

Prototipado, simulación y gobernanza en la era 4.0

Compilador: Julián Alberto Patiño

Colección ♦ Investigación

Prototipado, simulación y gobernanza en la era 4.0

Compilador: Julián Alberto Patiño



658.514 Prototipado, simulación y gobernanza en la era 4.0 / Julián Albeto Patiño
P967 Murillo compilador ; Francisco Javier Ramírez Gil [y otros siete autores]
Medellín : IUPB. Fondo Editorial Pascual Bravo, 2025
118 p. : il. – (Colección Investigación)
ISBN 978-628-97323-1-3

1. Industria 4.0 2. Robótica móvil 3. Internet de las cosas 4. Modelo de
prototipos

I. Idárraga Gutiérrez, Juan José II. Montealegre Rubio, Wilfredo III. Valencia
Hernández, Carlos IV. Lemmel Vélez, Karen V. Herrera Pineda, Juan Camilo
VI. Patiño Murillo, Julián Alberto VII. Pimienta Ruiz, Cristian Dario
Catalogación en la Publicación Biblioteca en Ciencia y Tecnología

Prototipado, simulación y gobernanza en la era 4.0

Colección Investigación
Institución Universitaria Pascual Bravo

Primera edición: noviembre de 2025
ISBNe: 978-628-97323-1-3

Autores

Francisco Javier Ramírez-Gil
Juan José Idárraga Gutiérrez
Wilfredo Montealegre-Rubio
Carlos Valencia-Hernández
Karen Lemmel-Vélez
Juan Camilo Herrera-Pineda
Julián Alberto Patiño Murillo
Cristian Dario Pimienta Ruiz

Coordinación editorial: Johana Martínez Ramírez
Corrección de textos: Tatiana Carolina Balvín
Diseño de colección: Evelyn Giraldo Urrea
Diagramación: Leonardo Sánchez Perea

Editado en Medellín, Colombia
Fondo Editorial Pascual Bravo
Institución Universitaria Pascual Bravo
Calle 73 No. 73A – 226 – Tel. (604) 4480520
fondoeditorial@pascualbravo.edu.co
www.pascualbravo.edu.co
Medellín – Colombia

Las ideas expresadas en la obra aquí contenida son manifestaciones del pensamiento individual de sus autores; en esa medida, no representan el pensamiento de la Institución Universitaria Pascual Bravo, siendo ellos los únicos responsables por los eventuales daños o perjuicios que pudieran causar con lo expresado o por la vulneración de los derechos de autor de terceros en los que hubiesen podido incurrir en su creación.

Está prohibido todo uso de la obra que atente contra los derechos de autor y el acceso abierto. Esta obra está protegida a través de la licencia Creative Commons: Reconocimiento-No comercial 4.0 Internacional.





Contenido

Contenido	4
Simulación computacional de los efectos en la acústica producidos al usar tapabocas	5
Francisco Javier Ramírez-Gil, Juan José Idárraga Gutiérrez, Wilfredo Montealegre-Rubio	
Robot autónomo para detección y extinción temprana de incendios	31
Valencia-Hernández, C.A., Lemmel-Vélez, K., and Herrera-Pineda J.C.	
Los modelos de gobernanza como alternativa de fortalecimiento de la industria 4.0 en el desarrollo de <i>software</i>	64
Julián Alberto Patiño Murillo, Cristian Dario Pimienta Ruiz	

Simulación computacional de los efectos en la acústica producidos al usar tapabocas

Francisco Javier Ramírez-Gil¹,
Juan José Idárraga Gutiérrez²,
Wilfredo Montealegre-Rubio³

1. Introducción

Con la llegada de la letal pandemia COVID-19 a finales del año 2019, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el uso del tapabocas como una medida efectiva para la disminución del riesgo de transmisión de la enfermedad [1]. La función principal del tapabocas es cubrir la boca y la nariz para filtrar la entrada o la salida de gotículas y partículas que transitan en medios fluidos como líquidos y aerosoles [2]. La eficacia de la filtración bacteriana y de partículas depende del tamaño de poro de los filtros; los poros microscópicos son los más efectivos para atraparlas, pero esto incrementa la caída de presión o reduce la transpirabilidad de las mascarillas, lo que, a su vez, afecta la salida del sonido desde la boca. Por ello, que debe existir un compromiso entre ambos conceptos [3]. Estudios recientes han cuantificado esta relación, lo cual demuestra que mascarillas con mayor porosidad y transpirabilidad presentan menor atenuación de sonido, especialmente en frecuencias altas [4]. Existen diversas normas internacionales como la ASTM F2100-21 [5] y la UNE 149:2001+A1:2010 [6] que proveen estándares para la verificación de la eficacia del filtrado y de la transpirabilidad de las mascarillas.

La entrada del virus SARS-CoV-2 y el uso generalizado de mascarillas, las personas identificaron diversos problemas de confort, tales como

1 Docente ocasional, Institución Universitaria Pascual Bravo, francisco.ramirez@pascualbravo.edu.co

2 Estudiante de Ingeniería Mecánica, Institución Universitaria Pascual Bravo, juan.idarraga614@pascualbravo.edu.co

3 Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, wmontealegre@unal.edu.co

sensación térmica elevada [7], ahogamiento [8] y problemas para hablar y hacerse entender. Este último aspecto está relacionado con el comportamiento acústico del tapabocas. Actualmente, el confort acústico de interés particular en los ámbitos automotriz y arquitectónico. No obstante, el efecto acústico del uso del cubrebocas había sido poco estudiado antes de la pandemia; sin embargo, en los últimos años ha surgido un creciente interés por el tema, como lo demuestra con el número de publicaciones desde entonces. En una revisión reciente se identificaron más de cincuenta estudios centrados en los efectos acústicos y perceptivos de distintos tipos de tapabocas, lo que consolida evidencia sobre la atenuación de frecuencias medias y altas, así como la reducción en la inteligibilidad del habla [9]. Desde el punto de vista acústico, dichas investigaciones abordan los principales problemas del uso de mascarillas, tales como:

- Dificultad para comunicarse, dado que las señales visuales de la lectura de labios y las expresiones faciales en muchas ocasiones no están disponibles con tapabocas no transparentes [10]–[12].
- Atenuación de la transmisión de las frecuencias vocales medias y altas (por encima de 1 kHz [12], [13]) en un rango de 3 a 12 dB [14] o hasta 25 dB cuando un protector facial se combina con una o más mascarillas [10], lo que se traduce en una disminución del volumen del habla y dificultad para escuchar.
- Pérdida de la inteligibilidad del habla de hasta un 69 % dependiendo del ambiente y el consiguiente aumento del esfuerzo de escucha siendo más crítico para trabajadores de la salud, niños en edad escolar y personas afectadas por trastornos de la voz y la audición [15]. Estudios recientes muestran que el uso de mascarillas reduce significativamente el reconocimiento de habla en los niños, especialmente en ambientes con mayor reverberación [16]. Además, se han evidenciado diferencias en la inteligibilidad del habla infantil dependiendo del tipo de mascarilla y del género del hablante, subrayando la complejidad del fenómeno en entornos educativos [17]. La situación se agrava en entornos ruidosos y con el aumento de la separación física entre los hablantes [10], [18].
- Las personas suelen hablar más alto cuando llevan puestas mascarillas, lo que provoca mayor esfuerzo en las cuerdas bucales, hiperarticulación, y emisión de mayor cantidad de aerosoles [19].
- Alteración de la directividad del habla, con mayor atenuación delante del hablante [12].

A pesar del reciente interés por la caracterización acústica del uso de tapabocas, la revisión bibliográfica revela que la totalidad de la investigación se ha basado en métodos experimentales que, si bien son muy confiables, requieren mayores recursos (tiempo, dinero, equipos, materiales, etc.). Por lo tanto, el propósito de esta investigación es ampliar algunos de los trabajos previos realizados experimentalmente, mediante simulación computacional con el Método de los Elementos Finitos (MEF). Asimismo, el estudio se centra en el desempeño acústico de un tapabocas transparente especialmente diseñado para niños en etapa escolar (5-11 años), dado que la comprensión en entornos escolares es fundamental para el aprendizaje y el éxito académico de los estudiantes. Esto a pesar de que las máscaras transparentes presentan un rendimiento deficiente en la transmisión de sonido [20]. No obstante, investigaciones recientes han propuesto mejoras en el diseño de mascarillas transparentes, lo que reduce las pérdidas acústicas mediante materiales plásticos más delgados y optimizados acústicamente [21]. Además, se ha demostrado que las máscaras transparentes proporcionan señales auditivas y visuales que pueden ayudar a los oyentes en ambientes ruidosos y, por lo tanto, pueden reducir los desafíos de comunicación estresantes que se experimentan, por ejemplo, en salones de clase [11], [18], [22] - [25].

2. Materiales y métodos

En esta sección se presentan las ecuaciones fundamentales del problema acústico modelado mediante el MEF. Posteriormente, se describe el problema simulado con todos los detalles para su posible aplicación futura.

2.1 Fundamentos de la simulación acústica computacional

El desempeño acústico se puede evaluar mediante diversas métricas, tales como: atenuación acústica en función del nivel de presión sonora (SPL, por sus siglas en inglés) y de la frecuencia [10], [26]; la directividad acústica en función del nivel de SPL, de la frecuencia y del ángulo de dirección [10], [26]; el índice de Inteligibilidad del Habla (SII) [15], entre otras. En este trabajo se emplea como medida de desempeño acústico el SPL en función de la frecuencia, el ángulo y la distancia. Para ello, se utilizó ANSYS APDL con el módulo *Harmonic Acoustics*. Aunque en esta simulación se aplicó el SPL clásico sin ponderación, para una evaluación más cercana a la percepción humana del sonido, se podría considerar, en trabajos futuros,

la ponderación en frecuencia tipo A (dBA), ampliamente usada en estudios de confort acústico [27].

Los análisis de acústica armónica se utilizan para determinar la respuesta en estado estacionario de una estructura y el medio fluido circundante a cargas y excitaciones que varían de forma sinusoidal (armónica) con el tiempo [28]. El *software* permite modelar problemas acústicos puros y problemas de interacción fluido-estructura (FSI). Dado que no se pretende estudiar las vibraciones del cubrebocas, ni del maniquí que representa al niño, ni de las paredes, piso o techo que componen el recinto, en esta ocasión se considera un problema acústico puro. En este, las cantidades típicas de interés en el fluido y la ubicación de campo lejano a diferentes frecuencias son la distribución de presión, el gradiente de presión, la potencia sonora y la velocidad de las partículas de las ondas acústicas. Para fenómenos acústicos puros, la ecuación matricial dinámica de elementos finitos que resuelve el programa es [29]:

$$[M_F]\{\ddot{p}_e\} + [C_F]\{\dot{p}_e\} + [K_F]\{p_e\} = \{f_F\} \quad (1)$$

donde $[M_F]$, $[C_F]$ y $[K_F]$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, y $\{f_F\}$ es el vector de excitación externa en el fluido acústico (subíndice F). Mientras que $\{p_e\}$, $\{\dot{p}_e\}$ y $\{\ddot{p}_e\}$ son el vector de presión nodal, sus primera y segunda derivadas respecto al tiempo, respectivamente. Sin embargo, en un análisis armónico, se resuelve la siguiente ecuación:

$$(-\omega^2 [M_F] + j\omega [C_F] + [K_F])\{p_e\} = \{f_F\} \quad (2)$$

puesto que se supone una respuesta variable armónicamente, como:

$$p(\vec{x}, t) = \text{Re}(p(\vec{x})e^{j\omega t}) \quad (3)$$

con $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ como la frecuencia circular natural (radianes/segundo), f la frecuencia de oscilación de la presión (Hz), \vec{x} la posición espacial y t , el tiempo. Por otro lado, el SPL es definido como [30]:

$$SPL = 10 \left(\frac{P_{RMS}}{P_{REF}} \right)^2 \quad (4)$$

o equivalentemente como:

$$SPL = 20(P_{RMS}) + 94 \text{ dB} \quad (5)$$

donde P_{REF} es la presión de referencia definida como $P_{REF} = 2 \times 10^{-5}$ Pa (20 μ Pa) y P_{RMS} es la amplitud de presión RMS (*root mean square*), que para una onda armónica de presión $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$ es:

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^\tau P_0^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{P_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707 P_0 \quad (6)$$

Con P_0 como la amplitud de la onda acústica de presión y τ como el período asociado a la onda dado por:

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega} \quad (7)$$

donde la frecuencia angular es definida como:

$$\omega = 2\pi f \quad (8)$$

y la frecuencia definida como:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (9)$$

con c como la velocidad del sonido en el medio y λ como la longitud de onda. Nótese que la Ec. (6) es válida para una sola onda, pero si se tiene un sonido compuesto por varias ondas armónicas cada una de ellas definida como:

$$P_i(t) = P_{0_i} \sin(\omega_i t) \quad (10)$$

entonces se puede demostrar que la presión RMS de la onda resultante viene dada por:

$$P_{RMS} = \sqrt{(P_{RMS1})^2 + (P_{RMS2})^2 + \dots + (P_{RMSN})^2} \quad (11)$$

donde P_{RMSN} es la presión RMS de $P_N(t)$ aislada. Además, si se tienen varias fuentes de sonido no correlacionadas, se puede demostrar que el nivel de presión sonora resultante es:

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{(P_{RMS1})^2 + (P_{RMS2})^2 + \dots + (P_{RMSN})^2}{P_{REF}^2} \right) \quad (12)$$

2.2 Configuración de la simulación computacional

Las investigaciones experimentales resaltadas indican que las pruebas de laboratorio se realizan habitualmente en cámaras anecoicas, con *dummies* (maniquíes) de cabeza a tamaño real, donde se les inserta un

pequeño altavoz en la posición de la boca y, posteriormente, se cubren con el tapabocas ajustado a la cara, según el uso recomendado [13]. El altavoz produce sonidos en un rango de frecuencias seleccionado, los cuales son capturados con micrófonos situados alrededor del *dummy* a una distancia determinada [12]. Consecuentemente, en este trabajo se intenta replicar una prueba experimental en una cámara anecoica o de campo libre, sin ruido de fondo, usando un solo *dummy* mediante el MEF. Se consideran dos casos: con y sin cubrebocas en un modelo bidimensional (2D). En esta simulación se adopta un modelo 2D como aproximación inicial al problema tridimensional, lo cual permite reducir significativamente la carga computacional. Si bien esta decisión introduce ciertas limitaciones en la representación espacial, resulta aceptable dado que los principales efectos de atenuación acústica en el plano frontal del hablante pueden capturarse de manera adecuada en 2D, como lo han demostrado estudios previos en simulación acústica [31]. Además, la variación en algunos parámetros de la simulación será considerada para el estudio. A continuación, se presentan los pasos para la configuración del modelo virtual.

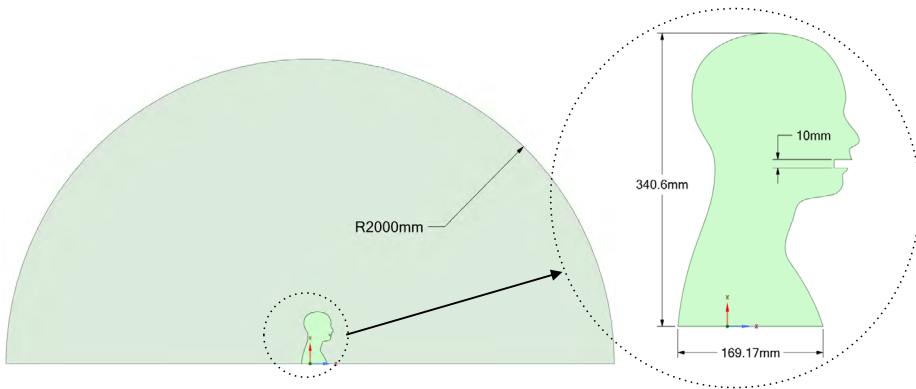


Figura 1. Dimensiones generales del recinto y del dummy.

2.2.1 Geometría

Como se muestra en la Figura 1, el recinto por simular es un semicírculo 2 m de radio, correspondiente a un dominio 2D que servirá como primera aproximación computacional a la simulación acústica. El radio de 2 m se seleccionó por ser una de las distancias seguras para prevenir la transmisión del virus [32], [33]. El *dummy* empleado tiene dimensiones promedio de un niño de escuela básica primaria como se ilustra en la misma Figura 1,

donde se incluye la cabeza y parte del dorso. Una abertura de 10 mm en la «boca» se utiliza para simular el habla o la excitación acústica. El *dummy* se ubica en el centro tal cual se hace en la experimentación. Por otra parte, el cubrebocas, en la vista 2D, es simplemente una curva de 0.91 mm de espesor y está separado del rostro como se indica en la Figura 2.

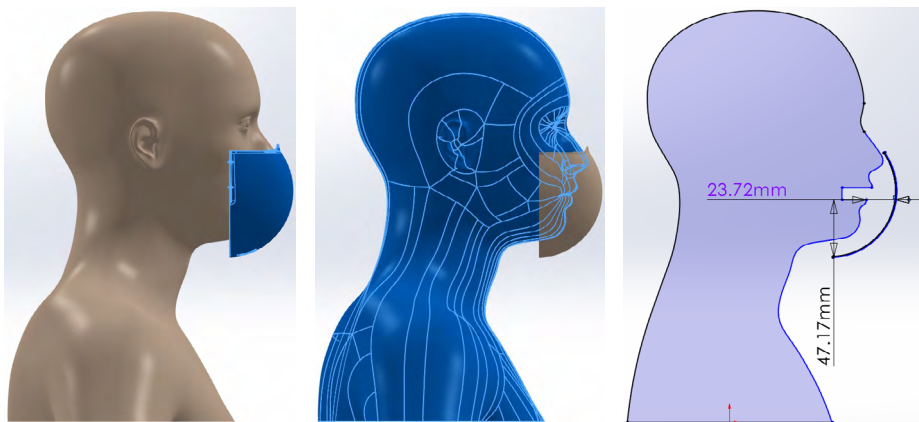


Figura 2. Configuración de la geometría usando mascarilla: a) Dummy con tapabocas; b) Tapabocas con transparencia para identificar su posicionamiento en la cara; c) Aproximación 2D del conjunto dummy-cubrebocas y dimensiones generales de separación.

2.2.2 Propiedades del material

En este trabajo se modelará únicamente el fluido (acústica pura sin interacción con la estructura), lo cual implica un medio homogéneo (aire) y constituye una simplificación importante, considerando que la propagación real del sonido atraviesa al menos tres medios consecutivos: (1) el aire entre boca y tapabocas, (2) el material del tapabocas, y (3) el aire ambiente. Para representar esta transición sin modelar de manera directa cada interfase, se usa un coeficiente de absorción acústica promedio ajustado al material. Una modelación más precisa podría considerar propiedades específicas del medio fluido dependiendo de su ubicación, así como propiedades específicas para el tapabocas, como el material, el diseño y su efecto en la impedancia acústica mediante simulaciones multiparamétricas con interacción fluido-estructura. No obstante, esta es una investigación pionera y se mantienen las simplificaciones indicadas con aclaraciones a trabajos futuros. Por lo tanto, la ecuación gobernante es la ecuación de onda dada en términos de la presión [30]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (13)$$

donde la velocidad del sonido en el medio, c , se define como:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (14)$$

con K como el módulo volumétrico y ρ la densidad de masa del fluido. De acuerdo con estas ecuaciones, en un problema acústico lineal puro, solo se deben especificar c y ρ como propiedades del material. Consecuentemente, el fluido modelado aquí es aire con propiedades de densidad y velocidad del sonido de 1.225 kg/m^3 y 346.25 m/s , respectivamente. La presión de referencia (P_{REF}) utilizada para calcular el nivel de presión acústica es de $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$.

2.2.3 Discretización del modelo

Es vital considerar la longitud de onda acústica, debido a que esto afectará la precisión de los resultados. Como regla general, para garantizar una solución confiable, se requieren doce o seis elementos finitos por longitud de onda para elementos de bajo o alto orden, respectivamente [34]. Cabe resaltar que esto aplica para la frecuencia de trabajo más alta. En este trabajo se utilizó un elemento cuadrilátero lineal de cuatro nodos (Q4, FLUID29), con un grado de libertad (GDL) por nodo: presión, ya que no se cuenta con interfaz FSI en el elemento. Aunque el rango de frecuencias que los seres humanos pueden escuchar varía de unos 20 Hz a 20000 Hz, el rango de frecuencia más relevante para la inteligibilidad del habla es 0.6–4 kHz [20], por ello se adopta este rango para la solución numérica, mediante un intervalo de 100 Hz. En consecuencia, el tamaño del elemento finito debe ser de:

$$E_{size} = \frac{1}{12} \lambda_{min} = \frac{1}{12} \frac{c}{f_{max}} \quad (15)$$

De acuerdo con lo anterior, donde $c = 346.25 \text{ m/s}$ y $f = 4000 \text{ Hz}$, entonces el tamaño del elemento Q4 de primer orden para el presente trabajo es de $E_{size} \leq 0.0072 \text{ m} \approx 7 \text{ mm}$. Para el caso del *dummy* con tapabocas, se obtuvo una malla con 144.156 elementos (cuadriláteros y triángulos) y 144.924 nodos (ver Figura 3). Para el caso del *dummy* sin tapabocas, se obtuvo una malla con 134.300 elementos (cuadriláteros y triángulos) y 135.039 nodos.

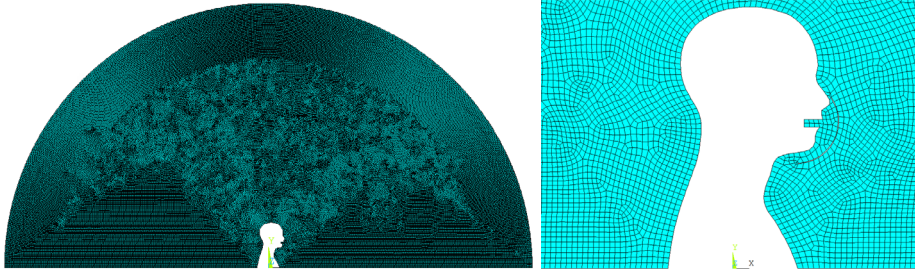


Figura 3. Malla para el caso dummy con cubrebocas: a) dominio total; b) acercamiento alrededor del maniquí.

2.2.4 Condiciones de frontera y excitación acústica

Se descarta el efecto disipativo debido a la viscosidad del fluido, pero la absorción del sonido en la interfaz se contabiliza mediante una matriz de amortiguación en la que se utiliza el área superficial y la admitancia de la frontera en la interfaz [35]. Los valores medidos de forma experimental de la admitancia, en la frontera para el material absorbente de sonido, se pueden ingresar como propiedad del material μ , donde $\mu=0$ representa ausencia de absorción de sonido y $\mu=1$ simboliza absorción de sonido total. En ANSYS, cuando se usa la propiedad de material μ (MU), se tiene que [34]:

$$MU = Re\left\{\frac{Z_0}{Z}\right\} = \frac{1}{R} \quad (16)$$

dado que se supone que la componente imaginaria es cero, Z_0/Z es la admitancia equivalente y donde Z/Z_0 es la relación de impedancia acústica específica, también conocida como impedancia acústica específica normalizada definida por:

$$\frac{Z}{Z_0} = R + jX \quad (17)$$

donde $Z_0 = \rho_0 c_0$ es la impedancia característica del fluido, R es la parte real (Resistencia) y X es la parte imaginaria (Reactancia) de la impedancia, los cuales están asociados con el coeficiente de absorción acústica α y el coeficiente de reflexión r así:

$$\alpha = \frac{4R}{(R^2 + X^2) + 2R + 1} = 1 - |r|^2 \quad (18)$$

de tal forma que una frontera con absorción total se tiene que $r=0$ (no hay reflexión), $R=1$ (impedancia real), $X=0$ (impedancia imaginaria),

$\alpha=1$ (absorción total) y $\mu=1$ (absorción total). En ANSYS, los modelos acústicos de elementos finitos tienen condiciones de pared rígida en las fronteras donde no se definen elementos. Esta suposición es válida en situaciones en las que no se espera que el movimiento de la frontera tenga un efecto significativo en la acústica del sistema [34]. Por lo tanto, cada frontera debe configurarse si se desea un comportamiento diferente.

2.2.4.1 Fronteras del dominio de análisis

Un problema de acústica exterior normalmente involucra un fluido infinito, homogéneo y no viscoso, y la onda de presión debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld [29]. Para absorber las ondas salientes y evitar reflejos en el dominio computacional, de manera que se simule la acústica en espacios abiertos, se pueden utilizar diversas técnicas. Un enfoque típico para un problema de este tipo consiste en truncar el dominio ilimitado mediante la introducción de una condición en la frontera a cierta distancia de la estructura. Tres enfoques son comunes: condiciones de contorno absorbentes, capas artificialmente acopladas y contornos con impedancia superficial. La más simple y eficiente en términos computacionales es la tercera opción, por lo que es la considerada en este trabajo. Así, a las líneas L1, L4 y L5⁴ mostradas en la Figura 4, se les aplica una frontera de radiación infinita (SF,NLIST,INF). La frontera de radiación infinita acústica supone que la relación entre la presión y la velocidad normal hacia afuera es igual a $Z_0 = \rho_0 C_0$. Cuando la frontera de radiación está cerca de los objetos o los radiadores, es posible que la onda de presión saliente ya no mantenga la relación Z_0 y se produzca un error numérico. Usar un elemento de contorno absorbente o capas combinadas de forma artificial es más preciso para modelar la frontera de radiación de campo lejano. Sin embargo, en este caso, la frontera está suficientemente alejada de la fuente acústica y, por lo tanto, una frontera de radiación infinita es una buena aproximación.

4 Las líneas L4 y L5 se suponen líneas de simetría y por tanto se le impone una condición de frontera de radiación infinita para evitar el rebote de ondas acústicas en el dominio de análisis MEF.

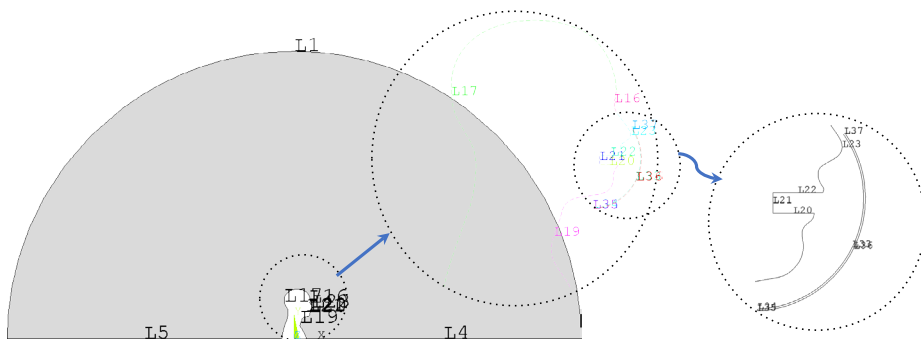


Figura 4. Numeración de líneas en el modelo para la aplicación de condiciones de frontera.

2.2.4.2 Configuración del tapabocas

Cuando se diseña un dispositivo acústico, la selección del material, sus propiedades, el grosor de los componentes y otros parámetros se pueden modificar para alterar las características de rendimiento en un rango de frecuencias. Lo ideal es obtener un rendimiento constante en la gama de frecuencias de funcionamiento (graves, medios y agudos). Sin embargo, es típico que las propiedades acústicas de los materiales varíen con la frecuencia, tal y como se ilustra en la Tabla 1, con el coeficiente de absorción acústica. Este se emplea, a menudo, para medir la absorción de una superficie en aplicaciones acústicas; es decir, es la relación entre la potencia de sonido que es absorbida por el material y la potencia de sonido incidente en el material, y adopta valores entre 0 y 1. La impedancia superficial con valor real se puede derivar del coeficiente de absorción definido como [36]:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha}}{1 - \sqrt{1 - \alpha}} \quad (19)$$

Tabla 1. Coeficiente de absorción sonora según frecuencia en bandas de octava para algunos elementos típico de un salón de clases⁵.

Material	α vs Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Paredes ^a	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Piso/techo ^b	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Persona ^c	0,18	0,20	0,27	0,30	0,36	0,36
Vidrio ^d	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02
Escolar con pupitre	0,17	0,21	0,26	0,30	0,33	0,37

^a Pared revocada^b Piso/techo de hormigón.^c Muchacho de pie.^d Ventana/puerta de vidrio de 4 mm de espesor.

El material del tapabocas es polipropileno clarificado (PP); pero no existe una caracterización acústica del coeficiente de absorción, por lo que se adopta un valor constante para α_{mask} en el intervalo [0,1] ($\alpha_{mask} = 0.01$). Las superficies del tapabocas son las líneas L33, L34, L35, L36 y L37 que se muestran en la Figura 4. Para aplicar dicho coeficiente de absorción se usa el comando APDL: SF,NLIST,ATTN,ALPHA, donde NLIST corresponde a la lista de los nodos del modelo de elementos finitos que conforman las líneas antes indicadas.

2.2.4.3 Fronteras del *dummy*

Aunque el coeficiente de absorción acústica es variable con la frecuencia, ANSYS APDL no dispone de un camino simple para implementar esto en los contornos del *dummy*. Por consiguiente, se aplicará a las líneas L16, L17, L19 y L23 (ver Figura 4) un α constante, es decir, $\alpha = 0.36$ usando los valores definidos para una persona en la Tabla 1 (niño de pie), que es el valor a una frecuencia de 2000 Hz (igual para 4000 Hz).

2.2.4.4 Excitación acústica

Existen diversas fuentes acústicas que pueden ser utilizadas para excitar el sistema, por ejemplo, una condición de presión, un desplazamiento (si existe acople fluido-estructura) o una condición de flujo, entre otras.

5 Datos tomados de <http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/Tablas-de-Absorcion.pdf>

La primera opción es la más simple, puesto que se imponen valores de presión en la frontera, lo que la convierte en una condición de frontera tipo Dirichlet. No obstante, al aplicar la excitación por presión, esta se fuerza a un valor dado en la región específica y no se considera la presión del sonido reflejada por otros objetos hacia el punto de excitación. La excitación por presión se recomienda, únicamente, en condiciones en las que no se requiere el efecto de la presión del sonido reflejado. En nuestro caso particular, la excitación acústica se realiza en la boca del *dummy* al simular una conversación y el rebote de ondas en la fuente se considera despreciable. Por lo tanto, en la línea L21 de la Figura 4 se representa el ruido equivalente a una oficina ocupada (SPL=80 dB⁶), que se asemeja a un salón de clases con niños. La presión equivalente (amplitud), se obtiene al usar las ecuaciones (5) y (6), lo que produce:

$$P_0 = \sqrt{2} \cdot 10^{\frac{SPL-94}{20}} \quad (20)$$

por lo que, para un SPL=80 db re 20μPa, se tiene una presión de $P_0=0.2822$ Pa. En ANSYS se dispone el comando APD, NLIST, PRES, PA para aplicar dicha condición de frontera, con NLIST como la lista de nodos pertenecientes a la línea L21 y PA el valor de la amplitud de la presión. Adicionalmente, en las líneas L20 y L22 que pertenecen a la boca (ver Figura 4) no se les impone ninguna condición, lo cual ANSYS lo toma por defecto como una pared rígida (por ser una condición de frontera natural), tipo Neumann, donde $\vec{n} \cdot \nabla p = 0$, que indica que el gradiente de presión normal a la superficie es 0.

2.2.5 Configuración del solucionador

La variable de estado (solución o respuesta), es decir, la presión acústica en el medio fluido, está determinada por la ecuación de onda con las siguientes suposiciones [35]:

- Se considera presión acústica el exceso de presión respecto a la presión media.
- Los análisis se limitan a presiones acústicas relativamente pequeñas, por lo que los cambios de densidad son pequeños en comparación con la densidad media, es decir, la presión acústica es el exceso de presión de la presión media.
- El fluido es comprimible (la densidad cambia debido a las variaciones de presión).

6 Datos tomados de <https://engcourses-uofa.ca/books/vibrations-and-sound/12-sound-and-acoustics/sound-pressure-level/>.

- Fluido no viscoso (sin efecto disipativo debido a la viscosidad).
- No existe flujo medio en el fluido.

La respuesta armónica (presión acústica según la frecuencia) de un sistema se puede calcular en ANSYS por dos métodos [28], [29], [34]: completo (*full*) o superposición. El método completo consiste en calcular de forma directa las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento en cada paso, resolviendo las ecuaciones de movimiento para la respuesta de la fuerza armónica. Aunque esta técnica es más costosa desde el punto de vista computacional, es más simple para el usuario y tiene menos limitaciones. En este trabajo, el análisis armónico se concluyó usando el método *full* sin condiciones FSI o PML para un rango de frecuencia de 600 - 4000 Hz con 35 subpasos (cada 100 Hz). La carga se aplica por pasos, lo que significa que la fuerza es constante en cada paso de todo el rango de frecuencia. Los siguientes solucionadores están disponibles para un análisis armónico completo:

- Solucionador directo con matriz dispersa
- Solucionador iterativo
 - QMR (Quasi-Minimal Residual)
 - Gradiente conjugado preconditionado (PCG) con diferentes preconditionadores:
 - Factorización incompleta de Cholesky (ICCG)
 - Precondicionador de Jacobi (JCG)

Para un problema relativamente pequeño (menos de 500.000 grados de libertad, GDL o DOF), el solucionador directo es el recomendado. Como en nuestro caso se tienen menos de 150.000 nodos y cada nodo tiene un solo GDL (presión), el solucionador por utilizar será el directo con matriz dispersa (EQLV, SPARSE). En general, este requiere más memoria (~10x) que el solucionador PCG, aunque cuando la memoria es limitada, el solucionador guarda los datos en el disco de almacenamiento en vez de en la RAM, lo que puede ralentizar notablemente el rendimiento del solucionador, pero si hay suficiente capacidad en la RAM para alojar la memoria requerida, el solucionador funciona de manera óptima. Es más, este solucionador soporta procesamiento paralelo en procesadores (CPU) multinúcleo (SMP, *shared-memory parallel*), múltiples procesadores (DMP, *distributed-memory*

parallel) y procesadores gráficos (GPU). Para la obtención de los resultados en este trabajo, se usó un computador equipado con un procesador AMD Ryzen 9 de tercera generación (3900X) de 12 núcleos físicos, 64 GB de RAM, 1 TB de SSD y una GPU Nvidia GeForce 2080 SUPER de 8 GB de memoria. El procesamiento en paralelo con una GPU diferente a las recomendadas (Quadro y Tesla) se activó de forma manual mediante la configuración de la variable del sistema ANSGPU_OVERRIDE=1.

3. Análisis y resultados

En esta sección se presentan los resultados de la simulación, donde se compara el nivel de presión sonora (SPL) para diferentes frecuencias y distancias de la fuente, con o sin tapabocas. A medida que se enseñan, estos se analizan y se infieren algunas conclusiones.

3.1 Contornos de presión y SPL

La solución directa de un problema acústico es la presión del fluido en el dominio de análisis. Dicha presión y su distribución dependen de la frecuencia de excitación. La Figura 5 presenta como ejemplo la distribución de presión sonora a 600 Hz y a 4000 Hz, tanto para el caso con tapabocas como para el caso sin este. Se observa que el valor máximo de presión acústica es el impuesto en la boca (0.2822), mientras que el valor mínimo y su ubicación varían según la frecuencia, como se muestra en la figura. Para 600 Hz, se tiene que $P_{min_{wom}} = -0.04642 Pa$ y $P_{min_{wm}} = -0.036315 Pa$, donde el subíndice *wom* se refiere al caso sin mascarilla y *wm* al caso con mascarilla. Por otro lado, para la frecuencia de 4000 Hz los valores mínimos son $P_{min_{wom}} = -0.15071 Pa$, mientras que $P_{min_{wm}} = -0.119616 Pa$. Para explicar mejor lo anterior, la Figura 6 presenta la distribución del SPL (nivel de presión sonora) medido en decibels, donde se observa que el máximo valor de SPL es de ~80 dB y se halla en la boca, lo cual fue impuesto como condición de frontera, mientras que el valor mínimo varía según la frecuencia. No obstante, los valores mínimos solo se evidencian en algunos puntos, ya que no se alcanzan a observar en los contornos de las gráficas.

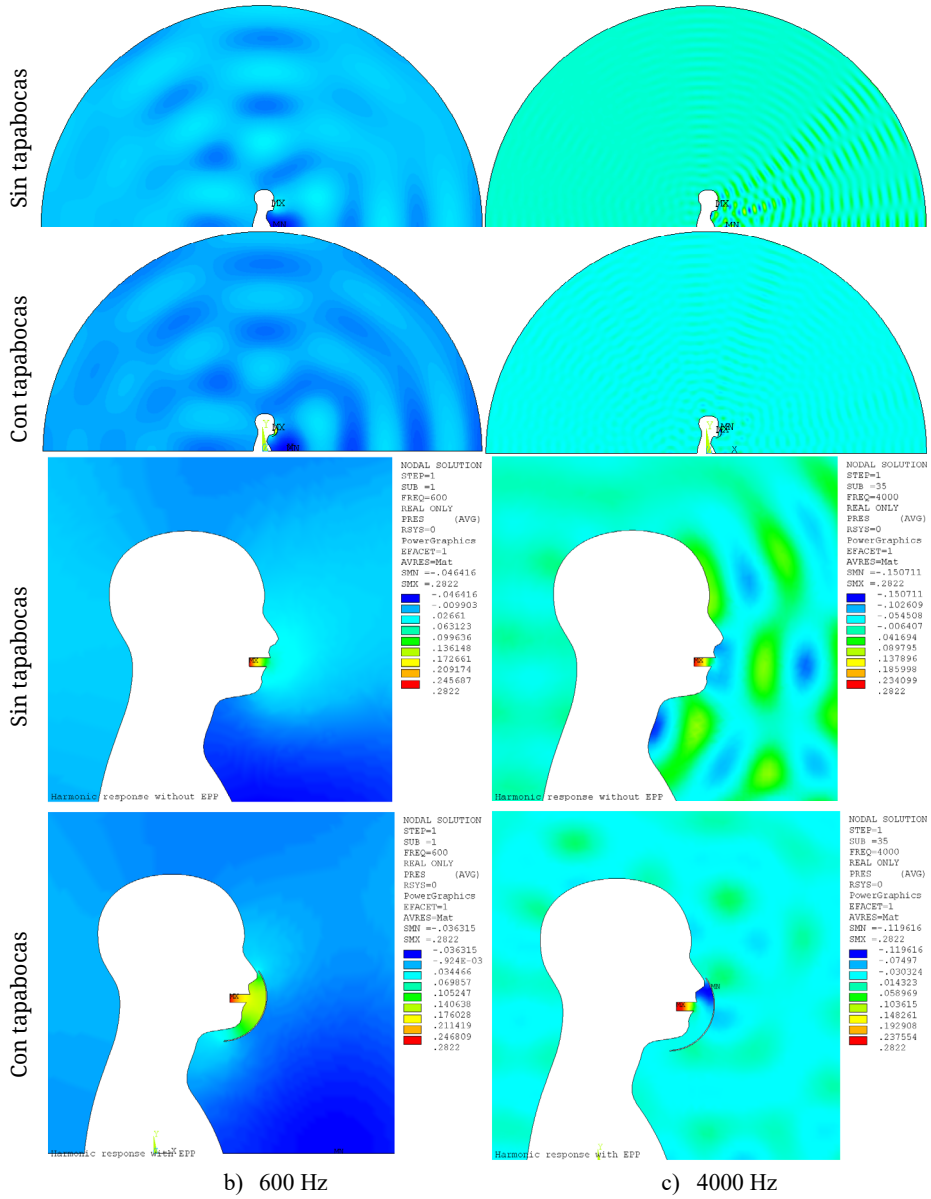


Figura 5. Distribución de presión acústica (Pa) en el dominio de análisis con o sin cubrebocas. La escala de colores es la misma para cada columna, según el caso.

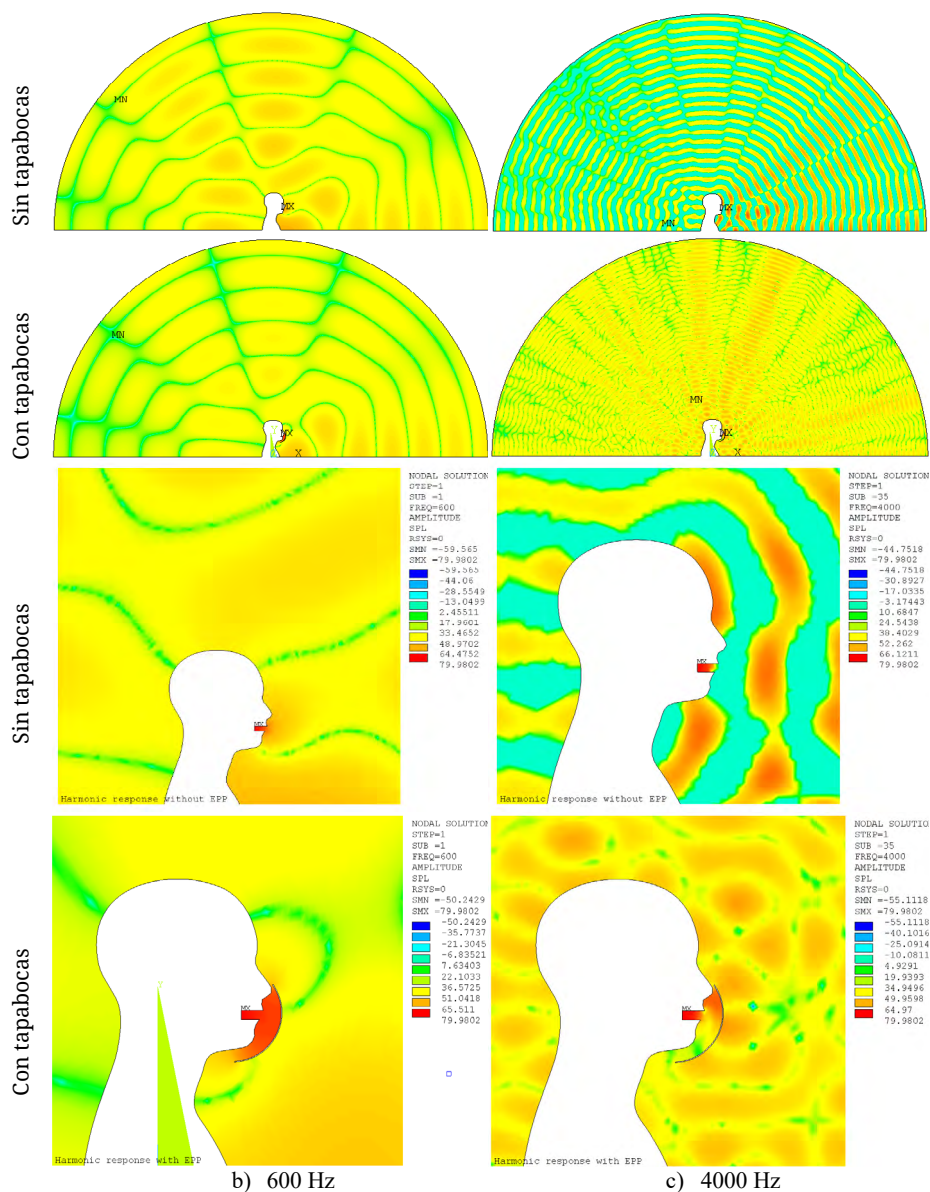


Figura 6. Distribución SPL (en dB re 20μPa) en el dominio de análisis. La escala de colores es la misma para cada columna, según el caso.

3.2 Atenuación acústica por el uso del tapabocas

La principal diferencia con el uso del tapabocas es la distribución del SPL. Para entender este fenómeno es necesario graficar el SPL frente a la frecuencia en un punto específico o varios del dominio de análisis. En La Figura 8 se muestra el nivel de presión sonora en diferentes puntos después de la boca ubicados, según se describe en la Figura 7, a la altura de 190mm (mitad de la boca) y espaciados cada 20cm para el rango de frecuencias considerado (600-4000 Hz).

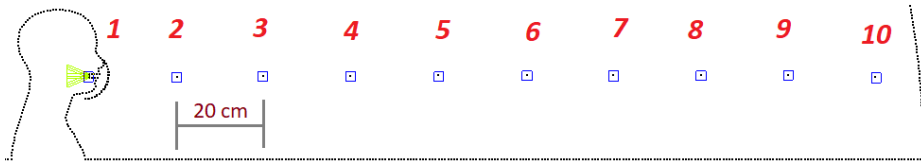


Figura 7. Nodos seleccionados para la obtención del SPL.

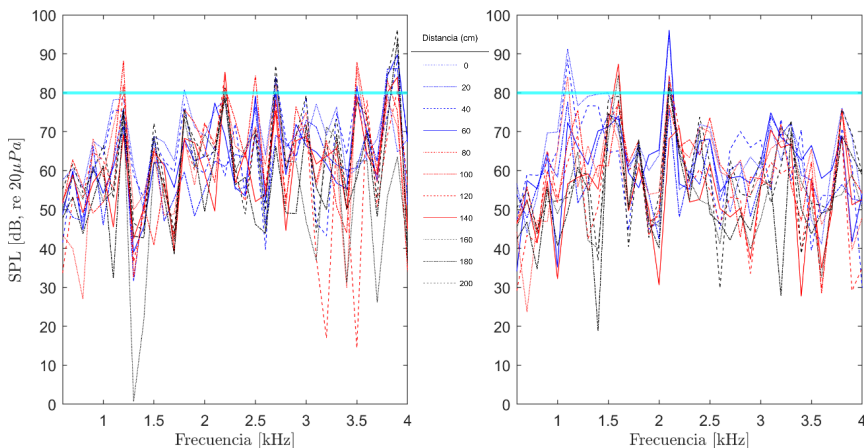


Figura 8. Presión acústica SPL en el espectro 600-4000 Hz: a) condición sin mascarilla y b) para la condición con máscara. La leyenda aplica para ambas gráficas.

De acuerdo con la Figura 8, parece existir una atenuación del sonido cuando se usa mascarilla, particularmente para frecuencias mayores a 2.1 kHz, ya que el SPL para todos los puntos está por debajo del valor de referencia de 80 dB a partir de este umbral. No obstante, se observa que aumentaron los picos en cantidad e intensidad que sobrepasan los 80 dB para frecuencias inferiores a 2.1 kHz cuando se usa el cubrebocas. Esto explica por qué la voz humana suena más grave con elementos de

protección personal, atenuando las frecuencias altas y amplificando las bajas. La Figura 9 presenta una comparación en el SPL en cierta ubicación (puntos 2, 6 y 10 de la Figura 7) usando o no el tapabocas. El punto 2 está a 20cm de la boca, mientras que el punto 6 está a 1m de distancia, una más segura frente a la COVID-19, y el punto 10 está 1.8m alejado de la fuente. Adicionalmente, la Figura 9 presenta la diferencia en dB para los tres puntos comparados en función de la frecuencia de excitación, donde se restó el SPL con máscara al SPL sin máscara. De las gráficas a), b) y c) presentadas en la Figura 9 se observa que la curva roja (SPL con tapabocas) es mayor en algunos puntos, lo cual se explica por el rebote de ondas en las superficies del cubrebocas, lo que hace que en algunas ocasiones se sumen y produzcan mayor nivel de sonido.

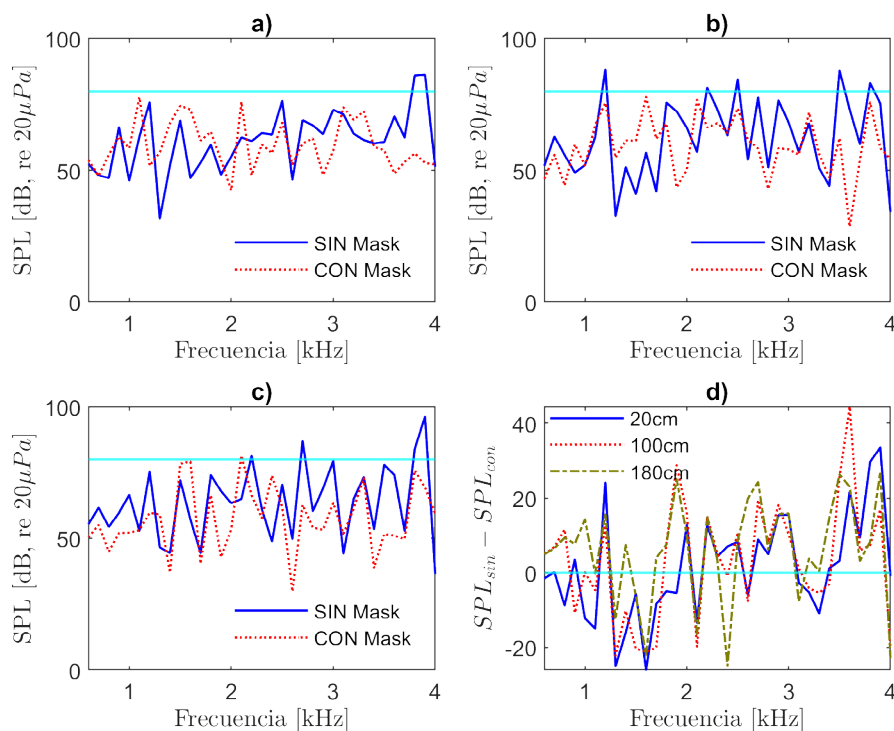


Figura 9. Comparación del SPL con y sin mascarilla en función de la frecuencia para diferentes distancias a la fuente: a) 20cm de la fuente (punto 2); b) 100cm de la fuente (punto 6); c) 180cm de la fuente (punto 10); d) Diferencia entre SPL.

Por otro lado, cuando la separación entre la fuente y la medición es reducida, las curvas son bastante similares, mientras que para distancias mayores, existe una tendencia a que, con el uso mascarilla, el SPL sea mayor

para bajas frecuencias (<1800 Hz), sin embargo, para las frecuencias más altas (>2000 Hz), el SPL es menor, lo cual indica que se presenta rebote y suma de ondas alrededor del tapabocas para todas las frecuencias, pero que haya pérdida de intensidad de sonido a distancias mayores en las frecuencias más altas. Este fenómeno se aprecia mejor en la Figura 9 d), donde, para frecuencias por debajo de 1800 Hz, casi todas las restas de SPL ($SPL_{sinTB} - SPL_{conTB}$) dan negativas (por debajo de la línea de referencia cian (SPL=0 dB), lo que demuestra que, con tapabocas, se evidencian amplificaciones del sonido en frecuencias bajas. Por otro lado, para frecuencias superiores a 1800 Hz, la resta de SPL casi siempre es positiva, especialmente para los puntos 6 y 10 (los más alejados de la fuente), por lo tanto, existe atenuación para frecuencias altas cuando se usa el tapabocas. Estos resultados concuerdan con los indicados en la literatura revisada en la introducción de este texto y con la experiencia práctica, debido a que, por lo general, al emplear cualquier tipo de mascarilla, la voz tiende a sonar más grave (ronca), puesto que las frecuencias bajas se favorecen y las altas se ven afectadas.

Dichos resultados demuestran una reducción progresiva del nivel de presión sonora a medida que se aumenta la distancia y la frecuencia, en concordancia con los hallazgos de Martarelli *et al.* [26] y Kwon y Yang [16], quienes reportaron que las mascarillas generan pérdidas acústicas más pronunciadas en frecuencias altas y, por ende, se afecta de forma negativa la inteligibilidad del habla. Además, si bien en este estudio no se calculó directamente el índice de transmisión del habla (Speech Transmission Index - STI), se reconoce que esta métrica ofrece una visión más precisa de la inteligibilidad en entornos educativos. Dado que el STI depende de parámetros como la relación señal/ruido, la reverberación y el contenido espectral [16], [17], los resultados presentados en esta simulación (atenuación de SPL en altas frecuencias y modificación de la directividad) apuntan a que el STI se vería comprometido en condiciones similares. Esto será considerado en futuras simulaciones tridimensionales más avanzadas. Otro hecho es que, para separaciones pequeñas entre la fuente y el receptor, el sonido no sufre alteraciones significativas y, por esta razón, se recomienda usar micrófonos para hablar en espacios grandes, como auditorios [12].

3.3 Directividad del sonido

Para estudiar la directividad del sonido en un modelo 2D se tomará un semicírculo alrededor de la cabeza de radio 350 mm, y centrado en el eje de coordenadas del modelo (ver Figura 10 y Figura 1). Del arco generado se seleccionan 10 puntos equiespaciados cada 18°, desde 0° hasta 180°.

La Figura 11 y Figura 12 muestran el SPL para el caso sin tapabocas y con tapabocas, respectivamente. Se observa que, cuando se usa tapabocas, las frecuencias más altas son las más afectadas, ya que el SPL se encuentra por debajo de 60 dB. Para corroborar este hecho, la Figura 13 presenta la diferencia entre el SPL sin tapabocas y el SPL con él.

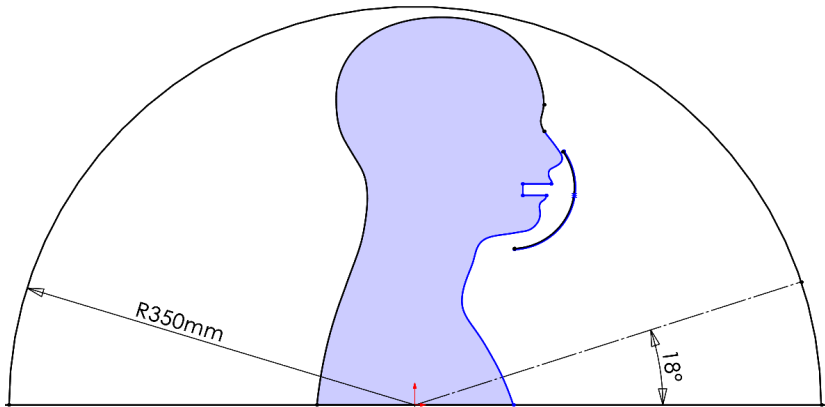


Figura 10. Arco definido alrededor de la cabeza para medir la directividad del sonido.

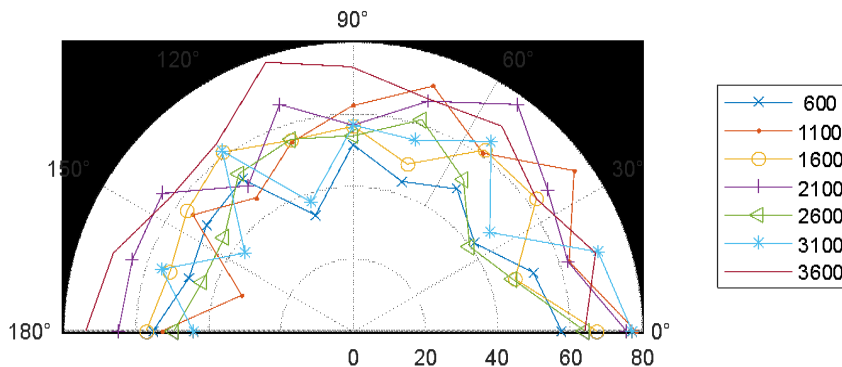


Figura 11. SPL (dB, eje radial) en función del ángulo para el caso **sin** tapabocas. Por claridad sólo se grafican algunas frecuencias del espectro completo 600 a 4000 Hz.

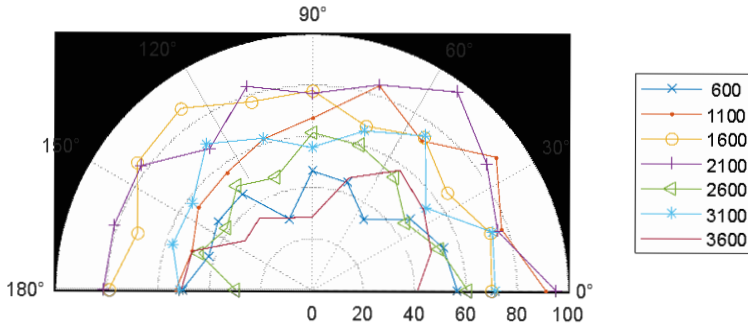


Figura 12. SPL (dB, eje radial) en función del ángulo para el caso **con** tapabocas. Por claridad sólo se grafican algunas frecuencias del espectro completo 600 a 4000 Hz.

De la Figura 13 se observa que, para valores menores a cero (0), el tapabocas favorece la transmisión del sonido, y viceversa cuando la diferencia es positiva, el tapabocas la dificulta. Como regla general, el cubrebocas afecta de manera negativa el sonido dado que hay pérdidas, particularmente para frecuencias por encima de 2 kHz, con excepciones en algunos puntos ubicados por encima de la cabeza hacia atrás (punto # 6 hasta punto #11). El hecho de que, en algunos puntos, y para ciertas frecuencias, haya mayor nivel de sonido con el tapabocas se puede explicar por las formas y materiales usados en este, ya que pueden existir ondas que se suman. Para comprobarlo, sería necesario estudiar otras geometrías, configuraciones y materiales del cubrebocas, lo cual se plantea como trabajo futuro.

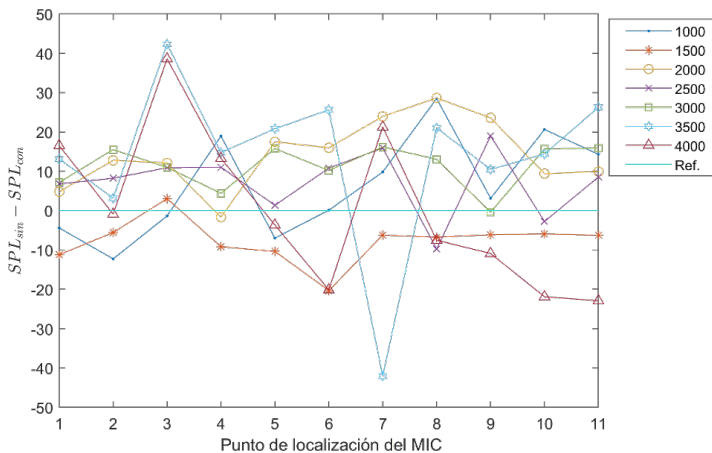


Figura 13. Diferencia entre el SPL sin tapabocas y con tapabocas, medidas en diferentes posiciones alrededor de la cabeza, para un conjunto de frecuencias analizadas.

4. Conclusiones

Este estudio constituye una fase preliminar que explora, mediante simulación de elementos finitos (MEF), el comportamiento acústico asociado al uso de tapabocas en niños en contextos escolares. En este trabajo se obtuvo una simulación bidimensional (2D) simplificada que no ha sido validada experimentalmente y que muestra concordancia cualitativa con estudios previos que utilizaron métodos de medición directa y simulación acústica en aulas. De lo anterior, se concluye que, en general, las frecuencias altas son las más afectadas por el uso del tapabocas, debido a que sufren atenuación, mientras que los sonidos graves permanecen prácticamente inalterados, en consecuencia, la voz suena más ronca. Por otro lado, el nivel de presión sonora disminuye con el incremento de la distancia a la fuente, lo cual corresponde a un efecto natural; sin embargo, con el uso del cubrebocas este efecto se acentúa. Se evidencia, además, que la intensidad sonora alrededor de las personas que usan tapabocas varía según la posición. La directividad del sonido se ve afectada de forma negativa cuando se emplea algún tipo de mascarilla, ya que las ondas acústicas se pueden desviar. Esta investigación numérica presenta la ventaja de requerir menos recursos (tiempo y personal) en comparación con una investigación experimental, lo cual abre la posibilidad de incorporar mayores complejidades al modelo numérico en trabajos futuros, tales como la simulación tridimensional (3D) del problema, incluyendo interacción fluido-estructura (FSI) y las propiedades reales de los materiales sólidos y fluidos. La inclusión de otros elementos como sillas, paredes, techo, piso y la presencia de otras personas permitiría simular muy bien un salón de clases. Por último, la validación empírica en recintos educativos reales, el uso de métricas avanzadas como el índice de transmisión del habla (STI) y la ponderación en frecuencia tipo A (dBA), fortalecería la aplicabilidad práctica del modelo propuesto.

5. Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, “Enfermedad por coronavirus (COVID-19): mascarillas”. Consultado: el 8 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-masks>. [Consultado: 8 de septiembre de 2022].
- [2] S. Kumar y H. P. Lee, “The perspective of fluid flow behavior of respiratory droplets and aerosols through the facemasks in context of SARS-CoV-2”, *Physics of Fluids*, vol. 32, núm. 11, p. 111301, nov. 2020, doi: 10.1063/5.0029767.

- [3] Y. Xu, X. Zhang, X. Hao, D. Teng, T. Zhao, y Y. Zeng, “Micro/nanofibrous non-wovens with high filtration performance and radiative heat dissipation property for personal protective face mask”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 423, p. 130175, nov. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2021.130175.
- [4] M. Martarelli, L. Montalto, P. Chiariotti, S. Simoni, P. Castellini, G. Battista, *et al.*, “Acoustic Attenuation of COVID-19 Face Masks: Correlation to Fibrous Material Porosity, Mask Breathability and Bacterial Filtration Efficiency”, *Acoustics*, vol. 4, no. 1, pp. 123–138, Feb. 2022, doi: 10.3390/acoustics4010009.
[4] M. Martarelli, G. Castellini, G. Revel, L. Scalise, F. Tomasini y E. Chiariotti, “Acoustic attenuation of COVID-19 face masks: Correlation to fibrous material porosity, mask breathability and bacterial filtration efficiency”, *Acoustics*, vol. 4, núm. 1, pp. 123–138, feb. 2022, doi: 10.3390/acoustics4010009.
- [5] American Society for Testing and Materials, “ASTM F2100-21: Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks”, vol. 11.03, núm. F23.40, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1520/F2100-21. [6] Comité Europeo de Normalización “UNE-EN 149:2001+A1:2010. Respiratory protective devices - Filtering half masks to protect against particles - Requirements, testing, marking”. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0044643> [Consultado: 8 de septiembre de 2022].
- [7] H. Daanen, S. Bose-O'Reilly, M. Brearley, D. Flouris, N. Gerrett, M. Huynen, *et al.*, “COVID-19 and thermoregulation-related problems: Practical recommendations”, *Temperature*, vol. 8, núm. 1, pp. 1–11, ene. 2021, doi: 10.1080/23328940.2020.1790971.
- [8] H. Salati, M. Khamooshi, S. Vahaji, F. C. Christo, D. F. Fletcher, y K. Inthavong, “N95 respirator mask breathing leads to excessive carbon dioxide inhalation and reduced heat transfer in a human nasal cavity”, *Physics of Fluids*, vol. 33, núm. 8, p. 081913, ago. 2021, doi: 10.1063/5.0061574/5.0061574.MM.ORIGINAL.V1.AVI.
- [9] G. Badh y T. Knowles, “Acoustic and perceptual impact of face masks on speech: A scoping review”, *PLoS One*, vol. 18, núm. 8, p. e0285009, ago. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0285009.
- [10] S. R. Atcherson, B. R. McDowell, y M. P. Howard, “Acoustic effects of non-transparent and transparent face coverings”, *J Acoust Soc Am*, vol. 149, núm. 4, p. 2249, abr. 2021, doi: 10.1121/10.0003962.
- [11] L. M. Thibodeau, R. B. Thibodeau-Nielsen, C. M. Q. Tran, y R. T. de S. Jacob, “Communicating During COVID-19: The Effect of Transparent Masks for Speech Recognition in Noise”, *Ear and Hearing*, vol. 42, núm. 4, pp. 772–781, jul. 2021, doi: 10.1097/AUD.0000000000001065.
- [12] R. M. Corey, U. Jones, y A. C. Singer, “Acoustic effects of medical, cloth, and transparent face masks on speech signals”, *J Acoust Soc Am*, vol. 148, núm. 4, p. 2371, oct. 2020, doi: 10.1121/10.0002279.
- [13] B. T. Balamurali, T. Enyi, C. J. Clarke, S. Y. Harn, y J.-M. Chen, “Acoustic Effect of Face Mask Design and Material Choice”, *Acoust Aust*, vol. 49, núm. 3, pp. 505–512, sep. 2021, doi: 10.1007/s40857-021-00245-2.

- [14] Goldin A, Weinstein BE, y Shiman N, “How Do Medical Masks Degrade Speech Reception?”, *Hearing Review*, vol. 27, núm. 5, pp. 8–9, 2020. Disponible en <https://hearingreview.com/hearing-loss/health-wellness/how-do-medical-masks-degrade-speech-reception> [Consultado: 1 de septiembre de 2022].
- [15] E. Muzzi, C. Chermaz, V. Castro, M. Zaninoni, A. Saksida, y E. Orzan, “Short report on the effects of SARS-CoV-2 face protective equipment on verbal communication”, *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, vol. 278, núm. 9, pp. 3565–3570, sep. 2021, doi: 10.1007/S00405-020-06535-1.
- [16] M. Kwon y W. Yang, “Effects of face masks and acoustical environments on speech recognition by preschool children in an auralised classroom”, *Applied Acoustics*, vol. 202, p. 109149, ene. 2023, doi: 10.1016/j.apacoust.2022.109149.
- [17] M. Kwon y W. Yang, “Effects of talker gender and face masks on the speech recognition of 6-year-old children in a classroom”, *Frontiers in Public Health*, vol. 13, p. 1430530, jun. 2025, doi: 10.3389/fpubh.2025.1430530.
- [18] J. Wolfe, J. Smith, S. Neumann, S. Miller, E. Schafer, A. Birath, *et al.*, “Optimizing Communication in Schools and Other Settings During COVID-19”, *Hearing Journal*, vol. 73, núm. 9, pp. 40–45, sep. 2020, doi: 10.1097/01.HJ.0000717184.65906.b9.
- [19] S. Asadi, A. S. Wexler, C. D. Cappa, S. Barreda, N. M. Bouvier, y W. D. Ristenpart, “Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness”, *Scientific Reports 2019 9:1*, vol. 9, núm. 1, pp. 1–10, feb. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-38808-z.
- [20] S. R. Atcherson, E. T. Finley, B. R. McDowell y C. Watson, “More speech degradations and considerations in the search for transparent face coverings during the COVID-19 pandemic”, *Audiology Today*, vol. 32, núm. 6, pp. 20–27, dic. 2020. Disponible en: <https://www.audiology.org/news-and-publications/audiology-today/articles/more-speech-degradations-and-considerations-in-the-search-for-transparent-face-coverings-during-the-covid-19-pandemic/> [Consultado: 10 de julio de 2022].
- [21] T. J. Cox, G. Dodgson, L. Harris, E. Perugia, M. A. Stone, y M. Walsh, “Improving the measurement and acoustic performance of transparent face masks and shields”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 151, núm. 5, pp. 2931–2944, may 2022, doi: 10.1121/10.0010384.
- [22] M. Caniato, A. Marzi, y A. Gasparella, “How much COVID-19 face protections influence speech intelligibility in classrooms?”, *Applied Acoustics*, vol. 178, p. 108051, jul. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108051.
- [23] D. W. Furnas y J. M. Wingate, “The Effects of Mask Usage on Reported Vocal Health of Educators”, *Journal of Voice*, may 2022, doi: 10.1016/j.jvoice.2022.04.011.
- [24] S. Sukaj, A. Trematerra, G. Ciaburro, y G. Iannace, “Use of masks inside the classrooms”, *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Washington, D.C., USA, vol. 263, núm. 2, pp. 4020–4027, ago. 2021, doi: 10.3397/IN-2021-2577.

- [25] P. Bottalico, S. Murgia, G. E. Puglisi, A. Astolfi, y K. I. Kirk, “Effect of masks on speech intelligibility in auralized classrooms”, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 148, núm. 5, pp. 2878–2884, nov. 2020, doi: 10.1121/10.0002450.
- [26] M. Martarelli, L. Montalto, P. Chiariotti, S. Simoni, P. Castellini, G. Battista, et al. “Acoustic Attenuation of COVID-19 Face Masks: Correlation to Fibrous Material Porosity, Mask Breathability and Bacterial Filtration Efficiency”, *Acoustics*, vol. 4, pp. 123–138, feb. 2022, doi: 10.3390/acoustics4010009.
- [27] A. M. O. Mohamed, E. K. Paleologos, y F. M. Howari, “Noise pollution and its impact on human health and the environment”, *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*, Butterworth-Heinemann, Londres, pp. 975–1026, ene. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-809582-9.00019-0.
- [28] ANSYS, “Mechanical User’s Guide. Release 2022 R2”, jul. 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.ansys.com>, Canonsburg, PA, USA.
- [29] ANSYS, “Theory Reference. Release 2022 R2” jul. 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.ansys.com>, Canonsburg, PA, USA.
- [30] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 6.^a ed., Boca Ratón, EE. UU. CRC Press, 2016. doi: 10.1201/9781315372150.
- [31] T. Okuzono, “Computational Accuracy and Efficiency of Room Acoustics Simulation Using a Frequency Domain FEM with Air Absorption: 2D Study”, *Applied Sciences*, vol. 14, núm. 1, p. 194, dic. 2023, doi: 10.3390/app14010194.
- [32] N. R. Jones, Z. U. Qureshi, R. J. Temple, J. P. J. Larwood, T. Greenhalgh, y L. Bourouiba, “Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19?”, *BMJ*, vol. 370, p. m3223, ago. 2020, doi: 10.1136/bmj.m3223.
- [33] B. Chea, A. Bolt, M. Agelin-Chaab, y I. Dincer, “Assessment of effectiveness of optimum physical distancing phenomena for COVID-19”, *Physics of Fluids*, vol. 33, núm. 5, p. 051903, may. 2021, doi: 10.1063/5.0046429.
- [34] C. Howard y B. Cazzolato, *Acoustic Analyses Using Matlab and Ansys*, Boca Ratón, EE. UU.: CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b17825.
- [35] ANSYS, “Element Reference. Release 2022 R2”, julio de 2022, <http://www.ansys.com>, Canonsburg, PA, USA.
- [36] ANSYS, “Acoustic Analysis Guide. Release 2022 R2”, julio de 2022, <http://www.ansys.com>, Canonsburg, PA, USA.

Robot autónomo para detección y extinción temprana de incendios

Valencia-Hernández, C.A.¹, Lemmel-Vélez, K.², and Herrera-Pineda J.C.³

1. Introducción

Con el aumento en la cantidad de viviendas en zonas urbanas y rurales, así como el crecimiento de las actividades empresariales, la amenaza de los incendios se mantiene como un desafío constante para la seguridad de las personas y la protección de los bienes. Sin embargo, más allá de la expansión de estos entornos, los principales riesgos se asocian a una inadecuada gestión eléctrica, descuidos humanos y factores climáticos. Este contexto resalta la necesidad ineludible de fortalecer los sistemas de detección temprana de incendios, tal como lo plantea Muñoz [1] en su estudio sobre robots extintores. A pesar de los esfuerzos loables de instituciones especializadas, como los bomberos y los sistemas de alarma contra incendios, investigaciones como la de Smith *et al.* [2] muestran que los incendios originados por errores humanos o eventos imprevistos son problemáticas cotidianas. Si bien estos mecanismos de control demuestran eficacia en las respuestas, carecen de métodos que posibiliten la anticipación en la detección de las llamas antes de que la situación se torne incontrolable.

No es exagerado afirmar que, en la actualidad, ninguna estrategia de lucha contra incendios puede ofrecer garantías absolutas para la seguridad de las vidas humanas ni la preservación del entorno natural. Esta idea, discutida por Regan [3] en el contexto de las limitaciones tecnológicas y operativas de los sistemas de respuesta actuales, subraya la necesidad urgente de explorar enfoques novedosos y disruptivos para abordar esta creciente problemática. En esta misma línea, Smith *et al.* [2] sostienen que los incendios, ya sean forestales o urbanos, plantean un desafío incesante en términos de mitigación de riesgos y gestión de situaciones de emergencia.

1 Orcid: 0009-0000-8986-8428; correo electrónico: carlos.valencia@pascualbravo.edu.co

2 Orcid: 0000-0003-4759-9332; correo electrónico: karen.lemmel@pascualbravo.edu.co

3 Orcid: 009-0009-1011-1330; correo electrónico: juan.herrerap@pascualbravo.edu.co

Los incendios, una constante en nuestra sociedad, se presentan como una amenaza latente que pone en vilo la seguridad humana, el medio ambiente y el patrimonio material. No obstante, a pesar de los notables avances tecnológicos y las medidas de control implementadas, la detección temprana y la extinción eficiente de incendios siguen siendo desafíos cruciales en la gestión de emergencias. En este escenario, la robótica móvil se plantea como una solución innovadora y prometedora para abordar de manera efectiva estos riesgos y mejorar la seguridad pública.

A lo largo de las últimas décadas, la investigación en robótica móvil ha experimentado avances significativos que han transformado la forma en que enfrentamos el problema de los incendios. Este capítulo se centra en la situación actual de la robótica móvil aplicada a la detección y extinción de incendios, con una revisión exhaustiva de investigaciones recientes y avances en este campo multidisciplinario.

Por ejemplo, el estudio pionero de Macias-García, Galeana-Pérez, Medrano-Hermosillo y Bayro-Corrochano [4] introduce un robot móvil capaz de navegar en entornos incendiados, recopilando datos en tiempo real acerca de la propagación del fuego y las condiciones ambientales circundantes. Esta tecnología brinda a los equipos de respuesta contra incendios la capacidad de tomar decisiones fundamentadas y mejorar la coordinación de sus esfuerzos, al tiempo que reduce la exposición a peligros potenciales.

Además, investigadores visionarios como Martínez-Rozas, Rey, Alejo, Acedo, Cobano, Rodríguez-Ramos y Caballero [5] han concebido robots móviles equipados con sistemas de extinción de incendios, lo que les permite combatir las llamas de manera eficiente y autónoma. Estos avances representan una transformación significativa en la forma en que abordamos los incendios, no solo en términos de reducir riesgos para el personal de bomberos, sino también en la eficiencia de la respuesta ante este tipo de emergencias.

La extinción eficiente de incendios se erige como un elemento clave para minimizar daños y preservar vidas. Martínez-Rozas *et al.* [5] desarrollaron robots móviles equipados con sistemas de extinción de incendios, capaces de reducir la exposición de los bomberos a situaciones peligrosas y acelerar la respuesta ante incendios. De igual forma, en diversos estudios se ha abordado el desafío que presenta la extinción de incendios subterráneos, una problemática particularmente compleja que ha impulsado la investigación en este ámbito, como evidencia el trabajo de Lee, Huynh, Kim y Soumayya [6].

Entre las contribuciones más notables, Wang, Chen y Liu [7] exploran el uso de la inteligencia artificial y de robots móviles en la detección y gestión de incendios forestales, mientras que Kim, Park y Lee [8] investigan sistemas multiagente para la detección y monitoreo de incendios forestales, lo cual evidencia la versatilidad de estas tecnologías en contextos de alta complejidad.

Adicionalmente, se aborda la aplicación de la inteligencia artificial en la detección de incendios mediante imágenes de vehículos aéreos no tripulados (UAV), tal como se plantea en la investigación de Rodríguez, Martínez y García [9], y se investiga cómo el aprendizaje por refuerzo permite la lucha autónoma contra incendios, como lo proponen Kim, Lee y Kim [10]. Además, se analizan soluciones para entornos industriales, donde Zhang, Wang y Li [11] estudian la detección y supresión de incendios mediante robots móviles, con un enfoque en la protección de infraestructuras críticas.

En este capítulo se considera un campo multidisciplinario en constante evolución, en el que la colaboración entre la robótica móvil y la inteligencia artificial se erige como una respuesta clave a los desafíos actuales de la gestión de incendios. A medida que exploramos estos avances y descubrimientos, se vislumbra un horizonte prometedor en la convergencia de la tecnología para abordar los riesgos de incendios y proporcionar respuestas más eficientes y seguras en una sociedad que busca salvaguardar vidas y recursos en constante riesgo.

2. Materiales y métodos

Para el diseño y prototipado del Robot detector y extintor de llamas nombre asignado al prototipo desarrollado, se trabajó en el sistema motoriz y eléctrico del prototipo. Se utilizaron técnicas de impresión 3D para la construcción de algunas piezas y corte láser para el chasis. El robot se realizó mediante las técnicas de prototipado rápido y diseño modular, por lo que la configuración de sus módulos se definió de la siguiente manera:

Primer módulo - sistema de locomoción: al tratarse de un robot de tracción diferencial, en su primer piso se tienen dos motores de 12V con 40kg de torque que, junto a una rueda loca, producen la estabilidad de la plataforma. En este piso también se encuentra la batería de litio polímero que entrega 11.1 V, los cuales se suministran directamente a un puente H L298 y, a su vez, se regulan a 5 V para la alimentación del sistema sensorial y el sistema de control.

Segundo módulo - sistema lógico de control: aquí se encuentra el sistema embebido para efectuar el control, junto con el sistema de visión artificial. En este caso, se trata de un Arduino Mega, el cual posee un algoritmo esencialmente reactivo que tiene como entradas las imágenes proporcionadas por la cámara, los 20 sensores de llama, los sensores de recuadro (que impiden que el robot salga del ambiente de pruebas), los finales de carrera (última línea de defensa contra las colisiones) y los sensores de ultrasonido (que contribuyen al suavizado de la trayectoria y la navegación). Todos estos dispositivos funcionan de manera integrada para recopilar datos del entorno del robot para que puedan ser procesados posteriormente. En cuanto a las salidas, se encuentran el control del puente H para la dirección de los motores y el control del sistema de extinción llamas.

Tercer módulo - sistema para apagar las llamas: en este módulo se incorpora un motor *brushless* de 1000 KV, acompañado con controlador de velocidad de 40 A, debido a los picos de corriente que presentan este tipo de motores al arranque. El motor está acoplado a una hélice de 5 pulgadas, que es la que empuja el aire para poder apagar la flama de las velas de prueba. Es importante señalar que el motor solo se activa cuando se detecta una flama a una distancia de 20 cm del frente del robot.

Finalmente, se puso en marcha el robot en el ambiente controlado, donde fue sometido a difíciles pruebas de evasión de obstáculos, contrarreloj y diferentes alturas de llamas, con el propósito de simular las probables situaciones con las que se podría encontrar en una situación real. El robot fue diseñado para funcionar de manera autónoma.

Un resumen de la metodología se presenta en la Figura 1.

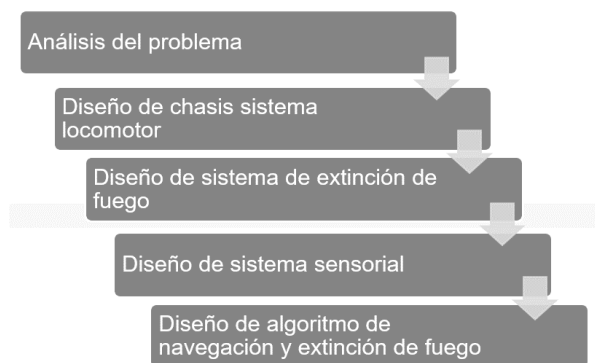


Figura 1. Metodología de diseño del Robot.

3. Resultados y discusión

Se diseñó y se prototipó un robot que tiene las siguientes especificaciones: Sin contar la parte móvil (ruedas y motores), la estructura mecánica del robot se diseñó con tres placas cuadradas de acrílico, unidas mediante cuatro varillas roscadas de 50 centímetros de largo cada una, ubicadas en las esquinas. Para los agarres de los pisos con las varillas de soportes se emplearon arandelas y tuercas con contratuercas, con el fin de mantener la rigidez.

Cada piso de acrílico está separado del anterior a una distancia uniforme de 16.6 cm, esto con el fin de garantizar una estructura rígida y nivelada (Ver figura 2).

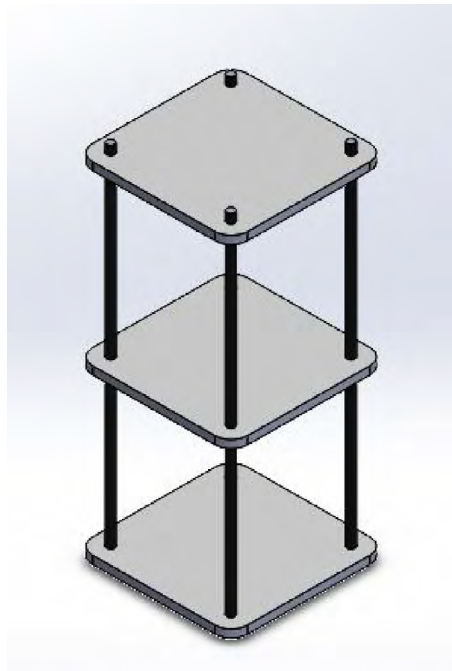


Figura 2. Estructura mecánica del robot.

La estructura debe contar con un sistema que permita configurar la altura de los sensores de llama, con el fin de eliminar los puntos ciegos que estos puedan tener. El funcionamiento del sistema consiste en un conjunto de bases que se acoplan a dos de las cuatro varillas (Figura 3 y 4) y, mediante los arreglos de tuercas y arandelas, es posible modificar su posición según la conveniencia.

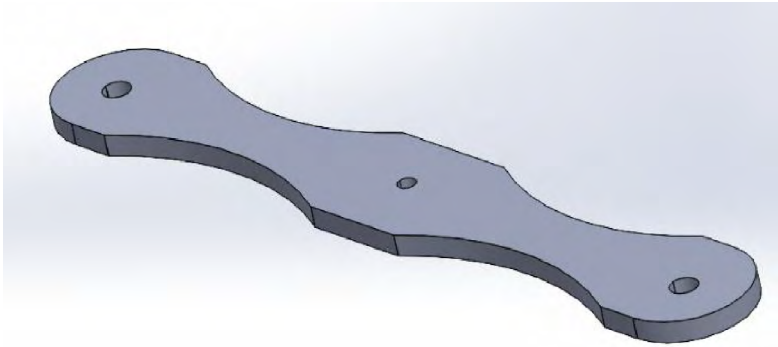


Figura 3. Estructura de los soportes para módulos de sensores de llama.

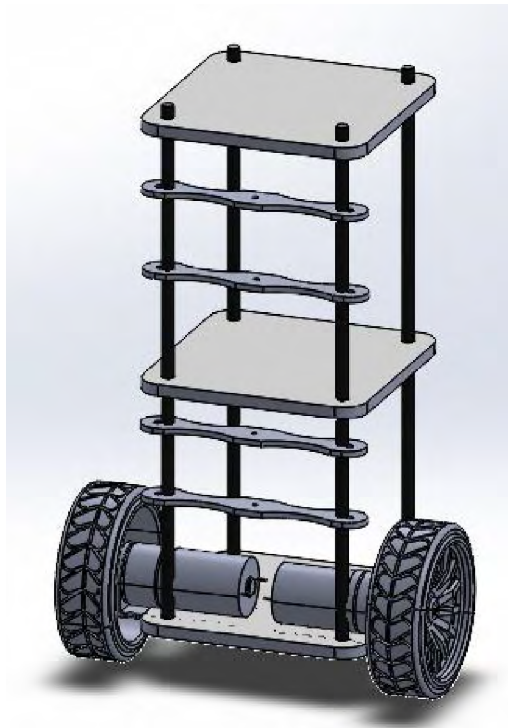


Figura 4. Estructura modular del robot con los soportes para módulos de sensores de llama.

La base del motor *brushless* debe presentar una adecuada orientación, de modo que el aire no llegue a las llamas únicamente desde la parte superior (Figura 5 y 6).

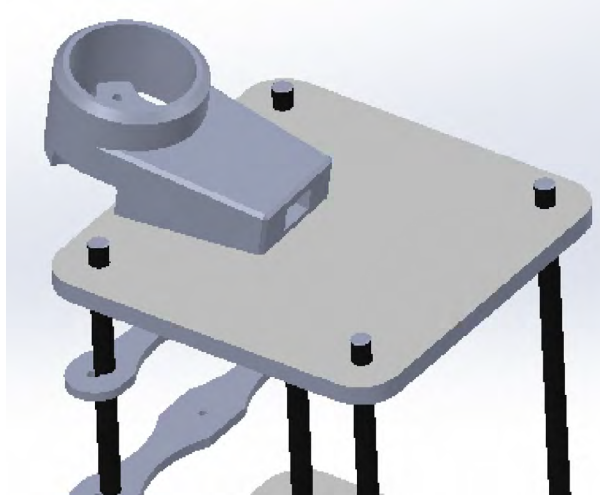


Figura 5. Estructura del robot con base para colocación del motor brushless.

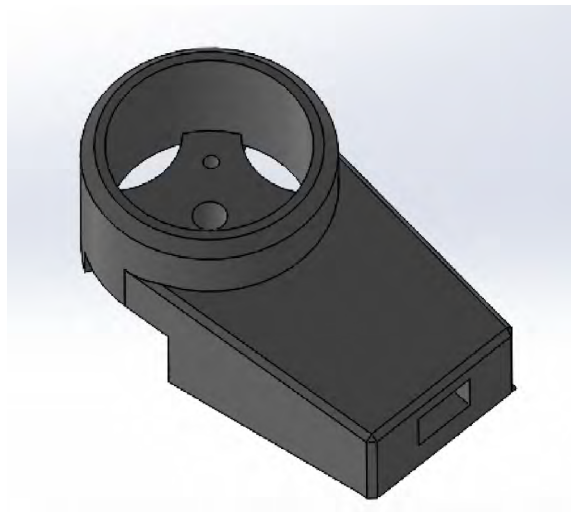


Figura 6. Base para colocación del motor *brushless*.

Para el sistema locomotor se optó por una tracción diferencial, la cual se compone de dos ruedas motrices ubicadas en un eje compartido, impulsadas por motores autónomos, sin contar con ninguna rueda directriz. El robot tiene la capacidad de avanzar o retroceder cuando las ruedas se muevan en la misma dirección y a la misma velocidad. Para efectuar giros, es imprescindible que las ruedas se muevan a velocidades distintas y, cuando la velocidad de giro es constante, pero en sentido contrario, el robot gira sobre sí mismo. Es decir, la dirección y velocidad del robot

están controladas por la diferencia de velocidad en los dos motores independientes, los cuales son controlados por el driver conectado al sistema embebido (Figura 7).

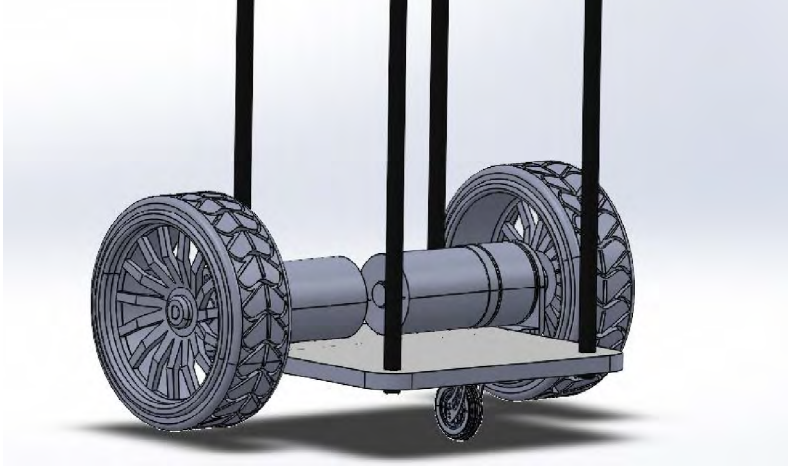


Figura 7. Sistema de locomoción del robot.

El modelo cinemático diferencial del robot puede verse en la Figura 8. Este modelo cinemático se describe, según Vargas Muñoz y Pérez Salazar [12], de la siguiente manera: el robot se puede mover con una velocidad lineal (V), definida como el promedio de las velocidades por el radio de sus ruedas. Cuando las velocidades aplicadas en las ruedas son diferentes, el robot móvil realiza un recorrido no lineal y utiliza el teorema de Pitágoras para encontrar el ángulo de dirección de la trayectoria:

$$V = R * \left(\frac{V_R + V_L}{2} \right) \quad (1)$$

$$V_x = R * \left(\frac{V_R + V_L}{2} \right) * \cos \theta \quad (2)$$

$$V_y = R * \left(\frac{V_R + V_L}{2} \right) * \sin \theta \quad (3)$$

Para que el robot tenga un movimiento rotacional en su mismo centro de masa, las velocidades deben ser iguales con magnitudes diferentes y, así, se define la velocidad angular (W):

$$W = R \left(\frac{V_r - V_l}{L} \right) \quad (4)$$

Las ecuaciones anteriores se relacionan con el hecho de que la integral de la velocidad corresponde a la posición. De esta manera, la integral de la velocidad en el eje X determina la posición X y, de igual forma, con la velocidad en Y y la velocidad angular W.

$$\dot{x} = V * \cos \theta \quad (5)$$

$$\dot{y} = V * \sin \theta \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = W \quad (7)$$

Como resultado de las ecuaciones anteriores se llega al modelo cinemático y al sistema de referencia inercial del robot móvil.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R * \left(\frac{V_r + V_l}{2} \right) \\ R * \left(\frac{V_r - V_l}{L} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

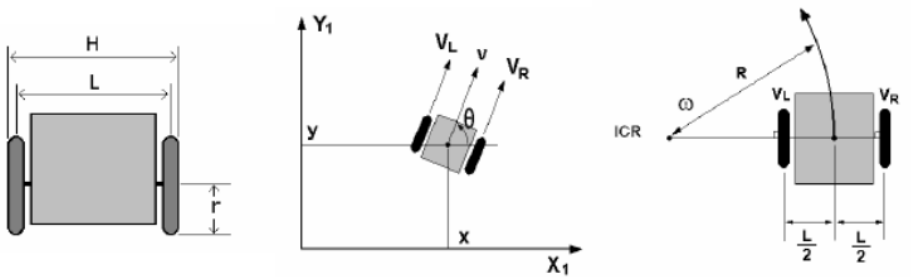


Figura 8. Modelo cinemático diferencial de un robot móvil de dos ruedas según López Valverde [13].

Las llantas constan de dos piezas: una interna y otra externa, unidas por compresión, dado que el diámetro del anillo exterior es ligeramente menor que el del anillo interior. La parte interna está fabricada en plástico rígido y resistente (ABS), con la forma del eje del motor para permitir su

acople, además de un espacio para un piñón prisionero que asegure la unión (Figura 9).

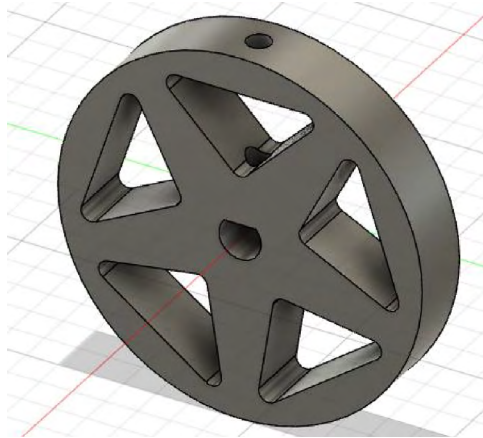


Figura 9. Pieza interna de las llantas.

El anillo exterior está inspirado en los neumáticos sin aire que la reconocida empresa de llantas para coches Michelin ha desarrollado durante años. Estos neumáticos, a diferencia de los convencionales utilizados en los autos, están hechos de un material elástico que permite deformaciones y garantiza un buen agarre al piso (Figura 10). Para recrear estas propiedades, el diseño se imprimó en TPU, un polímero con propiedades elásticas. Aprovechando estas propiedades del material, las dos piezas se pueden ensamblar sin necesidad de ningún tipo de pegamento o sistema de sujeción.



Figura 10. Anillo exterior de la llanta.

El resto de los soportes de baterías y sensores como los ultrasónicos, finales de carrera e infrarrojos, se crearon en impresión 3D y se presentan en la Figura 11.

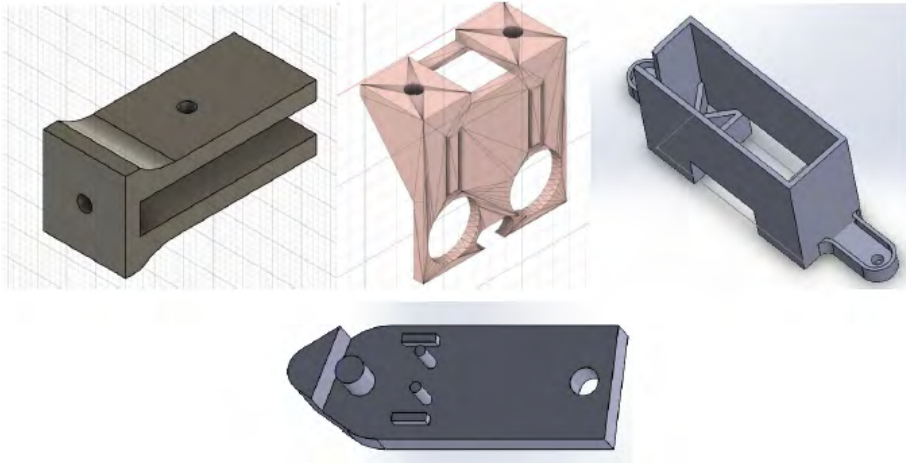


Figura 11. Soportes de las baterías y los diferentes sensores del robot.

Finalmente, se muestra en la Figura 12 un esquema general de la estructura modular incluyendo los soportes de los sensores de llama.

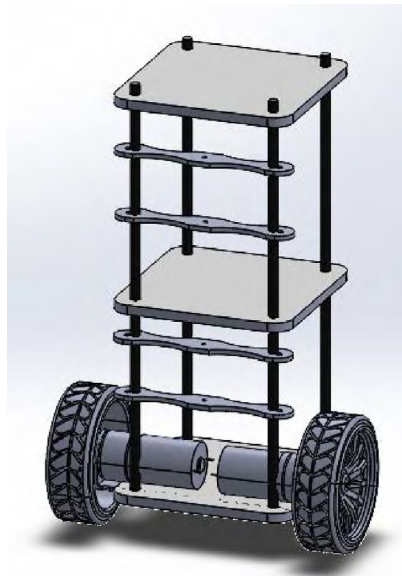


Figura 12. Estructura modular del robot con los soportes de los módulos de llama.

El robot completo funciona a través de señales digitales, razón por la cual cada uno de los sensores y *drivers* necesita ser cableado directamente al Arduino, en este caso particular un Arduino Mega. En cuanto a los sensores, se utilizaron algunos de llama con salida digital y calibración de distancia con un rango de 1 a 200 cm, de ultrasonido con un alcance de 200 cm regulables por *software* y de línea infrarrojos con ajuste análogo auto réflex. Asimismo, se empleó un controlador de velocidad o ESC para el control del motor *brushless* y un puente H L298 con capacidad de 2 A por canal, para manejo de los motores (Figura 13).

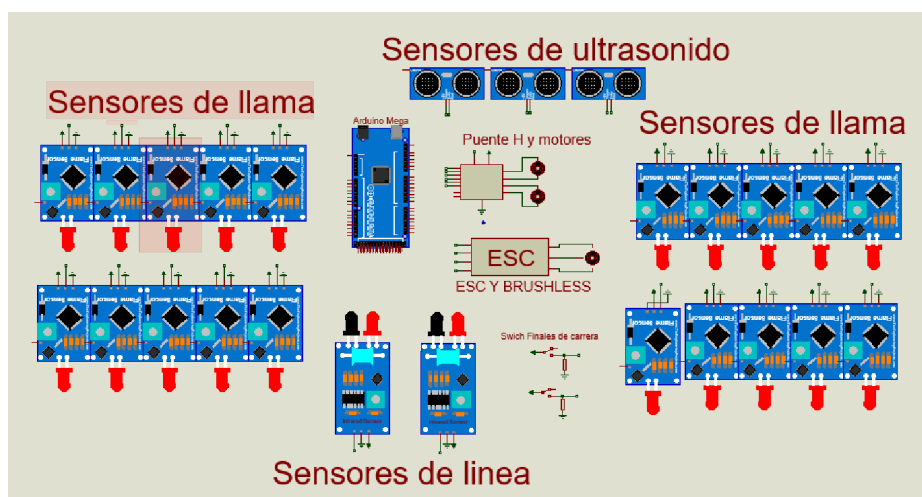


Figura 13. Partes electrónicas que componen el robot.

El sensor de ultrasonido HC-SR04 (Figura 14) es una herramienta en el ámbito de la electrónica y la robótica. Se trata de un dispositivo de medición de distancias fundamentado en el principio de la propagación y reflexión de ondas ultrasónicas. A través de la emisión de pulsos ultrasónicos, este sensor crea una interacción con los objetos circundantes y, posteriormente, cuantifica la distancia entre el sensor y el objeto en cuestión a partir de la medición del tiempo necesario para que los pulsos reflejados regresen al sensor. Esta metodología le confiere una capacidad de medición precisa, con un rango operativo típico de 2 a 400 centímetros y una precisión estimada de aproximadamente 3 milímetros. Para su implementación, se requiere la asignación de dos pines de control en un microcontrolador, junto con una fuente de alimentación nominal de 5 voltios.



Figura 14. Sensor de ultrasonido HC-SR04.

No obstante, es imperativo subrayar que, pese a la extensa difusión y asequibilidad que caracterizan al HC-SR04, este dispositivo adolece de ciertas limitaciones inherentes que potencialmente inciden en la fiabilidad de las mediciones obtenidas. Estas limitaciones, manifestadas en la forma de variabilidad en los datos medidos, se derivan de múltiples factores, incluyendo condiciones ambientales, la textura y la geometría de los objetos detectados, y la disposición angular del sensor. Para reducir esta variabilidad y mitigar las inexactitudes, se implementó un filtro de media móvil exponencial (EMA, por sus siglas en inglés). Esta técnica de procesamiento de señales contribuye a mejorar la precisión y suavidad de las mediciones, generando datos más confiables y estables en diversas aplicaciones.

El filtro EMA es una técnica de procesamiento de señales que se utiliza para suavizar y mejorar la precisión de las mediciones. Su base matemática es relativamente sencilla y se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$S_t = (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} + \alpha \cdot X_t$$

Donde:

- S_t es el valor suavizado en el tiempo t .
- S_{t-1} es el valor suavizado en el tiempo $t-1$.
- X_t es el valor de la medición en el tiempo t .
- α es la constante de suavizado, que varía entre 0 y 1.

A continuación, se presentan las gráficas que ilustran el impacto de la variación de la constante de suavizado en el comportamiento del filtro de media móvil exponencial (EMA) aplicado a las señales de distancia proporcionadas por el sensor ultrasónico HC-SR04. Estas gráficas se elaboraron con el propósito de analizar cómo la modificación de la

constante (α) afecta la capacidad de respuesta y suavidad del filtro EMA en la suavización de las mediciones de distancia. La inclusión de estas representaciones visuales contribuye a una comprensión más profunda de la dinámica y el rendimiento de este filtro en el contexto de aplicaciones específicas que requieren un equilibrio cuidadoso entre la capacidad de respuesta y la reducción de ruido en los datos.

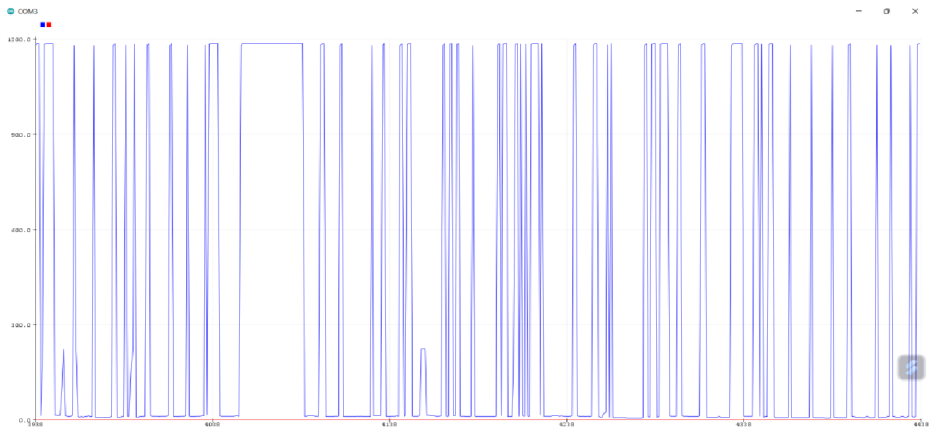


Figura 15. Respuesta del filtro EMA cuando $\alpha = 0$.

En caso de que la constante de suavizado (α) en la implementación del filtro de media móvil exponencial (EMA) se fije en 0, esto conlleva a omisión completa de la medición más reciente en el proceso de suavización de los datos. En términos más concretos, el filtro EMA se convierte en un filtro de media móvil simple (SMA), en el cual todos los puntos de datos previos son igualmente ponderados en la estimación del valor suavizado. El resultado es una respuesta insensible a las fluctuaciones en los datos y la inobservancia de las mediciones más recientes se evidencia en la Figura 15, donde la línea roja del filtro se mantiene en un valor constante de cero, en marcado contraste con la variación evidente de la línea azul que representa las mediciones de distancia a lo largo del tiempo.

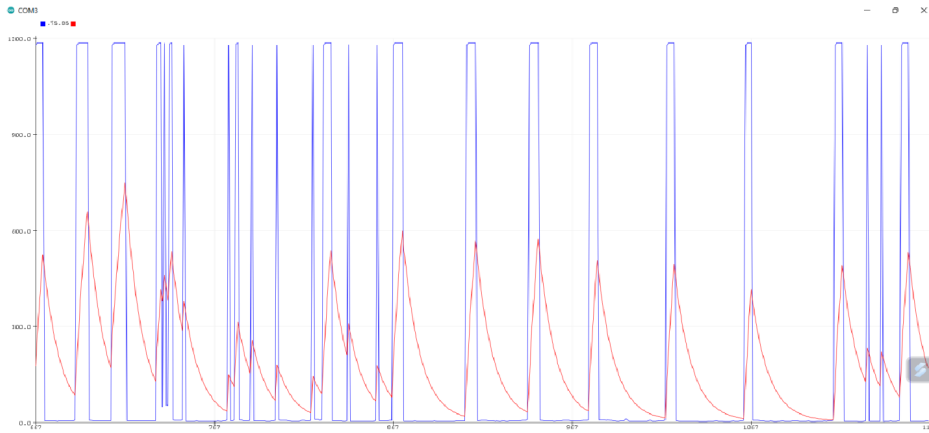


Figura 16. Respuesta del filtro EMA cuando $\alpha = 0.1$.

Cuando la constante de suavizado (α) en la implementación del filtro de media móvil exponencial (EMA) se establece en 0.1, se enfatiza la ponderación más significativa de las mediciones recientes en el proceso de suavización de los datos, aunque aún se retiene una parte sustancial de la información histórica. Es decir, el filtro EMA privilegia la información actual sin obviar las mediciones previas.

Un valor de (α) igual a 0.1 implica que aproximadamente el 10 % del peso total en la estimación del valor suavizado proviene de la medición más reciente, mientras que el 90 % restante se basa en mediciones previas. Este comportamiento se puede apreciar visualmente en la Figura 16, donde la línea roja representa la señal del filtro EMA y la línea azul refleja las mediciones de distancia a lo largo del tiempo. La gráfica ilustra de manera clara cómo el filtro EMA con ($\alpha = 0.1$) genera una respuesta suave que da preferencia a las mediciones recientes, pero aún incorpora una parte significativa de datos históricos en la estimación del valor suavizado. Este enfoque equilibrado se utiliza para suavizar y estabilizar las mediciones de distancia, lo que resulta en una respuesta más controlada y menos sensible a las fluctuaciones en los datos.

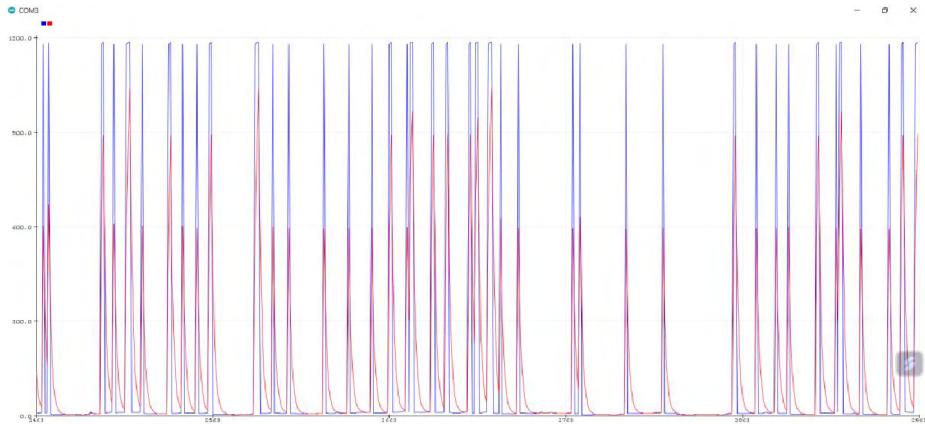


Figura 17. Respuesta del filtro EMA cuando $\alpha = 0.5$.

Cuando se configura la constante de suavizado () en el filtro de media móvil exponencial (EMA) en 0.5, se establece un equilibrio óptimo en la ponderación de las mediciones más recientes y las anteriores en el proceso de suavización de los datos.

Un valor de () igual a 0.5 indica un escenario donde se asigna la misma importancia tanto a las mediciones recientes como a las históricas en la estimación del valor suavizado. En términos concretos, el 50 % del peso total en la estimación se deriva de la medición más reciente, mientras que el 50 % restante proviene de mediciones previas. Este equilibrio es evidente en la respuesta característica del filtro EMA, que proporciona una suavización de moderada intensidad y una respuesta lo suficientemente ágil para atender las fluctuaciones presentes en los datos.

La elección de ($= 0.5$) generalmente se implementa en situaciones donde es fundamental alcanzar un equilibrio entre la capacidad de respuesta a las variaciones en los datos y la disminución del ruido en la señal suavizada. Esto hace que el filtro EMA con esta constante sea apropiado para aplicaciones en las que se demanda una respuesta suave y, al mismo tiempo, no tan lenta como la proporcionada por un valor de () más bajo. La visualización de este equilibrio se aprecia claramente en la Figura 17, donde la línea roja representa la señal generada por el filtro EMA y la línea azul ilustra las mediciones de distancia a lo largo del tiempo.

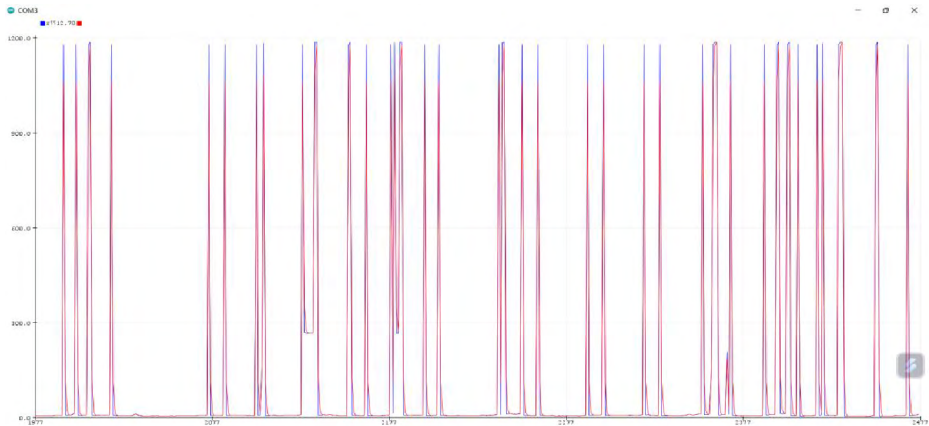


Figura 18. Respuesta del filtro EMA cuando $\alpha = 0.9$.

Cuando se configura la constante de suavizado (α) en el filtro de media móvil exponencial (EMA) en un valor de 0.9, se prioriza de manera significativa el peso otorgado a las mediciones más recientes en el proceso de suavización de los datos, al tiempo que se minimiza la influencia de las mediciones históricas.

Un valor de α igual a 0.9 refleja un escenario donde alrededor del 90 % del peso total en la estimación del valor suavizado proviene de la medición más reciente, mientras que sólo el 10 % restante se basa en mediciones anteriores. Este enfoque implica que el filtro EMA adopte una postura altamente reactiva hacia las mediciones recientes, lo que genera una respuesta veloz a las fluctuaciones presentes en los datos, aunque con un grado mínimo de suavización.

La elección de $\alpha=0.9$ se aplica en situaciones en las que se busca deliberadamente una respuesta sumamente ágil a cambios en los datos y se acepta una cantidad apreciable de ruido en la señal suavizada. Este enfoque se adecua a aplicaciones en las que la capacidad de respuesta es esencial y las variaciones en los datos no representan un factor crítico. Este comportamiento se ilustra claramente en la Figura 18, donde la línea roja representa la señal generada por el filtro EMA, mientras que la línea azul evidencia las mediciones de distancia a lo largo del tiempo.

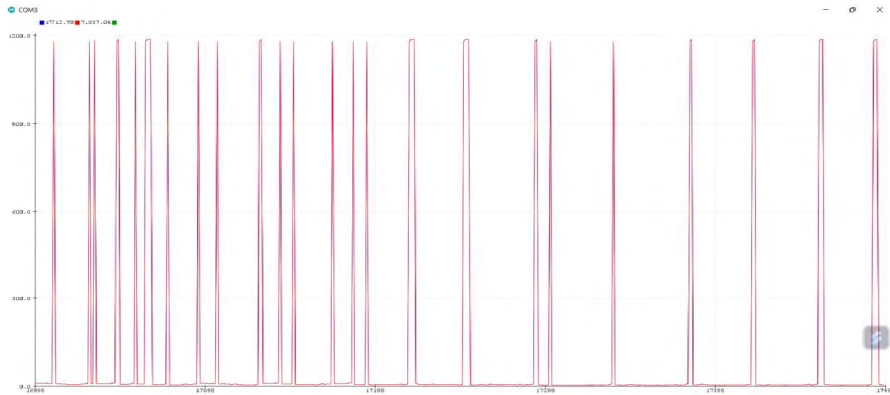


Figura 19. Respuesta del filtro EMA cuando $\alpha = 1.0$.

Cuando se configura la constante de suavizado (α) en el filtro de media móvil exponencial (EMA) en 1.0, el filtro EMA excluye por completo de las mediciones más recientes en el proceso de suavización de los datos, otorgando así prioridad total a las mediciones históricas.

Un valor de (α) igual a 1.0 indica que no se incorpora en absoluto información de las mediciones recientes en la estimación del valor suavizado. En este escenario, el filtro EMA se transforma en un modelo de media móvil simple (SMA), donde todas las mediciones previas son tratadas con igual peso en la estimación, sin distinción de las mediciones más recientes.

La elección de ($\alpha = 1.0$) es poco común, puesto que representa un valor que excluye de manera completa las mediciones más recientes, dando preferencia absoluta a las mediciones históricas en el proceso de suavización de los datos. Como resultado, el filtro EMA no reaccionará a las fluctuaciones actuales en los datos y proporcionará una suavización constante y lenta. Este comportamiento se ilustra en la Figura 19, donde la línea roja representa la señal generada por el filtro EMA, en contraste con la línea azul que refleja las mediciones de distancia a lo largo del tiempo.

Como resultado de la consideración de los datos anteriores, se optó por seleccionar $\alpha=0.5$ como constante de suavizado en el filtro de media móvil exponencial (EMA), basándose en la búsqueda de un equilibrio óptimo entre dos aspectos cruciales en el procesamiento de señales. En primer lugar, esta constante permite mantener una capacidad de respuesta suficientemente ágil del filtro a las variaciones bruscas y sutiles en los datos. Esto es particularmente importante en aplicaciones que requieren seguimiento en tiempo real o respuestas rápidas a cambios en las condiciones del entorno.

Por otro lado, $\alpha=0.5$ también contribuye a la reducción efectiva del ruido en la señal suavizada. La ponderación equitativa de mediciones recientes y anteriores proporciona un nivel moderado de suavización, lo que permite eliminar el ruido de alta frecuencia en los datos, sin eliminar completamente la información relevante. En aplicaciones donde la precisión y la estabilidad de las mediciones son esenciales, este equilibrio juega un papel fundamental.

La incorporación del filtro de media móvil exponencial (EMA) representa una estrategia eficaz para abordar la variabilidad inherente en las mediciones obtenidas con el sensor de ultrasonido HC-SR04. El EMA, una técnica de procesamiento de señales ampliamente utilizada, se basa en la ponderación de los datos de entrada recientes y anteriores, con lo cual se da mayor énfasis a las mediciones más recientes y se reduce progresivamente la influencia de las mediciones más antiguas. Este enfoque de ponderación exponencial asegura que las mediciones se adapten dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno, minimizando así los efectos de los factores que pueden provocar inexactitudes, como ruido eléctrico, fluctuaciones en la superficie del objeto o incluso variaciones en la velocidad del sonido en el aire.

La aplicación del filtro EMA al HC-SR04 puede, por lo tanto, mitigar la variabilidad y las inexactitudes en las mediciones al proporcionar resultados más precisos y estables. La elección de la constante de suavizado debe sopesar cuidadosamente en función de la aplicación particular y las características del entorno, dado que un equilibrio adecuado entre la capacidad de respuesta y la suavidad de las mediciones es crucial para obtener resultados confiables. En consecuencia, la utilización de esta técnica de procesamiento de señales se convierte en una valiosa adición para mejorar la confiabilidad del sensor HC-SR04, en una variedad de aplicaciones en las que la precisión de las mediciones es crítica.

Los sensores de línea y de llama suelen ser de fácil uso, ya que solo requieren la implementación de tres conexiones: alimentación con 5 voltios, tierra y salida digital; en esta última, se representa un uno (1) lógico con 5 voltios y un cero (0) lógico con 0 voltios. En el caso del sensor detector de línea (Figura 20 y 21), esta muestra en la salida un uno (1) lógico cuando detecta el color blanco y muestra un cero (0) cuando detecta el color negro. En el caso de los sensores de llama (Figura 23 y 23) estos detectan una frecuencia de luz infrarroja característica que corresponde a una llama

(Figura 24), expresando esto con un uno lógico a la salida y a un cero lógico en ausencia de dicha llama.

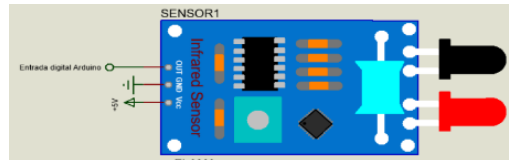


Figura 20. Esquema de conexiones de sensores de línea.



Figura 21. Imagen real de sensores de línea.

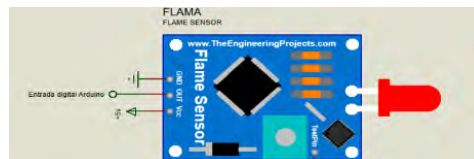


Figura 22. Esquema de conexiones de sensores de llama.



Figura 23. Imagen real de sensores de llama.

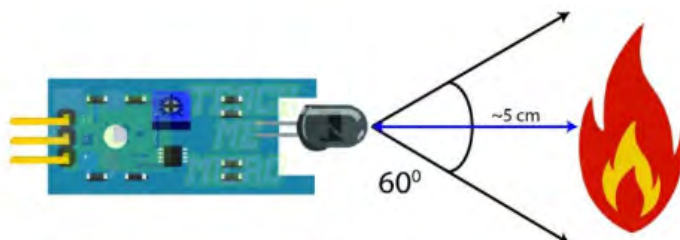


Figura 24. Angulo de detección de sensores de llama.

En el caso del sensor de fin de carrera, se dispone un circuito que, mediante una resistencia de 10 k, conectada a tierra, mantiene la salida en un cero lógico para asegurar la consistencia de la medida. Este circuito es presentado en la Figura 26. Cuando el circuito se cierra, se permite el paso de corriente entre +5 V hacia la entrada digital del Arduino, indicando la presencia de un obstáculo que no fue detectado por los sensores ultrasónicos. Una imagen real del sensor de fin de carrera se muestra en la Figura 27.



Figura 26. Esquema de conexiones del sw de fin de carrera.



Figura 27. Imagen real del sensor de fin de carrera.

El ESC (Electronic Speed Controller), también denominado variador de velocidad (Figura 28) se encarga de generar la señal trifásica para controlar la velocidad del motor *brushless* con el que se realiza la extinción

de llamas. Los cambios de velocidad se regulan mediante una señal PWM generada por el Arduino, en función de la detección o ausencia de la llama.

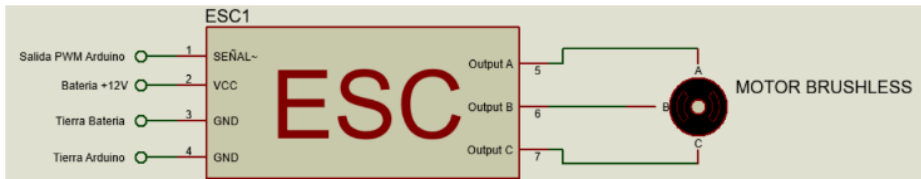


Figura 28. Diagrama de conexión del ESC con el motor brushless.

Para la implementación de este robot se requirió una cantidad considerable de sensores de llama, pues el objetivo es que, por muy pequeña que esta sea, el robot pueda detectarla a una distancia adecuada. Por esta razón, se optó por usar arreglos de sensores de llama de cinco canales (Figura 29), estos dispositivos acoplan cinco sensores infrarrojos en un solo módulo, colocados en un semicírculo cada uno a 30° para cubrir un área de 150° . Se utilizan cuatro de estos arreglos para un total de 20 sensores infrarrojos distribuidos a lo largo de la estructura en su parte delantera. Este módulo tiene la peculiaridad de poder configurarse para entregar una señal de salida analógica o digital; sin embargo, para la aplicación planteada sólo se utilizará la configuración digital.



Figura 29. Arreglo de sensores de flama.

Para acoplar el arreglo de sensores con su soporte (Figura 30), se emplea un tornillo que atraviesa el orificio central del sensor y el correspondiente en el soporte, quedando sujeto mediante una tuerca. Esta configuración se muestra en la Figura 31.

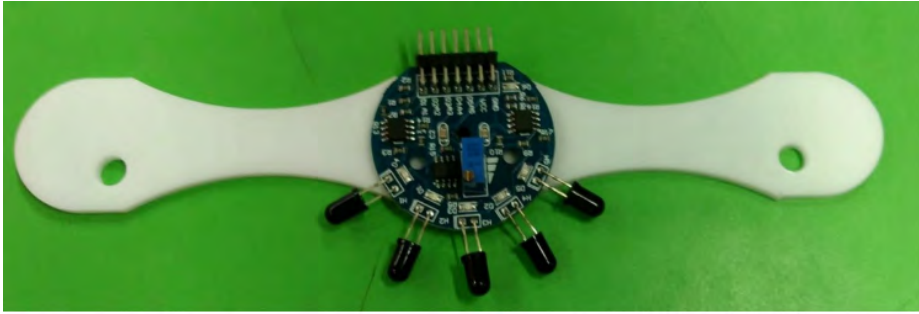


Figura 30. Arreglo de sensores de llama con su soporte.

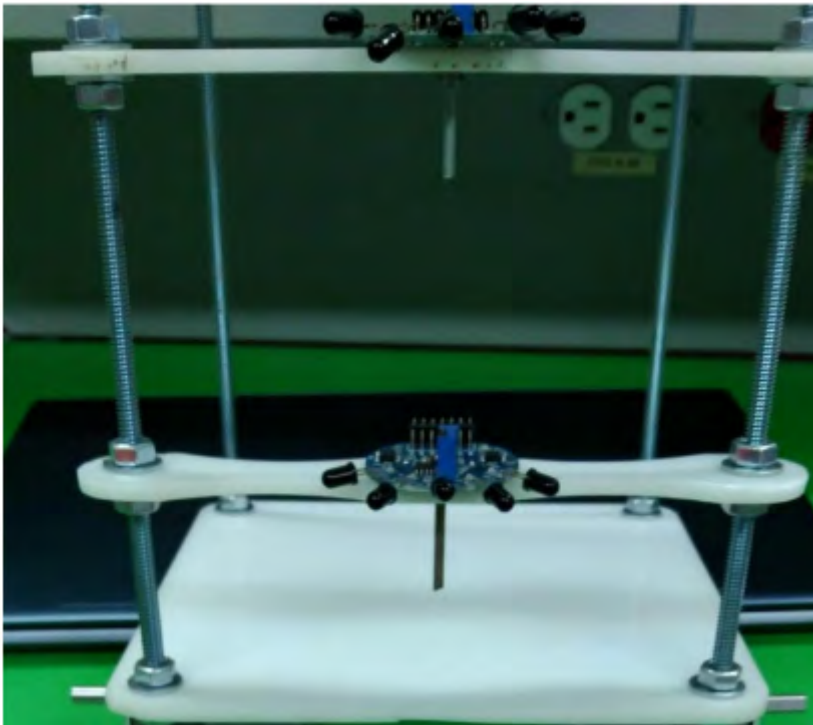


Figura 31. Ensamblaje de los sensores de llama.

La sencillez mecánica del sistema no solo reduce los costos de fabricación, sino que también facilita su mantenimiento, lo que explica su adopción en múltiples aplicaciones robóticas. Este tipo de locomoción se utiliza en robots de exploración que operan en terrenos irregulares, en vehículos autónomos destinados al transporte y la logística, así como en plataformas de investigación y robots de servicio empleados en distintas industrias. Su diseño funcional y adaptable evidencia una combinación equilibrada entre eficiencia, bajo costo y facilidad de implementación. Su capacidad para sortear obstáculos y desenvolverse en terrenos variados lo convierte en una opción excepcional para misiones de exploración, inspección y transporte en entornos desafiantes [14], [15].

Un sistema de locomoción tipo diferencial en un robot móvil se caracteriza por la presencia de al menos dos ruedas motrices independientes, cada una controlada por un motor específico. Estas llantas son fundamentales para la propulsión y el direccionamiento del robot. Para controlarlas y darles dirección de giro se necesita el puente H (Figura 32), también denominado Puente en H. Este componente es esencial en las ingenierías robótica y electrónica dado que despliega una función crítica: controlar la dirección y la velocidad de los motores, como los motores de corriente continua o los motores paso a paso. Su principal cometido radica en posibilitar que un motor gire en ambas direcciones, es decir, hacia adelante y atrás, y en regular la velocidad de rotación del motor. Las aplicaciones de este componente son diversas y abarcan la manipulación de robots móviles, el control de ruedas, movimientos de brazos robóticos en la industria y la regulación de la velocidad en motores eléctricos en vehículos y drones. Además, es común en proyectos educativos y de bricolaje en el ámbito de la robótica y la electrónica, debido a que se emplea en la construcción de robots caseros y vehículos controlados a distancia.



Figura 32. Puente H de referencia L298N.

El módulo L298N, un puente H ampliamente utilizado en robótica y en electrónica, se destaca por su capacidad para controlar la dirección y la velocidad de motores de corriente continua (DC). Con dos canales independientes, puede manejar corrientes de hasta 2A por canal, lo que le otorga versatilidad en diversas aplicaciones. Su sistema de protección térmica integrada previene el sobrecalentamiento, garantizando una mayor durabilidad. El control se logra mediante señales desde microcontroladores, lo que permite el mando preciso de la dirección y velocidad del motor. Esto lo hace adecuado para proyectos de robótica, vehículos controlados a distancia y automatización. El L298N funciona como un puente H conformado por cuatro transistores (Figura 33), lo que posibilita el flujo de corriente en ambas direcciones del motor y facilita su integración y uso eficiente en diferentes aplicaciones diversas.

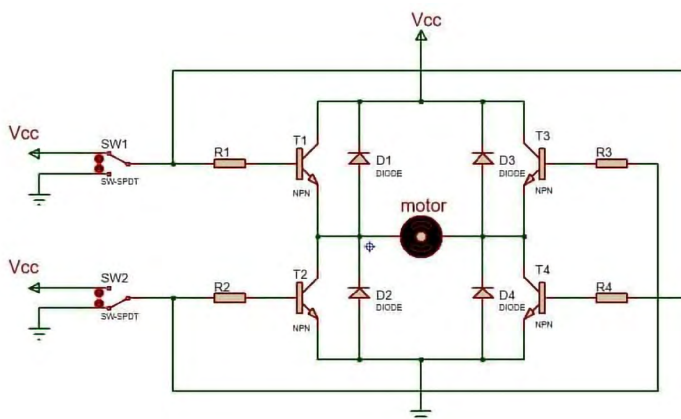


Figura 33. Plano esquemático de conexión L298.

En este robot, se usó un sistema de visión artificial como herramienta de navegación. Además, se incorporó un sistema de visión auxiliar para la evaluación de las trayectorias del robot en ambiente controlado.

En el caso del sistema de visión para navegación, se utilizó la cámara mostrada en la Figura 34, con video Full HD (1080p) a 30 fps, enfoque automático y corrección de iluminación automática (RightLight 2 o 3).



Figura 34. Cámara sistema de visión para navegación.

Por otra parte, el sistema de visión auxiliar para la evaluación de las trayectorias del robot se compone de una cámara con sensor de imagen Sony IMX415, lente delantero y trasero de 6 cristales + 4 cristales, ángulo de 170 grados + 140 grados, apertura F1.6 + apertura F2.0. Esta cámara se muestra en la Figura 35.



Figura 35. Cámara sistema de visión para evaluación de trayectorias.

Para la locomoción correcta del robot es necesario implementar un algoritmo de navegación. Según Hu y Assaad [16], este tipo de algoritmo es el encargado de la planificación de trayectorias y de llevar al robot de un punto de inicio a uno final. Este componente es esencial en los sistemas de robótica móvil, dado que permite al robot moverse de manera autónoma y responder en tiempo real a los cambios y obstáculos del entorno

durante su recorrido. Mediante el uso de datos provenientes de diferentes sensores y mapas, el sistema de navegación determina constantemente la mejor ruta posible con lo cual se garantiza que el desplazamiento sea eficiente y seguro.

La navegación autónoma implica mucho más que simplemente seguir una ruta predefinida: requiere que el robot interprete su entorno, localice su propia posición y adapte sus decisiones a situaciones dinámicas, como la aparición de obstáculos imprevistos o cambios en el entorno. Además, los algoritmos modernos suelen incorporar elementos de percepción, localización y toma de decisiones sofisticadas, permitiendo a los robots operar de manera fiable en entornos complejos y desconocidos sin la intervención directa de un operador humano como señalan Wichmann, Okkalioglu y Korkmaz [17].

Generalmente, estos algoritmos se basan en métodos clásicos de planificación como los grafos de visibilidad, diagramas de Voronoi, modelado del espacio libre, descomposición en celdas, campos potenciales y comportamiento reactivo. Según Jiménez, Moreno, González y Díaz [18], estos últimos son especialmente útiles en tareas en las que no se dispone de un mapa confiable del terreno o cuando la información del entorno es incompleta.

Para el caso específico de este robot se usó de un algoritmo de navegación reactivo que se basa en la información suministrada por los sensores del robot. De acuerdo con el estado de estos sensores, se desencadenan acciones simples como avanzar, retroceder o girar. Este enfoque tiene una capa deliberativa mínima o inexistente, por lo que se emplea principalmente en tareas de baja complejidad, como la evasión de obstáculos en entornos dinámicos (ver Figura 36).

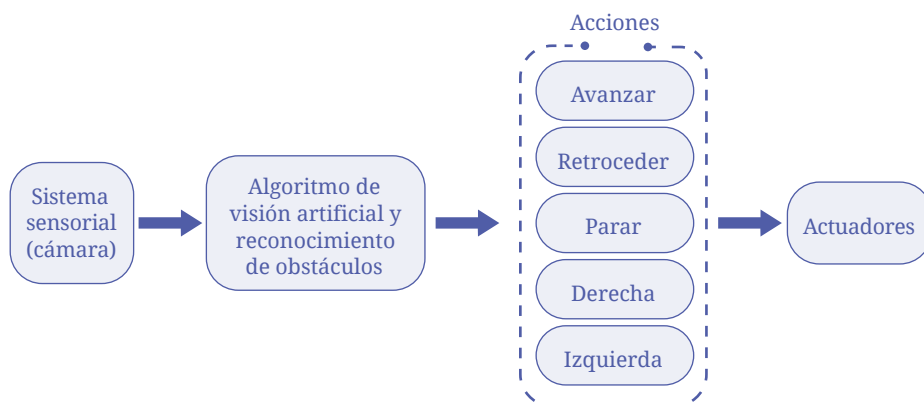


Figura 36. Diagrama de flujo del algoritmo de navegación reactivo básico.

Entre las ventajas de los algoritmos reactivos se encuentran sus bajos requerimientos computacionales, la facilidad de desarrollo modular y el hecho de que no requieren un modelo del entorno para su implementación. Dentro de los algoritmos reactivos se encuentran los algoritmos basados en campos potenciales, descritos por Durán Perea [19], los cuales tratan al robot como una partícula influenciada por campos artificiales generados por los elementos del entorno y por el objetivo final. En este modelo, se asignan campos de repulsión a los obstáculos y un campo de atracción a la meta.

Cada obstáculo emite un campo de repulsión y, al interactuar con los campos generados por el robot y el objetivo, se produce una fuerza resultante que guía el movimiento del robot (ver Figura 37).

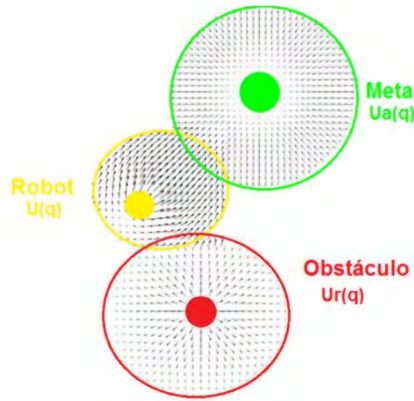


Figura 37. Representación de la interacción de campos potenciales artificiales.

El potencial total que actúa sobre el robot en una posición q , denotado como $\mu(q)$, se define mediante la siguiente ecuación:

Potencial incidente sobre el robot:

$$\mu(q) = \mu_a(q) + \mu_r(q)$$

A partir de este potencial, la fuerza incidente se calcula como:

Fuerza incidente sobre el robot:

$$F = -\nabla\mu(q)$$

Esto significa que la fuerza resultante sobre el robot es la suma de las fuerzas de atracción F_a generadas por la meta y las fuerzas de repulsión F_r generadas por los obstáculos (Figura 38). Esta relación se expresa en la siguiente fórmula:

Sumatoria de fuerzas en el robot:

$$F(q) = \sum F_a + \sum F_r$$

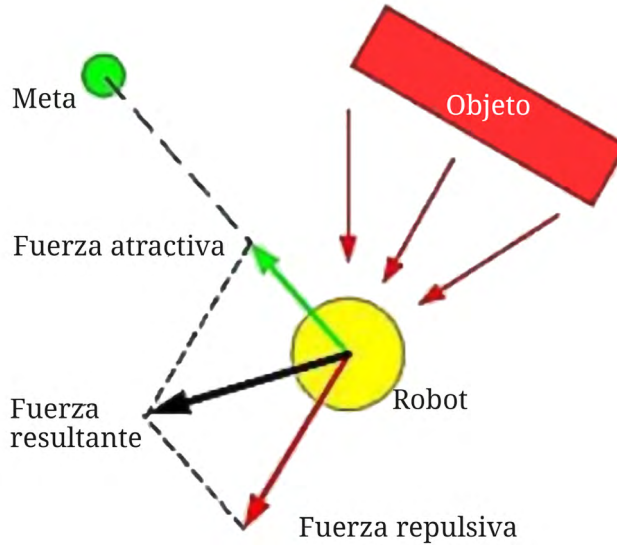


Figura 38. Modelo de fuerzas de campos potenciales.

Para las pruebas de navegación se utilizó un ambiente controlado de pruebas que consistió en un corredor de 1.1 m de ancho y 4 m de largo, el cual contiene tres obstáculos físicos (un cubo, un cilindro y un poliedro) distribuidos a lo largo del mismo. Adicionalmente, el ambiente estaba delimitado con un par de cintas negras a los lados para evitar que el robot saliera de los límites (ver Figura 39). Se realizaron 32 pruebas con el algoritmo de navegación reactivo y los objetos reales, las cuales arrojaron las tendencias mostradas en la Figura 40.

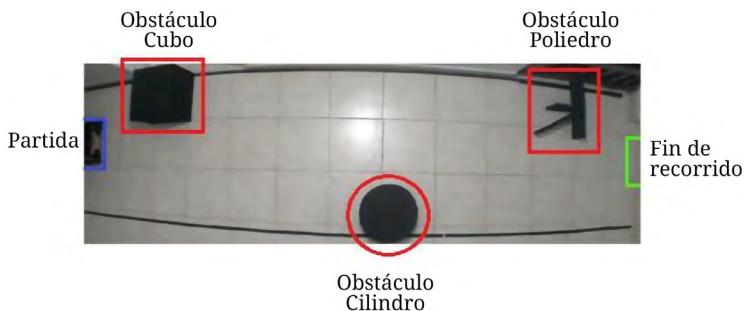


Figura 39. Ambiente controlado de pruebas de navegación.

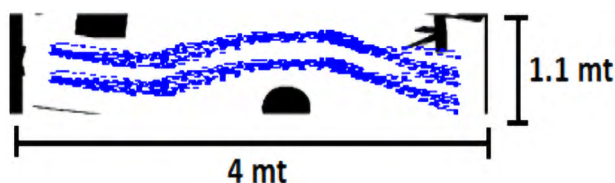


Figura 40. Gráficas de trayectorias de robot con objetos reales empleando el algoritmo de navegación reactivo.

En la Figura 40 se puede apreciar una marcada tendencia en el comportamiento del robot (visto en color azul), donde el primer y segundo obstáculos son franqueados sin problemas. No obstante, en el tercer obstáculo (poliedro) es visible un acercamiento excesivo.

Para las pruebas de funcionamiento general se trabajó en un ambiente controlado (Figura 41), descrito de la siguiente manera: para simular un incendio en medio de los cuatro círculos blancos, se colocó una vela de mechero alimentada con combustible, a diferentes alturas que iban de 10 a 45 cm, cubiertas con paredes para dificultar su detección. El robot de manera autónoma debe ser capaz de esquivar los obstáculos y encontrar las fuentes de llama y extinguirlas sin entrar en contacto directo. En el código, el robot se configura para que navegue por el recuadro negro a una velocidad moderada con el objetivo de que en el momento que pase cerca de una de las velas se dirija hacia ella y active el motor *brushless* para apagar la llama.

En todas las pruebas realizadas (Figura 42), el robot, de forma autónoma, detectó y apagó todas las llamas con una pequeña cantidad de contactos tanto con los obstáculos como con las velas.

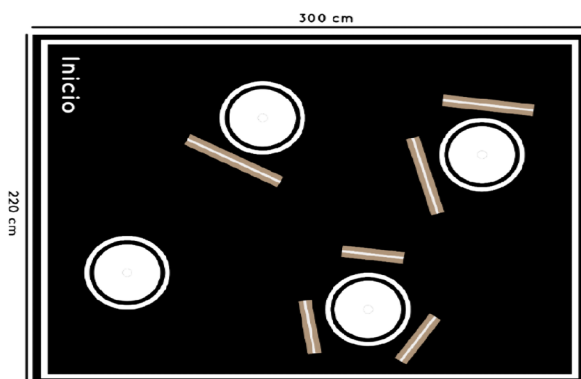


Figura 41. Campo de pruebas para apagar las llamas.



Figura 42. Prueba de desempeño del robot.

Finalmente, en la Figura 43 puede apreciarse el robot montado con todas sus partes.

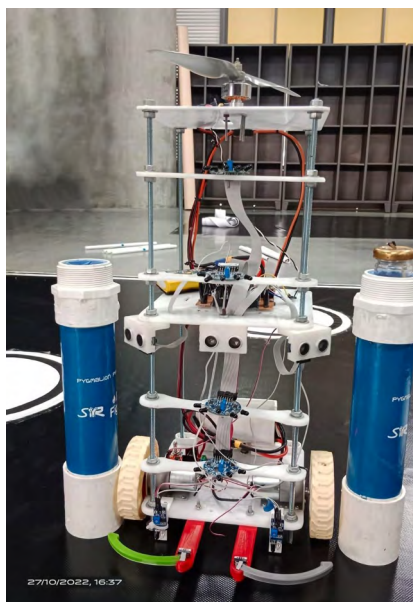


Figura 43. Robot implementado.

4. Conclusiones

El desarrollo e implementación del robot autónomo demuestra que es posible mejorar, de manera significativa, la detección y extinción temprana de incendios en entornos controlados. La autonomía y la capacidad de reacción del prototipo contribuyen a minimizar los tiempos de respuesta, lo cual resulta fundamental para reducir los daños materiales y los riesgos para la vida humana.

El sistema logrado integra de forma exitosa varios sensores y algoritmos de procesamiento, lo que permite que el robot identifique, localice y actúe sobre focos de incendio con precisión y eficiencia. Esto resalta la importancia de la interdisciplinariedad en la robótica aplicada a la gestión de emergencias y refuerza el potencial de escalar y adaptar la solución a diferentes ambientes.

El prototipo desarrollado sienta las bases para futuras optimizaciones, como el aumento de la autonomía energética, el perfeccionamiento de la navegación y la incorporación de inteligencia artificial para una toma de decisiones más sofisticada. Además, el enfoque presentado se puede adaptar a escenarios industriales y habitacionales, lo cual evidencia su versatilidad y el impacto positivo que podría tener en la prevención de desastres.

Referencias

- [1] J. C. Muñoz, *Diseño preliminar de un robot extintor de incendios*, University of Technology, Finlandia, 2009.
- [2] T. D. Smith, C. Mullins-Jaime, M. A. Dyal, and D. M. DeJoy, «Stress, burnout and diminished safety behaviors: An argument for Total Worker Health® approaches in the fire service», *Journal of safety research*, vol. 75, pp. 189–195, 2020.
- [3] J. W. Regan, «Heat release rate characterization of NFPA 1403 compliant training fuels» *Fire Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 1847–1867, 2021.
- [4] E. Macias-Garcia, D. Galeana-Perez, J. Medrano-Hermosillo, and E. Bayro-Corrochano, «Multi-stage deep learning perception system for mobile robots» *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 191–205, 2021.
- [5] S. Martínez-Rozas, R. Rey, D. Alejo, D. Acedo, J. A. Cobano, A. Rodríguez-Ramos, and F. Caballero, «An aerial/ground robot team for autonomous fire-fighting in urban GNSS-denied scenarios», *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Philadelphia, PA, USA, pp. 10432–10438, 2022.
- [6] D. H. Lee, T. Huynh, Y. B. Kim, and C. Soumayya, «Motion control system design for a flying-type firefighting system with water jet actuators» *Actuators*, vol. 10, no. 10, p. 275, oct. 2021.

- [7] L. Wang, Q. Chen, and S. Liu, «Artificial Intelligence and Mobile Robots for Wildfire Detection and Management» *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, p. 2298, 2020.
- [8] J. Kim, H. Park, and S. Lee, «Multi-Agent Systems for Wildfire Detection and Monitoring» *Journal of Field Robotics*, vol. 36, no. 6, pp. 1123–1141, 2019.
- [9] A. Rodríguez, R. Martínez, and M. García, «Deep Learning-Based Fire Detection in UAV Images for Wildfire Monitoring» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67878–67888, 2021.
- [10] P. Kim, J. Lee, and H. Kim, «Autonomous Firefighting with Mobile Robots Using Reinforcement Learning» *International Journal of Robotics Research*, vol. 41, no. 1, pp. 3–22, 2022.
- [11] X. Zhang, Y. Wang, and Z. Li, «Fire Detection and Suppression by Mobile Robots in Industrial Environments» *Automation in Construction*, vol. 114, p. 103184, 2020.
- [12] J. L. Vargas Muñoz and P. E. Perez Salazar, «Diseño de un robot móvil con tracción diferencial para seguimiento de trayectorias,» in *Memorias del Congreso Internacional de Ciencia e Ingeniería*, Universidad de los Llanos, 2020. [Online]. Available: https://cici.unillanos.edu.co/media2020/memorias/CICI_2020_paper_125.pdf.
- [13] A. López Valverde, «Sistema locomotor y de localización de un microrobot (EUROBOT 2009) (Proyecto fin de carrera)» Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2009. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6827>.
- [14] J. C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Berlin, Germany: Springer, 2012.
- [15] B. Siciliano, O. Khatib, and P. Rocco, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd ed. Cham, Switzerland Springer, 2020.
- [16] X. Hu and R. H. Assaad, «The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector: Applications, robotic platforms, sensors, and algorithms» *Expert Systems with Applications*, vol. 232, p. 120897, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120897>.
- [17] A. Wichmann, B. D. Okkalioglu, and T. Korkmaz, «The integration of mobile (tele) robotics and wireless sensor networks: A survey» *Computer Communications*, vol. 51, pp. 21–35, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.06.005>.
- [18] F. J. Jiménez, J. C. Moreno, R. González, and F. R. Díaz, «Sistema de visión de apoyo a la navegación de un robot móvil en invernaderos,» in *XXIX Jornadas de Automática*, 2010, pp. 3–5.
- [19] R. Durán Perea. Planificación de un robot móvil holonómico con controlador borroso para el seguimiento de paredes basado en fuerzas de repulsión de campo de potencial artificial y coordinación con evitador de obstáculos, Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2018.

Los modelos de gobernanza como alternativa de fortalecimiento de la industria 4.0 en el desarrollo de *software*

Julián Alberto Patiño Murillo¹, Cristian Dario Pimienta Ruiz²

1. Introducción

El término «Industria 4.0», también denominado Cuarta Revolución Industrial, se utilizó inicialmente para referirse a la estrategia de alta tecnología de Alemania, subtitulada «el éxito del desempeño económico alemán» y, desde entonces, se ha extendido en el ámbito mundial. En 2014, Deutsche Bank publicó un informe de investigación titulado «Actualización de las capacidades industriales de Alemania en el horizonte» [1], en el que se precisa que la Industria 4.0 abarca todas las áreas de la revolución tecnológica, incluidas Big Data, internet de las cosas, comunicación entre máquinas (*machine to machine*, M2M) y conceptos inteligentes (ciudades, logística, fabricación, etc.) [2]. En términos generales, la Industria 4.0 busca aumentar la eficiencia mediante la integración de inteligencia electrónica (automatización) en un número creciente de sistemas, con el objetivo de lograr operaciones más rentables [3], [4]. Además, cubre todas las áreas de la industria donde se integran las tecnologías de automatización, como la automoción, la alta tecnología, el transporte y la logística, la electrónica y el desarrollo de tecnologías médicas avanzadas [5], [6].

Por otro lado, la industria del departamento de Antioquia, concentrada principalmente en la ciudad de Medellín y su área metropolitana, tampoco es ajena a esta realidad mundial. Según datos de la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia [7], en 2020, los principales retos de las pymes del municipio, que representaban cerca del 60 % de la economía del de-

1 Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia, julian.patino@pascualbravo.edu.co

2 SENA, Colombia, cdpimientar@sena.edu.co

partamento, estaban relacionados con: i) la actualización tecnológica, ii) a la generación de capacidades de innovación al interior de las empresas y iii) contar con una oferta institucional de servicios empresariales diferenciados que den respuesta a las dificultades o limitantes en la operación y sostenibilidad de las pymes.

En virtud de lo anterior, la región ha buscado responder a estos retos mediante el fortalecimiento de sus capacidades en torno a la industria 4.0, con el fin de proyectarse como una región inteligente, tal como lo establece la Agenda departamental de competitividad para la subregión del área metropolitana de Medellín y sus alrededores [8]. Como parte de este reto, el SENA, desde su perspectiva de desarrollo institucional, ha incorporado la transformación digital y el fortalecimiento del uso de las TIC para soportar la estrategia institucional y los retos que trae consigo la cuarta revolución industrial [9]. Esta dinámica encuentra en el territorio una oportunidad al contar con una de sus sedes en la ciudad de Medellín, lo que resalta el creciente reconocimiento que la llamada Industria 4.0 ha logrado en el ámbito local hasta posicionarse como un asunto importante en los ejercicios de planeamiento estratégico de las organizaciones. No obstante, factores como la conectividad, la tasa de retorno de la inversión y la cultura del cambio y la cualificación del talento humano, siguen siendo retos significativos para su implementación [10].

Las nuevas realidades en torno a la Cuarta Revolución Industrial promoverán, en el corto y mediano plazo, la articulación coherente y la integración de los procesos de producción y apropiación del conocimiento socialmente relevantes para la innovación disruptiva, con entornos en los que el futuro del trabajo o el trabajo del futuro, entrarán en nuevas redefiniciones y, probablemente, estos esfuerzos se enfoquen en áreas que aún no existen [11]. Estas transformaciones impulsarán el surgimiento de nuevos negocios para fortalecer la economía; en consecuencia, si el empleo cambia, las habilidades y las capacidades para desarrollarlo también deberán adaptarse a esta lógica de cambio [12].

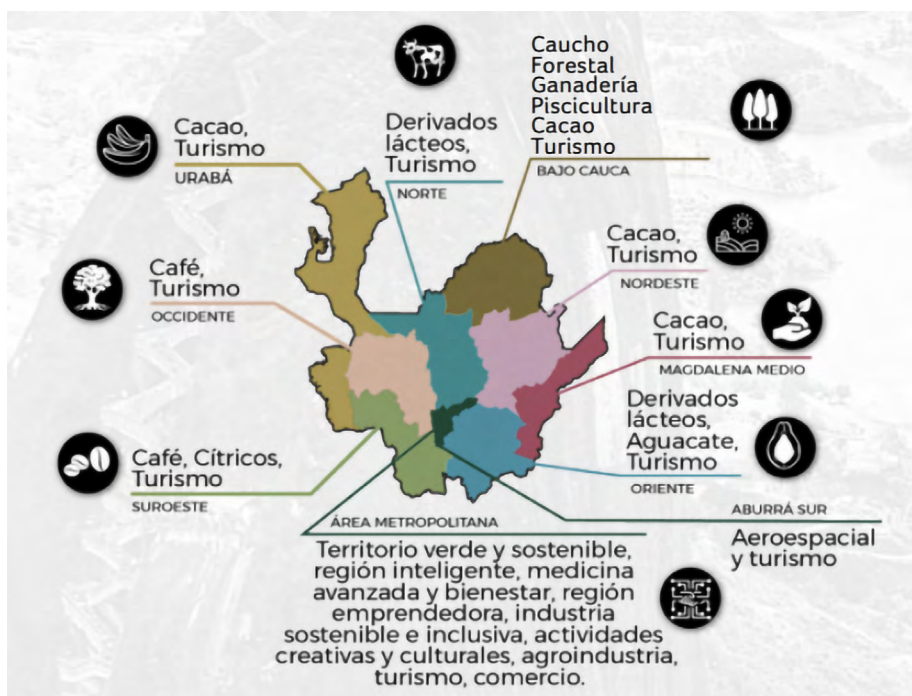


Figura 1. Vocaciones productivas en Antioquia según la agenda regional de competitividad. Adaptado de [13]

En este sentido, a partir de las vocaciones productivas identificadas para las subregiones de Antioquia, según la Agenda Departamental de Competitividad [8], se pueden resaltar algunas áreas en las que las características habilitantes de la industria 4.0 potencian la innovación regional, más allá del sector estrictamente industrial:

- Sector salud, con apuestas hacia la medicina avanzada, la telemedicina y el bienestar.
- Sector comercio, como una región emprendedora con industria sostenible e inclusiva.
- Sector turismo, presente en todas las subregiones del departamento.
- Sector ambiental, como un territorio verde y sostenible.
- Sector de actividades creativas y culturales que integra acciones de economía del conocimiento para una región inteligente.

Si bien este proceso no ocurre de un día para otro, los sectores mencionados deben adaptarse progresivamente a estos cambios por medio de actualizaciones en torno a las nuevas tecnologías y métodos para digitalizar y automatizar sus procesos, mediante herramientas tales como:

- Internet de las cosas
- Big data para la toma de decisiones
- Inteligencia artificial
- Robótica colaborativa (RPA)
- Realidad virtual
- Realidad aumentada
- Computación en la nube y almacenamiento de datos
- Ciberseguridad

Además de estas tecnologías como aliadas para la automatización de los procesos industriales, el *software* desempeña un papel clave, pues aquellos desarrollos que logren implementar estas tecnologías tendrán una acogida y una alta demandada en los sectores productivos [14]. Del mismo modo, los diferentes sectores pueden generar estrategias para desarrollar sus propios sistemas al integrar las tecnologías que más les resulten útiles de acuerdo con sus necesidades. Esto se evidencia en el creciente papel de los sistemas de software dentro de las compañías y su integración en las cadenas de producción, lo que ha contribuido a los procesos de innovación y transformación digital [15], [16]. En el caso de Colombia, según los resultados de la Encuesta de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Empresas (ENTIC Empresas), elaborada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se observa un crecimiento en el uso de soluciones digitales adaptadas a las necesidades productivas específicas. En el año 2020, el 61,1 % de las empresas del sector industrial contrató servicios periódicos de software, el 52,4 % descargó software de acceso gratuito, el 29,9 % contrató desarrollos por parte de terceros, y el 13,9 % desarrolló o creó software por medio de áreas internas de la empresa [17]. En comparación con los datos del año anterior, se observa un incremento en el uso de servicios periódicos (+4,3 %), en el desarrollo interno (+1,3 %) y en el desarrollo por terceros (+2,2 %), acompañado de una ligera disminución en el uso de aplicaciones de acceso libre (-0,6 %) [18].

Por lo anterior, se puede decir que el software es un aliado clave para que las tecnologías de Industria 4.0 se adapten y se desarrollen en los diferentes sectores, lo que permite [19], [20]:

- Se generen entornos en los que se organice automáticamente la información.
- Se produzcan productos adaptados a las necesidades de los clientes.
- Se reduzcan significativamente los defectos y se identifiquen con más rapidez los errores.
- Se produzca solo lo que está en demanda.
- Se identifiquen tendencias y patrones de operación de manera automatizada.
- Se genere un aumento en la seguridad.

En este mismo sentido, programas como «Medellín Valle del Software», promovidos por la Alcaldía de Medellín en articulación con Ruta N y el Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación, han destinado importantes recursos y esfuerzos entre 2024 y 2027, al fortalecimiento de capacidades digitales y a la creación de soluciones tecnológicas en diversos sectores productivos. Asimismo, iniciativas como «Ecosistemas de Innovación Abierta» y la implementación local del programa nacional Apps.co han impulsado el desarrollo de aplicaciones enfocadas en retos específicos en salud, educación, logística y sostenibilidad, lo cual genera un entorno propicio para consolidar el desarrollo de *software* se consolide como eje transversal de la transformación digital en el territorio [21]–[23]

El SENA Regional Antioquia, como eje fundamental en la formación de competencias para el sector productivo, se propone contribuir al impulso de estas habilidades características de la industria 4.0 en el departamento, teniendo en cuenta la infraestructura y las capacidades de las que dispone en sus diferentes Centros de Formación. El Centro de Servicios y Gestión Empresarial cuenta con una Unidad de Servicios Tecnológicos para la producción de software y de contenidos digitales, y para la ejecución de las respectivas pruebas de calidad. Sin embargo, a pesar de que los servicios tecnológicos ofrecidos por este centro han generado soluciones útiles y aplicables a distintos sectores del aparato productivo, estas no siempre incorporan de manera transversal las características tecnológicas habilitantes de la Industria 4.0. Esta situación se explica, entre otros factores, por limitaciones en infraestructura especializada, como la disponibilidad

de entornos de simulación ciberfísica, plataformas interoperables o tecnologías IoT, necesarias para una implementación plena de soluciones avanzadas. Adicionalmente, los procesos de desarrollo de software no siempre están estandarizados bajo marcos metodológicos que promuevan la integración de datos, la automatización inteligente o la escalabilidad industrial, aspectos fundamentales en el paradigma 4. En este sentido, y teniendo en cuenta que dicho Centro, dentro de su plan Tecnológico, tiene por objetivo estratégico potenciar la aplicación de tecnologías emergentes en las líneas de formación, investigación y servicios en sus operaciones, se hace necesario contar con un modelo de gobernanza en tecnologías de información (TI) que permita dotar de características 4.0 a los desarrollos de software producidos en el centro y, por ende, en la Regional Antioquia.

En este capítulo se presentan el contexto y los conceptos principales con el propósito de destacar la relación entre la gobernanza de TI y la Industria 4.0. Luego, se describe la gobernanza y sus implicaciones en la gestión de TI para sectores específicos. Por último, se señalan algunas implicaciones prácticas y teóricas para la aplicación de la gobernanza de TI en el desarrollo de la Industria 4.0 en los productos de software de las vocaciones productivas de Antioquia, en el contexto del SENA.

2. Marco conceptual en Industria 4.0 y gobernanza de TI y su relación con el desarrollo de habilidades

La Cuarta Revolución Industrial representa un cambio paradigmático en la manera en la que se producen bienes y se prestan servicios, dado que integra tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data, inteligencia artificial (IA) y sistemas ciberfísicos en los procesos productivos. A medida que las empresas adoptan estos avances, la gobernanza de TI se convierte en un componente crítico para garantizar que las tecnologías se implementen de manera efectiva, generen valor y cumplan con los objetivos estratégicos organizacionales. En esta sección, se exploran los elementos clave de ambos conceptos y se analizan sus interrelaciones con el fin de destacar cómo, una adecuada gobernanza de TI en la Industria 4.0, puede optimizar la eficiencia, la seguridad y la capacidad de innovación en las organizaciones.

Dentro de la industria 4.0, el desarrollo de software se ha convertido en un elemento preponderante que en general debe ser integrado y gestionado con las tecnologías de información (TI) desde lo que se conoce como

un modelo de gobernanza. Básicamente, la gobernanza de TI proporciona una estructura para alinear la estrategia de TI con los objetivos empresariales [24]. Al seguir un marco formal, las organizaciones pueden producir resultados medibles para lograr sus metas. Un programa formal también tiene en cuenta los intereses de las partes interesadas, así como las necesidades del personal y los procesos que siguen. En el panorama general, la gobernanza de TI es un componente esencial de la gestión empresarial.

En la actualidad, las entidades y las organizaciones están sujetas a regulaciones que guían la protección de información confidencial, la responsabilidad financiera, la retención de datos y la recuperación de desastres, entre otras, además de someterse a la presión que surge de diversos actores como accionistas, partes interesadas y clientes. Para garantizar el cumplimiento de los requisitos internos y externos, muchas instituciones implementan un programa formal de gobierno de TI que proporciona un marco de mejores prácticas y controles [25]. Tanto las organizaciones del sector público como el privado requieren de una forma de garantizar que sus funciones de TI respalden las estrategias y los objetivos comerciales. Por lo tanto, un programa formal de gobernanza de TI debería estar en el radar de cualquier organización que para la observación de las normativas financieras y tecnológicas. Sin embargo, la puesta en práctica de un programa integral de gobierno de TI requiere de compromiso; mientras que las empresas muy pequeñas pueden practicar solo métodos esenciales, las de mayor tamaño y con mayor nivel de regulación se deben orientar a un modelo completo.

Existen marcos de trabajo (*frameworks*) que incluyen guías de implementación para ayudar a las organizaciones en un programa de gobierno de TI de una manera más ágil. Los *frameworks* más utilizados son [26]:

- COBIT: publicado por ISACA, COBIT es un marco integral de prácticas, herramientas analíticas y modelos globalmente aceptados diseñado para el gobierno y la gestión de la TI empresarial. Con sus raíces en la auditoría de TI, ISACA expandió el alcance de COBIT a lo largo de los años para respaldar completamente el gobierno de TI. La versión de COBIT 5 es ampliamente utilizada por organizaciones enfocadas en la gestión y mitigación de riesgos. COBIT busca proveer un marco de trabajo integral para asistir a las empresas en la consecución de sus metas y en la entrega de valor a través de un gobierno efectivo y gestión empresarial de TI.

- ITIL: anteriormente un acrónimo de *Information Technology Infrastructure Library*, ITIL se centra en la gestión de servicios de TI. Su objetivo es garantizar estos respalden los procesos centrales del negocio. ITIL comprende conjuntos de mejores prácticas de gestión para la estrategia de servicio, el diseño, la transición (incluida la gestión de cambios), la operación y la mejora continua del servicio.
- COSO: este modelo se usa para evaluar controles internos y se deriva del Comité de Organizaciones Patrocinadoras de la Comisión Treadway (COSO). El enfoque de COSO es menos específico en TI que otros marcos, y se concentra en aspectos comerciales como la gestión de riesgos empresariales (ERM) y la disuasión del fraude.
- CMMI: el método de integración del modelo de madurez de capacidad, desarrollado por el Software Engineering Institute, es un enfoque para la mejora del rendimiento. CMMI utiliza una escala del 1 al 5 para medir el nivel de madurez, rendimiento, calidad y rentabilidad de una organización. Según su metodología, permite la inserción de medidas objetivas y de modo mixto para evaluar los riesgos que son de naturaleza cualitativa.
- FAIR: el análisis de factores de riesgo de la información (FAIR) es un modelo relativamente nuevo que ayuda a las organizaciones a cuantificar el riesgo. El modelo se centra en la seguridad cibernética y en el riesgo operativo, con el objetivo de tomar decisiones mejor informadas. Aunque es más nuevo que otros marcos mencionados aquí, es un método que ya ha ganado mucha aceptación entre las empresas *Fortune 500*.

Otros marcos sugeridos son:

- ISO/IEC 27001: la norma ISO/IEC 27001 es un estándar internacional para la gestión de la seguridad de la información. Proporciona un marco sistemático para establecer, implementar, operar, monitorear, revisar, mantener y mejorar un Sistema de Gestión de Seguridad de la Información (SGSI). Su enfoque se centra en identificar riesgos a la seguridad de la información y en aplicar controles adecuados para mitigarlos. Es ampliamente adoptada en entornos organizacionales que requieren alta protección de sus activos de información y cumplimiento regulatorio [27].
- TOGAF: el marco TOGAF (The Open Group Architecture Framework) es un estándar para la arquitectura empresarial que permite diseñar,

planificar, implementar y gobernar sistemas de información integrados. Se basa en un método estructurado conocido como ADM (Architecture Development Method) y promueve la alineación entre los objetivos de negocio y las capacidades tecnológicas de la organización. TOGAF facilita la gestión de la complejidad, la toma de decisiones estratégicas de TI y la estandarización de prácticas arquitectónicas [28].

- PMBOK/PRINCE2: PMBOK (Project Management Body of Knowledge), desarrollado por el Project Management Institute (PMI), y PRINCE2 (Projects IN Controlled Environments), promovido por AXELOS, son dos marcos ampliamente utilizados en la gestión de proyectos. PMBOK define buenas prácticas para la gestión de proyectos estructurados en áreas como integración, alcance, tiempo, costo, calidad, recursos, comunicaciones, riesgos y adquisiciones. Por su parte, PRINCE2 se enfoca en una gestión basada en procesos, con roles claramente definidos, orientación hacia la entrega de productos y control del proyecto a lo largo de su ciclo de vida. Ambos marcos se aplican en iniciativas de gobernanza de TI para asegurar el cumplimiento de plazos, costos y objetivos estratégicos [29].

La mayoría de los marcos de gobernanza de TI están diseñados para ayudar a determinar cómo está funcionando el departamento de TI en general, qué métricas necesita la administración y qué retorno está generando a la entidad a partir de sus inversiones. Cuando COBIT y COSO se utilizan principalmente para riesgos, ITIL ayuda a optimizar el servicio y las operaciones. Aunque CMMI se diseñó originalmente para la ingeniería de software, ahora incluye procesos de desarrollo de *hardware*, prestación de servicios y compras. Como se mencionó anteriormente, FAIR está destinado directamente a evaluar los riesgos operativos y de seguridad cibernética.

Al revisar los marcos, se debe tener en cuenta la cultura corporativa: ¿un marco o modelo en particular parece un ajuste natural para su organización? ¿Resuena con sus partes interesadas? Ese marco es probablemente la mejor opción. Sin embargo, no es obligatorio elegir solo uno. Por ejemplo, COBIT e ITIL se complementan en el sentido de que COBIT a menudo explica por qué se hace o se necesita algo, mientras ITIL proporciona el «cómo». Algunas organizaciones han utilizado COBIT y COSO, junto con la norma ISO 27001 para gestionar la seguridad de la información [30]. La Figura 2 presenta los principios de implementación de COBIT 5.



Figura 2. Principios de implementación de COBIT 5. Adaptado de [31].

En conclusión, el análisis de los modelos de gobernanza de TI y su relevancia en la Industria 4.0 evidencia que su implementación exitosa no depende únicamente de la adopción de marcos teóricos y normativos, sino también de la capacidad de las organizaciones para asimilar, adaptar y aplicar este conocimiento en sus contextos específicos. Esta tarea requiere, además de estructuras tecnológicas, procesos efectivos de formación, apropiación y circulación del saber al interior de las instituciones. Es precisamente en este en el que la transferencia de conocimiento cobra un papel fundamental, puesto que permite garantizar la sostenibilidad de las capacidades organizacionales frente a los retos del entorno digital. En la siguiente sección se explora este componente esencial para destacar cómo su planificación estratégica puede facilitar la continuidad operativa, la reducción de brechas de aprendizaje y la consolidación de una cultura organizacional basada en la innovación y el aprendizaje continuo.

2.1 Importancia de la transferencia de conocimiento

La transferencia de conocimiento es una estrategia sistemática cuyo propósito es capturar el conocimiento crítico del personal clave para almacenarlo y compartirlo dentro de una organización para lograr la máxima eficiencia [32]. Este concepto se refiere a que la organización obtendrá una estrella de oro en procesos esenciales como:

- Apoyar a un empleado actual en su transición a un nuevo rol dentro de la organización.
- Reducir los tiempos de aceleración para las nuevas contrataciones o pasantes en sus funciones
- Garantizar que el conocimiento de un empleado saliente se almacene y se comparta con los futuros miembros del equipo.

Para lograr esos resultados, es importante establecer objetivos claros para un plan de transferencia de conocimientos desde el inicio. Estas guías ayudarán a orientar el proceso y evitarán duplicaciones y frustraciones que podrían desviar su plan. A continuación, se presentan algunas preguntas que se deben considerar para establecer dichas metas [33]:

- ¿En qué áreas o posiciones enfrenta la mayor pérdida potencial de conocimiento?
- ¿Quiénes son las personas que poseen este conocimiento?
- ¿Cuánto conocimiento se necesita capturar? ¿Qué información es fundamental y qué se puede aprender de otras formas?
- ¿Cómo se capturará y transferirá el conocimiento crítico a quienes lo necesiten?
- ¿Hay centralización de conocimiento en unos pocos trabajadores/colaboradores?
- ¿El conocimiento es tácito o implícito?
- ¿Los procesos críticos están documentados y existen los formatos adecuados para mantenerlos actualizados?
- ¿El nuevo conocimiento es explicado, entendido, aplicado y documentado, tanto cuando proviene de fuentes internas como externas?

En el contexto del SENA, entidad que lidera procesos de formación para el trabajo y el desarrollo tecnológico en Colombia, la transferencia de conocimiento adquiere un valor estratégico para garantizar que las capacidades técnicas y los saberes acumulados por instructores, aprendices y aliados del sector productivo sean preservados, compartidos y mejorados de manera continua. Este enfoque resulta particularmente relevante ante los desafíos de la Industria 4.0, en la que la obsolescencia de habilidades puede ser rápida y las tecnologías evolucionan con velocidad. Por esto,

la institucionalización de mecanismos eficaces de transferencia de conocimiento en los centros de formación del SENA, tales como repositorios digitales, sistemas de documentación colaborativa, mentorías intergeneracionales y comunidades de práctica, es primordial para fortalecer la continuidad y la sostenibilidad de los procesos formativos, facilitar la adaptación al cambio tecnológico y consolidar una cultura organizacional basada en la innovación, el aprendizaje continuo y la apropiación social del conocimiento.

2.2 Desarrollo de habilidades para la Industria 4.0

Son muchas las habilidades que se deben desarrollar para lograr que la educación impulse el crecimiento de las tecnologías 4.0 en Colombia. En el documento «Future Work Skills 2020» se identificaron seis ejes para lograr este trabajo futuro y las competencias relevantes asociadas, entre ellas: pensamiento computacional, gestión de la carga cognitiva, competencias interculturales, colaboración virtual, mentalidad de diseño, alfabetización en nuevos medios, inteligencia social, pensamiento adaptativo y síntesis [34].

Potenciar estas capacidades y habilidades requiere del esfuerzo conjunto de diferentes entes institucionales, como las entidades gubernamentales, universidades, centros de tecnología e innovación y semilleros de investigación. Un aprendizaje flexible, adaptado a las necesidades de quien aprende, ritmos definidos y con reacciones antes los procesos, permitirán avanzar rápidamente hacia la consecución del objetivo [35]. Una de las tendencias que permite victorias tempranas para las instituciones es la integración de la investigación desde dos planos: la aplicada, enfocada a la innovación y la académica, dado que ambas ayudarán a definir prácticas de aprendizaje y a generar nuevos conocimientos [36].

Entidades como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) han propuesto la categorización de las habilidades como se describe a continuación [37]:

Habilidades blandas:

- Cognitivas, como la creatividad, razonamiento lógico, comprensión de problemas.
- Habilidades sociales, orientación y coordinación con otras personas, negociación, persuasión, inteligencia social.
- Habilidades en contenidos, como la expresión oral y escrita, idiomas y TIC.

- Habilidades en proceso, como pensamiento crítico, escucha activa.
- Habilidades sistemáticas, como análisis de sistemas y toma de decisiones.
- Habilidades para la resolución de problemas

Habilidades duras:

- Habilidades STEM en ciencia, tecnología, matemáticas.
- Habilidades en administración de recursos, en especial los financieros y de tiempo.
- Habilidades técnicas, como control de calidad, diseño de UX, mantenimiento.

Desarrollar estas competencias, e integrarlas con el conocimiento técnico existente, será el primer reto para alcanzar la transformación de los actores en la era de la Cuarta Revolución Industrial.

3. Vocaciones productivas en Antioquia que pueden ser impactadas por la gobernanza de TI y la Industria 4.0 desde los centros SENA

De acuerdo con la Comisión Regional de Competitividad e Innovación de Antioquia [8], el departamento presenta una distribución territorial de vocaciones productivas claramente diferenciada por subregiones, lo que permite identificar fortalezas sectoriales y orientar estrategias de desarrollo regional con enfoque territorial. Por ejemplo, Urabá, Nordeste y Magdalena Medio tienen una marcada vocación hacia el cultivo de cacao y el turismo; el Suroeste y el Occidente se destacan por su producción de café, cítricos y también por el turismo; mientras que el Norte y el Oriente presentan capacidades relevantes en derivados lácteos y el Oriente, además, en aguacate. El Bajo Cauca, por su parte, cuenta con una alta diversidad productiva que incluye caucho, producción forestal, ganadería, piscicultura y cacao. En contraste, el Valle de Aburrá Sur se posiciona en sectores de base tecnológica como el aeroespacial y el turismo. La región metropolitana, en tanto, concentra capacidades asociadas a la industria sostenible, las actividades creativas, la medicina avanzada y las tecnologías inteligentes. Esta distribución de vocaciones constituye un insumo clave para la implementación de políticas de formación, innovación y transfe-

rencia de conocimiento contextualizadas, que respondan a las demandas y potencialidades productivas de cada subregión del departamento.

Entre los años 2021 y 2022, por medio de un proyecto de investigación aplicada liderado por diferentes centros de formación del SENA Regional Antioquia, como el Centro de Servicios y Gestión Empresarial, el Centro Textil y de Gestión Industrial, el Centro de Comercio y el Centro de Formación en Salud, la transferencia de conocimiento cobra especial relevancia como mecanismo para asegurar la continuidad y la escalabilidad de los proyectos tecnológicos orientados a la Industria 4.0. La aplicación de modelos de gobernanza de tecnologías de la información (TI) en estos desarrollos permite consolidar soluciones de software integradas a sectores estratégicos como salud, ambiente, comercio, turismo y región inteligente, alineadas con las vocaciones productivas regionales y las prioridades institucionales. En este marco, la transferencia de conocimiento posibilita la preservación y difundir el saber acumulado por los equipos técnicos y pedagógicos involucrados, y garantiza que dichas soluciones evolucionen con criterios de sostenibilidad, interoperabilidad y pertinencia territorial.

Esta sección presenta algunos antecedentes e iniciativas de industria 4.0, desarrollo de software y aplicativos relacionados con las principales vocaciones productivas que han sido identificadas como áreas de enfoque estratégico. Se busca fundamentar cómo estas vocaciones, específicas al contexto regional y las necesidades del mercado, pueden beneficiarse de la implementación de tecnologías avanzadas y prácticas de gobernanza de TI. Con esta base conceptual, en este capítulo se proporciona una guía para entender cómo las capacidades productivas locales se pueden fortalecer, adaptar y competir eficazmente en un entorno digitalizado y global, mediante la ejecución de pilotos de prueba del modelo de gobernanza propuesto. Con los contenidos presentados, se puede observar cómo las vocaciones productivas identificadas en las subregiones de Antioquia ofrecen un marco estratégico que integra las capacidades formativas, investigativas y tecnológicas de los Centros SENA con las necesidades territoriales y sectoriales. La implementación de soluciones basadas en la Industria 4.0 y en modelos de gobernanza TI favorece la transformación digital de sectores como salud, ambiente, turismo, comercio y las industrias creativas, además de posicionar al SENA como un agente catalizador del crecimiento regional sostenible.

3.1 Vocación productiva en salud

El Modelo de Acción Integral Territorial (MAITE) es la nueva cara de la Política de Atención Integral en Salud (MIAS), establecida tras la publicación de la resolución para observaciones publicada por el Ministerio de Salud y Protección social y que deroga integralmente las resoluciones 429 de 2016 y 489 de 2019 [38]. El objeto de MAITE es orientar de forma articulada la gestión de los integrantes del sistema de salud en el territorio para responder a las prioridades de salud de la población y contribuir al mejoramiento de la salud, la satisfacción de las expectativas de los ciudadanos y la sostenibilidad del sistema con el liderazgo del departamento o distrito [39]. En ese orden de ideas, las Rutas Integrales de Atención en Salud (RIAS) definen las condiciones necesarias para asegurar la integralidad en la atención por parte de los agentes del Sistema de Salud (territorio, asegurador, prestador) con el fin de generar acciones que se anticipen a la presencia de eventos en salud, a partir de la identificación temprana de factores de riesgo [40]. El Ministerio de Salud y Protección Social (MSPS) definió 16 grupos de riesgo [41], con énfasis en dos grupos: 1. Trastornos asociados al uso de sustancias psicoactivas (SPA). 2. Problemas de salud mental.

3.2 Vocación productiva en ambiente

La sostenibilidad ambiental, en el marco de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, implica por un lado la reducción de los daños al ambiente y, por otra parte, el papel de los recursos naturales y de los servicios ecosistémicos en el bienestar humano, las oportunidades económicas y la resiliencia social y ecológica. En este sentido, mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se hace un llamado para afrontar los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad para garantizar que todas las personas tengan las mismas oportunidades y puedan llevar una vida mejor sin comprometer el planeta [42]. Dentro de estos objetivos, se destacan la eficiencia energética y la energía renovable, la producción y consumo responsable y la capacidad de los países para tomar acción frente a los cambios y efectos climáticos. De otro lado, en la agenda departamental de competitividad e innovación de Antioquia, para el área metropolitana, se identificó como vocación productiva un territorio verde y sostenible, lo cual implica, entre otros factores, comunidades más autosuficientes, resilientes e inteligentes, capaces de hacer frente a los actuales desafíos medioambientales [8]. Por otro lado, el Plan Tecnológico del Centro de Servicios y Gestión Empresarial,

dentro de sus variables estratégicas, considera la sostenibilidad ambiental como la posibilidad de que las personas conozcan y sean conscientes de sus impactos ambientales a partir de cada una de sus actividades y que, dentro de sus prioridades, implementen diferentes medidas o estrategias que aseguren la prevención, disminución o eliminación de las afectaciones al entorno [43]. Así mismo, en la apuesta de escenario 2030, se contempla que el Centro de Servicios y Gestión Empresarial se haya constituido en un agente transformador a partir de la sostenibilidad ambiental, lo cual se alinea con sus objetivos de potenciar la oferta de servicios relacionada con empaques, utilización de nuevos materiales y los segundos usos.

Para dar respuesta a las iniciativas ambientales globales y locales, en la Regional Antioquia, y en particular desde el Centro de Servicios y Gestión Empresarial del SENA, se han implementado diversas estrategias basadas en aplicaciones móviles y soluciones de software, orientadas a fortalecer la sostenibilidad ambiental del propio centro y de la comunidad que lo rodea. Estas iniciativas buscan promover la conciencia ambiental y aportar a la mitigación y compensación de los impactos negativos en el entorno. Entre los desarrollos más representativos se encuentra una aplicación móvil y web para el cálculo de la huella de carbono, implementada en 2018, cuyo propósito fue estimar las emisiones generadas y sugerir la cantidad de árboles necesarios para compensar el CO₂ producido. Además, se creó una aplicación móvil para fomentar el uso compartido de vehículos (*carpooling*), dirigida a administrativos, instructores y aprendices del centro, con lo cual se busca reducir las emisiones asociadas al transporte individual y promover la movilidad sostenible.

3.3 Vocación productiva en actividades creativas y culturales que integran acciones de economía del conocimiento para una región inteligente

Desde el año 2006, el SENA le apuesta a la adquisición de competencias en investigación, experimentación e innovación de todas las personas vinculadas a la entidad, tales como aprendices, instructores, administrativos y directivos; en este sentido, el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación del SENA (SENNOVA), con sus diferentes líneas programáticas como Tecnoparque, Tecnoacademia y semilleros y grupos de investigación [44], contribuye a la solución de los problemas, necesidades y oportunidades identificadas en los diferentes sectores de interés en las regiones, desde la perspectiva del desarrollo tecnológico.

En particular, el programa Tecnoparque del SENA ha demostrado un impacto significativo en el ecosistema de ciencia, tecnología e innovación [44], como se evidencia en los resultados de su gestión durante el año 2021 [45]. En tres etapas estructuradas, registro y *pitch* inicial, desarrollo de proyectos con niveles de madurez tecnológica (TRL 6-7-8), y apoyo al cierre de los proyectos, se dinamizó la participación de más de 3 000 ejecutores en un total de 2 223 proyectos, involucrando 1 933 personas, 70 grupos de investigación y 1 009 empresas, de las cuales 728 fueron micro y pequeñas. El perfil de los participantes reflejó un enfoque inclusivo y diverso, en el que se destaca la participación de 1 688 emprendedores, 219 aprendices del SENA, 1 075 mujeres, 117 personas pertenecientes a grupos étnicos y 39 personas en condición de discapacidad.

Adicionalmente, el programa promovió el desarrollo de competencias transversales mediante 35 eventos de habilidades blandas, 193 talleres de fortalecimiento, y más de 1 100 espacios de interacción entre charlas informativas y comités de ideas. El impacto también se evidenció en la articulación con 220 instituciones aliadas, la firma de 56 convenios, la generación de 26 nuevas empresas y la participación en 313 convocatorias. Este crecimiento impulsó la ejecución de proyectos y, por ende, la generación de productos de I+D+i como prototipos, publicaciones científicas y tecnológicas, innovaciones en procesos empresariales, entre otros, lo que ha hecho evidente la necesidad de mantener un seguimiento en las evaluaciones y valoraciones de estos productos y, sobre todo, del impacto que tales productos generan en el ecosistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (CT&I) de la región y de la misma institución [46].

En este contexto, es de total competencia iniciar procesos de modelamiento e identificación de estos comportamientos de I+D+i con el fin de entablar procesos de gestión del conocimiento en los que todas estas lecciones aprendidas permitan, mediante nuevos procesos innovadores, alcanzar elementos de mejoramiento continuo, enfocados en la identificación de indicadores de estas capacidades para su control y posterior ejercicio de prospectiva [47]. Por otro lado, los desarrollos de aplicaciones y software se presentan como un pilar importante de la economía naranja en los aspectos de medios y contenidos digitales, además de ser un eje fundamental en la participación de tecnologías habilitantes de la Cuarta Revolución Industrial, como la analítica de datos y el aprendizaje de máquina, fundamentados transversalmente en los principios de la confidencialidad, disponibilidad e integridad de la información [48]. De esta manera, la determinación de

indicadores para la gestión en CT&I de los Centros SENA Regional Antioquia se convierte en una iniciativa que contribuye directamente al reconocimiento de Antioquia como una región inteligente, tal como lo indica la Agenda Departamental de Competitividad e Innovación.

3.4 Vocación productiva en turismo

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, titulado «Colombia, potencia mundial de la vida» [49], tiene como objetivo transformar a Colombia en una economía productiva y sostenible, donde el turismo juega un papel clave. El plan impulsa la reindustrialización, el agro, el turismo y los proyectos de infraestructura de transporte aérea, fluvial y terrestre que mejoren la competitividad y la conectividad del país. En el marco del actual *Plan Sectorial de Turismo 2022-2026*, titulado «Turismo en armonía con la vida» [50], se establece una visión renovada que reconoce al turismo como un eje estratégico para la sostenibilidad, la inclusión y la transformación del país. Este plan incorpora aprendizajes de la pandemia y busca atender problemáticas como la informalidad, la desconexión entre oferta y demanda, la dispersión de políticas y la falta de gobernanza, con lo cual se promueve una gestión turística más integrada, resiliente y basada en datos.

Según cifras de Procolombia [51], el país cerró el año 2024 con US\$ 10 082 millones en ingresos por viajes y transporte aéreo de pasajeros, lo que representa un aumento del 12,8 % frente a 2023. Este desempeño también se reflejó en el aumento de visitantes no residentes que, en 2024, alcanzó 6 944.192, con un crecimiento del 12,5 % en comparación con el año anterior. En el ámbito departamental, Antioquia evidenció un notable desempeño: en 2022 el turismo aportó el 4,8 % al PIB regional, frente al 4 % registrado en 2019 [52]. Esta tendencia también se observó en la ciudad de Medellín, que durante 2022 recibió aproximadamente 1,4 millones de visitantes, superó las proyecciones municipales y se consolidó como un destino urbano relevante en el país [53].

En este contexto, la aplicación de tecnologías emergentes como la realidad aumentada (RA), la realidad virtual (RV) y la gamificación ofrece oportunidades significativas para potenciar la promoción de destinos turísticos, enriquecer la experiencia del visitante y aumentar la competitividad de los territorios [54] - [56]. Esta tecnología se puede aplicar a un sinfín de actividades que se realizan durante los viajes: información sobre monumentos, rutas culturales, lugares para comer, horarios de museos, medios de transporte y un sinnúmero de opciones más. Muchos municipios,

como Santa Rosa de Osos, cuentan con una sede alterna del Centro Textil y de Gestión Industrial sin una aplicación con estas funcionalidades que ayude a la promoción turística, ni que apoye los procesos de formación de aprendices de las áreas de turismo. Este rezago se convierte en un factor negativo en los procesos de certificaciones turísticas en el ámbito nacional dado que la falta de implementación de este tipo de aplicaciones hace que los municipios sean menos competitivos y visibles en el ámbito del turismo [57]. Por ello, el desarrollo de soluciones tecnológicas contextualizadas desde los centros de formación del SENA representa una oportunidad concreta de innovación, transferencia de conocimiento y dinamización de economías locales, coherente con las metas trazadas en la hoja de ruta nacional y regional para el turismo.

3.5 Vocación productiva en comercio

Según el documento de Perfil Económico para el Departamento de Antioquia, elaborado por la Oficina de Estudios Económicos del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo en 2024. El sector comercio representó el 19,1 % del valor agregado departamental y se ubicó como la segunda actividad económica más importante después de la industria manufacturera (20,9 %) [58]. Para el sector comercial, la cadena de suministro juega un papel esencial en la etapa de Industria 4.0. Por lo tanto, las empresas tienen varios tipos de canales de distribución disponibles para llegar a los clientes; pueden utilizar el comercio multicanal, de venta libre o en línea. Además, la digitalización y la accesibilidad a la información justo a tiempo permiten a los fabricantes y distribuidores responder más rápidamente a cualquier problema nuevo que surja en el mercado y gestionar mejor sus gastos [59].

En la cadena de suministro orientada al escenario de la Industria 4.0 se producen cambios profundos, como la visibilidad en tiempo real de toda la cadena de suministro y una colaboración continua entre las etapas; según el Informe Global de Riesgos de la Cadena de Suministro del año 2023, el 53% de las empresas considera la colaboración con proveedores como una oportunidad clave para mejorar la gestión de la cadena [60]. Un área destacable es la disponibilidad de datos, especialmente las soluciones que permiten el seguimiento en tiempo real de las operaciones y la prevención de eventos no deseados. No obstante, la utilidad de esta información depende de su articulación con sistemas logísticos eficientes y políticas urbanas coherentes. Por ejemplo, aunque el rastreo de pedidos en tiempo

real puede mejorar la experiencia del usuario, su impacto se ve limitado si persisten problemáticas estructurales como demoras por congestión vial, obsolescencia del parque automotor, falta de segmentación de zonas de cargue y descargue, y precariedad en la logística de última milla [61].

La digitalización cambiará por completo el entorno empresarial y la cultura organizativa de las empresas, propiciando el surgimiento de nuevas estructuras del mercado en las que el comportamiento del cliente será diferente, con mayor involucramiento en el acto de compra y venta. [62] En este contexto, la automatización de procesos en modelos B2C (*business-to-consumer*) y B2B2C (*business-to-business-to-consumer*) desempeña un papel fundamental en la optimización de las operaciones comerciales. En el modelo B2C, la automatización se manifiesta en procesos como la recomendación personalizada de productos basada en algoritmos de inteligencia artificial, la gestión automatizada del inventario, la atención al cliente mediante *chatbots* y el procesamiento de pagos digitales con validación automática [63]. En el modelo B2B2C, además de estos elementos, se suman plataformas que integran múltiples proveedores, gestionan pedidos de forma centralizada y permiten trazabilidad en tiempo real del estado de entregas, devoluciones y logística inversa [64].

El entorno inteligente está acelerando los cambios en el comportamiento del cliente. Además, la experiencia del cliente se puede optimizar con la ayuda de la tecnología de extracción de datos. Mientras el comercio electrónico está en auge, surge el problema de la «sobrecarga de información», que también causa problemas a clientes y empresas. Esta dificultad se puede solucionar con un sistema de recomendación de comercio electrónico que brinde información sobre productos que satisfagan las preferencias del consumidor hacia el cliente objetivo [59]. Además, la introducción de las tecnologías de *big data* ha llevado al crecimiento del comercio electrónico [65]; en Colombia, por ejemplo, el valor total de las transacciones digitales realizadas en el sector *e-commerce* en el país alcanzó \$15,4 billones en el tercer trimestre de 2023 [66]. El rendimiento de las compras online de los consumidores ha mejorado debido a la diversificación de las fuentes de información. Así mismo, la aplicación de la tecnología IOT y los servicios de posicionamiento e información geográfica también son útiles para el comercio móvil, puesto que permiten que los usuarios reciban información integrada basada en el tiempo, la ubicación y el contexto, agilizando la experiencia de compra. [67].

En síntesis, la vocación productiva en comercio dentro de Antioquia, enmarcada en el contexto de la Industria 4.0, se beneficia de la integración

de tecnologías avanzadas como big data, IOT e inteligencia artificial, las cuales optimizan los procesos logísticos y comerciales, mejoran la experiencia del cliente y potencian la competitividad del sector. Desde los Centros de Formación del SENA, la incorporación de modelos de gobernanza TI en el desarrollo de software orientado al comercio se presenta como un habilitador estratégico para articular datos, automatización y analítica avanzada en soluciones que respondan a los retos del comercio digital y físico. Esta sinergia impulsa la eficiencia operativa y la sostenibilidad de los procesos y fortalece el ecosistema regional de innovación y las capacidades formativas, preparando al talento humano para enfrentar los desafíos y oportunidades de una economía cada vez más digitalizada.

3.6 Comentarios finales para la sección

La caracterización de las vocaciones productivas en Antioquia permite visibilizar las oportunidades de desarrollo económico y social en los distintos territorios del departamento, y constata la pertinencia de orientar intervenciones tecnológicas desde una lógica contextualizada. El análisis realizado en esta sección evidencia cómo sectores estratégicos como salud, ambiente, cultura, turismo y comercio se pueden dinamizar mediante la implementación de soluciones de software basadas en tecnologías habilitantes de Industria 4.0, siempre que estas se articulen a modelos de gobernanza de TI robustos, interoperables y sostenibles.

La identificación de experiencias previas de desarrollo tecnológico en los Centros de Formación del SENA, y en los programas como Tecnoparque, semilleros y demás iniciativas de innovación, confirma la capacidad institucional para contribuir activamente a la transformación digital del tejido productivo. Además, la búsqueda de estrategias y soluciones basadas en sistemas de información, aplicaciones móviles, plataformas inteligentes y sistemas de trazabilidad demuestra que el SENA tiene el potencial para actuar como un agente formativo y como un articulador del ecosistema de innovación regional en Antioquia.

Estos análisis dan paso al siguiente hito metodológico de este trabajo: el estudio de los modelos de gobernanza en tecnologías de la información aplicables a este tipo de iniciativas. Entender cómo se estructuran, adaptan e implementan dichos modelos, y cómo se integran con la dinámica de desarrollo de *software* para la transformación digital territorial, será esencial para formular un marco de gobernanza efectivo y escalable. En este sentido, la sección 4 ofrece una revisión de antecedentes sobre

modelos de gobernanza TI, sus principios fundamentales y su aplicabilidad al contexto colombiano, como base para el diseño del modelo propuesto.

4. Antecedentes sobre modelos de gobernanza

4.1 Gobernanza de tecnologías de la información

Durante las últimas décadas, el papel de las tecnologías de la información (TI) ha cambiado significativamente, desde la oficina y la automatización de procesos hacia la agregación de valor y la innovación a través de su uso. Esto significa que la función de TI ya no es principalmente técnica y reactiva, pues se ha vuelto proactiva y se ha enfocado en las actividades centrales de las organizaciones [25]. Por lo tanto, el uso de TI tiene el potencial de ser el principal impulsor de la riqueza económica en el siglo XXI para respaldar las estrategias comerciales existentes y dar forma a nuevas estrategias (digitales) [68]. Para asegurar que las TI estén alineadas con los objetivos de una entidad y que sostengan y amplíen la estrategia empresarial, se necesita un modelo de gobernanza en TI eficaz [69].

La gobernanza de TI garantiza que se cumplan los objetivos de TI y se mitiguen los riesgos. De esta manera, las TI aportan valor a la sostenibilidad y al crecimiento de la entidad. La gobernanza de TI impulsa la articulación entre las tecnologías de información y la estrategia de la entidad, y requiere medir juiciosamente su desempeño. Investigaciones como los trabajos de Van Grembergen [68] y de Ridley et. al. [70] muestran que un modelo de gobernanza eficiente asegura los beneficios de TI y ayuda a disminuir los riesgos [70], lo que lleva a mayor control de las funciones de TI [68]. Con estas estrategias organizadas de una manera adecuada, las empresas pueden aumentar el rendimiento de sus inversiones en TI hasta en un 40 % y generar hasta un 20 % más ganancias que sus competidores [71].

Si bien la gobernanza en TI ha sido objeto de considerable debate entre investigadores y profesionales, sigue siendo un fenómeno que está en continua evolución con una complejidad creciente. Dado que la gestión de TI se ha convertido en un elemento crucial para las empresas, las decisiones más importantes con respecto a TI se han trasladado del departamento de TI hacia los consejos de administración y ejecutivos de alta dirección, exigiendo un enfoque específico en la gobernanza empresarial de IT [31]. Esta situación ha reforzado el papel de la gobernanza en TI como parte integral del gobierno corporativo. La Figura 3 describe las dimensiones del gobierno de TI.



Figura 3. Dimensiones del gobierno de TI. Adaptado de [24]

Los modelos de gobernanza TI genéricos disponibles actualmente no funcionan de la misma manera en empresas de diferentes industrias, tamaños, niveles de madurez, entre otras [69], [72]. Lo que funciona estratégicamente para una empresa no necesariamente tiene el mismo impacto en otra, incluso dentro de la misma industria. Por ello, es fundamental identificar una combinación adecuada de estructuras, procesos y mecanismos que respondan a los factores de contingencia particulares de cada organización. Si bien en general estos modelos han sido desarrollados para grandes empresas y luego ajustados a pymes, existen marcos que permiten iniciar de forma estructurada y escalar gradualmente. Tal es el caso de COBIT 5 e ISO/IEC 38500, que ofrecen principios rectores y prácticas operativas que se pueden adoptar como punto de partida universal. COBIT 5 proporciona un marco basado en procesos enfocado en el vínculo estratégico de TI con el negocio, mientras que la ISO/IEC 38500 ofrece principios de buena gobernanza aplicables a cualquier organización, incluyendo responsabilidad, estrategia, adquisición, desempeño, conformidad y comportamiento [73].

No se debe descuidar la convergencia de tecnologías digitales y características de la Industria 4.0 como las redes sociales, comunicaciones móviles, analítica de datos, servicios en la nube, e internet de las cosas. Estas tecnologías han transformado radicalmente la dinámica organizacional con nuevas oportunidades, riesgos y demandas para los modelos de

gobernanza. Las prácticas de gobernanza tradicionales, como los marcos centrados únicamente en la infraestructura tecnológica (por ejemplo, Val IT) o los esquemas jerárquicos con procesos estáticos como los planteados en ITIL v3, resultan limitadas ante entornos caracterizados por la hiperconectividad, la movilidad de la información y la toma de decisiones en tiempo real [74]. En contraste, marcos como COBIT 2019 permiten una gobernanza más dinámica, centrada en el valor del negocio, la evaluación de desempeño continuo y la incorporación de factores de cambio tecnológico, incluyendo analítica avanzada, automatización inteligente y servicios distribuidos [75].

4.1.1 Comparación de modelos y marcos de gobernanza

En esta subsección se presenta la Tabla 1, en la que se resumen algunos de los principales modelos y marcos de gobernanza de TI utilizados en entornos corporativos y públicos, con el propósito de identificar sus fortalezas, limitaciones y ámbitos de aplicación. El análisis permite establecer puntos de convergencia y divergencia entre ellos, así como orientar la selección e implementación de estrategias de gobernanza adecuadas para las necesidades de las instituciones colombianas, incluidas las iniciativas que lideran los Centros de Formación del SENA en articulación con la industria.

Tabla 1. Tabla comparativa de modelos de gobernanza TI

Modelo / Marco	Enfoque principal	Fortalezas clave	Limitaciones	Pertinencia para SENA y vocaciones productivas
COBIT 5 / COBIT 2019	Control, alineación estratégica, medición de valor [73, p. 5], [75, p. 19].	Modelo estructurado con objetivos de control, métricas, procesos, responsabilidades y guías detalladas.	Complejidad para pymes o entidades con bajo nivel de madurez.	Alta, especialmente si se adapta progresivamente.
ISO/IEC 38500	Principios de liderazgo y toma de decisiones [73].	Enfocado en gobernanza desde la alta dirección; es flexible y complementario a otros marcos.	Carece de orientación operativa y mecanismos detallados.	Alta, útil para diseñar políticas institucionales.
ITIL v4	Gestión de servicios TI [76].	Énfasis en gestión de servicios, integración con DevOps, Agile y Lean IT.	No es propiamente un modelo de gobernanza.	Media, útil para procesos internos de TI.

Modelo / Marco	Enfoque principal	Fortalezas clave	Limitaciones	Pertinencia para SENA y vocaciones productivas
Risk-Driven IT Governance	Priorización y decisiones basadas en riesgo [77]	Flexible ante entornos de incertidumbre; enfocado en continuidad del negocio y resiliencia.	Requiere madurez en gestión de riesgos.	Alta en sectores dinámicos y entornos disruptivos.
Viable System Model (VSM)	Adaptabilidad y autoorganización organizacional [26].	Permite análisis estructural de viabilidad organizativa y flexibilidad adaptativa.	Dificultad en su comprensión inicial y modelado formal.	Alta para sectores productivos en cambio acelerado.
Enterprise Architecture (EA)	Alineación entre TI, procesos y estrategia [78].	Visión holística de la organización, integración de procesos y soporte a decisiones.	Alto costo de implementación y requerimientos técnicos.	Alta, para proyectos estructurales de largo plazo.
Governance Frameworks en la práctica (ej. Microsoft)	Integración de liderazgo, arquitectura y cultura organizacional [79].	Enfoque pragmático, basado en experiencias reales; adaptable a entornos empresariales modernos.	Puede no tener formalización académica completa.	Muy alta, útil para modelos híbridos e institucionales.

A partir de la información consolidada en la tabla, se destacan los siguientes aspectos:

- Cobertura y orientación estratégica: modelos como COBIT 5 y ISO/IEC 38500 presentan una cobertura amplia, orientada a garantizar el alineamiento estratégico entre TI y el negocio. Estos marcos son especialmente adecuados para organizaciones que buscan integrar la gobernanza dentro de un sistema de gestión más robusto. Su aplicabilidad es alta en sectores regulados o con alto grado de madurez digital [73].
- Flexibilidad para adaptación organizacional: modelos como el Viable System Model (VSM) y la Metodología de Afinación de Modelos ofrecen una perspectiva más estructural y adaptable, particularmente apropiada para entornos cambiantes o con estructuras descentralizadas, como los sistemas públicos o educativos [26], [80].
- Soporte para transformación digital: marcos contemporáneos como el Marco conceptual integral de gobernanza TIC [81] o el enfoque de Enterprise Architecture (EA) [78] están específicamente diseñados

para acompañar procesos de transformación digital y proporciona una visión que integra arquitectura organizacional, procesos, tecnología y cultura.

- Limitaciones en contextos pyme: algunos marcos clásicos, como COBIT o ITIL, aunque robustos, pueden ser percibidos como complejos o costosos para su implementación en pequeñas y medianas empresas. Esto ha motivado la creación de adaptaciones o metodologías livianas que reducen la carga documental y permiten un enfoque más práctico [82], [83].
- Dimensión humana y cultural: aunque menos tratada en marcos técnicos, algunos estudios resaltan la importancia de integrar elementos como liderazgo, gestión del cambio y competencias digitales dentro de la gobernanza TI, especialmente en procesos de adopción de tecnológica disruptiva [78].
- Interrelación entre gobernanza TI e información: la distinción entre IT Governance e Information Governance [84] resalta que, aunque comparten principios, abordan objetivos distintos; la primera se enfoca en la gestión de TI como función habilitadora del negocio, la segunda se orienta en asegurar el uso ético, legal y estratégico de los datos.
- Casos prácticos y mejores prácticas: el estudio de Microsoft como referente práctico demuestra cómo una empresa puede articular mecanismos de gobernanza a través de estructuras ágiles, con roles bien definidos, indicadores clave y participación activa del liderazgo corporativo, logrando así una gobernanza efectiva en contextos de innovación constante [79].

A pesar del extendido interés investigativo en estas áreas, aún se requiere un trabajo considerable para proporcionar mayor comprensión de la gobernanza de TI en el contexto de la sociedad digital. Los rápidos avances tecnológicos, los cambios disruptivos en las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) y la aparición de nuevos modelos de negocio, a menudo digitales, exigen nuevas prácticas comerciales, adaptables y sostenibles [85], [86] incluyendo prácticas y modelos de medición de la gobernanza de TI. Es importante desarrollar métodos más prácticos para su implementación, permitir su uso y que convierta en parte integral de la organización, tanto en el proceso estratégico como operativo.

4.2 Gobernanza y gestión de TI en Colombia

En Colombia, el interés por la gobernanza de las Tecnologías de la Información (TI) ha crecido significativamente en las últimas décadas, dada la necesidad de modernizar el Estado, fortalecer las capacidades institucionales y fomentar la eficiencia organizacional en entidades públicas y privadas. La gobernanza de TI ha sido orientada principalmente por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Min-TIC), a través de un conjunto de decretos, resoluciones, leyes y documentos técnicos que estructuran cómo las entidades públicas deben planificar, gestionar y controlar sus recursos tecnológicos. La Tabla 2 presenta un compendio de los principales decretos y normas vigentes relacionados con la gobernanza TI en Colombia:

Tabla 2. Normativa y Decretos clave en Gobernanza TI en Colombia

Norma o Decreto	Descripción	Relevancia para la Gobernanza TI
Ley 1341 de 2009 (modificada por Ley 1978 de 2019)	Ley marco del sector TIC. Establece los principios y reglas para el uso eficiente de las tecnologías en el país.	Base legal para los modelos de gobernanza TIC en Colombia. Promueve la convergencia tecnológica y la masificación del acceso.
Ley 1712 de 2014 (Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública)	Obliga a las entidades a gestionar adecuadamente su información digital.	Refuerza la importancia de la gobernanza de datos e información como parte integral del gobierno TI.
Ley 1581 de 2012	Ley de Protección de Datos Personales.	Influye en la gobernanza de TI, especialmente en seguridad, privacidad y cumplimiento regulatorio.
Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018–2022)	Introdujo la Política de Gobierno Digital como lineamiento obligatorio para entidades públicas.	Sustituyó el enfoque de Gobierno en Línea y promueve gobernanza TI orientada a servicios ciudadanos digitales.
Decreto 415 de 2016	Reglamenta la gestión de TI en el Estado colombiano, bajo el Modelo Integrado de Planeación y Gestión (MIPG).	Establece que las entidades deben aplicar la arquitectura TI del Estado para mejorar el servicio al ciudadano.

Norma o Decreto	Descripción	Relevancia para la Gobernanza TI
Decreto 1078 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector TIC)	Recopila toda la normatividad del sector TIC en Colombia. Incluye disposiciones sobre gestión de TI y servicios digitales.	Es el marco reglamentario principal para la gestión y gobernanza de las TI en entidades públicas.
CONPES 3854 de 2016	Política Nacional de Explotación de Datos (Big Data).	Requiere gobernanza de datos sólida como parte del ecosistema de gobernanza TI nacional.
Manual de Gobierno TI – MinTIC (última versión 2023)	Documento técnico que forma parte del Marco de Referencia de Arquitectura Empresarial para TI en el Estado.	Define roles, estructuras, dominios y prácticas de gobernanza para entidades públicas. Incluye la guía del Dominio de Gobierno TI.
Marco de Referencia de Arquitectura Empresarial – MinTIC	Requisito obligatorio para todas las entidades del Estado, incluye dominios de Gobierno, Gestión, Seguridad, Servicios y Datos.	Contiene lineamientos prácticos para implementar la gobernanza TI en entidades públicas.

Desde una perspectiva gubernamental, el país ha adoptado lineamientos específicos para orientar la gobernanza TI en el sector público, siendo el Modelo de Gobierno de TI del Ministerio TIC uno de los marcos más relevantes en este contexto. Este modelo fue desarrollado como parte del Marco de Referencia de Arquitectura Empresarial para la Gestión TI en el Estado y busca vincular la estrategia institucional con la gestión de las TI con el objetivo de promover la toma de decisiones basada en valor, riesgo y desempeño. El modelo contempla cinco dominios: alineación estratégica, entrega de valor, gestión de recursos, medición de desempeño y gestión de riesgos que se relacionan estrechamente con marcos internacionales como COBIT 5, ISO/IEC 38500 y ITIL, adaptados a la realidad del sector público colombiano. Uno de los avances más significativos fue la publicación de la Guía de Dominio de Gobierno de TI [87], en la que se establecen lineamientos y buenas prácticas para definir estructuras organizacionales, roles, responsabilidades y mecanismos de control en las entidades del Estado, con las que se busca garantizar transparencia, eficiencia y sostenibilidad.

La Figura 4 presenta el Modelo conceptual del dominio de gobierno de TI en Colombia, el cual parte de una visión sistémica en la que se integran seis grandes componentes estructurales [87]:

1. **Arquitectura institucional y normativa:** establece la necesidad de incorporar políticas de TI en la organización, fundamentadas en un marco normativo sólido (como el Decreto 1078 de 2015 o el Decreto 415 de 2016), que incluya procesos internos y externos.
2. **Estructura organizacional y gestión de proveedores:** se orienta a definir estructuras y perfiles del talento humano en TI, así como lineamientos técnicos y criterios de aceptación para una adecuada contratación y evaluación de proveedores.
3. **Procesos de TI:** contempla la definición, implementación, mejora y evaluación continua de los procesos de TI en línea con los planes estratégicos de cada entidad.
4. **Esquema de gobierno de TI:** propone la definición de instancias y roles responsables de la gobernanza, la gestión de relaciones internas y externas, y los acuerdos de desarrollo y prestación de servicios.
5. **Alineación y habilitación de procesos:** introduce la necesidad de identificar habilitadores que soporten los procesos y permitan su vinculación efectiva con el modelo de gobierno de la entidad.
6. **Toma de decisiones y relacionamiento con áreas:** incorpora elementos como la formalización de políticas y estándares, la toma de decisiones informadas, y los acuerdos de gobernabilidad que consolidan la interacción entre TI y las demás áreas organizacionales.

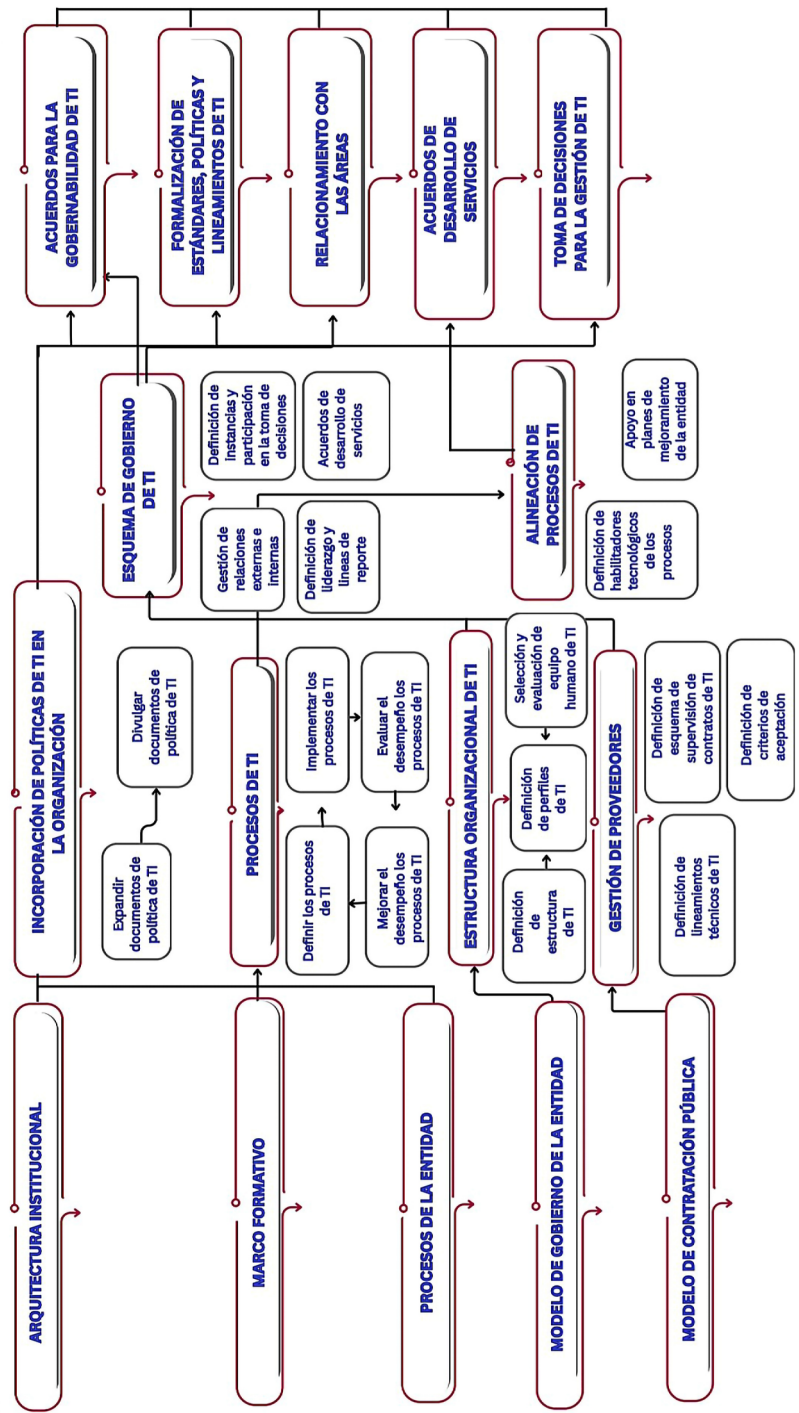


Figura 4. Modelo conceptual del dominio de gobierno de TI en Colombia [87]

Por otro lado, desde el ámbito académico se han propuesto modelos de gobernanza TI para universidades colombianas en los que se consideran sus características específicas como organizaciones híbridas, con misiones de docencia, investigación y extensión. Por ejemplo, la investigación de Vivas-Martín, Díez-Silva, y López-Sevillano [88] the performance of Information Technology (IT propone mecanismos y estructuras orientadas a garantizar la articulación de las TIC con los objetivos misionales de las instituciones universitarias, tomando en cuenta su autonomía y dinámicas de gestión del conocimiento. Por su parte, investigaciones recientes han evidenciado la baja adopción de marcos estructurados en muchas organizaciones del país, especialmente en el sector privado y en pymes, debido a barreras como desconocimiento, falta de capacidades técnicas o la percepción de complejidad de los marcos internacionales [89]. Sin embargo, también se han documentado casos de éxito en empresas colombianas que han adaptado marcos como COBIT, ISO/IEC 38500 y mecanismos híbridos para mejorar la toma de decisiones, el control de riesgos y la generación de valor mediante el uso estratégico de las TI [90].

En suma, Colombia ha avanzado en el diseño de marcos normativos y estratégicos para la gobernanza TI, especialmente en el sector público. No obstante, es necesario fortalecer la implementación en sectores productivos, consolidar capacidades institucionales y fomentar una cultura organizacional orientada a la toma de decisiones basada en datos, la eficiencia digital y la sostenibilidad.

4.3 Gobernanza y gestión de TI en Antioquia y Medellín

En los últimos años, los gobiernos departamentales y municipales han reconocido la importancia de la gobernanza de las tecnologías de la información como un componente esencial para fortalecer la transparencia, la eficiencia administrativa y la toma de decisiones basada en datos. Antioquia y Medellín han estructurado sus respectivos Planes Estratégicos de Tecnologías de la Información (PETI), los cuales establecen marcos de acción alineados con la política nacional de Gobierno Digital y los referentes internacionales en gobernanza de TI como ISO/IEC 38500, COBIT y el Marco de Referencia de Arquitectura Empresarial.

4.3.1 Gobernanza de TI en la Gobernación de Antioquia

El Plan Estratégico de Tecnologías de Información (PETI) de la Gobernación de Antioquia 2024–2027 [91] tiene como propósito principal

consolidar un modelo de gestión y gobierno de las TIC que promueva la innovación pública, la eficiencia en la prestación de servicios digitales y la integración de los sistemas de información departamentales para la toma de decisiones estratégicas. En el documento se definen cinco pilares estratégicos: gobierno digital, servicios ciudadanos digitales, arquitectura de ti, seguridad y privacidad, e inteligencia de negocios.

Desde la perspectiva de gobernanza, se destacan los siguientes elementos:

- Adopción de marcos internacionales como ITIL, COBIT y TOGAF para estructurar la gestión de servicios y activos tecnológicos.
- Enfoque en interoperabilidad, transparencia y control de la información pública.
- Desarrollo de un modelo de gobernanza descentralizada, con capacidades regionales mediante nodos TIC en las subregiones.
- Articulación con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo Digital para asegurar el cumplimiento de principios de sostenibilidad, equidad digital y participación ciudadana.

Este PETI enfatiza también en el fortalecimiento de la infraestructura tecnológica para soportar el uso de *big data*, inteligencia artificial e IOT como habilitadores de decisiones basadas en datos y plataformas colaborativas para la gestión interinstitucional.

4.3.2 Gobernanza de TI en el Municipio de Medellín

El Plan Estratégico de Tecnologías de Información (PETI) de Medellín 2025–2028 [92] plantea la necesidad de transformar digitalmente la ciudad, impulsando un Gobierno Inteligente y Abierto. En este documento, la gobernanza de TI se entiende como una estructura de dirección estratégica que articula políticas, procesos, personas y tecnologías para generar valor público.

Los componentes clave del modelo de gobernanza en Medellín son:

- Institucionalización del gobierno digital mediante la creación de políticas, procedimientos y comités de TI con roles definidos.
- Sistema de monitoreo de indicadores de gestión de TI para evaluar impacto, madurez y cumplimiento normativo.

- Estrategias de adopción tecnológica para ciudadanos y funcionarios públicos, desde el enfoque de ciudad inteligente.
- Desarrollo de laboratorios de innovación pública, integrando tecnologías de Industria 4.0 para la cocreación de servicios con la ciudadanía.

Además, Medellín participa en redes de ciudades inteligentes en los ámbitos regional y global, lo que ha facilitado la implementación de estándares abiertos y el desarrollo de arquitecturas interoperables en sus plataformas de gestión pública.

4.3.3 Convergencias y desafíos regionales

Tanto el departamento de Antioquia como el municipio de Medellín comparten una visión común orientada hacia la transformación digital, sustentada en la gobernanza de TI como pilar de una administración moderna y eficaz. Sin embargo, el reto principal continúa siendo la implementación efectiva de los modelos planteados, la consolidación del talento humano especializado y la adopción masiva de servicios digitales en zonas rurales o con menor infraestructura. Estos esfuerzos representan una oportunidad estratégica para que el SENA articule sus centros de formación en Antioquia y Medellín, con énfasis en vocaciones productivas locales, para capacitar el talento humano que no solo opere tecnologías emergentes, sino que también participe en su diseño, evaluación y mejora desde una perspectiva de gobernanza adaptativa e inclusiva.

4.4 Gobernanza y gestión de TI en el Servicio Nacional de Aprendizaje

SENA El Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), como entidad líder en formación para el trabajo en Colombia, ha asumido un compromiso estratégico con la transformación digital y el fortalecimiento de la gobernanza de las tecnologías de la información (TI). Esta apuesta se evidencia en su Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (PETIC) 2023–2026, el cual articula la gestión tecnológica con los objetivos institucionales, en consonancia con el Modelo Integrado de Planeación y Gestión (MIPG), el Marco de Referencia de Arquitectura Empresarial del Estado y los lineamientos establecidos por el MinTIC en el Dominio de Gobierno TI [87], [93].

El modelo de gobernanza del SENA está orientado a garantizar el uso eficiente, efectivo, transparente, seguro y ético de las tecnologías de información. Para ello, se basa en principios como la interoperabilidad, la sostenibilidad tecnológica, la seguridad digital, la innovación, la orientación al usuario y la ética digital [93]. Estos principios buscan asegurar que la inversión en TI contribuya directamente al cumplimiento de la misión institucional, de manera que sea posible garantizar la trazabilidad, la calidad de los datos y la modernización del servicio público.

La Figura 5 ilustra la alineación entre el Proyecto Educativo Institucional del SENA y el PETI 2023 – 2026. La estrategia de gobernanza de TI del SENA se apoya en mecanismos institucionales como:

- Comités de gobierno de TI.
- Procesos de rendición de cuentas.
- Auditorías periódicas.
- Herramientas para la toma de decisiones basada en datos.
- Gestión de proyectos TI con enfoque ágil y sostenible.

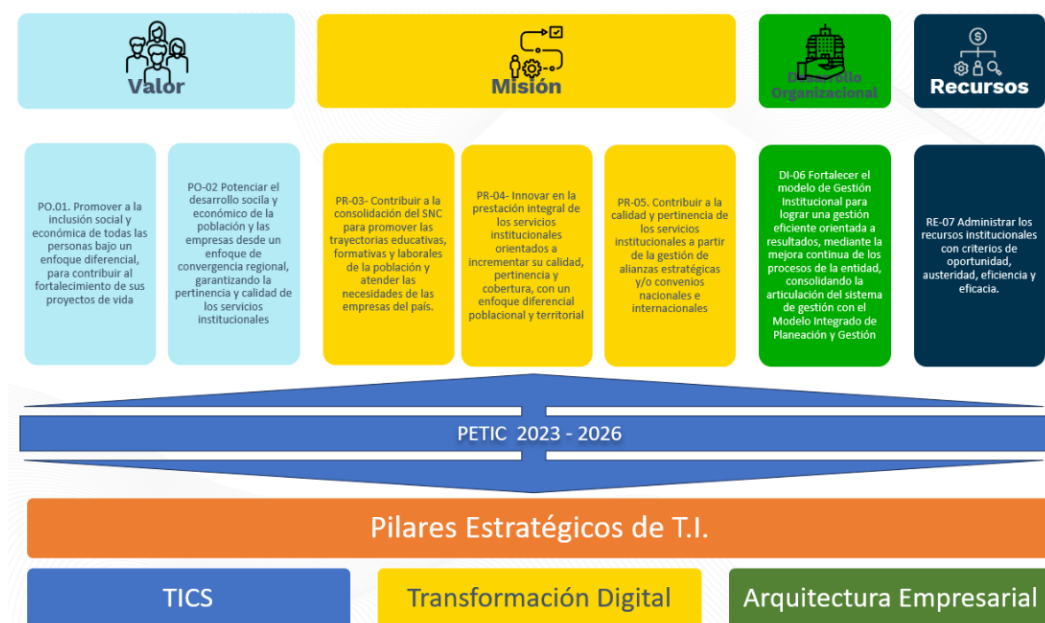


Figura 5. Alineación entre el Proyecto Educativo Institucional del SENA y el PETI 2023 – 2026 [93]

Además, el SENA adopta como referente buenas prácticas internacionales, en especial el marco COBIT para la implementación de procesos de gobierno y gestión de TI, lo que permite establecer responsabilidades claras, métricas de desempeño y alineación estratégica con los objetivos organizacionales [89].

Uno de los elementos distintivos del PETIC 2023–2026 es su enfoque en el gobierno digital, que se operacionaliza a través de ejes estratégicos como la transformación digital, la cultura del dato, la gestión del cambio, la infraestructura tecnológica y la seguridad de la información. Esta visión integral permite que la gobernanza de TI se traduzca en servicios públicos digitales más accesibles, eficientes y centrados en el ciudadano, incluyendo la comunidad educativa y empresarial que se relaciona con el SENA [93].

En términos operativos, el SENA ha consolidado un conjunto de indicadores y proyectos estratégicos para evaluar y monitorear la implementación del PETIC. Entre ellos se destacan:

- El fortalecimiento del Sistema Integrado de Información del SENA (SIIS).
- La mejora de los canales digitales de atención al ciudadano.
- La implementación de analítica de datos para la toma de decisiones institucionales.

Este enfoque posiciona al SENA como una entidad pública que cumple con los requerimientos normativos de gobernanza de TI en Colombia y lidera procesos innovadores que pueden ser replicables en otras entidades del Estado. La implementación del PETIC refleja, además, el interés por consolidar una cultura organizacional digital que involucre activamente a servidores públicos, aprendices, instructores y empresas vinculadas a la red de formación para el trabajo.

4.5 Comentarios finales de la sección

La revisión desarrollada en esta sección ha permitido identificar que los modelos de gobernanza de Tecnologías de la Información (TI), aunque inicialmente concebidos para grandes organizaciones y sectores tradicionales, se pueden constituir como herramientas estratégicas para promover las capacidades asociadas a la Industria 4.0, especialmente en entornos orientados al desarrollo de software. Marcos como COBIT, ISO/IEC 38500 y TOGAF, así como propuestas específicas de gobernanza

sectorial o territorial, han evolucionado hasta incorporar dimensiones como la agilidad, la ciberseguridad, la arquitectura empresarial, la analítica avanzada y la gestión del cambio.

En el contexto colombiano, y particularmente en entidades como el Estado, las gobernaciones y el SENA, se observa un esfuerzo por estructurar modelos adaptativos que vinculen las estrategias institucionales con el potencial transformador de las TIC. Sin embargo, también se identifica la necesidad de avanzar en mecanismos prácticos de implementación, métricas contextualizadas de desempeño y modelos flexibles de adopción para sectores de innovación como el software.

Esta perspectiva es particularmente relevante en un entorno donde el desarrollo de software demanda marcos de gestión ágiles, colaborativos y orientados a la creación de valor. La gobernanza de TI, cuando es bien adaptada y contextualizada, permite gestionar riesgos y asegurar la alineación estratégica, además de impulsar la innovación tecnológica, fomentar la interoperabilidad entre sistemas, y facilitar el escalamiento de soluciones digitales en entornos industriales emergentes.

Así, se reafirma que la gobernanza de TI no debe concebirse como un conjunto rígido de normas, sino como un marco habilitador para la evolución organizacional, capaz de fortalecer las características clave de la Industria 4.0: interconectividad, descentralización, autonomía, análisis de datos y toma de decisiones inteligentes. A partir de este análisis, se avanza hacia el estudio específico del papel de estos modelos en los procesos de desarrollo de software como pilar fundamental de la transformación digital industrial.

5. Impactos de la gobernanza de software en las vocaciones productivas de la región

En el panorama general, el gobierno de TI es una parte integral del gobierno empresarial [68]. Un programa formal de gobernanza TI también tiene en cuenta los requerimientos de las partes interesadas, así como las necesidades del personal y los procesos que siguen. En este sentido, la gobernanza de TI actúa como un puente estratégico entre las demandas del negocio y las capacidades tecnológicas, lo cual permite que los procesos de tecnología estén alineados con los objetivos organizacionales, como se ilustra en el esquema presentado en la Figura 6: se observa que el buen gobierno corporativo de las TIC se sostiene sobre tres funciones: dirigir,

evaluar y monitorizar. Estas funciones orientan las iniciativas tecnológicas, y retroalimentan los procesos de negocio, a través de la formulación de planes y políticas, la generación de propuestas y el monitoreo del desempeño. Este ciclo dinámico responde tanto a las presiones externas del negocio como a las necesidades organizacionales internas, para asegurar que los proyectos TIC y las operaciones recurrentes estén al servicio del cumplimiento de metas institucionales y sectoriales.

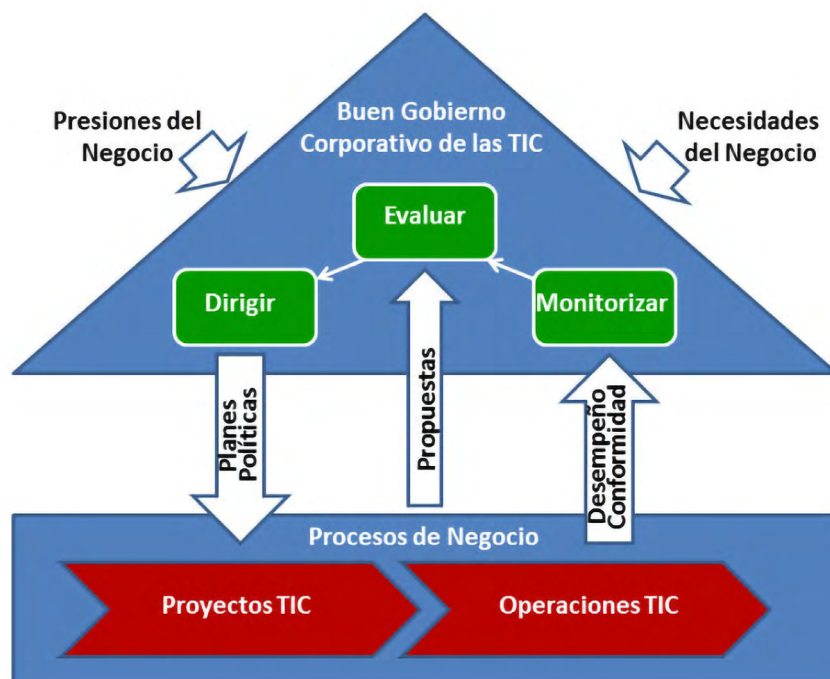


Figura 6. Modelo de alineación entre la gobernanza de TIC y los procesos estratégicos del negocio.

En el contexto particular del SENA Regional Antioquia, un modelo de gobernanza TI cobra especial relevancia al facilitar la articulación entre los desarrollos tecnológicos del Centro de Servicios y Gestión Empresarial y los saberes especializados de los demás centros de formación. De este modo, se propicia una sinergia que responde a las exigencias de sectores como la salud, el comercio, la industria textil y la manufactura, además de consolidar un modelo de gobernanza institucional orientado a la eficiencia, la trazabilidad y la generación de valor público mediante el uso estratégico de las TIC. Con elementos como la analítica de datos, la realidad virtual y

aumentada, la inteligencia artificial, la computación en nube y la ciberseguridad, se podrán desarrollar características habilitantes de la Industria 4.0 dentro de las vocaciones productivas de Antioquia según la Agenda Departamental de Competitividad a partir de la ejecución de proyectos de investigación e innovación. Esto permitirá el desarrollo de soluciones tecnológicas con los últimos estándares, para que tanto las empresas como los centros de formación del país estén integrados con las últimas tendencias y cuenten con herramientas útiles, eficientes y competitivas.

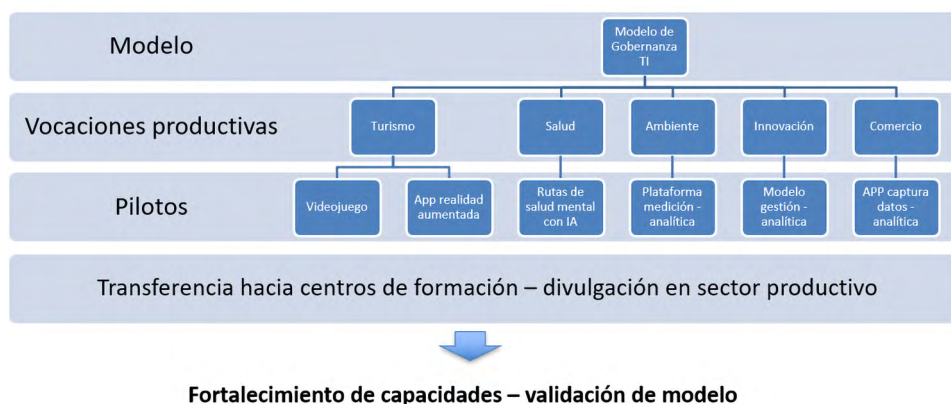


Figura 7. Fases de ejecución necesarias para definir un modelo de gobernanza TI para los desarrollos de software en el SENA.

La Figura 7 representa de manera esquemática las fases necesarias para la formulación y validación de un modelo de gobernanza de Tecnologías de la Información (TI) orientado al desarrollo de software en el SENA Regional Antioquia, con un enfoque directo hacia las vocaciones productivas estratégicas de la región: salud, comercio, turismo, ambiente, innovación y actividades creativas y culturales.

El proceso inicia con la construcción del modelo, fundamentado en la revisión de marcos conceptuales internacionales y en las condiciones institucionales locales (ver Sección 4). Esta fase considera la identificación de elementos clave de la entidad, como la infraestructura tecnológica disponible, los planes estratégicos de TI de los centros de formación, y los requerimientos específicos de cada sector productivo priorizado. De manera general, el reconocimiento de los factores primordiales de la entidad se puede basar en la cadena de valor de Michael Porter [94], la cual establece las macro actividades de toda organización. A partir del conocimiento de la organización, con el análisis de las características y

necesidades de los desarrollos de software de la región, de acuerdo con las vocaciones productivas, se puede establecer brecha entre el estado actual, el entorno y el estado deseado, para luego efectuar una selección de referentes conceptuales aplicables a la situación para el desarrollo del modelo. Se tendrán en cuenta factores como la definición de métricas y la determinación del alcance deseado, para culminar con una propuesta de modelo de gobernanza TI para desarrollos de software en la Regional Antioquia hacia las vocaciones productivas de salud, comercio, turismo, ambiente y actividades creativas y culturales.

Por medio de un modelo de gobernanza TI para los desarrollos de software en la Regional Antioquia, se podrán definir e implementar las características de Industria 4.0 que mejor respondan a las necesidades particulares de cada sector económico. Estas demandas pueden ser identificadas tanto en proyectos de innovación o investigación específicos, como también a partir de información estratégica ya disponible en los análisis sectoriales elaborados por entidades como las cámaras de comercio, la ANDI, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, así como otros entes territoriales y gremiales. Dichas fuentes proporcionan una visión macro consolidada que facilita la alineación del modelo con los retos y prioridades estructurales del aparato productivo regional. Con base en estos insumos, el modelo de gobernanza TI permitirá establecer procedimientos estandarizados para el desarrollo de software como un servicio tecnológico, configurando rutas metodológicas claras que garanticen la articulación efectiva entre los Centros de Formación aliados. Esto posibilitará que cada centro se pueda concentrar en los saberes especializados propios de su área de actuación y que sus contribuciones tecnológicas tengan un mayor impacto en los procesos de transformación digital de las vocaciones productivas priorizadas para las subregiones de Antioquia, conforme a lo estipulado en la Agenda de Competitividad e Innovación.

El desarrollo de esta idea busca aplicar el modelo propuesto mediante pilotos de pilotos tecnológicos de software para las vocaciones productivas de salud, comercio, turismo, ambiente y actividades creativas y culturales en la Regional Antioquia. Cada uno comprende la planificación, análisis, diseño, programación y pruebas del respectivo desarrollo de software. A continuación, se describen los elementos de articulación que vinculan las diferentes vocaciones productivas en el departamento de Antioquia con los centros de formación SENA de líneas asociadas.

5.1 Gobernanza de software para la vocación productiva en salud

La Cuarta Revolución Industrial ha traído avances significativos para el sector salud. La inteligencia artificial, el *big data* y la medicina de precisión mejoran notablemente el acceso a los servicios, pero, al mismo tiempo, implican retos para la formación y ética profesional, las políticas públicas y una nueva ciudadanía en salud [95], [96]. Para potenciar este sector salud se han propuesto una serie de estrategias establecidas en el Clúster Medellín Health City, orientados a promover procesos de integración y relacionamiento empresarial, teniendo como referencia un modelo centrado en el paciente, que permitan responder a los retos y oportunidades de la industria de la salud, con énfasis en servicios de excelencia clínica, transformación digital y en el desarrollo de productos de base tecnológica y valor agregado de conocimiento e innovación [97]. Estas necesidades han sido identificadas desde el ejercicio de vigilancia y prospectiva estratégica del Centro de Servicios de Salud, con tendencias estratégicas por desarrollar para el sector salud como modelos de cuidado, seguridad del paciente y la e-salud, los cuales podrán ser abordados desde la solución planteada en el proyecto.

5.2 Gobernanza de software para la vocación productiva en ambiente

En la agenda departamental de competitividad e innovación de Antioquia, para el Área Metropolitana, se identificó como vocación productiva un territorio verde y sostenible, que implica, entre otros factores, comunidades más autosuficientes, resilientes e inteligentes, capaces de hacer frente a los actuales desafíos medioambientales [42]. Por otra parte, el Plan Tecnológico del Centro de Servicios y Gestión Empresarial dentro de sus variables estratégicas, contempla la sostenibilidad ambiental desde la perspectiva de que las personas sean conscientes de sus impactos ambientales a partir de cada una de sus actividades y que dentro de sus prioridades implementen estrategias que aseguren la prevención, disminución o eliminación de las afectaciones al entorno. Así mismo, en la apuesta de escenario 2030 se contempla ser un agente transformador a partir de la sostenibilidad ambiental [98] en cuya propuesta se integran los objetivos del plan tecnológico del Centro, con el fin de potenciar la oferta de servicios relacionada con empaques nuevos materiales y segundos usos.

5.3 Gobernanza de software para la vocación productiva en actividades creativas y culturales, integrando acciones de economía del conocimiento para una región inteligente

El crecimiento en la ejecución de proyectos y, por ende, en la producción de productos de I+D+i como prototipos, publicaciones científicas y tecnológicas, innovaciones en procesos empresariales, entre otros, ha generado la necesidad de establecer mecanismos robustos para el seguimiento, evaluación y valorización de estos resultados, así como del impacto que generan en el ecosistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (CT&I) de la Regional Antioquia y de la misma institución.

En este contexto, se hace indispensable iniciar procesos de modelamiento e identificación de patrones de comportamiento de I+D+i, que permitan consolidar procesos de gestión del conocimiento basados en lecciones aprendidas y orientados a la mejora continua. Dichos procesos deben estar acompañados de la definición de indicadores clave de desempeño (KPI) para el control, la evaluación y el ejercicio prospectivo de las capacidades regionales en CT&I.

En particular, el desarrollo de software y de aplicaciones digitales constituye un eje central dentro de la economía naranja, por su vinculación con la creación de contenidos y medios digitales, y representa un habilitador transversal de la Cuarta Revolución Industrial. Su integración con tecnologías como la analítica de datos, el aprendizaje automático y los sistemas inteligentes de decisión, debe estar articulada con principios de gobernanza de datos que garanticen la confidencialidad, disponibilidad e integridad de la información. Además, el desarrollo de API (interfaces de programación de aplicaciones) para el consumo de datos en tiempo real por parte de diversos actores del ecosistema, se configura como una estrategia para mejorar procesos institucionales, optimizar servicios y fomentar la toma de decisiones basada en evidencia. Estas API, cuando se integran a una infraestructura de red de datos abiertos, permiten que ciudadanos, emprendedores y entidades del sector cultural y productivo accedan a información relevante sobre tendencias, resultados de investigación, indicadores de impacto y otros insumos estratégicos.

De esta forma, la institucionalización de una plataforma de datos abiertos y API para la gestión del conocimiento en CT&I mejora la trazabilidad y el aprovechamiento de los desarrollos de software e innovación y fortalece la proyección de Antioquia como una región inteligente, alineada con las

directrices de la Agenda Departamental de Competitividad e Innovación y con los principios de la economía del conocimiento.

5.4 Gobernanza de software para la vocación productiva en turismo

Antioquia es reconocida como uno de los destinos más visitados en Colombia, siendo Medellín la tercera ciudad con más afluencia de turistas internacionales. Esto es reconocido en el Plan de Desarrollo Turístico de Antioquia 2016-2025, en el que se busca mejorar la articulación de la promoción del destino por medio del marketing turístico [99]principalmente las empresas dedicadas a este sector. La presente investigación tuvo como propósito caracterizar las prácticas de turismo sostenible de las micro, pequeñas y medianas empresas (mipymes). El turismo sostenible se proyecta como una estrategia de reactivación económica para los territorios, pues permite la generación de ingresos de forma inmediata y local. Esta situación representa una oportunidad clave para los operadores turísticos y líderes locales, quienes pueden dinamizar el sector mediante la innovación en servicios y experiencias, teniendo en cuenta que la infraestructura, la accesibilidad y la conectividad son factores determinantes para la competitividad de los destinos.

En este contexto, la disponibilidad de una aplicación móvil basada en realidad aumentada (RA) podría permitir que los visitantes del municipio de Santa Rosa de Osos, por ejemplo, vivan experiencias turísticas inmersivas, interpretativas y educativas en los principales atractivos del municipio. La construcción de esta aplicación estaría liderada de forma conjunta por el Centro de Servicios y Gestión Empresarial y la subsele del Centro Textil y de Gestión Industrial del SENA en ese municipio, como una muestra del trabajo articulado entre centros de formación para fortalecer las vocaciones productivas territoriales por medio de tecnologías emergentes. Todo ello se ejecutará siguiendo un modelo de gobernanza de tecnologías de la información que garantice la seguridad, la integridad y la sostenibilidad del software, en línea con los principios de la economía del conocimiento y las tecnologías habilitantes de la Cuarta Revolución Industrial. Este facilitará la definición de estándares técnicos, protocolos de actualización, interoperabilidad con plataformas regionales de turismo y mecanismos de evaluación de impacto. Así, el proyecto impulsará la digitalización del turismo en Santa Rosa de Osos y servirá como una experiencia piloto replicable para otros municipios del norte antioqueño y del país, lo que

contribuirá al posicionamiento de Antioquia como una región inteligente y culturalmente atractiva.

5.5 Gobernanza de software para la vocación productiva en comercio

Por otra parte, el Centro de Comercio desde el año 2016 ha implementado con recursos Sennova la herramienta denominada «Plataforma Digital de Diagnóstico Empresarial-APP», como apoyo a la fase de «Diagnóstico Empresarial» de los proyectos formativos en los programas tecnológicos del Centro de Comercio. La plataforma reemplaza el método tradicional de diagnóstico en el que la recolección, el almacenamiento y el procesamiento de la información para las empresas se realizaba en formatos físicos o digitales, correos electrónicos, memorias USB o carpetas archivadas que, en muchas ocasiones, carecían de trascendencia, uniformidad y prevalencia en el tiempo. La plataforma está constituida por un conjunto de aplicaciones móviles y web que permiten recolectar y almacenar programas de formación y empresas que están activas en su uso [20] en bases de datos información referente a los usuarios.

El principal resultado es un diagnóstico de la situación actual de la empresa, según el área de formación que se estudia en cada programa, que brinda un plan de mejoramiento que puede ser desarrollado por el aprendiz en su etapa lectiva. Actualmente, el Centro de Comercio cuenta con diez (10) aplicativos móviles que permiten diagnosticar las empresas en los programas tecnológicos como: Gestión del Talento Humano, Gestión Logística, Negocios Internacionales, Gestión Documental, Contabilidad y Finanzas, Gestión de Mercados, Dirección de Ventas, Gestión Administrativa, Gestión Bibliotecaria y Fondo de Pensiones y Cesantías. Aunque estas herramientas han sido de utilidad para varios programas de formación del Centro, se justifica técnicamente su actualización y complemento para que su uso abarque el total de programas de formación ofertados y ejecutados por el Centro de Comercio, para cubrir la mayor cantidad de aprendices por año y generar equidad en el acceso a estas TIC.

Debido a la renovación, ya sea por reglamentación o avance tecnológico, que han tenido algunos de los programas de formación, también se justifica técnicamente la actualización de las aplicaciones desarrolladas, mediante la actualización de las rúbricas de diagnóstico de cada una, de acuerdo con los cambios recientes en las áreas de estudio, tales como leyes, programas formativos, tendencias, entre otros aspectos. En conjunto, con

el proyecto será posible mejorar la forma de evaluar el conocimiento y el desempeño producto de las competencias de los aprendices de todos los programas de formación del Centro, con una veracidad actualizada a los requerimientos del mundo laboral actual.

Toda esta población realiza sus etapas prácticas en empresas e instituciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá que se verán beneficiadas de las rúbricas y planes de mejoramiento que entregan las aplicaciones. Lo anterior favorece la transferencia de conocimiento al sector empresarial mediante las intervenciones realizadas por los proyectos formativos con el uso de las aplicaciones. Adicionalmente, dado el volumen de información generado por el número de empresas impactadas a través de estas herramientas, se encuentra una oportunidad de analítica de datos para caracterizar las organizaciones atendidas y obtener diagnósticos a nivel territorial.

5.6 Comentarios finales de la sección

La implementación de un modelo de gobernanza de TI específico para el desarrollo de software, representa una estrategia para habilitar capacidades de Industria 4.0 en sectores productivos regionales. Al articular las necesidades tecnológicas con los saberes especializados de los centros de formación, la gobernanza facilita procesos más eficientes, escalables y alineados con la transformación digital del territorio.

En el caso del SENA Regional Antioquia, esta articulación se proyecta como un modelo funcional para canalizar el desarrollo de soluciones digitales orientadas a sectores como salud, comercio, turismo, ambiente y economía creativa. El desarrollo de software, entendido como un servicio estratégico, se configura aquí como una respuesta a las demandas sectoriales y como un instrumento para dinamizar procesos de formación, investigación aplicada e innovación tecnológica.

En suma, se destaca que un modelo de gobernanza TI adecuadamente estructurado impulsa la implementación efectiva de tecnologías emergentes, la estandarización de procesos de desarrollo y la consolidación de rutas metodológicas compartidas entre actores del ecosistema productivo y formativo. Este hallazgo reafirma el papel de la gobernanza como instrumento para fortalecer las capacidades territoriales en la era de la Industria 4.0.

6. Conclusiones

La incorporación de modelos de gobernanza de TI en el contexto del desarrollo de software representa un aspecto primordial para la adopción efectiva de los principios y tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. En este estudio, se evidencia que una gobernanza sólida permite alinear la estrategia tecnológica con las metas institucionales, integrar las necesidades de los actores involucrados y articular los procesos organizacionales desde criterios de eficiencia, trazabilidad y mejora continua.

En particular, el análisis y aplicación del modelo en el caso del SENA Regional Antioquia muestra cómo la gobernanza puede potenciar la transformación digital en sectores económicos priorizados, tales como salud, turismo, ambiente, comercio y actividades culturales. A través de una combinación de los marcos de referencia internacionales como el reconocimiento de los planes institucionales (PETI) y sectoriales, se propone una estructura de gobernanza flexible, estandarizada y contextualizada a las vocaciones productivas del territorio.

Mediante este trabajo fue posible identificar referentes conceptuales (como COBIT, ITIL, ISO/IEC 27001, TOGAF, CMMI, entre otros) y analizarlos en función de su aplicabilidad a procesos de desarrollo de software orientados a resultados de valor público. Además, se integraron lineamientos nacionales y territoriales que muestran avances importantes en gobernanza digital, como el caso del PETIC del SENA y los planes estratégicos de Antioquia y Medellín. Se destaca que el diseño de un modelo de gobernanza de software integrado con las necesidades de la Industria 4.0 requiere un enfoque metodológico riguroso que contemple diagnósticos, definición de roles, análisis de brechas, implementación progresiva y evaluación basada en métricas. Este proceso permite la generación de capacidades institucionales que trascienden el ámbito tecnológico, fortalecen la toma de decisiones, la gestión del riesgo, la interoperabilidad y la innovación en los procesos formativos y de servicio.

Finalmente, el estudio sienta bases para futuras líneas de acción en política pública y en la gestión institucional, al destacar la necesidad de promover estrategias de gobernanza de TI como motor del desarrollo económico, la formación por competencias digitales y la apropiación tecnológica en los territorios. La experiencia documentada en el SENA Regional Antioquia constituye un caso aplicable a otros contextos del país, que busquen integrar tecnologías emergentes al servicio del bien común y de una economía digital más justa, eficiente y sostenible.

Agradecimientos

Este resultado fue obtenido en el marco del proyecto SENNOVA de código SGPS 8491 «Fortalecimiento de capacidades de industria 4.0 para las vocaciones productivas de Salud, Comercio, Turismo y Ambiente del departamento de Antioquia a partir de un modelo de Gobernanza TI para desarrollos de software en los Centros SENA».

Referencias

- [1] S. Heng, «Industry 4.0: Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon,» Apr. 23, 2014. [Online]. Available: <https://papers.ssrn.com/abstract=2656608>. Accessed: Oct. 29, 2024.
- [2] J. J. Roldán, E. Crespo, A. Martín-Barrio, E. Peña-Tapia, and A. Barrientos, «A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining,» *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 59, pp. 305–316, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.004.
- [3] T. Zonta, C. A. Da Costa, R. Da Rosa Righi, M. J. De Lima, E. S. Da Trindade, and G. P. Li, «Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review,» *Comput. Ind. Eng.*, vol. 150, p. 106889, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106889.
- [4] D. S. Villa, S. Gallego Valencia, and Y. P. Arboleda Urrea, «Implementation of autonomous maintenance to pneumatic tools in an assembly line, » *Rev. CINTEX*, vol. 26, no. 2, pp. 14–21, Dec. 2021, doi: 10.33131/24222208.365.
- [5] M. Peruzzini, F. Grandi, and M. Pellicciari, «Benchmarking of Tools for User Experience Analysis in Industry 4.0,» *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 806–813, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.182.
- [6] O. A. Estrada-Ramírez, N. A. Muñoz-Realpe, J. A. Patiño-Murillo, and F. Chejne, «A Novel Set of Analysis Tools Integrated with the Energy Gap Method for Energy Accounting Center Diagnosis in Polymer Production,» *Resources*, vol. 14, no. 4, p. 60, Apr. 2025, doi: 10.3390/resources14040060.
- [7] F. Zea-Restrepo and R. L. Gaviria-Mesa, «Impacto financiero generado por la implementación de las normas de información financiera (NIF) en las PYMES de Colombia en el sector curtido de cueros,» *Rev. En-Contexto*, vol. 11, no. 20, pp. 215–231, Dec. 2023, doi: 10.53995/23463279.886.
- [8] Comisión Regional de Competitividad e Innovación: Antioquia. Comisión Regional de Competitividad e Innovación, CRCI, 2022. [Online]. Available: https://www.competitivas.gov.co/docs/default-source/infografias/antioquia.pdf?sfvrsn=b9cd575_1.
- [9] Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) , «Plan Estratégico Institucional SENA 2019-2022, » Dirección de Planeación & Direccionamiento Corporativo, 2019. Accessed: Oct. 31, 2022. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/>

- d/1SddyB-wklPjFgIQTyqqQlJDRiPCabuPL/view?usp=sharing&usp=embed_facebook.
- [10] D. Mora and L. Guerrero, «Industria 4.0: el reto en la ruta hacia las organizaciones digitales,» *Estud. Gest. Rev. Int. Adm.*, Nov. 2020, doi: 10.32719/25506641.2020.8.7.
 - [11] A. Andreoni, J. Barnes, A. Black, and T. Sturgeon, «Digitalization, Industrialization, and Skills Development: Opportunities and Challenges for Middle-Income Countries,» in *Structural Transformation in South Africa*, 1st ed., A. Andreoni, P. Mondliwa, S. Roberts, and F. Tregenna, Eds., Oxford University Press Oxford, 2021, pp. 261–285. doi: 10.1093/oso/9780192894311.003.0012.
 - [12] J. Reis and N. Melão, «Digital transformation: A meta-review and guidelines for future research,» *Heliyon*, vol. 9, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12834.
 - [13] Comisión Regional de Competitividad de Antioquia, «Agenda de Competitividad e Innovación,» Comisión Regional de Competitividad e Innovación. Accessed: Sep. 20, 2022. [Online]. Available: <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/sneci/Agendas/Agenda-Departamental-Antioquia.pdf>
 - [14] A. Nguyen-Duc, J. Münch, R. Prikladnicki, X. Wang, and P. Abrahamsson, Eds., *Fundamentals of Software Startups: Essential Engineering and Business Aspects*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-35983-6.
 - [15] C. Leyh, T. Schäffer, K. Bley, and S. Forstenhäusler, «Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0,» in *Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions*, vol. 277, E. Ziemba, Ed., in Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 277, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 103–119. doi: 10.1007/978-3-319-53076-5_6.
 - [16] E. B. Machado Córdoba and A. A. Pino Martínez, «Desarrollo de un aplicativo para el modelo de alternancia académica en tiempos de COVID-19 ‘SENA ME CUIDA,» *Rev. CINTEX*, vol. 25, no. 1, pp. 32–39, Dic. 2020, doi: 10.33131/24222208.357.
 - [17] DANE, «Encuesta de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Empresas (ENTIC Empresas) 2020,» DANE, Bogotá, Colombia, Boletín Técnico, Dic. 2022. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/entic/bol_entic_empresas_2020.pdf
 - [18] DANE, «Encuesta de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en Empresas (ENTIC Empresas) 2019,» Boletín Técnico, DANE, Bogotá, Colombia, Sep. 2021. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/entic/bol_entic_empresas_2019.pdf.
 - [19] D. Cafasso, C. Calabrese, G. Casella, E. Bottani, and T. Murino, «Framework for Selecting Manufacturing Simulation Software in Industry 4.0 Environment,» *Sustainability*, vol. 12, Art. no. 15, p. 5909, Jul. 2020, doi: 10.3390/su12155909.

- [20] C. L. Ramírez *et al.*, «Desarrollo de aplicaciones web progresivas para el diagnóstico empresarial en programas de formación del Centro de Comercio del SENA,» *Rev. CINTEX*, vol. 27, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2022, doi: 10.33131/24222208.410.
- [21] Alcaldía de Medellín, «Plan de Desarrollo Distrital 2024-2027 Medellín Te Quiere,» *Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín*, 2024. [Online]. Available: <https://www.medellin.gov.co/es/wp-content/uploads/2025/05/Plan-de-Desarrollo-Distrital-2024-2027.pdf>.
- [22] OPPCM, «Seguimiento a la Línea Estratégica de Reactivación Económica y Valle del Software del Plan de Desarrollo de Medellín Futuro 2020-2023,» Observatorio de Políticas Públicas del Concejo de Medellín, 2021. [Online]. Available: <https://www.concejodemedellin.gov.co/wp-content/uploads/files/28.06.2022%20Valle%20del%20Software.pdf>.
- [23] MINTIC, «Apps.co,» Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones - Preguntas Frecuentes. Accessed: Jul. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Atencion-y-Servicio-a-la-Ciudadania/Preguntas-frecuentes/12750:Apps-co>
- [24] I. L. Muñoz Perinián and G. Ulloa Villegas, «TI Governance - State of the Art,» *Sist. Telemática*, vol. 9, no. 17, p. 23, Jul. 2011, doi: 10.18046/syt.v9i17.1052.
- [25] P. Zhang, K. Zhao, and R. L. Kumar, «Impact of IT Governance and IT Capability on Firm Performance,» *Inf. Syst. Manag.*, vol. 33, no. 4, pp. 357–373, Oct. 2016, doi: 10.1080/10580530.2016.1220218.
- [26] T. Huygh and S. De Haes, «Investigating IT Governance through the Viable System Model,» *Inf. Syst. Manag.*, vol. 36, no. 2, pp. 168–192, Apr. 2019, doi: 10.1080/10580530.2019.1589672.
- [27] G. Culot, G. Nassimbeni, M. Podrecca, and M. Sartor, «The ISO/IEC 27001 information security management standard: literature review and theory-based research agenda,» *TQM J.*, vol. 33, no. 7, pp. 76–105, Dec. 2021, doi: 10.1108/TQM-09-2020-0202.
- [28] L. Sofyana and A. R. Putera, «Business architecture planning with TOGAF framework,» *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1375, Art. no. 012056, Nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1375/1/012056.
- [29] G. Jamali and M. Oveisi, «A Study on Project Management Based on PMBOK and PRINCE2,» *Mod. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 6, p. 142, Apr. 2016, doi: 10.5539/mas.v10n6p142.
- [30] P. Mikalef, A. Pateli, and R. Van De Wetering, «IT architecture flexibility and IT governance decentralisation as drivers of IT-enabled dynamic capabilities and competitive performance: The moderating effect of the external environment,» *Eur. J. Inf. Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 512–540, Sep. 2021, doi: 10.1080/0960085X.2020.1808541.
- [31] S. De Haes, W. Van Grembergen, and R. S. Debreceeny, «COBIT 5 and Enterprise Governance of Information Technology: Building Blocks and Research

- Opportunities,» *J. Inf. Syst.*, vol. 27, no. 1, pp. 307–324, Jun. 2013, doi: 10.2308/isys-50422.
- [32] L. Chittaro, C. L. Corbett, G. A. McLean, and N. Zangrando, «Safety knowledge transfer through mobile virtual reality: A study of aviation life preserver donning,» *Saf. Sci.*, vol. 102, pp. 159–168, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.10.012.
- [33] N. E. Viana-Rua, A. A. Pino, J. J. Castro Maldonado, and J. A. Patiño Murillo, «Aplicación de la transferencia tecnológica para la validación de la pertinencia de desarrollos de software para la formulación de proyectos de investigación e innovación,» *Rev. CINTEX*, vol. 26, no. 1, pp. 24–38, Aug. 2021, doi: 10.33131/24222208.403.
- [34] B. Echeverría Samanes and P. Martínez Clares, «Revolución 4.0, Competencias, Educación y Orientación,» *Rev. Digit. Investig. En Docencia Univ.*, pp. 4–34, Nov. 2018, doi: 10.19083/ridu.2018.831.
- [35] J. A. Patiño Murillo, «Rethinking the role of assessment and feedback in technology education from a formative and transformative approach,» *Rev. CINTEX*, vol. 26, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2021, doi: 10.33131/24222208.337.
- [36] J. G. Pérez-Rojas, «Retos de las instituciones de educación superior para su articulación en la Industria 4.0,» *Rev. CEA*, vol. 6, no. 11, pp. 9–11, Jan. 2020, doi: 10.22430/24223182.1584.
- [37] M. Llanes-Font, Y. Salvador-Hernández, and M. Á. Suárez-Benítez, «Cuarta revolución industrial y administración pública de América Latina y el Caribe,» *Cienc. Holguín*, vol. 26, no. 3, pp. 78–87, 2020.
- [38] N. L. S. Marulanda and L. V. Rueda, «Una mirada a la Transformación Digital desde la estrategia SENNOVA para operativizar el Modelo de Acción Integral Territorial en Salud,» *Cienc. Tecnol. E Innov. En Salud*, vol. 4, pp. 51–60, 2019.
- [39] E. L. Rincón-Sánchez and F. A. Escobar-Díaz, «Incorporación de la Política de Atención Integral en Salud en la planeación territorial departamental en salud de Colombia, 2021,» *Saúde E Soc.*, vol. 33, no. 3, p. e220645pt, 2024, doi: 10.1590/s0104-12902024230645es.
- [40] J. I. Montaña-Caicedo, B. Gutiérrez, and C. A. Pineda-Cañar, «Rutas Integrales de Atención y Atención Primaria en Salud,» *Salud UIS*, vol. 55, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.18273/saluduis.55.e:23081.
- [41] L. S. Álvarez Castaño, «Los determinantes sociales de la salud: más allá de los factores de riesgo,» *Rev. Gerenc. Políticas Salud*, vol. 8, no. 17, pp. 69–79, 2009.
- [42] E. J. R. Zapata, «Análisis de las estrategias ambientales que implementan las ecouniversidades de Antioquia y su influencia en la mitigación de la huella de carbono,» *Rev. CINTEX*, vol. 27, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2022, doi: 10.33131/24222208.387.
- [43] S. Albareda-Tiana, P. A. Goded, J. M. Muñoz-Rodríguez, R. Valderrama-Hernández, and J. Ruiz-Morales, «Assessing competences in sustain-

- ability in teaching degrees and post-degrees: A proposal of a tool,» *Enseñ. Cienc.*, vol. 37, no. 3, pp. 11–29, 2019, doi: 10.5565/rev/ensciencias.2670.
- [44] A. E. Florián Villa, «The Importance of technology parks and rapid prototyping in innovation and industrial technological development,» *Rev. CINTEX*, vol. 28, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2023, doi: 10.33131/24222208.407.
- [45] Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), «Informe de gestión SENA 2021,» 2021. [Online]. Available: https://www.sena.edu.co/es-co/transparencia/Lists/Informes%20de%20gesti%C3%B3n/informe_gestion_sena_2021.pdf.
- [46] J. J. Castro Maldonado, J. A. Patiño Murillo, and C. Gómez López, «Procesos de I+D+i en el Centro de Servicios y Gestión Empresarial del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA 2015-2017,» *Rev. Espac.*, vol. 39, no. 20, p. 21, 2018.
- [47] P. A. Buitrago-Cadavid, J. A. Benavides-Guevara, E. J. Restrepo-Zapata, J. J. Castro-Maldonado, and J. A. Patiño-Murillo, «Geospatial visualization of indicators for the dynamics of innovation in an educational institution applying clustering techniques,» *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2516, no. 1, p. 012012, May 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2516/1/012012.
- [48] J. J. Castro-Maldonado, J. A. Patiño-Murillo, and E. Camargo-Casallas, «Aplicación de analítica de datos en la evaluación de los procesos de investigación aplicada y desarrollo experimental para fortalecer las competencias del siglo XXI en una institución de educación no formal,» *Respuestas*, vol. 27, no. 2, pp. 6–27, May 2022, doi: 10.22463/0122820X.3541.
- [49] Departamento Nacional de Planeación, «Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 Colombia potencia mundial de la vida,» Departamento Nacional de Planeación, 2023. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-inversiones-2022-2026.pdf>
- [50] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, «Plan Sectorial de Turismo 2022-2026 Turismo en armonía con la vida,» 2023. Accessed: Jul. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.mincit.gov.co/participa/consulta-ciudadana/20-12-2022-plan-sectorial-de-turismo-vfpp.aspx>
- [51] Procolombia, «Colombia alcanza cifras récord en ingresos por turismo y transporte aéreo en 2024,» *Sala de Prensa*. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://procolombia.co/sala-de-prensa/noticias/colombia-alcanza-cifras-record-en-ingresos-por-turismo-y-transporte-aereo-en-2024>
- [52] Gobernación de Antioquia, «El 2022 fue el año de la recuperación del turismo en Antioquia,» *Secretaría de Turismo*. Accessed: Jul. 01, 2025. [Online]. Available: <https://antioquia.gov.co/oculto-secretaria-de-turismo/el-2022-fue-el-ano-de-la-recuperacion-del-turismo-en-antioquia>.
- [53] K. Londoño Muriel, «En el 2022 Medellín rompió un nuevo récord en turismo - BluRadio,» BLU Radio. Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.bluradio.com/blu360/antioquia/en-el-2022-medellin-rompio-un-nuevo-record-en-turismo-rg10>.

- [54] R. Yung and C. Khoo-Lattimore, «New realities: a systematic literature review on virtual reality and augmented reality in tourism research,» *Curr. Issues Tour.*, vol. 22, no. 17, pp. 2056–2081, Oct. 2019, doi: 10.1080/13683500.2017.1417359.
- [55] F. Restrepo Giraldo, «Construcción de significado en el aula mediante el diseño de una aplicación de realidad aumentada para la enseñanza de los elementos químicos,» *Rev. CINTEX*, vol. 26, no. 1, pp. 51–64, Jul. 2021, doi: 10.33131/24222208.367.
- [56] C. Adarve Gómez, D. A. Castillo Carvajal, E. J. Restrepo Zapata, and H. Villar-Vega, «A review of virtual reality videogames for job-training applications,» *Rev. CINTEX*, vol. 24, no. 1, pp. 64–70, Dec. 2019, doi: 10.33131/24222208.346.
- [57] J. M. Mendoza and O. Lengerke, «Posibilidades competitivas para la industria del turismo en Colombia: Un estudio exploratorio,» *Rev. Interam. Ambiente Tur.*, vol. 14, no. 2, pp. 114–121, Dec. 2018, doi: 10.4067/S0718-235X2018000200114.
- [58] Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, «Perfil Económico para el Departamento de Antioquia,» *Oficina de Estudios Económicos del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo*, Jan. 2024. Accessed: Jul. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.mincit.gov.co/getattachment/800d-4b4c-9748-4fdf-88e2-a013acc7e85f/Antioquia.aspx>
- [59] V. Sima, I. G. Gheorghe, J. Subić, and D. Nancu, «Influences of the Industry 4.0 Revolution on the Human Capital Development and Consumer Behavior: A Systematic Review,» *Sustainability*, vol. 12, no. 10, p. 4035, May 2020, doi: 10.3390/su12104035.
- [60] X. D. Velásquez Monroy, «Industria 4.0 impacta la logística inversa» *LOGINN Investig. Científica Tecnológica*, vol. 7, no. 1, Jul. 2023, doi: 10.23850/25907441.5277.
- [61] Y. Sánchez Suarez, J. A. Pérez Castañeira, N. Sangroni Laguardia, C. Cruz Blanco, and Y. E. Medina Nogueira, «Retos actuales de la logística y la cadena de suministro,» *Ing. Ind.*, vol. 42, pp. 169–184, Apr. 2021.
- [62] P. Rita and R. F. Ramos, «Global Research Trends in Consumer Behavior and Sustainability in E-Commerce: A Bibliometric Analysis of the Knowledge Structure,» *Sustain. Switz.*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: 10.3390/su14159455.
- [63] J. A. Patiño-Murillo, S. Londoño Marin, M. T. Muñoz-Trejos, P. A. Quintero Echeverri, and L. Loaiza Botero, «Development of a technological platform for data analysis and customer profile according to consumption patterns,» *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 25, no. 47, Jul. 2025, doi: 10.22395/rium.v25n47a4.
- [64] M. Mingione and L. Leoni, «Blurring B2C and B2B boundaries: corporate brand value co-creation in B2B2C markets,» *J. Mark. Manag.*, vol. 36, no. 1–2, pp. 72–99, Jan. 2020, doi: 10.1080/0267257X.2019.1694566.
- [65] S. C. Esquivia, A. F. S. Prisco, J. M. R. Serna, and M. de J. B. Durango, «Sistema inalámbrico basado en IoT para la medición temperatura y velocidad en un motor de inducción,» *Rev. CINTEX*, vol. 27, no. 2, Art. no. 2, julio-diciembre, 2022, doi: 10.33131/24222208.375.

- [66] El Tiempo Latinoamericana de Registros S.A.S, «El sector del comercio electrónico en Colombia proyecta crecimiento de 17% en 2024,» Diario La República. Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/internet-economy/el-sector-del-comercio-electronico-en-colombia-proyecta-crecimiento-de-17-en-2024-3781454>.
- [67] B. Kabaja, M. Wojnarowska, M. C. Cesarani, and E. Varese, «Recognizability of Ecolabels on E-Commerce Websites: The Case for Younger Consumers in Poland,» *Sustain. Switz.*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/su14095351.
- [68] W. Van Grembergen, Ed., *Strategies for Information Technology Governance*: IGI Global, 2004. doi: 10.4018/978-1-59140-140-7.
- [69] L. Rusu and G. Viscusi, Eds., *Information Technology Governance in Public Organizations: Theory and Practice*, vol. 38. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-58978-7.
- [70] G. Ridley, J. Young, and P. Carroll, «COBIT and its utilization: a framework from the literature,» in *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. Proceedings of the*, Big Island, HI, USA: IEEE, 2004, p. 8 pp. doi: 10.1109/HICSS.2004.1265566.
- [71] H. Lingyu, L. Bingwu, Y. Ruiping, and W. Jianzhang, «An IT Governance Framework of ERP System Implementation,» in *2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*, Wuhan, China: IEEE, 2010, pp. 431–434. doi: 10.1109/CCIE.2010.226.
- [72] J. Devos, H. Van Landeghem, and D. Deschoolmeester, «Rethinking IT governance for SMEs,» *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 112, no. 2, pp. 206–223, Mar. 2012, doi: 10.1108/02635571211204263.
- [73] T. Toifur, K. Kusriani, and A. Budi, «Evaluation of Information Technology Governance Using COBIT 5 and ISO/IEC 38500,» *J. Online Inform.*, vol. 7, no. 1, pp. 17–27, Jun. 2022, doi: 10.15575/join.v7i1.814.
- [74] R. S. Dewi, «Maturity Level Assessment for ERP Systems Investment Using Val IT Framework,» *Procedia Comput. Sci.*, vol. 161, pp. 250–257, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.11.121.
- [75] M. Yasin, A. Akhmad Arman, I. J. M. Edward, and W. Shalannanda, «Designing Information Security Governance Recommendations and Roadmap Using COBIT 2019 Framework and ISO 27001:2013 (Case Study Ditreskrimsus Polda XYZ),» in *2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Nov. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/TSSA51342.2020.9310875.
- [76] Y. Al-Ashmoery, H. Haider, A. Haider, N. Nasser, and M. Al-Sarem, «Impact of IT service management and ITIL framework on businesses,» in *Proc. Int. Conf. Modern Trends Inf. Commun. Technol. Ind. (MTICTI)*, Sana'a, Yemen, Dec. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/MTICTI53925.2021.9664763.
- [77] M. Rubino and F. Vitolla, «Corporate governance and the information system: how a framework for IT governance supports ERM,» *Corp. Gov.*, vol. 14, no. 3, pp. 320–338, May 2014, doi: 10.1108/CG-06-2013-0067.

- [78] G. Fuentes-Quijada, F. Ruiz-González, and A. Caro, «Enterprise Architecture and IT Governance to Support the BizDevOps Approach: a Systematic Mapping Study,» *Inf. Syst. Front.*, vol. 27, no. 3, pp. 865–888, Jun. 2025, doi: 10.1007/s10796-024-10473-2.
- [79] J. Wang, J. Yang, and Z. Zhao, «The Analysis of Large High-tech Corporations' Governance: Taking Microsoft as an Example,» *Highlights Bus. Econ. Manag.*, vol. 24, pp. 489–493, Jan. 2024, doi: 10.54097/mbag0781.
- [80] V. M. M. Ardila, «Metodología para Afinar el Modelo de Gobierno de Tecnologías de la Información en las Organizaciones,» *Rev. Econ. Adm. E-ISSN 2463-1035 ISSN 1794-7561*, vol. 11, no. 2, Jul. 2014, Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.uao.edu.co/ojs/index.php/REYA/article/view/120>.
- [81] A. A. Tiwari, S. Gupta, E. D. Zamani, N. Mittal, and R. Agarwal, «An Overarching Conceptual Framework for ICT-enabled Responsive Governance,» *Inf. Syst. Front.*, vol. 26, no. 3, pp. 1161–1182, Jun. 2024, doi: 10.1007/s10796-023-10415-4.
- [82] S. Vejseli and A. Rossmann, «The Impact of IT Governance on Firm Performance A Literature Review,» in *Pacific Asia Conference on Information Systems*, 2017. Falta el lugar y la editorial (si disponible) según IEEE para conferencias.
- [83] A. Levstek, T. Hovelja, and A. Pucihar, «IT Governance Mechanisms and Contingency Factors: Towards an Adaptive IT Governance Model,» *Organizacija*, vol. 51, no. 4, pp. 286–310, Dec. 2018, doi: 10.2478/orga-2018-0024.
- [84] M. Gervalla and E. Hajrizi, «IT Governance vs Information Governance,» in *COVID-19 Challenges to University Information Technology Governance*, M. Alaali, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 309–329. doi: 10.1007/978-3-031-13351-0_15.
- [85] M. Marolt, G. Lenart, D. Maletič, M. K. Borštnar, and A. Pucihar, «Business Model Innovation: Insights from a Multiple Case Study of Slovenian SMEs,» *Organizacija*, vol. 49, no. 3, pp. 161–171, Aug. 2016, doi: 10.1515/orga-2016-0015.
- [86] A. Osterwalder and Y. Pigneur, *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. New York: Wiley&Sons, 2013.
- [87] MINTIC, «Guía Dominio MGGTI.G.GO - GOBIERNO DE TI,» Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2023. Accessed: Jul. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/arquitecturaempresarial/630/articles-237661_recurso_1.pdf
- [88] J. G. Vivas-Martín, H. M. Díez-Silva, and A. M. López-Sevillano, «Governance and performance of Information Technology projects in Colombia,» *DYNA*, vol. 90, no. 228, pp. 98–104, Sep. 2023, doi: 10.15446/dyna.v90n228.108569.
- [89] J. M. Aponte and M. F. Nandar Martínez, «Estado del arte, gobernabilidad tecnología de información en instituciones de educación superior» Master thesis, Universidad Cooperativa de Colombia, Bucaramanga, Colombia,

2023. [Online]. Available: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/7de683d7-d3ce-4a16-acfc-0c77543ca917/content>
- [90] P. R. Flores Cedeño and C. R. López Paz, «Gobernanza de las tecnologías de la información en el desarrollo corporativo,» May 28, 2024, *Zenodo*. doi: 10.5281/ZENODO.11374432.
- [91] Gobernación de Antioquia, «Plan Estratégico de Tecnologías de la Información 2024 - 2027 Gobernación de Antioquia,» Gobernación de Antioquia, Feb. 05, 2024. Accessed: Jul. 12, 2025. [Online]. Available: <https://antioquia.gov.co/images/PDF2/Transparencia/2024/09/petigobernacion-de-antioquia-v120242027.pdf#page=48.32>.
- [92] Secretaría de Innovación Digital, «Plan Estratégico de Tecnología de Información 2025 – 2028 Medellín.» Alcaldía de Medellín, Dec. 2024. Accessed: Jul. 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.medellin.gov.co/es/wp-content/uploads/2023/01/Plan-Estrategico-de-Tecnologias-de-la-Informacion-2025-2028.pdf#page=1.29>.
- [93] Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) «Plan Estratégico de Tecnologías de la Información y Comunicaciones – PETIC 2023-2026 V02.» Servicio Nacional de Aprendizaje, Jan. 2024. Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.sena.edu.co/es-co/transparencia/Documents/PETIC-SENA-2023-2026-V2.pdf>.
- [94] M. E. Porter, *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. New York : London: Free Press ; Collier Macmillan, 1985.
- [95] F. Da Silveira, I. R. Neto, F. M. Machado, M. P. Da Silva, and F. G. Amaral, «Analysis of Industry 4.0 technologies applied to the health sector: Systematic literature review,» in *Occupational and Environmental Safety and Health*, P. M. Arezes, J. S. Baptista, M. P. Barroso, P. Carneiro, P. Cordeiro, N. Costa, R. B. Melo, A. S. Miguel, and G. Perestrelo, Eds., *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 202. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 701–709, doi: 10.1007/978-3-030-14730-3_73.
- [96] J. Patiño, I. Vega, M. A. Becerra, E. Duque-Grisales, and L. Jiménez, «Integration Between Serious Games and EEG Signals: A Systematic Review,» *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 4, p. 1946, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15041946.
- [97] H. Mantilla-Mejía, D. J. Dorado-Ortega, and Y. Papamija-Anacona, «Identificación de estrategias desarrolladas del turismo en salud (Medellín, Colombia) años 2015-2019,» *J. Econ. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 31–47, Oct. 2023, doi: 10.55813/gaea/jessr/v3/n4/79.
- [98] A. A. Pino and N. E. Viana-Rua, «Identificación de indicadores para el diseño de una aplicación web de medición y mitigación ambiental en Complejo Central SENA Regional Antioquia,» *Rev. CINTEX*, vol. 26, no. 1, pp. 39–49, Jul. 2021, doi: 10.33131/24222208.370.
- [99] M. A. López-Argota, M. B. Monroy Anieva, J. V. Bernal Olvera, and M. B. Bernal Pérez, «Prácticas de turismo sostenible desde la gobernanza en las mipymes de Jardín (Colombia) y Tepetzotlán (México) en el periodo 2019-2021,» *Rev. CEA*, vol. 9, no. 19, p. e2253, Jan. 2023, doi: 10.22430/24223182.2253.

Reseña. Prototipado, simulación y gobernanza en la era 4.0 es un libro resultado de investigación en el que se examina la aplicación de tecnologías avanzadas de la Industria 4.0 en la resolución de desafíos técnicos y estratégicos contemporáneos. El contenido se estructura en tres capítulos: en el primero se explora la simulación computacional de los efectos acústicos producidos por el uso de tapabocas en entornos escolares; en el segundo se presenta el diseño y prototipado de un robot móvil autónomo destinado a la detección y extinción temprana de incendios; por último, en el tercer capítulo, se estudia el papel crucial de los modelos de gobernanza de Tecnologías de la Información (TI) como un instrumento para fortalecer las características de Industria 4.0 en el desarrollo de software.

www.pascualbravo.edu.co

 **IUPascualBravo**

VIGILADA Mineducación

Acreditados en Alta Calidad.
Resolución 012512 del MEN.
29 de junio de 2022 - 6 años.

Teléfono: (+57) 604 448 05 20
Calle 73 # 73a - 226 Robledo,
Vía El Volador



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación