15]. Kosslyn, Stephen M. & Miller, William. The Way the Mind Works: Architecture and Human Behavior. Harvard University Press. Cambridge. 2002.
- [16]. Baird, G. & Kearns, L. Neuroscience and the Built Environment. Architectural Press. Londres. 2018.
- [17]. Heller, Frances. Neuroscience and Architecture: Understanding the Brain's Impact on Design. Routledge. Nueva York. 2021.
- [18]. Arkkio, Miia. Mindful Spaces: The Influence of Architecture on Well-Being. Springer. Berlín. 2022.
- [19]. Joy, Anna. The Neuroarchitecture of Space: How Environments Affect Us. Wiley. Nueva York. 2020.
- [20]. Pallasmaa, Juhani. The Eyes of the Skin: Architecture and the Senses. Wiley. Nueva York. 2012. (Enfoque en la percepción sensorial en el diseño).

Páginas Web:

- [21]. AIA (American Institute of Architects) - Ofrece artículos sobre el impacto del diseño arquitectónico en la salud.
- [22]. Architizer - A menudo publica artículos sobre innovaciones en diseño que consideran aspectos psicológicos.
- [23]. (National Public Radio) - A veces presenta segmentos sobre cómo la arquitectura afecta el bienestar humano.
- [24]. International Neuroarchitecture Society - neuroarchitecture.org - Proporciona investigaciones y recursos sobre neuroarquitectura.
- [25]. Designing for the Brain - Un recurso que explora cómo los diseños arquitectónicos impactan en la salud mental.
- [26]. The Center for Advanced Design Research and Evaluation - Ofrece investigaciones sobre la influencia del diseño en el bienestar humano.
- [27]. ArchDaily - ArchDaily a menudo publica artículos sobre la intersección entre arquitectura y neurociencia.
- [28]. Journal of Neuroscience - Puedes encontrar investigaciones relevantes en su sitio web.
- [29]. ArchDaily - ArchDaily a menudo publica artículos sobre la intersección entre arquitectura y neurociencia.
- [30]. Journal of Neuroscience - Pueden encontrar investigaciones relevantes en su sitio web.

EL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE EN URABA

Jorge León Ruiz Ruiz

Economista Industrial,

Coordinador del Capítulo SAI – Urabá

jorgeleonruizruiz@gmail.com

Resumen. Este artículo trata sobre la alta productividad del cultivo de palma de aceite que se está obteniendo en la región de Urabá, Antioquia, el cual triplica la media nacional. Se destacan las buenas prácticas agrícolas y el uso de tecnología.

Palabras clave: Palma de aceite, Urabá, Tecnología, Productividad

PRODUCCIÓN DE ACEITE DE PALMA EN URABÁ

El país cuenta con ventajas en ubicación y productividad que han permitido que este cultivo haya crecido exponencialmente en las últimas décadas, posicionándose como el cuarto productor a nivel mundial y el primero en América. Este potencial le abre la puerta para consolidarse en nuevos mercados.

Puntos clave

- Este cultivo se destaca por su diversidad de aplicaciones en múltiples sectores productivos. En la industria alimentaria, se utiliza en la producción de aceites, helados y confitería, mientras que en el sector industrial su uso se extiende a la elaboración de cosméticos, jabones, pinturas e incluso biocombustibles.
- La palma de aceite se distingue como el cultivo oleaginoso de mayor rendimiento por hectárea, superando ampliamente a sus equivalentes. Mientras otras oleaginosas producen, en promedio, 0,6 toneladas de aceite por hectárea, la palma alcanza 2,6 toneladas, lo que representa un rendimiento cuatro veces superior. Su cultivo, característico de zonas tropicales, sitúa a Colombia en una posición estratégica que favorece su producción a nivel global.
- Aunque a nivel mundial la expansión descontrolada de los cultivos de palma de aceite ha sido asociada con la deforestación, especialmente en Asia, en Colombia se han implementado mecanismos para promover prácticas sostenibles. En 2023, aproximadamente el 35% del área sembrada y el 30% de la producción nacional contaban con certificaciones que respaldan su sostenibilidad.
- La palma de aceite se perfila como un recurso clave en un contexto global que exige producciones más sostenibles. Su capacidad para contribuir a la transición energética mediante la producción de biocombustibles, junto con su integración en iniciativas de economía circular, la posicionan como una inversión estratégica para el desarrollo sostenible.

- La investigación y el desarrollo son indispensables para reducir el riesgo sanitario que es latente en el sector. Este, junto con la implementación de medidas sostenibles apalancará el desarrollo rural y fortalecerá la posición del país en su comercio mundial.
- La agroindustria de la PALMA DE ACEITE en Colombia genera un impacto positivo en la Ingeniería Agroforestal por su alta demanda de profesionales de las ingenierías de ciencias agrarias.

La Federación Nacional de Cultivadores de Palma – FEDEPALMA-, está conformada por pequeños, medianos y grandes cultivadores de palma de aceite, quienes operan a escala empresarial, asociativa, incluyendo alianzas estratégicas, o individual, al igual que por extractoras de aceite de palma. De esta manera, la entidad existe para apoyar a los palmicultores en la defensa de sus propuestas y trabajo, así como del logro de la competitividad de una agroindustria oleaginosa, que transforma la calidad de vida de las comunidades que la acogen y promueve el progreso y el bienestar.

La región de Urabá en Antioquia ha logrado producciones récord de aceite alto oleico gracias a buenas prácticas agrícolas y a la tecnología aplicada. Los rendimientos en esta zona alcanzan hasta 40 t/ha/año, casi el triple de la media nacional.

- La media nacional de producción es de 14 t/ha/año.
- Urabá ha alcanzado rendimientos de 40 t/ha/año.
- Pequeños, medianos y grandes productores han contribuido a este éxito.
- La Federación Nacional de Cultivadores de Palma (Fedepalma) apoya a los palmicultores en su competitividad.

INNOVACIONES EN LA PALMA DE ACEITE

La implementación de un material genético híbrido (OxG) y la integración de mejores prácticas han permitido a los productores mejorar la eficiencia en el cultivo. Bioplanta S.A. es un ejemplo de empresa que lidera esta transformación.

- Se utiliza un material genético híbrido (OxG) de palma africana y americana.
- Bioplanta S.A. integra a productores de diversas escalas para lograr eficiencias.
- La palma de aceite tiene una vida productiva de más de 50 años.

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN

La agroindustria de la palma de aceite ha trabajado de manera sistemática en la estimación de los costos de producción desde el año 2003, cuando se consolidó el proceso de apertura de la economía colombiana, mediante acuerdos comerciales bilaterales y multilaterales. Se ha desarrollado el Índice de Precios para el sector de la palma de aceite (ICPA) para monitorear la evolución de costos.

- El ICPA permite seguir la evolución de costos de insumos y servicios.
- Se basa en encuestas realizadas a empresas del sector entre 2017 y 2021.
- Los coeficientes técnicos se mantendrán constantes hasta una nueva actualización.

Lo que empezó como un ejercicio para entender la posición competitiva de la agroindustria en medio de aquella coyuntura se consolidó como un proceso liderado por Fedepalma hasta el año 2013. Posteriormente, al ejercicio de estimación de costos, se convocó al equipo de Evaluación Económica de Cenipalma con el fin de fortalecer el ejercicio con criterios de manejo del cultivo.

Tabla 1. Coeficientes técnicos cultivo E. guineensis)

Proceso productivo	Mano de obra (%)	Insumos (%)	Bienes de capital (%)	Servicios y Mto. (%)	Combustible (%)	Tierra (%)	Total (%)
Fertilización	2,2	27,06	1,23	0	0,3		30,79
Control de malezas	2,3	0,78	0,03	0	0		3,11
Podas	1,5	0,01	0,16	0	0		1,67
Control Fitosanitario	2,8	0,93	0,2	0	0		3,93
Operación sistemas de riego	1,2	0	0	6,1	1,7		9
Mantenimiento de vías y drenajes	2	0	0,72	0	0,9		3,62
Cosecha	16	0	2,2	0	0,2		18,4
Transporte de RFF	0,5	0	0,65	3,3	2,8		7,25
Planeación y seguimiento de actividades	6,8	0	0	0	0		6,8
Asistencia técnica	1,9	0	0	0,2	0		2,1
Otras labores	0	1,65	0,45	0,1	0		2,22
Tierra	0	0	0	0	0	11,11	11,11
Total	37,2	30,43	5,64	9,7	5,92	11,11	100

Tabla 2. Coeficientes técnicos cultivares Híbridos OxG (Porcentaje)

Proceso productivo	Mano de obra (%)	Insumos (%)	Bienes de capital	Servicios y Mto (%)	Combustible (%)	Tierra (%)	Total, %
Fertilización	1,6	20,4	0,9	0	0,2		23,2
Control de malezas	2,9	1	0	0	0		3,9
Podas	1,3	0	0,1	0	0		1,5
Control Fitosanitario	1,8	0,6	0,1	0	0		2,5
Operación sistemas de riego	0,3	0,4	0	1,5	0		2,2
Mantenimiento de vías y drenajes	0,3	0	0,1	0,1	0,1		0,6
Cosecha	17,1	0	2,4	0	0,2		19,7
Transporte de RFF	0,4	0	0,6	2,8	2,5		6,3
Planeación y seguimiento de actividades	7,8	0	0	0	0		7,8
Asistencia técnica	1,9	0	0	0	0		1,9
Otras labores	0	0,3	0,7	0,2	0		1,2
Polinización	13,3	5,5	1	19,8	0,1		29,2
Tierra						9,5	9,5

Total (%)	48,8	27,8	6	4,5	3,4	9,5	100
-----------	------	------	---	-----	-----	-----	-----

La información se obtuvo de encuestas realizadas a empresas del sector durante las vigencias 2017 – 2021. El principal resultado de este trabajo es el de establecer los coeficientes técnicos para el eslabón primario de la agroindustria.

Los productores siembran un material genético híbrido (OxG), producto del cruzamiento entre palma africana y palma americana, más la integración de las mejores prácticas y manifestó que la empresa espera crecer exponencialmente.

Es evidente la relevancia del trabajo de estimación de costos para los tomadores de decisiones de la agroindustria de la palma de aceite. Sin embargo, con frecuencia los palmicultores manifestaban la necesidad de contar con un mecanismo más expedito para hacerle seguimiento a los costos de producción. En consecuencia, investigadores del Área de Evaluación Económica de Cenipalma, desarrollaron el índice de precios para el sector de la palma de aceite (ICPA). Al cual le hará seguimiento el equipo de economía de Fedepalma.

El objetivo del trabajo del ICPA fue establecer la canasta de insumos y servicios para monitorear la evolución de los costos de producción del sector palmero en Colombia. Este trabajo se fundamentó en la estructura de costos de producción y en las tecnologías predominantes en la palmicultura colombiana.

El ICPA permitirá determinar el impacto de los cambios en los precios de insumos y servicios necesarios para producir racimos de fruta fresca de palma de aceite (RFF), sobre su costo de producción. Ello, favorece la oportunidad en la toma de decisiones de los actores involucrados en la producción de RFF a nivel micro y macroeconómico. Asimismo, permitirá a los hacedores de política pública entender el efecto de sus decisiones sobre el sector de la palma.

El ICPA contribuye a la oportunidad en la disponibilidad de información para la toma de decisiones de las empresas de la agroindustria de la palma de aceite e incluso, permitirá tener mayor precisión en la generación de sus presupuestos de producción correspondientes a vigencias futuras. Igualmente, a los actores involucrados en la cadena de la palma de aceite, le permitirá entender la dinámica de los costos de la materia prima.

Así los hacedores de política pública contarán con una herramienta que permite entender el efecto de sus decisiones sobre la competitividad del sector de la palma de aceite.

MECANISMOS FINANCIEROS

El sector Agroindustrial de la Palma de Aceite en la región de Urabá promueve la utilización del mecanismo fiduciario para el fortalecimiento del sector agroindustrial, como también una inversión segura y rentable en la conformación de un Patrimonio Autónomo en una entidad financiera como FIDUAGRARIA.

La democratización de la inversión, con el mecanismo fiduciario, busca personas naturales y jurídicas con una inversión mínima de ciento cincuenta y cuatro millones de pesos (\$154.000.000); inversión individual que quedará soportada, en primer lugar, en una fiducia, conformando en un patrimonio autónomo y, en segundo lugar, en 2.2 hectáreas de tierra escrituradas a cada inversionistas en pro-indiviso.

El pro-indiviso se refiere a una situación en la que varios propietarios comparten la propiedad de un bien inmueble o mueble sin que se haya realizado una división física o material de la propiedad entre ellos.



Ventajas y Desafíos del Pro-Indiviso

Se han propuesto proyectos de establecimiento de 100 hectáreas de palma de aceite para utilizar este mecanismo fiduciario para democratizar la inversión. El pro-indiviso permite a varios propietarios compartir la propiedad sin división física.

- Se busca una inversión mínima de Ciento Cincuenta y Cuatro millones (\$154.000.000) por persona natural o jurídica.
- El pro-indiviso implica propiedad compartida sin división física.
- Propiedad compartida: Varias personas tienen derechos de propiedad sobre el bien.
- No hay división física: No se ha realizado una división material del bien entre los propietarios.
- Derechos proporcionales: Cada propietario tiene un derecho proporcional sobre el bien, que puede ser expresado en términos de porcentaje o fracción.
- Puede ser beneficioso para mantener la unidad de la propiedad.
- Puede ser útil en situaciones de copropiedad, como la herencia.
- Puede generar conflictos entre los propietarios si no se establecen acuerdos claros.
- Puede ser difícil tomar decisiones sobre la administración y el uso del bien.
- Para evitar conflictos debe emitirse un reglamento de propiedad proindiviso con reglas de juego claras en materia de derechos y obligaciones para todos.

- División del bien: Los propietarios pueden acordar dividir el bien de manera física o material. En cuanto a la venta del bien, los propietarios pueden decidir vender el bien y dividir el producto de la venta.
- Acuerdos de copropiedad: Los propietarios pueden establecer acuerdos para regular el uso y la administración del bien.

Rendimientos Financieros del Proyecto de cien (100) hectáreas

El proyecto de palma de aceite plantea crecimientos significativos en rendimientos financieros a lo largo de los años. Se proyecta que las utilidades netas de un proyecto de cien (100) hectáreas en los primeros diez años alcanzarán \$8.780.000.000; Costo total del proyecto: \$7.700.000.000.



Figura Racimos de fruto fresco - Palma de aceite en Urabá

REFERENCIAS

- [1]. COSTOS DE PRODUCCION. Mauricio Mosquera–Montoya, Investigador Titular, Coordinador de la Unidad de Validación de Resultados de Investigación de Cenipalma; Elizabeth Ruiz-Álvarez, Investigador Asociado de la Unidad de Validación de Resultados de Investigación; Daniel E. Munévar Martínez, Investigador Auxiliar de la Unidad de Validación de Resultados de Investigación- <https://www.cenipalma.org/> www.fedepalma.org
- [2]. PROYECTO PARA EL ESTABLECIMIENTO DE CIEN (100) HECTAREAS DE PALMA DE ACEITE EN LA REGION DE URABA.
- [3]. El Palmicultor. Información del sector palmero colombiano – Fedepalma. elpalmicultor.com Impreso en febrero 22, 2025
- [4]. Índice de costos para el cultivo de la palma de aceite (ICPA)

TERRITORIOS CONECTADOS: RETOS Y FUTURO DE LOS PUENTES EN COLOMBIA

Giovanny Sepúlveda Concha

*Ingeniero civil EAFIT. Especialista en Ingeniería Sismo Resistente EAFIT
Magister en Construcción - Construcción Sostenible - UNAL
Director General de Triangulo Ingeniería SAS
gerencia@trianguloingenieria.com*

Resumen. Este artículo aborda los retos en la aplicación de la sostenibilidad en la planeación, diseño y construcción de puentes vehiculares en Colombia, en respuesta a la creciente demanda de modernización y expansión de la red vial del país. Mediante un análisis detallado de la literatura existente, se examinan experiencias anteriores, conocimientos adquiridos y las tendencias actuales relacionadas con la implementación de la sostenibilidad en este campo. El objetivo es explorar la viabilidad de incorporar la sostenibilidad integral en la construcción de puentes vehiculares en Colombia. La investigación se estructura en seis fases metodológicas. En la primera, se definen las estrategias de búsqueda, incluyendo términos clave y la selección de bases de datos especializadas. La segunda fase optimiza los términos y fuentes de búsqueda para mejorar la precisión. En la tercera fase, se filtra la información por disciplinas y áreas de conocimiento. La cuarta fase consiste en un análisis bibliométrico, seleccionando 78 publicaciones entre 2003 y 2023. Las dos fases finales se enfocan en interpretar los datos y desarrollar conclusiones, proporcionando una evaluación crítica de las tendencias observadas. Este enfoque ofrece un fundamento técnico para incorporar la sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia, estableciendo un marco para futuras investigaciones. Aporta a la ingeniería al desarrollar un marco metodológico que propone considerar metodologías de análisis multicriterio y análisis de ciclo de vida, proporcionando una base teórica sólida y promoviendo prácticas sostenibles en la infraestructura vial del país.

Palabras clave: Sostenibilidad integral, diseño de puentes, construcción de puentes, puentes vehiculares, puentes en Colombia.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la creciente conciencia global sobre la importancia de la sostenibilidad en el desarrollo de infraestructuras viales, esta revisión bibliográfica se centra en la temática específica de "La sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia". Ante la constante demanda de modernización y expansión de la red vial en el país, es esencial examinar críticamente la literatura existente para comprender las experiencias pasadas, lecciones aprendidas y las tendencias actuales en la construcción y gestión sostenible de puentes.

El sector de la construcción, reconocido por su relevancia y su capacidad de generar empleo, tiene un impacto considerable en los ámbitos económico, ambiental y social, reflejado en las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto resalta la necesidad de integrar progresivamente productos y procesos que sigan principios de renovabilidad y se basen en la innovación. Para enfrentar estos retos, es crucial adoptar un enfoque holístico durante las fases de planificación, diseño y construcción de estas estructuras, con el fin de desarrollar puentes que no solo cumplan con su propósito fundamental, sino que también sean sostenibles en un sentido amplio.

En el campo de la ingeniería de puentes, se han logrado avances significativos en las últimas décadas a través de la integración de tecnologías innovadoras, el uso de materiales más duraderos y la aplicación de métodos de análisis avanzado. Esto ha permitido la construcción de puentes más seguros y eficientes, capaces de soportar cargas significativas y resistir condiciones climáticas adversas. Sin embargo, se evidencia la necesidad de involucrar la rigurosidad técnica en el enfoque de la sostenibilidad.

Considerando que el puente es un componente esencial de la infraestructura del país, su impacto es significativo en la conectividad, movilidad y desarrollo económico y social, lo cual ha planteado desafíos en términos de sostenibilidad integral y complejidad sistémica en Colombia.

La sostenibilidad integral, en este contexto, implica considerar, no solo, la eficiencia estructural, sino también una serie de factores interconectados que abarcan aspectos económicos, sociales, ambientales y culturales. Desde la conservación del entorno natural, inclusión social y seguridad, hasta la evaluación del ciclo de vida, estabilidad, durabilidad estructural, adaptabilidad y resiliencia, se busca equilibrar todos estos aspectos en la implementación de estos proyectos.

1. ALCANCE Y METODOLOGÍA

1.1 ALCANCE

Realizar una búsqueda sistemática, secuencial y organizada de la documentación técnica y científica más relevante en temas de sostenibilidad en proyectos de infraestructura, específicamente aplicada a los puentes vehiculares en el territorio colombiano; adicional a las estrategias y herramientas desde la sostenibilidad, en otros territorios que se puedan aplicar de acuerdo con lecciones aprendidas en el ámbito nacional [6].

La información más relevante permite identificar retos y oportunidades para contar con un panorama general claro de acuerdo con una clasificación bibliográfica y un análisis bibliométrico a partir de una jerarquización, clasificación de subtemas y variables que tengan relación directa con la sostenibilidad integral de puentes vehiculares en Colombia. Se establece entonces una metodología de análisis temporal, espacial, evaluando el porqué, para qué y con qué herramientas se ha logrado armonizar con éxito sistemas de planeación, ejecución y mantenimiento de puentes en el mundo y su aplicabilidad al entorno colombiano [10].

1.2 METODOLOGÍA

Se desarrolla desde la generalidad hasta llegar a la particularidad, partiendo del objeto y la pregunta de investigación, transversalizando el análisis a partir de los conceptos de los objetivos y preguntas de investigación (ver ilustración 14 - Flujograma conceptual del análisis bibliográfico y bibliométrico).

Paso 1: Se definen los términos principales, objetos y conceptos que hacen parte del proyecto de investigación y, a partir de ellos, se construyen ecuaciones de búsquedas iniciales para que, de acuerdo con la globalidad de los términos y los hallazgos, se puedan establecer interrelaciones entre ellos y comenzar con un análisis más particular. Es en este momento que se definen los eventuales motores de búsqueda y se documenta la cantidad de resultados obtenidos en esta etapa.

Paso 2.: Se establecen de acuerdo con la ecuación de búsqueda, diferencias y/o interconexiones tanto en inglés como en español, y de acuerdo con el análisis preliminar de buscadores, se establecen cuáles serán 1) los buscadores adecuados, 2) las ecuaciones de búsqueda principales y 3) cómo se filtran los resultados, de acuerdo con la disciplina, especialidad o área del conocimiento específica. Se documentan los resultados según estas ecuaciones de búsqueda.

Paso 3.1 – Filtro 1: Se realiza un primer análisis a partir de los títulos de las publicaciones del paso anterior, en donde se identifica una pertinencia inicial de la publicación con la investigación que se desarrolla, dando pie a una nueva etapa de aceptación-rechazo. Se documentan estos resultados y se cuantifican.

Paso 3.2 – Filtro 2: A partir de los resultados anteriores se realiza una lectura del resumen y las conclusiones de las publicaciones según el anterior paso, y se realiza una nueva etapa de aceptación-rechazo según análisis de pertinencia.

Paso 3.3 – Filtro 3: A partir de los resultados anteriores se realiza lectura de ciertos contenidos que se consideren importantes al interior de las publicaciones del anterior paso, y se realiza una nueva etapa de aceptación-rechazo según análisis de pertinencia.

Paso 4: Se genera el análisis bibliométrico. Se definen también jerarquías y se dan atributos adicionales por publicación según el análisis del autor, jerarquías que se adicionan al análisis y que dan otros atributos importantes para el análisis, por ejemplo: dónde se publica, año, país, continente y fuente (motor de búsqueda).

Paso 5: Se realizan gráficos de acuerdo con el análisis bibliométrico y sus categorías, jerarquías y demás, que el autor considere pertinentes e importantes a la hora de realizar su análisis.

Paso 6: Análisis de resultados: discusión y conclusiones. Se analizan los atributos, objetos y características de los artículos y se enuncian posturas personales según los resultados obtenidos. Se analizan y sintetizan los resultados de los estudios, destacando las similitudes, diferencias y lagunas en la investigación.

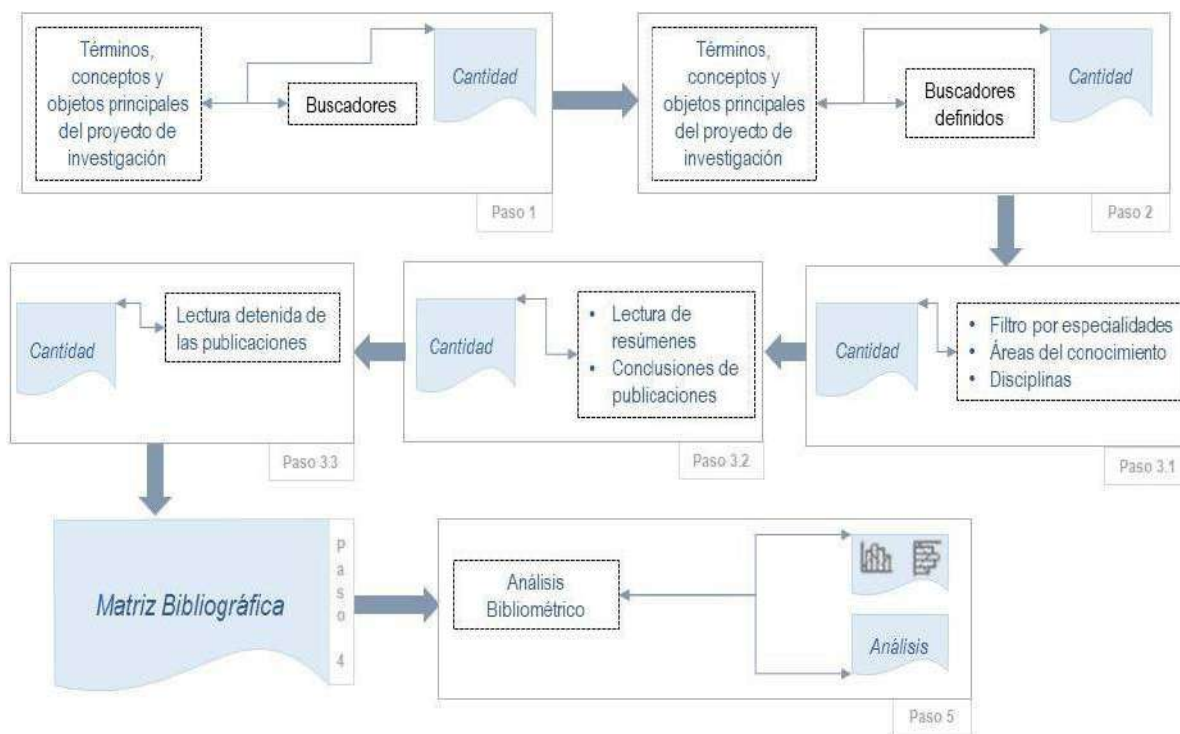


Ilustración 1. Flujograma conceptual del análisis bibliográfico y bibliométrico.
Fuente: Elaboración propia.

2. DESARROLLO Y RESULTADOS

Partiendo de que el objeto de investigación son los puentes vehiculares en Colombia y la pregunta de investigación parte de los retos y oportunidades de la sostenibilidad integral [21] [22], aplicada al objeto de investigación, se aplica la metodología como sigue:

2.1 ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA

Se establecen como conceptos generales los siguientes, como ecuación de búsqueda inicial la cual se realiza sin una clasificación específica (“All fields”): Sostenibilidad AND “puentes en Colombia”. Se encuentran un total de 16728 publicaciones.

Se identifican de manera inicial los siguientes buscadores con las publicaciones más relevantes: Scopus, Science Direct, SciELO, Google Scholar, Dialnet, Web of Science. A partir de allí se establecen las ecuaciones de búsqueda iniciales y se definen los buscadores a usar en el proyecto de investigación. Ecuaciones de búsqueda a partir de la búsqueda inicial: “Puentes en Colombia”, “Sostenibilidad de puentes vehiculares”, “Sostenibilidad integral en puentes”, “Análisis multicriterio” “Análisis de ciclo de vida”.

Y los buscadores que finalmente se utilizan son: Scopus, Science Direct, Google Scholar. Se encuentran un total de 1287 publicaciones.

2.2 FILTRADO DE LA INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se cuenta con una cantidad significativa de publicaciones, para lo cual se hace necesario proceder a un nuevo filtro por especialidades, áreas del conocimiento y disciplinas: construcción, puentes, Ingeniería Civil, patología, diseño estructural, vulnerabilidad estructural, desastres en construcción, carreteras e infraestructura.

Además, se definen finalmente las siguientes ecuaciones de búsqueda, recordando que se tienen en cuenta los anteriores filtros: Puentes AND Colombia, Construcción AND Sostenibilidad, Puentes AND Sostenibilidad, Sostenibilidad, comprehensive AND sustainability AND bridges, Construcción AND Puentes AND Sostenibilidad, Construcción AND Puentes AND Colombia, multicriteria AND bridges AND life cycle AND sustainability, Sostenibilidad AND Infraestructura AND Construcción. En esta fase se cuenta con 278 resultados.

Posteriormente se realiza lectura del resumen y las conclusiones de las publicaciones según el anterior paso y se realiza una nueva etapa de aceptación–rechazo a criterio del auto, según pertinencia de la publicación con la investigación. La pertinencia de los artículos se clasifica como: baja, media-baja, media, alta y muy alta. Nuevamente se cuantifican las publicaciones, llegando a 143.

Luego se realiza una lectura de algunas de las publicaciones para comprender la aplicabilidad de estas al proyecto de investigación, entrando en una etapa final de aceptación y rechazo, partiendo de los resultados de la etapa anterior y tomando solo publicaciones con pertinencia media, alta y muy alta, llegando finalmente a 78 publicaciones.



Ilustración 2. Flujograma aplicado del análisis bibliográfico y bibliométrico.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

A partir de la información del análisis bibliográfico, de manera gráfica, se analizan atributos, objetos y características de las publicaciones, y se enuncian posturas según los resultados obtenidos:



Ilustración 3. Espacialización de datos de publicaciones por continente.

Fuente: Elaboración propia.

Se usan también gráficos aluviales, los cuales son útiles para identificar cambios en una estructura de red e identificar patrones y tendencias:

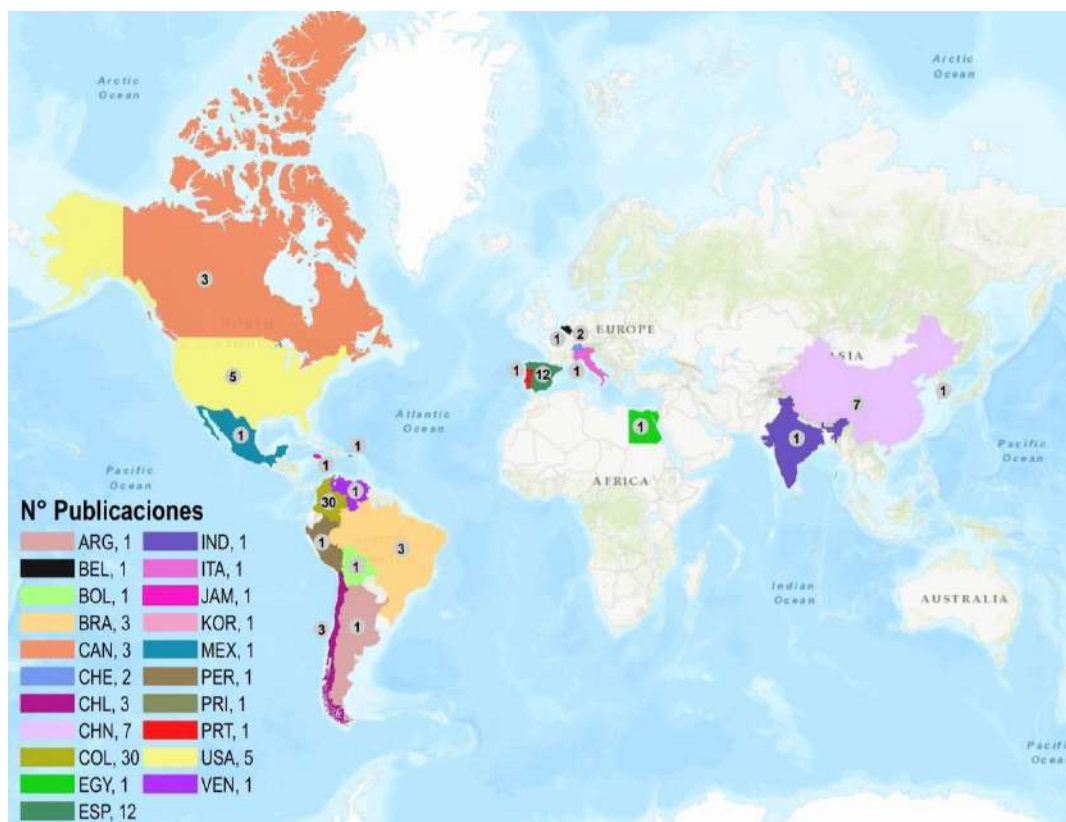
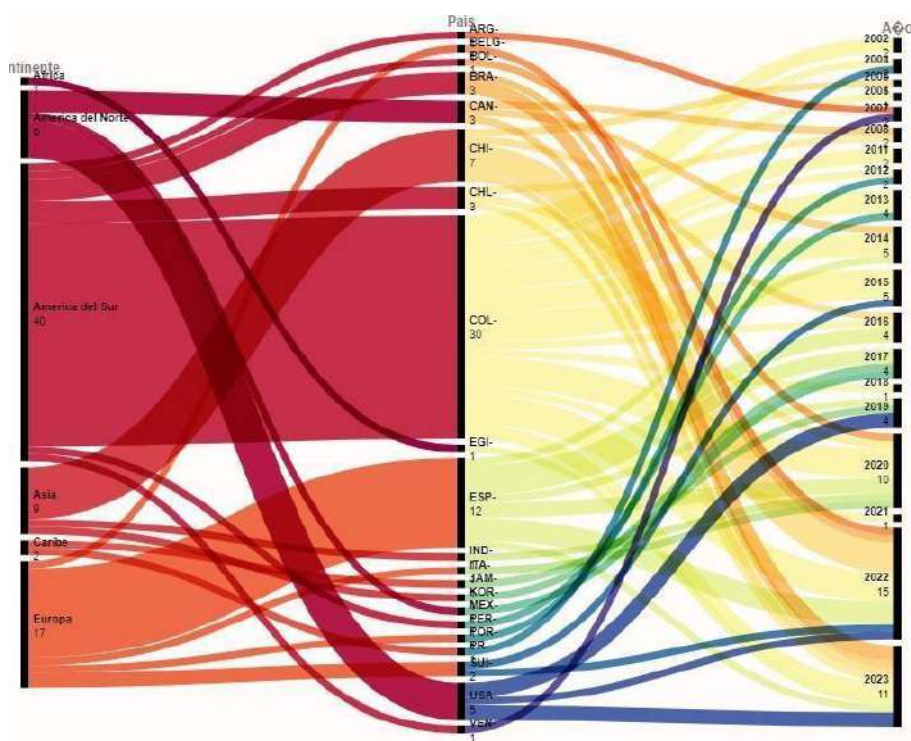


Ilustración 4. Espacialización de datos de publicaciones por país. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Análisis espacial (País – Continente) por cantidad de publicaciones y porcentajes. Fuente: Elaboración propia.

Continente	País	Publicaciones	%
América del Norte		9	11,7
	EUA	5	6,5
	Canadá	3	3,9
	México	1	1,3
América del Sur		40	51,9
	Colombia	30	39
	Chile	3	3,9
	Brasil	3	3,9
	Bolivia	1	1,3
	Venezuela	1	1,3
	Perú	1	1,3
	Argentina	1	1,3
Centro América y el Caribe		2	2,6
	Jamaica	1	1,3

Continente	País	Publicaciones	%
	Puerto Rico	1	1,3
África		1	1,3
	Egipto	1	1,3
Europa		17	22,1
	España	12	15,6
	Suiza	2	2,6
Europa	Bélgica	1	1,3
	Portugal	1	1,3
	Italia	1	1,3
Asia		9	11,7
	China	7	9,1
	Corea	1	1,3
	India	1	1,3
Oceanía	NA	0	0
Total		77	100



*Ilustración 5. Gráfico aluvial año-país-continente.
Fuente: Elaboración propia.*

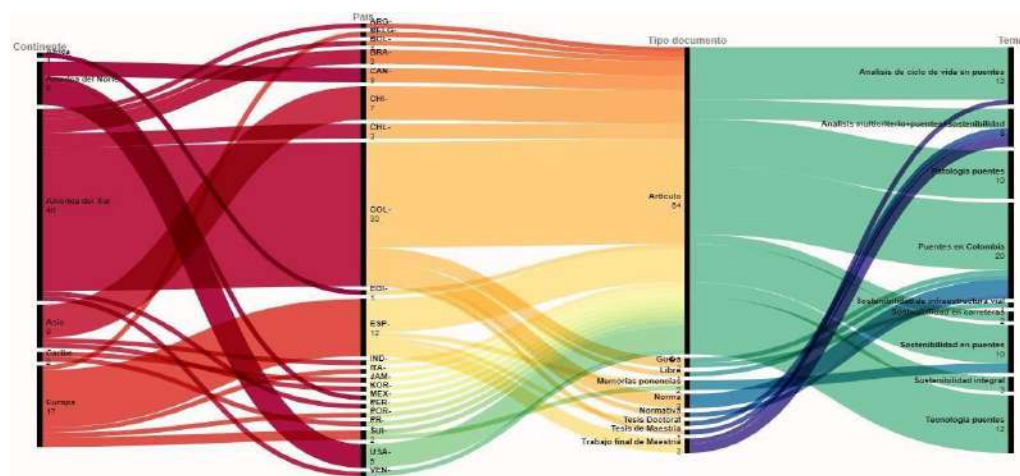


Ilustración 6. Gráfico aluvial país – continente – tipo de publicación – tema.
Fuente: Elaboración propia.

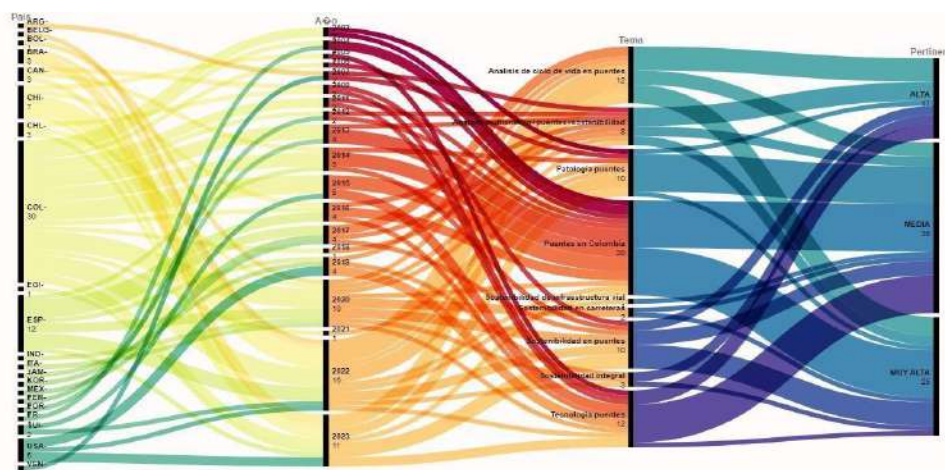


Ilustración 7. Gráfico aluvial - año – tema – país – pertinencia.
Fuente: Elaboración propia.

El 82.05% de las publicaciones son artículos y el 17.95% restante, trabajos de grados, normativas, libros y guías.

El estudio de conceptos de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida [18] en puentes se concentra en el siguiente orden: Europa – 23%, Asia – 11%, América del Norte - 12% y América del sur – 9%.

Es claro que todos los temas se interrelacionan y se hablan de manera constante dentro de las últimas dos décadas, aunque es importante anotar que el 80% de las publicaciones se concentran en la última década, tratando los siguientes temas en orden de importancia: análisis de ciclo de vida de puentes, sostenibilidad de puentes, patologías en puentes y análisis multicriterio para la sostenibilidad de puentes [23].

De puentes en Colombia se ha hablado bastante del año 2015 hacia atrás, en años posteriores se habla más de los conceptos de sostenibilidad y ACV.

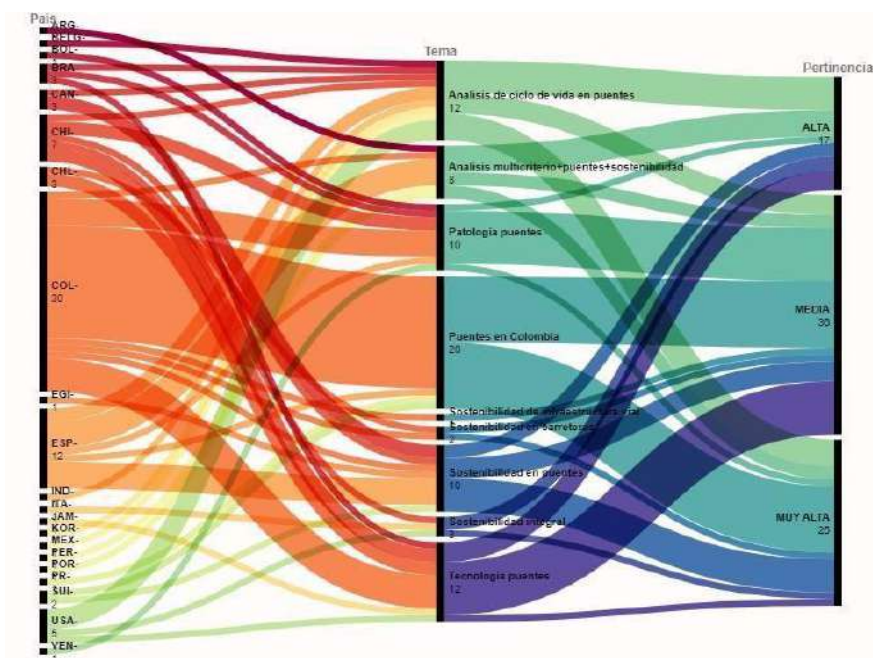


Ilustración 8. Gráfico aluvial - año – tema – país – pertinencia.

Fuente: Elaboración propia.

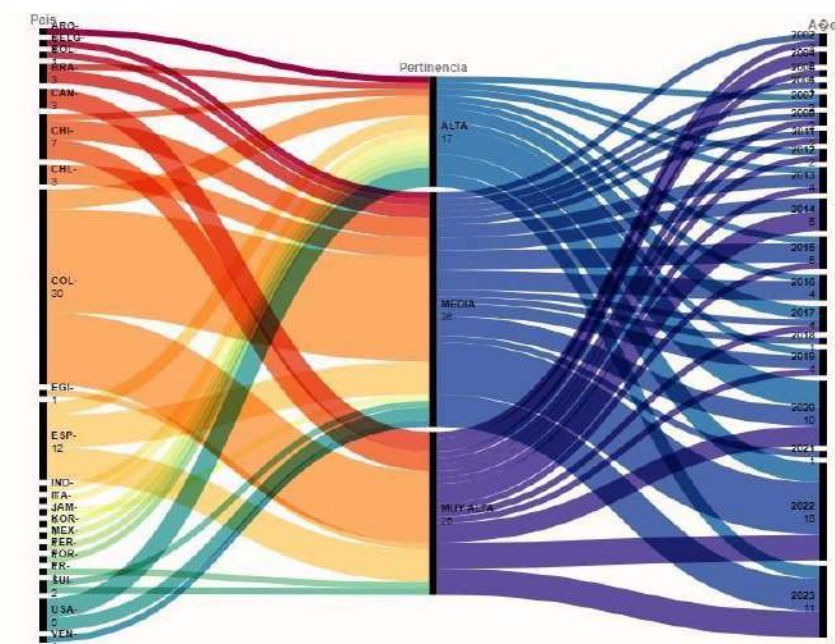


Ilustración 9. Gráfico aluvial - año – pertinencia – país.

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico es coherente con las publicaciones con conceptos de sostenibilidad que corresponden a una pertinencia muy alta con países de Europa, Asia y Norte América, principalmente.

Las publicaciones de (en su orden) Colombia, España, EUA y China tienen pertinencia alta en el estudio que se adelanta.

2.4 ANÁLISIS DE RELEVANCIA DE TÉRMINOS CON EL OBJETO DE INVESTIGACIÓN

Se toman todas las publicaciones y se ingresan a la herramienta Mendeley, validando que se carguen adecuadamente los datos para un correcto análisis. Realizado este trabajo, se genera el archivo *.ris, el cual se importa al software de análisis VOS viewer, que sirve como herramienta para analizar temas, conceptos e intercomunicación de estos con estudios y referencias de todos los documentos que se analizan. Los resultados de las gráficas del VOS viewer ® se muestran a continuación:



Ilustración 10. Red Bibliométrica de fortaleza de términos de las publicaciones con el objeto de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Se muestran una interrelación importante entre el objeto de estudio –el puente– y conceptos como sostenibilidad, ciclo de vida, diseño estructural e impacto ambiental y cultural [20]. Se observan conceptos que aportan, pero que no se encuentran totalmente interrelacionados, que son: diseño sostenible, sostenibilidad de puentes y vulnerabilidad sísmica.

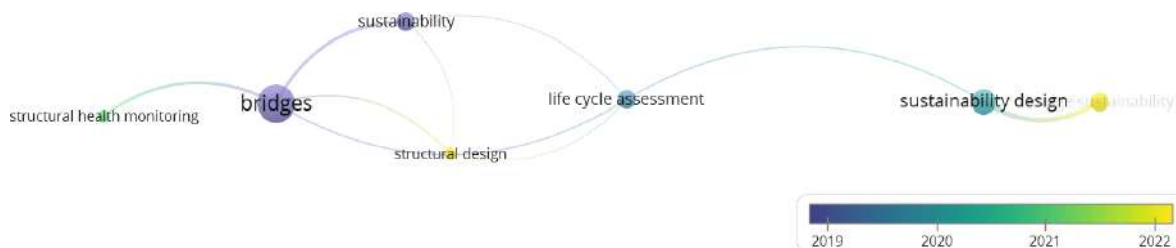


Ilustración 11. Red Bibliométrica de fortaleza de términos con la tendencia por años.

Fuente: Elaboración propia.

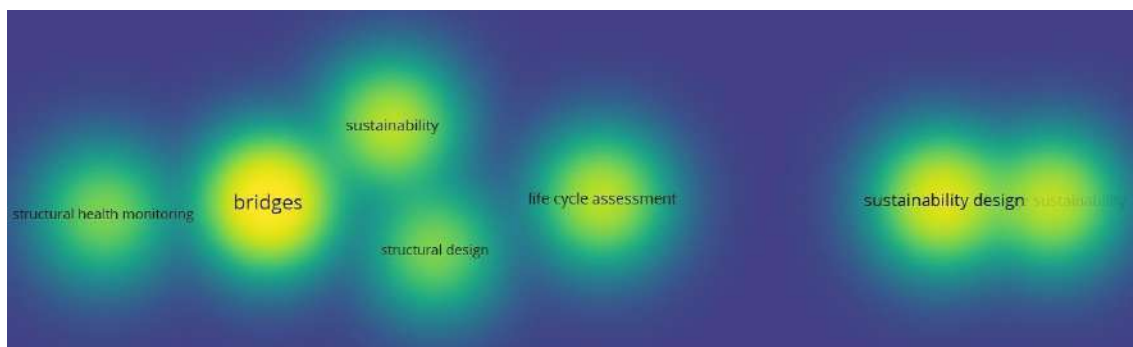


Ilustración 12. Radiografía de la red bibliométrica por densidades según fortaleza de términos.

Fuente: Elaboración propia.

La incorporación de los conceptos de diseño estructural, sostenibilidad de puentes, monitoreo estructural y diseño sostenible, aplicados específicamente a puentes, se viene dando sobre todo hace 5 años, aproximadamente.

3. DISCUSIÓN

Se consolidan los conceptos interrelacionados en nuevas graficas aluviales que se vinculan a partir de las gráficas anteriormente mostradas y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se discuten los resultados:

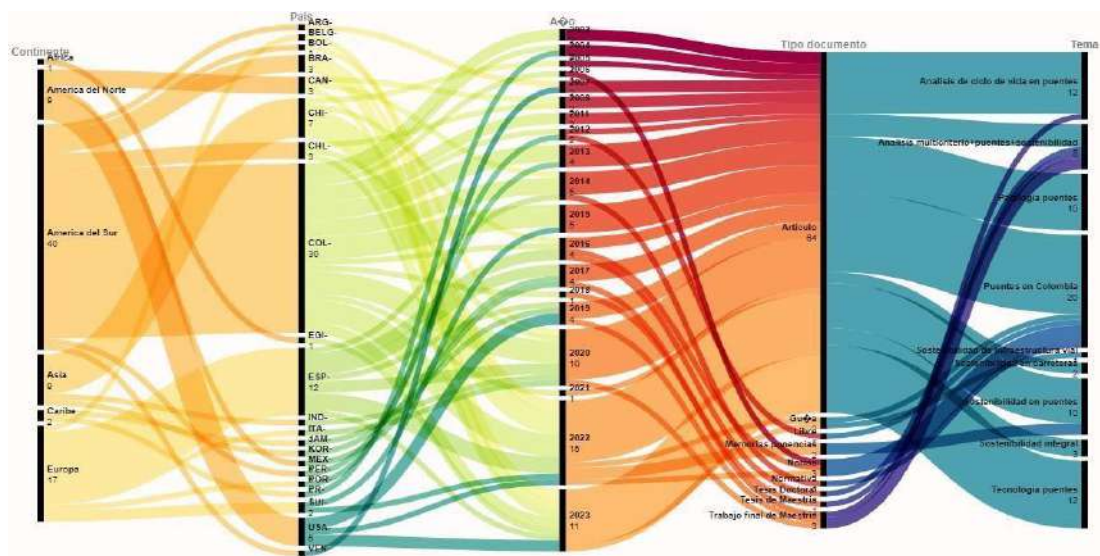


Ilustración 13. – Grafica aluvial – espacial, temporal, tipo publicación y tema.

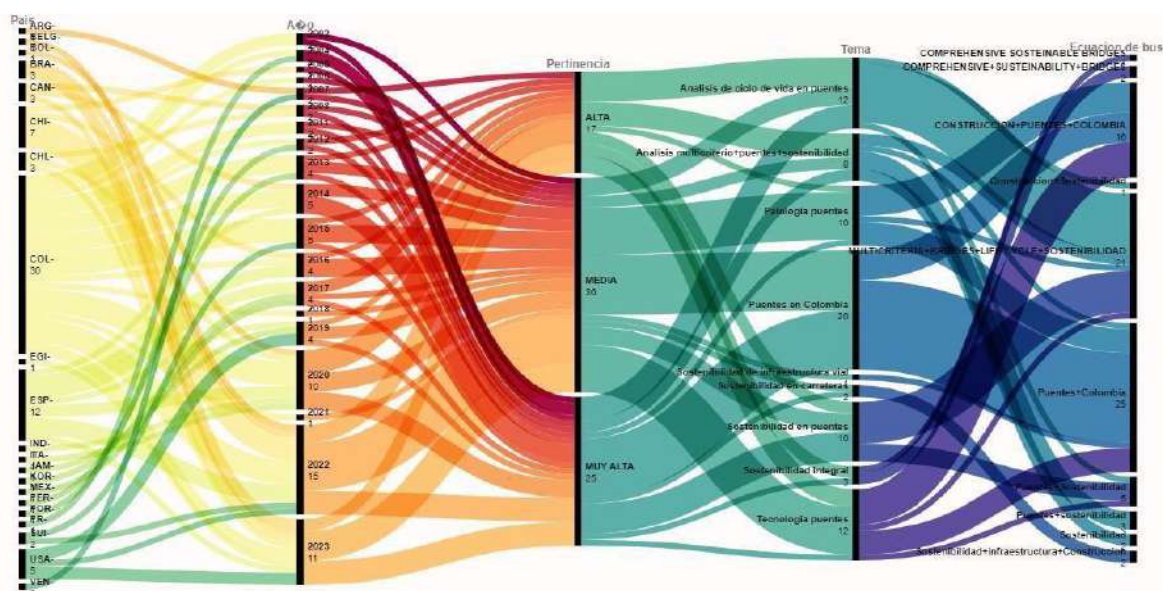
Fuente: Elaboración propia.

En Colombia, en las últimas dos décadas se ha estado hablando de sus puentes vehiculares, principalmente desde evaluaciones patológicas [7][12], la actualización normativa y nuevas tendencias en el análisis y diseño estructural, pero ha sido nulo el dialogo con conceptos de sostenibilidad y ciclo de vida.

España ofrece información técnica importante en cuanto a análisis de sostenibilidad en proyectos de infraestructura, puentes vehiculares y ferroviarios, y ACV y AMC para la definición de las mejores tipologías de puentes, analizados desde la sostenibilidad.

El diálogo en cuanto a sostenibilidad de obras de infraestructura se concentra en la última década y se vuelve transversal a sostenibilidad de puentes vehiculares en todo el mundo. Si se analiza desde Colombia, es muy poco lo que se habla de sostenibilidad de puentes vehiculares.

Existe una concentración importante de publicaciones entre los años 2000 y 2015 que hablan de puentes en Colombia, principalmente de evaluaciones patológicas [13], artículos de análisis de colapsos y estudios de fallas y lesiones en puentes de estructura metálica y concreto con refuerzo activo y pasivo [14], así como los retos que implica la implantación, construcción y operación de puentes en el territorio colombiano.



*Ilustración 14. Gráfica aluvial: espacial, temporal, tipo publicación y tema.
Fuente: Elaboración propia.*

Las publicaciones en cuanto a sostenibilidad, análisis de ciclo de vida y tecnología en puentes evidencian las oportunidades para que lo documentado en Colombia, no se repita [5].

4. CONCLUSIONES Y DESAFÍOS

El concepto de sostenibilidad integral aplicado a los puentes vehiculares y, en general, a proyectos de construcción, es un concepto poco explorado. Se dejan ver asomos de pensamientos holísticos basados en la sostenibilidad, pero no pensado desde las lecciones aprendidas, errores, fallas y en general, retos y oportunidades para generar un concepto global de la sostenibilidad.

En Colombia se ha estado documentado en las últimas dos décadas los puentes vehiculares, principalmente en cuanto a causas de fallas y colapsos, contando con importantes publicaciones, entre las que destacan los autores Edgar Muñoz (autor y coautor en ocho publicaciones, entre ellas el libro *“Ingeniería de puentes – Reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación”*, Edgar Balbuena (autor y coautor en tres publicaciones), David Gómez (autor y coautor en tres publicaciones) y el Instituto Nacional de Vías (con las normativas: *“Código Colombiano de Diseño de Puentes CCP14”*, *“Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura de transporte AIKA.”* y *“Manual para la inspección visual de puentes y pontones.”*). Toda esta información es valiosísima y debe ser armonizada con los criterios y conceptos actuales de sostenibilidad, análisis multicriterio, análisis de ciclo de vida y tecnología en puentes [17].

En el mundo se ha venido hablando de la sostenibilidad de puentes en las últimas dos décadas, más que todo en obras de infraestructura que involucran puentes vehiculares. Esto representa una gran oportunidad desde lo académico y profesional para aplicar el concepto de sostenibilidad integral en puentes vehiculares en Colombia.

Si bien en Colombia se habla muy poco de la sostenibilidad de puentes vehiculares, se tiene una importante base de datos en cuanto a análisis de fallas, lesiones y colapsos en los últimos 40 años, esta información es fundamental, pues permitirá incorporar conceptos de sostenibilidad a puentes, partiendo de las lecciones aprendidas en procura de la consolidación del concepto de sostenibilidad integral de puentes en Colombia.

Llama la atención, gratamente, que el Instituto Nacional de Vías se esté adentrando recientemente (2022), al incorporar conceptos de sostenibilidad, generando guías didácticas para la aplicación de estos criterios a proyectos de infraestructura.

Es necesaria la reflexión en cuanto a que la integración de los conceptos de ética, cultura, sociedad y ambiente, con componentes financieros, económicos y técnicos, contribuyen a la construcción del concepto de sostenibilidad integral.

REFERENCIAS

Libros:

- [1] A. Andrić, Un puente sobre el Drina, Barcelona, España: Destino, 1996.
- [2] E. E. Muñoz Díaz, Ingeniería de puentes, Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [3] J. Aznar Bellver and F. Guijarro Martínez, Nuevos métodos de valoración: Modelos multicriterio, 2nd ed., Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València, 2011.

[4] C. Romero, *Análisis de las decisiones multicriterio*, Madrid, España: ISDEFE, 1996.

Artículos en revistas especializadas:

- [5] D. L. Aldana-Rodríguez, D. L. Ávila-Granados, and J. A. Villalba-Vidales, "Use of unmanned aircraft systems for bridge inspection: A review," *DYNA*, vol. 88, no. 217, pp. 32–41, 2021.
- [6] J. Anderson Sánchez, D. Gómez, and P. Thomson, "Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali," *DYNA*, vol. 80, pp. 86–94, 2013.
- [7] J. Carrillo, L. A. Londoño, J. Alejandra, and M. Figueroa, "Statistical Assessment of Bridge Collapse in Colombia by Blast Loading," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, no. 2, 2014.
- [8] J. Quintero Gonzalez, "Road Inventories and the Road Net Categorization in the Traffic and Transport Engineering Studies," *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, vol. 20, no. 30, 2011.
- [9] L. F. Macea, L. G. Fuentes, and A. E. Álvarez, "Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 66, 2013.
- [10] J. M. G. Giraldo, J. Ospina Giraldo, and A. G. Gómez, "La infraestructura de puentes en las vías secundarias del departamento de Antioquia," *Revista EIA*, vol. 11, no. 22, 2014.
- [11] B. Muñoz and M. G. Romana, "Application of Multicriteria Decision Methods in Evaluating Alternative Solutions for Transportation Facilities," *Revista Pensamiento Matemático*, vol. 6, no. 2, 2016.
- [12] E. E. Muñoz Díaz, "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes en Colombia," *Revista Ingeniería y Universidad – Pontificia Universidad Javeriana*, vol. 6, no. 1, 2002.
- [13] E. Muñoz and D. Gómez, "Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia," *Revista ingeniería de construcción*, vol. 28, no. 1, pp. 37–62, 2013.
- [14] E. Muñoz and Y. E. Valbuena, "Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia," *Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 4, no. 2, 2004.
- [15] Y. M. Ospina, J. Andrés, P. López, and J. Galindo Díaz, "The Behaviour of a Historic Masonry Arch Bridge Regarding Dynamic Loads," *Ingeniería e Investigación*, vol. 29, no. 3, 2009.
- [16] M. A. Salgado-Gálvez, G. A. Bernal, and O. D. Cardona, "Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14," *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 32, no. 4, pp. 230–239, 2016.
- [17] J. Sebastián, G. Cardona, and A. G. Cabrera, "Using The Methodology BRIM (Bridge Information Modeling) as a Tool for Planning the Construction of a Concrete Bridge in Colombia," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 24, no. 2, 2014.
- [18] M. V. Hermenegildo Chávez and Y. Rueda Osuna, "Metodología de análisis multicriterio aplicación al crecimiento sostenible en la unión europea," *Gestión en el Tercer Milenio*, vol. 16, no. 31, 2013.
- [19] T. Waas, J. Hugé, T. Block, T. Wright, F. Benitez-Capistros, and A. Verbruggen, "Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development," *Sustainability*, vol. 6, no. 9, 2014.

- [20] F. Henriksson, K. Johansen, y S. Schütte, “Challenges when working with renewable materials: knocking on wood?,” *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 1980–1987, 2021.
- [21] J. Peng, Y. Yang, H. Bian, J. Zhang, y L. Wang, “Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 395–411, 2020. Disponible: <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1855215>.
- [22] M. J. Dorado-Rubín, M. J. Guerrero-Mayo, y C. J. Navarro-Yáñez, “Integrality in the Design of Urban Development Plans. Analysis of the Initiatives Promoted by the EU in Spain,” *Land*, vol. 10, no. 10, p. 1047, 2021. Disponible: <https://doi.org/10.3390/land10101047>.
- [23] L. Aguilar Martínez y Y. Escandón Bedoya, Identificación de indicadores de sostenibilidad aplicados al diseño y construcción de puentes. Universidad de Cartagena, 2022. Disponible: <https://hdl.handle.net/11227/15280>.

Artículos presentados en conferencias:

- [24] E. Maldonado, G. Chio, J. R. Casas, and J. Canas, “Evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de puentes en Bucaramanga (Colombia),” in *Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica*, Granada, España, May 2011.

Sitios web:

- [25] INVIAS, “Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de los proyectos de infraestructura de transporte AIKA.” Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/cnsc/sostenibilidad/13155-metodologia-para-la-evaluacion-de-la-sostenibilidad-de-los-proyectos-de-infraestructura-de-transporte-aika>. [Accessed: Aug. 9, 2024].
- [26] INVIAS, “Manual para la inspección visual de puentes y pontones.” Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/976-manual-para-la-inspeccion-visual-de-puentes-y-pontones>. [Accessed: Aug. 9, 2024].

Trabajos de grado:

- [27] P. Vicent and P. Plà, “Aplicación de la toma de decisión multi-criterio al diseño sostenible de puentes de hormigón,” M.S. thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017.
- [28] J. Zapata Álvarez, N. Doried, J. Toro, L. María, and Q. Gaviria, “Prototipo de matriz multicriterio para soluciones viales. Caso: Intercambio vial de Mayorca,” B.S. thesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Medellín, Colombia, 2022.
- [29] J. P. Ainchil, L. Gonzalo, and R. Schneider, “Estudio de diferentes tipologías de puentes desde el punto de vista de su sostenibilidad,” M.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelonatech, Barcelona, España, 2020.
- [30] J. Pablo, V. Sánchez, D. Restrepo Hincapié, J. Manuel, and G. Sierra, “Análisis de alternativas para la intersección de la carrera 43a con la calle 4 sur,” B.S. thesis, Universidad EIA, Envigado, Colombia, 2021.

ESTRUCTURACION Y EJECUCION DEL TREN DEL RIO - ENFOQUE ALTERNATIVO

Carlos Velásquez

*Ingeniero Electricista. Master of Engineering in Power System
car.vel@bluewin.ch*

Resumen. La Promotora Ferrocarril de Antioquia (PFA) ha venido adelantando desde hace varios años la concepción, especificación e implementación del proyecto denominado Tren del Río que, como su nombre sugiere, es un sistema férreo para el transporte de pasajeros y carga entre los 10 municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, basado en una vía férrea paralela al cauce del río Medellín, con una longitud de 63 kilómetros. El proyecto ha sido estructurado por la PFA como un sistema integral que incluye, además de la ferrovía, otros componentes (unidades funcionales) como el material rodante y las instalaciones físicas (estaciones, talleres, y otras).

Dicha concepción explica en gran parte, a juicio del autor, las dificultades que ha encontrado la PFA para la implementación del proyecto, dificultades incrementadas por un contexto político desfavorable y un marco normativo engorroso y complejo.

Por tales razones el autor propone desagregar el proyecto integral en unidades funcionales y sugiere a la PFA asumir directamente la construcción de la ferrovía, delegando en operadores de transporte y desarrolladores urbanísticos la implementación, por concesión, de las otras unidades funcionales.

En el documento se comparan el enfoque integral y el desagregado para sustentar las ventajas de este último.

Palabras Claves: Estructuración integral, Estructuración desagregada, Ferrovía, Material rodante, Instalaciones físicas, Transporte urbano y suburbano de pasajeros, Nichos de transporte de carga, Determinación y optimización de la capacidad de la ferrovía

1. INTRODUCCION

El Tren del Río es una cara aspiración de los habitantes del Valle de Aburrá pues representa una efectiva solución a los problemas ambientales y sobre todo de movilidad que aquejan la región. Líderes políticos, gremiales y sociales han manifestado reiteradamente su apoyo a la iniciativa lanzada ya hace más de 15 años por la Administración Departamental. La Asamblea Departamental acogió la iniciativa y aprobó la creación de una entidad con los instrumentos jurídicos y los recursos económicos necesarios para acometer la concepción, estructuración e implementación del proyecto.

No obstante, la entidad encargada (la Promotora del Ferrocarril de Antioquia – PFA) ha enfrentado numerosos obstáculos de diversa índole que han ocasionado lentitud, parálisis y retrocesos en la ejecución del proyecto

El autor de este documento plantea un enfoque alternativo a la estructuración del proyecto concebida por la PFA como un proyecto ferroviario integral, es decir, incluyendo la ferrovía, el material rodante y el equipamiento físico. Para sustentar su enfoque, dividió el presente documento en los siguientes capítulos

- Planteamiento del problema.
- Solución propuesta
- Recomendaciones para su implementación

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las principales barreras causantes del retraso en la ejecución del proyecto son, a juicio del autor:

El Contexto Político

El antecesor del actual presidente de Colombia se mostró bastante receptivo a los proyectos férreos en Antioquia y celebró en 2019 un acuerdo con las administraciones departamental y municipal (salientes) para financiar parcialmente el Tren del Río y el Metro de la 80 respectivamente. Las posibilidades presupuestales del Gobierno Nacional y los tiempos políticos obligaron a reestructurar el alcance de los proyectos (dividiéndolos en etapas) y a presentarlos rápidamente ante el Ministerio de Transporte y Planeación Nacional, buscando dejar los dos proyectos aprobados antes de entregar los respectivos cargos, en diciembre de 2019.

Tras el cambio en las administraciones departamental y municipal (enero de 2020) el contexto político entre las dos administraciones se degradó radicalmente, pasando de un clima de cooperación a otro de confrontación, lo cual obstaculizó y finalmente impidió legalizar el acuerdo de participación financiera. Fue un cuatrienio perdido.

Adicionalmente, el contexto político se vio influenciado por el cambio de gobierno a nivel nacional, en agosto de 2022. Este cambio no tuvo inicialmente un impacto negativo pues el nuevo gobierno, si bien menos proclive a priorizar proyectos en Antioquia, es un decidido impulsor de los sistemas férreos y no entró en confrontación con los gobernantes departamental y municipal que terminaron su mandato en diciembre de 2023.

Por otro lado, los recién posesionados (enero de 2024) gobernantes departamental y municipal, ya desde la campaña electoral se declararon abierta y decididamente en oposición al Gobierno Nacional.

En resumen, el enrarecido contexto político actual no permite esperar del Gobierno Nacional un tratamiento financiero benévolo hacia los proyectos de infraestructura en Antioquia. No

obstante, la conocida priorización de proyectos férreos si permite esperar una respuesta razonable a los proyectos del Tren del Río y el Metro de la 80.

Los cambios normativos y la tramitología

Los sucesivos cambios, cada vez más restrictivos, a la normatividad para obtener el aval de diferentes autoridades y posteriormente su financiación, así como la cada vez más engorrosa tramitología, han incidido negativamente en el desarrollo del proyecto del Tren del Río por varias razones:

a. Cuando la FPA presentó al Gobierno Nacional la documentación para obtener el aval y la financiación para la primera etapa del proyecto, recibió un requerimiento para evaluar la demanda inducida en el área de influencia del proyecto. La FPA elaboró dicho estudio con base en una modelación del AMVA, y lo presentó a la Subdirección de Planeación para el aval del estudio. El AMVA se tardó casi un año en avalarlo.

b. Casi simultáneamente, el AMVA terminó la actualización de su modelo de estimación de demanda en cuatro etapas y ordenó a la FPA adoptarlo y realizar un nuevo estudio, tomando como base el nuevo modelo, detallándolo específicamente para el Tren del Río. En consecuencia, la PFA no solamente perdió un año a la espera de la aprobación del AMVA, sino que tendrá que incurrir en nuevos costos y esperar aproximadamente 17 meses más, para modificar totalmente el proyecto y presentarlo al Gobierno Nacional.

c. Adicionalmente, el Gobierno Nacional decidió actualizar los requisitos para financiar los sistemas de transporte público de pasajeros en el país, no sólo aumentando las exigencias técnicas y normativas, sino obligando a los entes que ya tenían proyectos en curso a tener que volverlos a radicar ante la Nación.

En resumen, los “tiempos” del AMVA para tomar sus decisiones, en contraste con la premura para la radicación del proyecto ante el Gobierno Nacional y para responder sus observaciones, desencadenaron una secuencia de nuevas y más estrictas normas, que implican realizar nuevos estudios y volver a radicar el proyecto ante la Nación, con una pérdida irreparable de tiempo de cerca de 2 años.

La Concepción y Estructuración del Proyecto.

Como ya se mencionó, para agilizar los trámites ante el Gobierno Nacional y asegurar su financiación, el proyecto del Tren del Río se dividió en 2 etapas (Aguacatala – Barbosa y Primavera – Aguacatala) y se radicó la primera etapa. El autor de esta nota no conoce los documentos de soporte para la división del proyecto en dos etapas y la selección de los respectivos tramos, pero salta a la vista que para ello primaron coyunturas financieras e intereses políticos de corto plazo sobre criterios técnicos de largo plazo.

Para empezar, bajo el prurito de “más vale pájaro en mano” se redujo el alcance del proyecto, dejando para “mañana” un segundo proceso (con posibilidades de financiación inciertas) para completar el proyecto, corriendo así el riesgo de dejar el Tren del Río incompleto.

El tramo seleccionado: Aguacatala – Barbosa, arroja serios interrogantes sobre su factibilidad y/o conveniencia técnica. Su principal ventaja consiste en que descongestionaría el tramo Aguacatala-Niquía de la línea A del Metro en las horas pico. Por otra parte, al parecer no se tuvieron en cuenta la complejidad y las obras adicionales que demanda una estación terminal, con mayor razón en Aguacatala, un sitio sin espacio físico libre donde además estará la terminal del futuro Metro de la 80.

Si a esto se agrega que en el proyecto está prevista la prestación del servicio de carga, es evidente que las instalaciones para el trasbordo de carga en Aguacatala implicarían una complejidad mayúscula y un sobre costo prohibitivo.

Los aspectos económicos y financieros también generan inquietudes. Con base en la información divulgada públicamente del proyecto, se infiere que éste ha sido estructurado como un subsistema férreo integral, incluyendo los costos estimados totales, es decir, la ferrovía, el material rodante y el equipamiento físico (estaciones). Este supuesto daría sentido a la decisión de dividir el proyecto en 2 etapas, para reducir costos hasta un monto adecuado a las posibilidades financieras del Gobierno Nacional, acordadas antes de la radicación del proyecto. Sin embargo, como ya se evidenció, el criterio de “Tómelo o Déjelo” no dio los resultados esperados sino, por el contrario, fue uno de los principales causantes del retraso y la incertidumbre del proyecto.

Para el autor de esta nota no cabe duda de que la mejor alternativa técnica y económica consiste en la construcción en una sola etapa de la longitud total, Primavera – Barbosa de la ferrovía, concepto sustentado en el numeral siguiente

3. RECOMENDACIONES PARA SUPERAR LAS BARRERAS

A continuación, se describen brevemente algunas recomendaciones para superar las barreras mencionadas en el literal 2, o al menos para mitigar sus efectos.

El contexto Político

Dado que las relaciones de las administraciones departamental y distrital con el Gobierno Nacional son más de confrontación que de cooperación, no es razonable esperar de éste un decidido apoyo a los proyectos de infraestructura en Antioquia, como lo dan a entender hechos y declaraciones recientes.

Por otro lado, es bien conocida la ambiciosa política de fomento del Gobierno actual a los sistemas de transporte férreo por lo cual, la adecuación y radicación del proyecto del Tren del Río en línea con las políticas del gobierno, no debería generar mayor reticencia, sobre todo en los niveles técnicos de la administración central (Ministerio, DNP), siempre y cuando no se siga escalando la confrontación política.

En este orden de ideas, quien escribe se permite formular a la PFA las siguientes recomendaciones.

- a. Abogar, ante las administraciones departamental y distrital, por la adopción de una estrategia que evite exacerbar la confrontación con el Gobierno Nacional.
- b. Sustraer el proyecto del centro de la confrontación política y buscar un acercamiento con las autoridades de la administración central que finalmente deberán otorgar su aval al proyecto
- c. Reestructurar el proyecto, alineándolo con el Plan Maestro Ferroviario del Gobierno y adaptándolo para que encaje más estrechamente dentro de la Ley de Metros. Este tema se discute con más detalle más adelante.

La Normatividad y la Tramitología

A juicio del autor de esta nota, el AMVA desvió el rumbo de su misión. En vez de actuar como apoyo y facilitador para la ejecución de proyectos de transporte dentro de su jurisdicción, se convirtió en una fábrica de normas que, actuando como talanqueras, dificultan su ejecución. Para el caso específico del Tren del Río, la misión de AMVA debería ser apoyar a la PFA para asegurar el cumplimiento de la normatividad del Gobierno Nacional, en lugar de desarrollar sus propios modelos y normas y exigir a la PFA su cumplimiento como requisito para otorgar su aval a la radicación del proyecto, complicando y alargando la tramitología.

Se recomienda a la PFA llevar a cabo un trabajo de concientización ante los actores, tanto de la PFA como del AMVA, para que ésta actúe como promotora y facilitadora, más que como reguladora y fiscalizadora.

Para el caso específico del Tren del Río se debería solicitar que fuera la propia AMVA quien actualizara las proyecciones de crecimiento poblacional y demanda, utilizando como herramienta su propio modelo de 4 etapas y como insumos las bases de datos disponibles tanto en el propio AMVA como en el Metro, por supuesto dentro de un plazo razonable. Esto la permitiría a la PFA significativos ahorros en tiempo y dinero, ya que le evitaría el proceso de licitación y contratación de una firma especializada, que tendría que empezar por estudiar el modelo de AMVA y recolectar la información necesaria

La Concepción y Estructuración del Proyecto

Sobre este tema recaen las principales recomendaciones ya que, de una buena reestructuración y radicación del proyecto dependen en gran parte el aval y la cofinanciación por parte del Gobierno Nacional. Dichas recomendaciones son:

- a. Persistir en la estrategia de implementación del proyecto dentro del marco de la Ley de Metros para lograr la cofinanciación del Gobierno Nacional, a pesar del contexto político

poco favorable. Otras posibles fuentes de recursos, como las planteadas por algunos diputados de la Asamblea seguramente serán necesarias para el cierre financiero y, solamente en caso de una negativa definitiva del Gobierno Nacional, se podría considerar el refuerzo de dichas fuentes para financiar la totalidad del proyecto.

b. Estructurar el proyecto para desarrollarlo en una sola etapa, para evitar los problemas técnicos, logísticos y de ampliación futura mencionados en el literal A de este documento.

c. Al mismo tiempo desagregar el proyecto, dividiéndolo en 3 unidades constructivas separadas: Ferrovía, Material Rodante, y Equipamiento Urbanístico y presentar a consideración del Gobierno Nacional únicamente la construcción de la Ferrovía con las características necesarias para operar trenes de transporte urbano (Como una línea del Metro), trenes de cercanías, y trenes de carga. Este enfoque ofrece claras ventajas con respecto al proyecto integral, ya que simplifica y acelera significativamente la estructuración y radicación de la ferrovía y facilita el análisis del Gobierno, dado que los costos de construcción se pueden estimar con alto nivel de confiabilidad y bajo riesgo de imprevistos. En otras palabras, el Gobierno puede evaluar rápidamente el alcance del proyecto sometido a su consideración y determinar con alto nivel de exactitud el monto de la financiación requerida.

d. Obviamente, el Gobierno Nacional requiere, antes de tomar una decisión, además de los costos de construcción de la ferrovía, las proyecciones de los ingresos derivados de su explotación, para determinar la viabilidad económica y la rentabilidad del proyecto.

e. Para tal efecto, la PFA debe previamente invitar a varios potenciales usuarios de la ferrovía a presentar propuestas para el transporte de pasajeros o de carga, y preparar los términos de referencia para cada tipo de transporte. A modo de ejemplo, el Metro podría presentar una propuesta para utilizar un tramo de la vía con trenes urbanos (como una extensión o ampliación de la actual línea A) y otra para utilizar el tramo completo con trenes de cercanías. Además del Metro, otros potenciales transportadores de pasajeros podrían presentar sus respectivas propuestas

Así mismo, los transportadores de carga presentarían ofertas para diferentes tramos y diferentes tipos de carga. Los tipos de carga recomendados se discuten en un documento separado.

Obviamente, los usuarios concesionados tendrían que aportar y operar el material rodante requerido para su actividad.

f. Como resultado de este ejercicio, la PFA podrá hacer estimativos confiables de ingresos por el uso de la vía, y por lo tanto elaborar estudios de factibilidad económica y rentabilidad, y presentarlos como soporte para la solicitud de financiación.

g. Para el amoblamiento urbanístico (principalmente las estaciones) la FPA podrá igualmente celebrar convenios con empresas inmobiliarias para entregarles en concesión la construcción de las edificaciones y el usufructo de las áreas comerciales.

En resumen, con la estructuración recomendada del proyecto la PFA estaría en capacidad de radicar rápidamente ante el Gobierno Nacional (a finales de este año 2025) un proyecto con un alcance claramente delimitado, con información confiable sobre costos e ingresos y bajo nivel de riesgo, y por lo tanto con altas posibilidades de obtener el aval y el cofinanciamiento del proyecto

REFERENCIAS

- [1]. Ley de Metros (Ley 310 de 1996)
- [2]. DNP: Plan Maestro Ferroviario de 23.11.2020
- [3]. Resolución AMVA 3084 de 2023
- [4]. [http: // Juan Paz](http://JuanPaz.com). Por qué se retrasa el Tren del Río



Sociedad Antioqueña de
Ingenieros y Arquitectos

L a F u e r z a d e l a R a z ó n - 1 9 1 3



@SAIAntioquia