



Semi empirical path-loss modeling and cross-validation of industrial links at 5 GHz

Modelado semiempírico de la pérdida por trayectoria y validación cruzada de enlaces industriales en 5 GHz

Washington Antonio Delgado Neira¹  

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador

Recibido: 06-07-2026 | Revisado: 19-07-2026 | Aceptado: 05-10-2026 | Publicado: 10-10-2026

Autor de correspondencia: Washington Antonio Delgado Neira 

ABSTRACT

Introduction: Wireless links in industrial plants are exposed to metallic structures, absorbing materials, machinery, and multipath conditions that can reduce the accuracy of general propagation models. **Objective:** To develop and validate a semi-empirical path-loss model for 5 GHz point-to-point links in a paper and sugar industrial environment. **Methods:** Two line-of-sight links, Panasa-ISC and Panasa-Bomba 2, installed at approximately 15 m height, were analyzed. Eight spatial points were defined on each link, and eight received-power measurement series were collected using an RF analyzer, a Wi-Fi monitoring application, and a drone. Mean values were compared with the Friis free-space model and two industrial reference parameterizations. The α , β , and A path-loss parameters were fitted in MATLAB and evaluated using root mean square error and cross-validation between links. **Results:** The model fitted with Panasa-Bomba 2 yielded $\alpha=1.73$, $\beta=2.09$, and $A=0.8417$. Its RMSE against the mean series was 1.20 dB on the source link and 2.87 dB when applied to the Panasa-ISC link. In both scenarios, it outperformed the Friis model and the absorbing-industrial reference, whose errors ranged from 4.11 to 5.93 dB. **Conclusions:** Local measurement-based semi-empirical fitting improved received-power estimation and showed transferability between two nearby industrial paths. The model can support preliminary link planning under line-of-sight conditions, distances below 500 m, and operation near 5 GHz.

Keywords: radio propagation; industrial environment; path loss; 5 GHz; semi-empirical modeling.

RESUMEN

Introducción: Los enlaces inalámbricos en plantas industriales están expuestos a estructuras metálicas, materiales absorbentes, maquinaria y condiciones de multitrayectoria que pueden reducir la precisión de los modelos generales de propagación. **Objetivo:** Desarrollar y validar un modelo semiempírico de pérdida por trayectoria para enlaces punto a punto en la banda de 5 GHz en un entorno industrial papelerero y azucarero. **Métodos:** Se analizaron dos enlaces con línea de vista, Panasa-ISC y Panasa-Bomba 2, instalados aproximadamente a 15 m de altura. En cada enlace se definieron ocho puntos espaciales y se realizaron ocho series de medición de potencia recibida mediante un analizador RF, una aplicación de monitoreo Wi-Fi y un dron. Los valores promedio se compararon con el modelo de espacio libre de Friis y con dos parametrizaciones industriales de referencia. Los parámetros α , β y A del modelo de pérdida por trayectoria se ajustaron en MATLAB y se evaluaron mediante la raíz del error cuadrático medio y validación cruzada entre enlaces. **Resultados:** El modelo ajustado con Panasa-Bomba 2 obtuvo $\alpha=1.73$, $\beta=2.09$ y $A=0.8417$. Su RMSE frente a la serie promedio fue 1,20 dB en el enlace de origen y 2,87 dB al aplicarse al enlace Panasa-ISC. En ambos escenarios superó al modelo de Friis y a la referencia industrial absorbente, cuyos errores alcanzaron entre 4,11 y 5,93 dB. **Conclusiones:** El ajuste semiempírico basado en mediciones locales mejoró la estimación de potencia recibida y mostró capacidad de transferencia entre dos trayectos industriales cercanos. El modelo es aplicable como herramienta de planificación preliminar bajo condiciones de línea de vista, distancias inferiores a 500 m y operación cercana a 5 GHz.

Palabras clave: propagación radioeléctrica; entorno industrial; pérdida por trayectoria; 5 GHz; modelado semiempírico.

INTRODUCCIÓN

La conectividad inalámbrica se ha convertido en un componente relevante de la automatización, el monitoreo y el intercambio de información en plantas industriales. La evolución reciente del Internet industrial de las cosas y de las redes privadas ha incrementado la necesidad de enlaces con mayor disponibilidad y comportamiento predecible, en especial cuando las comunicaciones soportan terminales móviles, equipos de supervisión o sistemas distribuidos de control^{1,2}. Las campañas contemporáneas de caracterización muestran que los entornos fabriles presentan propiedades distintas de oficinas y espacios residenciales debido a la concentración de superficies conductoras, maquinaria, pasillos, materiales almacenados y elementos móviles, por lo que el modelado específico del canal continúa siendo necesario^{3,4}.

La propagación industrial combina mecanismos de reflexión, absorción, difracción y dispersión que pueden producir una elevada riqueza multitrayectoria, fenómeno documentado en diferentes ambientes fabriles^{5,6}. Investigaciones realizadas en talleres, almacenes y fábricas han descrito componentes especulares y difusas, variaciones temporales, dispersión de retardo y exponentes de pérdida que dependen de la geometría y de los materiales presentes^{7,8}. Esta variabilidad explica por qué un modelo general, aunque útil como referencia, puede generar errores apreciables cuando se emplea para dimensionar potencia, margen de enlace o cobertura sin considerar las condiciones físicas del escenario.

Entre los modelos de referencia, la propagación en espacio libre constituye un punto de partida para estimar la atenuación mínima asociada a distancia y frecuencia. Sin embargo, los entornos industriales requieren con frecuencia factores empíricos o semiempíricos que ajusten esa relación. Ai et al. propusieron métodos de predicción de pérdida basados en electromagnetismo de recintos y mediciones industriales (9), mientras que Ferrer-Coll et al. distinguieron ambientes fuertemente absorbentes y altamente reflectivos y demostraron que los parámetros del canal cambian de acuerdo con la naturaleza del material y la infraestructura (10). Estudios anteriores y posteriores han confirmado que los modelos basados en mediciones permiten representar con mayor fidelidad las condiciones locales (11,12).

La banda de 5 GHz es particularmente relevante porque se utiliza en tecnologías WLAN y en otras aplicaciones industriales de corto y mediano alcance. Se han reportado campañas a 5,1, 5,4 y 5,85 GHz, entre otras frecuencias próximas, tanto en escenarios interiores como en instalaciones industriales operativas, mostrando que la presencia de metal, almacenes, robots y estructuras de producción modifica la pendiente de pérdida y la dispersión del canal^{13,14,15}. En enlaces punto a punto cercanos a esta banda también se han descrito variaciones dependientes del escenario, por lo que los parámetros obtenidos en una instalación no deben asumirse automáticamente válidos para otra sin una evaluación de transferencia o validación independiente¹⁶.

Un aspecto metodológico importante es diferenciar el ajuste del modelo y su capacidad de generalización. Un modelo puede presentar un error bajo sobre los mismos datos con los que fue estimado y, al mismo tiempo, perder precisión al aplicarse a otro trayecto. La validación cruzada entre enlaces físicamente distintos dentro de una misma zona industrial constituye una estrategia sencilla para valorar la estabilidad de los parámetros y evitar seleccionar un modelo únicamente por su desempeño de ajuste.

El presente estudio reestructura y actualiza un conjunto de mediciones de campo desarrollado en un entorno industrial del cantón Marcelino Maridueña, Ecuador, y lo analiza con enfoque de artículo científico. El objetivo fue desarrollar y validar un modelo semiempírico de pérdida por trayectoria para enlaces punto a punto cercanos a 5 GHz, comparando su desempeño con modelos de referencia mediante RMSE y mediante una evaluación cruzada entre dos enlaces industriales.

METODOLOGÍA

Se realizó un estudio de caracterización de canal basado en mediciones de campo y modelado semiempírico. El conjunto experimental procede del trabajo de titulación desarrollado por Delgado Neira en la Escuela Superior Politécnica del Litoral¹⁷; para el presente artículo se reorganizaron los datos, se concentró el análisis en las variables necesarias para la estimación de pérdida por trayectoria y se actualizó la discusión con literatura especializada.

El escenario estuvo localizado en el cantón Marcelino Maridueña, provincia del Guayas, Ecuador, e incluyó infraestructura de Papelera Nacional S.A. y del Ingenio San Carlos. Se analizaron dos enlaces punto a punto en operación y con condición de línea de vista. El enlace Panasa-ISC conectaba la planta de fuerza de Papelera Nacional con un punto del Ingenio San Carlos y tenía una

separación total aproximada de 224 m. El enlace Panasa–Bomba 2 conectaba la planta de fuerza con una estación de bombeo y alcanzaba aproximadamente 396 m. Las antenas se encontraban instaladas a una altura cercana a 15 m sobre el terreno. La documentación experimental registra operación dentro del intervalo de 5,18 a 5,19 GHz, potencia de transmisión de 15 dBm y ganancias de 3 dBi en transmisión y recepción.

Para Panasa–ISC se emplearon antenas Ubiquiti LiteBeam M5 y para Panasa–Bomba 2 antenas Ubiquiti NanoStation M5. Las mediciones de potencia se realizaron con un analizador de espectro RF Explorer y una aplicación WiFi Analyzer instalada en un terminal móvil. El sistema de medición se elevó mediante un dron hasta una altura equivalente a la del trayecto del enlace. La aplicación permitió identificar la dirección MAC del transmisor y discriminar la señal de interés frente a otras emisiones cercanas en la misma banda.

En cada enlace se definieron ocho puntos de medición distribuidos a lo largo de la trayectoria. Para Panasa–ISC, las distancias desde el transmisor fueron 18,29; 36,88; 62,21; 89,48; 119,35; 144,90; 170,48 y 195,75 m. Para Panasa–Bomba 2 fueron 23; 72; 92; 154; 203; 248; 301 y 359 m. En cada conjunto espacial se registraron ocho series de potencia recibida, por lo que el análisis dispuso de 64 valores por enlace. Para el ajuste y la comparación se utilizó el promedio de las ocho observaciones de cada punto.

La formulación de pérdida por trayectoria se derivó de la referencia de propagación en espacio libre definida por la Recomendación ITU-R P.525-418y de la parametrización utilizada en el trabajo experimental. La potencia recibida se expresó mediante las ecuaciones:

$$PL(d,f) = 10\beta \log_{10}(f) + A + 10 \log_{10}[(4\pi/c)^2] + 10\alpha \log_{10}(d)(1)$$

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL(d,f)(2)$$

donde PL es la pérdida por trayectoria en dB; d, la distancia entre transmisor y punto de medición; f, la frecuencia en Hz; c, la velocidad de la luz; α , el exponente asociado a la variación con la distancia; β , el exponente de frecuencia; A, una constante de corrección; P_{tx} , la potencia transmitida; y G_{tx} y G_{rx} , las ganancias de las antenas. La distancia de referencia fue 1 m, por lo que los términos asociados a d_0 se simplifican en la forma presentada.

Como referencias se utilizaron tres parametrizaciones: Friis, con $\alpha=2$, $\beta=2$ y $A=0$; un modelo industrial absorbente, denominado modelo A, con $\alpha=1,99$, $\beta=2$ y $A=0,01$; y un modelo industrial reflectivo, denominado modelo R, con $\alpha=1,86$, $\beta=1,82$ y $A=-5,03$. Los dos últimos parámetros proceden del marco de caracterización de ambientes industriales absorbentes y reflectivos descrito por Ferrer-Coll et al.10.

Los parámetros propios de cada enlace se estimaron en MATLAB mediante Curve Fitting Toolbox. Aunque la memoria original describe el procedimiento de forma general como regresión, el código de ajuste utiliza mínimos cuadrados no lineales para estimar α , β y A. Se generó un modelo independiente para Panasa–ISC y otro para Panasa–Bomba 2. La calidad se cuantificó con la raíz del error cuadrático medio:

$$RMSE = \sqrt{[(1/n) \sum (P_{med,i} - P_{est,i})^2]}(3)$$

La validación se realizó en dos niveles. Primero, cada parametrización se comparó con el promedio de las mediciones del enlace correspondiente. Segundo, se aplicó una evaluación cruzada: el modelo obtenido de Panasa–ISC fue utilizado para estimar Panasa–Bomba 2 y el modelo obtenido de Panasa–Bomba 2 para estimar Panasa–ISC. El modelo con menor error y mejor estabilidad entre ambos trayectos se consideró el candidato más adecuado para representar el escenario estudiado.

Tabla 1. Características principales de los enlaces y del procedimiento de medición

Característica	Panasa–ISC	Panasa–Bomba 2
Separación total aproximada	224 m	396 m
Banda de operación	5,18–5,19 GHz	5,18–5,19 GHz
Condición de propagación	Línea de vista	Línea de vista
Altura aproximada de antenas	15 m	13–15 m
Potencia de transmisión	15 dBm	15 dBm
Ganancia Tx / Rx	3 / 3 dBi	3 / 3 dBi
Antena	Ubiquiti LiteBeam M5	Ubiquiti NanoStation M5
Puntos espaciales	8	8
Series de medición por punto	8	8

Nota. La documentación experimental presenta pequeñas diferencias al asignar 5,18 o 5,19 GHz a cada enlace; por ello se reporta el intervalo observado sin modificar los resultados de potencia o RMSE de la fuente.

RESULTADOS

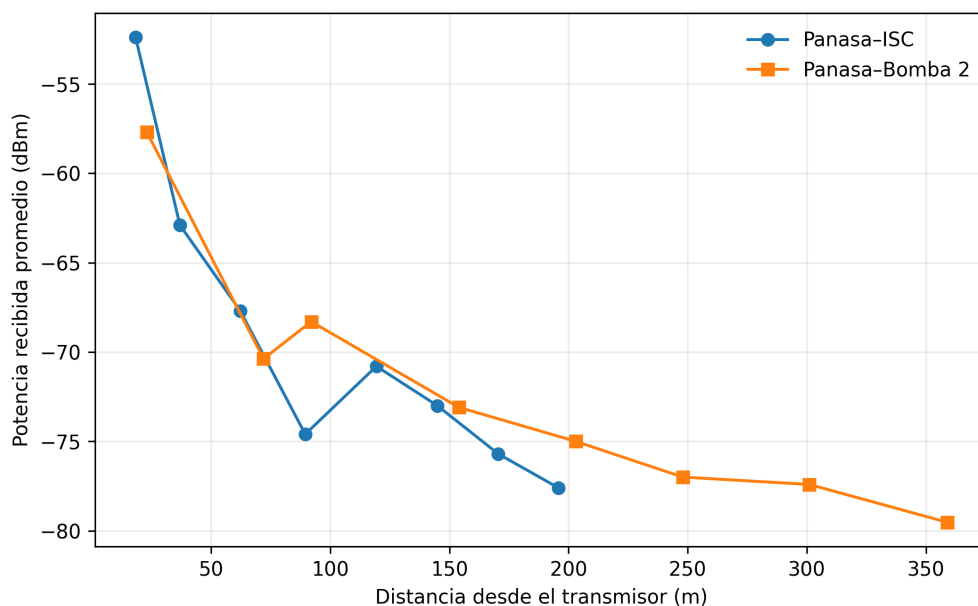
Las mediciones promedio mostraron una reducción global de la potencia recibida a medida que aumentó la distancia, pero con variaciones locales compatibles con efectos de multitrayectoria. En Panasa-ISC la potencia media disminuyó desde $-52,4$ dBm a 18,29 m hasta $-77,6$ dBm a 195,75 m. En Panasa-Bomba 2 pasó de $-57,7$ dBm a 23 m hasta $-79,53$ dBm a 359 m. En ambos trayectos se observaron puntos que se desviaron de una caída estrictamente monótona.

En Panasa-ISC destacó una reducción pronunciada alrededor de 89,48 m seguida de un aumento de potencia en 119,35 m, mientras que en Panasa-Bomba 2 se registró un incremento local en 92 m respecto del punto precedente. La inspección del escenario descrita en la campaña original relacionó estas variaciones con elementos del terreno, estructuras metálicas, zonas de almacenamiento y posibles reflexiones aditivas. Estos patrones justifican el uso de parámetros específicos del entorno en lugar de asumir exclusivamente propagación ideal.

Tabla 2. Potencia recibida promedio en los ocho puntos de cada enlace

Punto	Distancia ISC (m)	Promedio ISC (dBm)	Distancia Bomba 2 (m)	Promedio Bomba 2 (dBm)
1	18,29	-52,40	23,00	-57,70
2	36,88	-62,90	72,00	-70,38
3	62,21	-67,70	92,00	-68,30
4	89,48	-74,60	154,00	-73,10
5	119,35	-70,80	203,00	-75,00
6	144,90	-73,00	248,00	-77,00
7	170,48	-75,70	301,00	-77,41
8	195,75	-77,60	359,00	-79,53

Figura 1. Comportamiento de la potencia recibida promedio en los dos enlaces industriales



Nota. La tendencia decreciente con la distancia presenta desviaciones locales asociadas con las condiciones físicas del trayecto y la multitrayectoria.

La comparación inicial con los modelos de referencia mostró que Friis y el modelo A fueron sustancialmente más cercanos a las mediciones que el modelo R. En Panasa-ISC, los RMSE fueron 5,76 dB para Friis, 5,93 dB para el modelo A y 30,58 dB para el modelo R. En Panasa-Bomba 2 se obtuvieron 4,11; 4,29 y 29,34 dB, respectivamente. Por su elevada desviación, la parametrización R no fue competitiva en ninguno de los dos enlaces, aun cuando en puntos concretos existieron fenómenos reflectivos.

El ajuste del enlace Panasa–ISC produjo $\alpha=2,235$, $\beta=2,103$ y $A=-9,243$. La salida de Curve Fitting Toolbox consignó un RMSE de 2,739 dB para el procedimiento de ajuste. Para Panasa–Bomba 2 se estimaron $\alpha=1,73$, $\beta=2,09$ y $A=0,8417$, con RMSE de ajuste de 1,526 dB. Al recalculer el error contra las series promedio empleadas en las tablas de validación del trabajo original, los valores fueron 2,16 dB para el modelo Panasa–ISC sobre su propio enlace y 1,20 dB para Panasa–Bomba 2 sobre su enlace de origen.

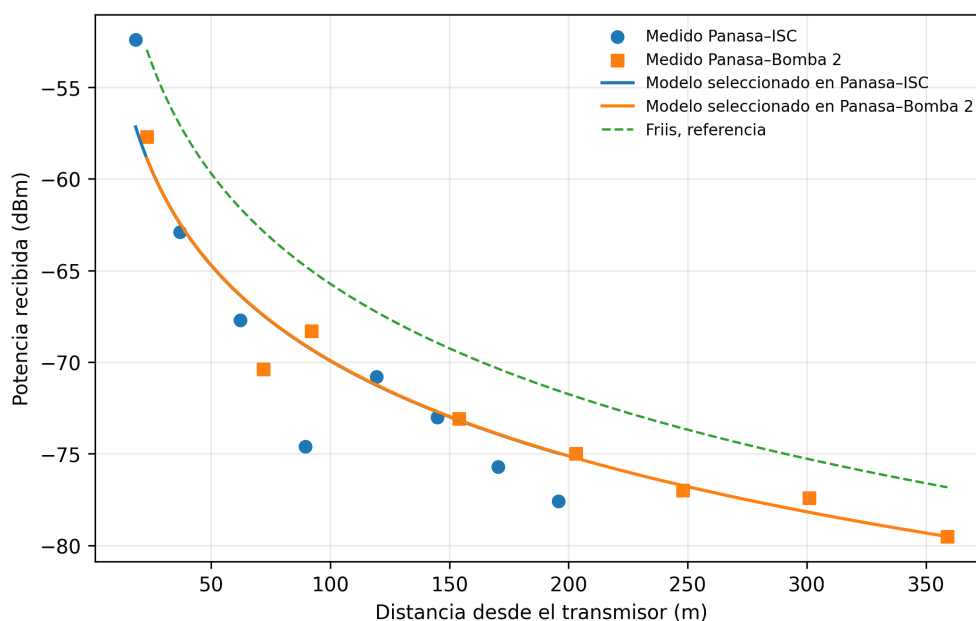
La evaluación cruzada permitió discriminar el modelo con mejor transferencia. Al aplicar el modelo Panasa–ISC sobre Panasa–Bomba 2, el RMSE fue 2,98 dB; el modelo Panasa–Bomba 2 aplicado a Panasa–ISC obtuvo 2,87 dB. Este último mantuvo una desviación claramente inferior a Friis y al modelo A en el enlace cruzado, mientras que conservó el menor error sobre su propio conjunto de datos.

Tabla 3. Parámetros y desempeño de los modelos evaluados

Modelo	α	β	A	RMSE ajuste (dB)	RMSE en Bomba 2 (dB)	RMSE en ISC (dB)
Friis	2,00	2,00	0	—	4,11	5,76
Industrial A	1,99	2,00	0,01	—	4,29	5,93
Industrial R	1,86	1,82	-5,03	—	29,34	30,58
Panasa–ISC	2,235	2,103	-9,243	2,739	2,98	2,16
Panasa–Bomba 2	1,73	2,09	0,8417	1,526	1,20	2,87

Nota. Los RMSE de ajuste corresponden a la salida de Curve Fitting Toolbox. Los RMSE en cada enlace corresponden a la evaluación contra la serie promedio utilizada en la validación. El modelo Panasa–ISC evaluado en Bomba 2 y el modelo Panasa–Bomba 2 evaluado en ISC representan la validación cruzada.

Figura 2. Validación del modelo seleccionado frente a las mediciones de ambos enlaces



Nota. El modelo seleccionado utiliza $\alpha=1,73$, $\beta=2,09$ y $A=0,8417$. Las curvas se trazaron con las frecuencias consignadas en los análisis individuales de cada enlace; los valores de RMSE reportados se conservaron de la evaluación original.

Considerando conjuntamente el error de ajuste y el comportamiento en el enlace no utilizado para estimar sus parámetros, el modelo Panasa–Bomba 2 presentó el mejor desempeño global. El intervalo observado de RMSE en la validación fue de 1,20 a 2,87 dB, frente a 4,11–5,76 dB para Friis y 4,29–5,93 dB para el modelo A. Esta diferencia indica que el ajuste local redujo de forma importante el error de estimación dentro del dominio medido.

DISCUSIÓN

El principal hallazgo fue que una parametrización semiempírica obtenida en uno de los enlaces mantuvo un error reducido cuando se trasladó al segundo trayecto. Esta observación es relevante porque diferentes estudios industriales han demostrado que la propagación depende fuertemente de la geometría local, de la densidad de metal y de la actividad en la planta (2,4,19). La validación cruzada no elimina la dependencia del sitio, pero ofrece evidencia más sólida que un ajuste evaluado únicamente con los mismos datos usados para estimar los parámetros (5).

El valor $\alpha=1,73$ del modelo seleccionado es inferior al exponente de 2 asociado al espacio libre. Exponentes bajos han sido informados en determinados entornos industriales y pueden aparecer cuando la estructura física produce múltiples trayectorias que contribuyen con energía en el receptor. Ai et al. observaron exponentes reducidos y una fuerte influencia de la multitrayectoria en ambientes fabriles²⁰, mientras que Tanghe et al. describieron características de gran escala y desvanecimiento temporal a 5200 MHz distintas de las observadas en oficinas convencionales²¹. El resultado no implica una ganancia física sobre el espacio libre en todo punto, sino que el ajuste promedio de la potencia en el intervalo estudiado presenta una pendiente menor.

Las desviaciones locales registradas en ambos enlaces son coherentes con el carácter no uniforme de los escenarios industriales. La literatura ha documentado componentes densas y especulares en talleres y almacenes, así como agrupamientos de energía en el dominio del retardo^{22,23,24}. Otros estudios de infraestructura fabril han mostrado que la respuesta electromagnética puede variar sustancialmente según los materiales y la configuración del entorno⁷. En los datos analizados coexistieron señales de ambos mecanismos: estructuras metálicas capaces de generar reflexiones y zonas de almacenamiento de papel o cartón con mayor absorción. Por esta razón, resulta más apropiado describir el escenario como heterogéneo que asignarle una única etiqueta electromagnética.

La proximidad de las frecuencias utilizadas a 5,2 GHz permite una comparación especialmente pertinente con campañas previas. Holfeld et al. estudiaron 5,85 GHz en una celda de automatización con robots en movimiento¹⁵; Jaeckel et al. midieron a 5,4 GHz en instalaciones industriales operativas¹⁴; Lyczkowski et al. analizaron 5,1 GHz junto con otras bandas sub-6 GHz¹³; y Zhang et al. realizaron mediciones SISO y MIMO a 5,5 GHz orientadas a IIoT¹. En conjunto, estos trabajos respaldan que el rango de 5 GHz necesita parametrizaciones acordes con la configuración industrial concreta y que la multitrayectoria puede mantenerse intensa incluso bajo línea de vista.

El desempeño del modelo de Friis merece una interpretación diferenciada. Aunque sus RMSE de 4,11 y 5,76 dB fueron superiores a los del modelo seleccionado, siguió la tendencia general de las mediciones y superó ampliamente al modelo R utilizado como referencia. Esto confirma su utilidad como aproximación inicial para presupuestos de enlace, tal como establece la Recomendación ITU-R P.525-4¹⁸, pero también muestra el beneficio de una corrección empírica cuando se necesita mayor precisión. Resultados semejantes han motivado modelos industriales específicos, desde formulaciones basadas en mediciones hasta métodos sustentados en electromagnetismo de recintos^{9,11,25}.

La diferencia entre el RMSE reportado por la herramienta de ajuste y el RMSE calculado sobre la serie promedio debe conservarse explícita. El código del trabajo experimental utilizó un ajuste por mínimos cuadrados no lineales, mientras que las tablas posteriores evaluaron las curvas contra promedios espaciales. Ambos indicadores responden a etapas distintas y no deben presentarse como si fueran intercambiables. Esta precisión metodológica mejora la reproducibilidad del estudio y evita atribuir al modelo un único valor de error fuera del contexto en que fue calculado.

El modelo Panasa-Bomba 2 redujo el error respecto de Friis tanto en su enlace de origen como en el enlace cruzado. Desde una perspectiva práctica, esto sugiere que la calibración con un conjunto reducido de puntos puede ser útil para ajustar estimaciones preliminares en instalaciones con topología semejante. La metodología de medición, ajuste y validación es coherente con el enfoque empleado históricamente en caracterización de canales^{12,26,27}. Además, los modelos estadísticos desarrollados para escenarios de 2 y 5 GHz muestran la importancia de contrastar el comportamiento de la propagación en configuraciones distintas¹⁶.

Los resultados deben interpretarse dentro de las condiciones del estudio. Solo se analizaron dos enlaces ubicados en una misma zona industrial y ambos mantuvieron línea de vista. La separación máxima fue inferior a 400 m, las antenas se ubicaron aproximadamente entre 13 y 15 m de altura y la banda de operación se limitó a valores próximos a 5,2 GHz. Tampoco se contó con un tercer emplazamiento independiente para validación externa ni con mediciones destinadas a separar de forma explícita el efecto de lluvia, humedad, actividad de maquinaria o variación temporal del ruido. El uso de ocho puntos espaciales y ocho series por enlace permitió identificar la

tendencia promedio, pero no caracteriza todas las configuraciones posibles de una planta industrial.

Otra limitación está relacionada con la adquisición de la potencia recibida mediante instrumentación portátil y una plataforma aérea. Aunque el procedimiento permitió medir a la altura del enlace sin modificar las instalaciones en operación, la precisión depende de la estabilidad de la posición del dron, del comportamiento del dispositivo de medición y de la actividad radioeléctrica presente durante cada campaña. Estudios posteriores deberían incorporar registro sincronizado del espectro, calibración trazable de receptores, información meteorológica y campañas en diferentes días y niveles de producción.

Como línea futura, la misma estrategia puede extenderse a enlaces sin línea de vista, alturas variables, diferentes tipos de industria y bandas de 2,4 y 5 GHz. También sería conveniente contrastar el modelo con metodologías contemporáneas de canal industrial sub-6 GHz y con modelos orientados a redes privadas 5G, donde se estudian simultáneamente pérdida de trayectoria, dispersión temporal, polarización y componentes densas de multitrayectoria^{3,19,28}. Las campañas multibanda recientes también ofrecen una referencia útil para ampliar este tipo de validación¹³. Una base multicentro permitiría estimar intervalos de confianza de los parámetros y determinar en qué condiciones el modelo deja de ser transferible.

CONCLUSIONES

El análisis de dos enlaces industriales en la banda de 5 GHz permitió obtener un modelo semiempírico de pérdida por trayectoria con mejor precisión que las referencias generales evaluadas. El modelo derivado del enlace Panasa–Bomba 2, con $\alpha=1,73$, $\beta=2,09$ y $A=0,8417$, presentó el comportamiento global más estable al considerar tanto el ajuste local como la aplicación sobre el segundo enlace.

La validación cruzada fue determinante para la selección. El RMSE del modelo seleccionado fue 1,20 dB en Panasa–Bomba 2 y 2,87 dB en Panasa–ISC, mientras que Friis alcanzó 4,11 y 5,76 dB y el modelo industrial A 4,29 y 5,93 dB. En consecuencia, la calibración basada en mediciones locales redujo el error sin perder capacidad de estimación al trasladarse entre dos trayectos cercanos con características industriales semejantes.

Las variaciones puntuales de potencia confirmaron que el canal industrial no puede interpretarse únicamente con una caída uniforme con la distancia. La potencia recibida se vio modificada localmente por las reflexiones originadas en la infraestructura metálica, la existencia de materiales absorbentes y la geometría de cada trayectoria. El modelo resultante resume el comportamiento promedio, pero no reemplaza la evaluación específica de multitrayectoria o interferencia cuando la aplicación requiere alta confiabilidad.

El modelo es apropiado como herramienta de planificación preliminar para enlaces punto a punto con línea de vista, antenas instaladas aproximadamente a 15 m, distancias inferiores a 500 m y frecuencias próximas a 5 GHz. Su aplicación fuera de este dominio requiere nuevas mediciones y validación antes de utilizar los parámetros como referencia de diseño.

Referencias

1. Zhang L, Wang CX, Zhou Z, Li Y, Huang J, Xin L, et al. Wireless channel measurements and characterization in industrial IoT scenarios. *IEEE Trans Veh Technol*. 2025;74(2):2292-2307. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3480528>
2. Bulut Cebecioglu B, Mo YK, Dinh-Van S, Fowler DS, Evans A, Sivanathan A, et al. Sub-6 GHz channel modeling and evaluation in indoor industrial environments. *IEEE Access*. 2022;10:127742-127753. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3227052>
3. Al-Saman A, Mohamed M, Cheffena M, Moldsvor A. Wideband channel characterization for 6G networks in industrial environments. *Sensors*. 2021;21(6):2015. <https://doi.org/10.3390/s21062015>
4. Lyczkowski E, Sauer C, Reichert F, Frey H. Power delay profile analysis of industrial channels at 2.1, 2.6, 3.8 and 5.1 GHz. In: 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). 2021. p. 854-859. <https://doi.org/10.1109/PIMRC50174.2021.9569632>
5. Wang Y, Lv Y, Yin X, Duan J. Measurement-based experimental statistical modeling of propagation channel in industrial IoT scenario. *Radio Sci*. 2020;55(9). <https://doi.org/10.1029/2019RS007013>
6. Schmieder M, Eichler T, Wittig S, Peter M, Keusgen W. Measurement and characterization of an indoor industrial environment at 3.7 and 28 GHz. In: 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2020. p. 1-5. <https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135943>
7. Jaeckel S, Turay N, Raschkowski L, Thiele L, Vuohtoniemi R, Sonkki M, et al. Industrial indoor measurements from 2-6 GHz for the 3GPP-NR and QuaDRiGa channel model. In: 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). 2019. p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891356>
8. Dungen M, Hansen T, Croonenbroeck R, Kays R, Holfeld B, Wieruch D, et al. Channel measurement campaigns for wireless industrial automation. *at-Automatisierungstechnik*. 2019;67(1):7-28. <https://doi.org/10.1515/auto-2018-0052>
9. Ai Y, Andersen JB, Cheffena M. Path-loss prediction for an industrial indoor environment based on room electromagnetics. *IEEE Trans Antennas Propag*. 2017;65(7):3664-3674. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2702708>
10. Holfeld B, Wieruch D, Raschkowski L, Wirth T, Pallasch C, Herfs W, Brecher C. Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots. In: 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2016. p. 1-7. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564890>
11. Cheffena M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks. *IEEE Antennas Propag Mag*. 2016;58(1):66-73. <https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2501227>
12. Ai Y, Cheffena M, Li Q. Power delay profile analysis and modeling of industrial indoor channels. In: 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2015. p. 1-5.
13. Ai Y, Cheffena M, Li Q. Radio frequency measurements and capacity analysis for industrial indoor environments. In: 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2015. p. 1-5.
14. Tanghe E, Gaillot DP, Liénard M, Martens L, Joseph W. Experimental analysis of dense multipath components in an industrial environment. *IEEE Trans Antennas Propag*. 2014;62(7):3797-3805. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2321162>
15. Ferrer-Coll J, Ångskog P, Chilo J, Stenumgaard PF. Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications. *IET Commun*. 2012;6(15):2404-2412. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2012.0028>
16. Ferrer-Coll J, Chilo J, Ben Slimane S. Radio-frequency electromagnetic characterization in factory infrastructures. *IEEE Trans Electromagn Compat*. 2012;54(3):708-711. <https://doi.org/10.1109/TEM.2012.2197753>
17. Cheffena M. Industrial wireless sensor networks: channel modeling and performance evaluation. *EURASIP J Wirel Commun Netw*. 2012;2012:297. <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-297>
18. Luo S, Polu N, Chen Z, Slipp J. RF channel modeling of a WSN testbed for industrial environment. In: 2011 IEEE Radio and Wireless Symposium. 2011. p. 375-378. <https://doi.org/10.1109/RWS.2011.5725435>
19. Tanghe E, Joseph W, De Bruyne J, Verloock L, Martens L. The industrial indoor channel: statistical analysis of the power delay profile. *AEU Int J Electron Commun*. 2010;64(9):806-812. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2009.06.003>
20. Tanghe E, Joseph W, Verloock L, Martens L. Statistical validation of WLAN range calculated with propagation models for industrial environments by chipset-level received signal strength measurements. *IET Sci Meas Technol*. 2009;3(3):244-255. <https://doi.org/10.1049/iet-smt:20080024>
21. Tanghe E, Joseph W, Verloock L, Martens L, Capoen H, Van Herwegen K, et al. The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz. *IEEE Trans Wirel Commun*. 2008;7(7):2740-2751. <https://doi.org/10.1109/TWC.2008.070143>
22. Karedal J, Wyne S, Almers P, Tufvesson F, Molisch AF. A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels. *IEEE Trans Wirel Commun*. 2007;6(8):3028-3037. <https://doi.org/10.1109/TWC.2007.051050>
23. Zhao X, Kivinen J, Vainikainen P, Skog K. Propagation characteristics for wideband outdoor mobile communications at 5.3 GHz. *IEEE J Sel Areas Commun*. 2002;20(3):507-514.
24. Wang Z, Tameh EK, Nix AR. Statistical peer-to-peer channel models for outdoor urban environments at 2 GHz and 5 GHz. In: IEEE 60th Vehicular Technology Conference. 2004;7:5101-5105.
25. Andersen JB, Rappaport TS, Yoshida S. Propagation measurements and models for wireless communications channels. *IEEE Commun Mag*. 1995;33(1):42-49. <https://doi.org/10.1109/35.339880>
26. Rappaport TS. Characterization of UHF multipath radio channels in factory buildings. *IEEE Trans Antennas Propag*. 1989;37(8):1058-1069. <https://doi.org/10.1109/8.34144>

27. International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.525-4: Calculation of free-space attenuation. Geneva: ITU; 2019.
28. Delgado Neira WA. Modelamiento de propagación del canal inalámbrico en la banda de 5 GHz en área industrial [trabajo de titulación de maestría]. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral; 2018.

Financiación

No aplica.

Conflictos de interés

No existe.

Contribución de autoría

Conceptualización: Washington Antonio Delgado Neira.

Metodología: Washington Antonio Delgado Neira.

Investigación: Washington Antonio Delgado Neira.

Redacción – borrador original: Washington Antonio Delgado Neira.

Redacción – revisión y edición: Washington Antonio Delgado Neira.