

Ciber-Sistemas

Revista de Ingeniería



Revista Ciber-Sistemas

Fundación Universitaria Los Libertadores
Bogotá, noviembre de 2021
ISSN: 2745-2662

Presidente del Claustro

Juan Manuel Linares

Rectora

Ángela María Merchán Basabe

Vicerrectora General

María Angélica Cortes Montejo

Vicerrector Académico

Vladimir Ballesteros Ballesteros

Comité Editorial

Luis Alejandro Caycedo Villalobos

Iván Darío Ladino Vega

Oscar Fernando Penagos

Nelson Eduardo Lozano

John Petearson Anzola

Editor Jefe

Jairo Ignacio Rodríguez Osorno



CIBER-SISTEMAS

Licencia de Publicación



Publicación disponible en:

<http://hdl.handle.net/11371/4066>





Nota del editor

Los Sistemas Ciber-Físicos darán respuesta a las necesidades de la sociedad y los requerimientos de la industria en Colombia. Esta tecnología está marcada en gran parte por la eclosión de los Sistemas Ciber-físicos, que interactúan con la interconexión del “todo con el todo” en el Internet de las Cosas a lo largo de la integración vertical y horizontal dentro de la Industria 4.0. Adicionalmente, los Sistemas Ciber-Físicos son vitales para el crecimiento económico, empresarial, industrial, la generación de nuevos sistemas de negocio y el bienestar de la sociedad.



Artículos de Divulgación

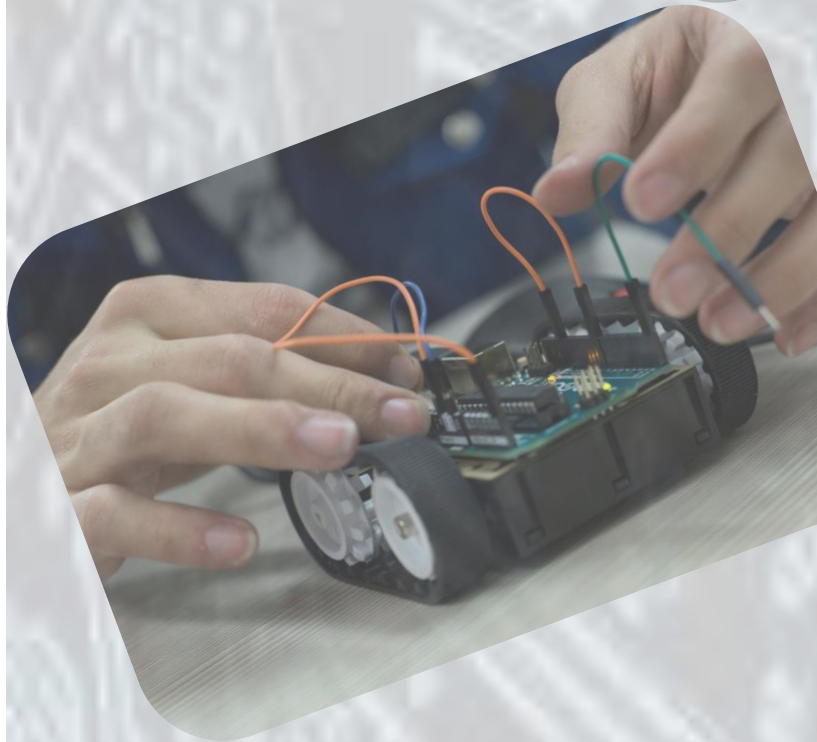
Artículos de Divulgación

05

Predicción de radiación solar para sistemas fotovoltaicos utilizando técnicas de aprendizaje automático en Python

15

Estimación de distanciamiento social mediante mapas de calor





Predicción de radiación solar para sistemas fotovoltaicos utilizando técnicas de aprendizaje automático en Python

Richard Cortázar Forero
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Luis Alejandro Caycedo Villalobos
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un modelo de predicción de radiación solar, el cual hace uso de tratamiento de datos meteorológicos medidos por satélite y datos medidos en tierra. El modelo emplea un algoritmo de perceptrón multicapa para predecir valores de radiación solar en un periodo de tiempo específico, las variables climáticas usadas como entrada del modelo son la radiación solar, temperatura e índice de claridad, todas estas obtenidas de los datos satelitales. El objetivo principal de este modelo es el de crear una herramienta que permita usar los datos satelitales para obtener un estimado del comportamiento del recurso solar reduciendo el error entre los datos satelitales y los datos medidos en tierra. El modelo logró obtener una disminución del 10.0448% del error con una diferencia promedio de 0.1916 kW/m².

Palabras Clave: Radiación solar, Satélite, Estimación, Red Neuronal, Análisis de datos.

1. Introducción

La radiación solar es la energía emitida por el sol, esta se propaga en forma de ondas electromagnéticas a través del espacio y llega a la superficie terrestre después de atravesar la atmósfera, se considera la fuente de energía más abundante e importante para la vida en la tierra, es la causa de fenómenos naturales y de reacciones químicas para el crecimiento de plantas y animales. La energía captada por la tierra proveniente del sol es la principal fuente de energía renovable que tenemos disponible, la cantidad de energía que es captada anualmente es aproximadamente 1.6 millones de kWh, la cual es mucho más de lo que se consume mundialmente Schallenberg Rodríguez, Piernavieja Izquierdo, Hernández Rodríguez, Unamunzaga Falcón *et al.* (2008) . Con el fin de disminuir la dependencia de la energía eléctrica producida por fuentes no renovables el uso de la energía solar ha cobrado gran importancia en los últimos años, prueba de ello es el aumento de los sistemas solares fotovoltaicos - FV como parte de la generación de energía eléctrica, según Enerdata en el año 2019 la generación de energía eléctrica a partir de energía solar tuvo un aumento del 24 % con respecto al año 2018 Sánchez Silva and Gabriel Maldonado (2021).

Con la alta demanda de energía eléctrica actualmente, ha surgido un gran interés a nivel mundial por integrar a la red eléctrica sistemas de energía solar, con el fin de mejorar la calidad suministrada en algunos sitios y reducir los costos asociados a la dependencia de la red eléctrica convencional. Sin embargo, la implementación de estos sistemas presenta un obstáculo, el dimensionamiento de un sistema FV está estrechamente relacionado con las condiciones climáticas [Obando-Paredes and Vargas-Cañas \(2016\)](#), por lo cual se requieren fuentes de datos confiables que permitan hacer un pronóstico del recurso solar. Gracias al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se cuenta con datos de irradiancia medida en diferentes estaciones meteorológicas de Colombia, pero no cualquier usuario tiene acceso a estos datos, por lo que se hace necesario contar con una fuente adicional que permita obtener datos fiables y que proporcionen información de predicción en el futuro. Una alternativa, es el acceso que tienen los usuarios a los datos de la base de datos PowerViewer de la NASA, pero para que se puedan usar se debe reducir el error en la medición de la radiación solar tomada por satélite y registrada en la base de datos.

El modelo que se propone busca realizar el ajuste de la radiación promedio diaria y la desviación estándar de la misma reportado por el satélite y obteniendo un modelo de distribución normal que predice los valores de la radiación diaria con sus máximos y mínimos. Además, realizar el ajuste a valores a partir de los registrados por el IDEAM en las diferentes estaciones meteorológicas de Colombia.

Por esta razón, se propone un modelo que pueda ser usado como herramienta de planeación para el diseño de sistemas FV, para lo cual se hace uso del lenguaje de programación Python, empleando las librerías Pandas, netCDF4 y Scikit Learn. Dicho modelo está estructurado en 4 etapas: 1. Lectura y procesamiento de los datos medidos en tierra (IDEAM), 2. Apertura y procesamiento de los datos proporcionados por la base de datos PowerViewer, 3. Pronóstico de datos, 4. Análisis de resultados.

2. Trabajos Realizados

La predicción de la radiación solar brinda la posibilidad de optimizar el funcionamiento de los sistemas alimentados por energía solar, mejorar la calidad, optimizar los costos de producción y estimar la cantidad de energía que puede entregar el sistema. Anteriormente se han realizado varios estudios similares a los que se realizaron en este trabajo.

En [Bella-Santos \(2018\)](#) el autor utilizó datos meteorológicos almacenados en ficheros GRIB y netCDF para generar un modelo predictivo en Python usando la librería sklearn, específicamente se usó el método de regresión lineal entre diferentes datos de irradiancia, en el que se consiguió un coeficiente de determinación de 0.82 y un error absoluto medio de 4.16.

En [Vélez-Pereira, Vergara, Barraza, and Agudelo \(2013\)](#) se generó un modelo estadístico para la estimación de radiación solar aplicando datos meteorológicos alternos. Los datos que se emplearon para el estudio fueron suministrados por el IDEAM, de una estación que cuenta con la medición de radiación solar, temperatura, humedad relativa y hora de sol. Se emplearon regresiones estadísticas Angstrom-Preseott y Gueymard, en las cuales se evidenció poca relación entre las variables, el mejor ajuste logrado fue mediante la regresión lineal entre la humedad relativa y la radiación solar con un coeficiente de determinación de 11.14%.

En [Obando-Paredes \(2018\)](#) el autor propone un modelo de predictor híbrido implementado en etapas de clasificación-agrupamiento usando Lógica Difusa y para la estimación Redes Neuronales y Máquinas de Vectores de Estado, el objetivo principal fue crear un modelo que tuviera en cuenta las condiciones geográficas de Colombia. Las variables de entrada al modelo incluyeron temperatura, velocidad del viento, índice de claridad, precipitación total,

humedad relativa y presión atmosférica, todas estas obtenidas de la base de datos PowerViewer de NASA. Los coeficientes de correlación obtenidos por este modelo se encuentran cercanos a 1 y el error cuadrático medio (RMSE) se encuentra entre 0.04 y 0.09, demostrando que en general el modelo muestra un rendimiento aceptable en todas las ciudades evaluadas.

En Jimenez, Will, and Rodriguez (2017) se propone un modelo para predecir radiación solar horaria utilizando regresión lineal y redes neuronales. Se utilizaron como variables de entrada al modelo radiación solar obtenida con modelos matemáticos, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Se compararon los modelos aplicados para determinar cuál se ajustaba de mejor manera con datos provenientes de cinco estaciones meteorológicas de Tucumán, Argentina. Los resultados obtenidos muestran que se logró un error promedio de 11 % con regresión lineal y 7.84 % con redes neuronales.

3. Método Propuesto

El presente trabajo propone un modelo que permita reducir el error en la medición de la radiación solar tomada de la base de datos PowerViewer tomando como referencia los datos registrados por el IDEAM en sus estaciones meteorológicas cercanas a la región geográfica de interés. Obteniendo de esta propuesta un modelo de distribución normal para la radiación solar y su desviación estándar en un día en particular.

Los datos meteorológicos usados para generar el modelo propuesto en este trabajo fueron obtenidos de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de la base de datos PowerViewer de la NASA, los cuales están contenidos en archivos formato CSV y netCDF respectivamente. Se tomaron como referencia los datos de mediciones de radiación solar, índice de claridad y temperatura en las estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades principales de Colombia¹. La ventana de tiempo empleado en este trabajo está comprendida entre el 4 de diciembre de 2014 al 31 de agosto de 2020.

El desarrollo del modelo propuesto se realiza en 4 etapas: 1. Apertura y procesamiento de los datos medidos en tierra (IDEAM), 2. Apertura y procesamiento de los datos proporcionados por la base de datos PowerViewer, 3. Pronóstico de datos, 4. Análisis de resultados. Los detalles de cada etapa se describen en las siguientes secciones.

3.1. Apertura y procesamiento de los datos medidos en tierra (IDEAM)

Los datos de mediciones en tierra proporcionados por el IDEAM están contenidos en ficheros CSV, para su lectura se emplea la librería pandas², que nos permite visualizar, analizar y procesar conjuntos de datos que son conocidos como dataframe. Además de su lectura, estos datos al estar registrados de manera horaria, se debe realizar el procesamiento de representación en una distribución normal para obtener datos que puedan ser comparados con el fichero de datos satelitales.

El preproceso previo a obtener la distribución normal busca eliminar los registros que no aportan información relevante para el análisis. Del dataframe se suprimen los registros de los cuales la estación de meteorología no registró información, es decir las filas con registros iguales a 0, valores que corresponden a las horas donde no hay radiación solar incidente sobre el equipo. Además, filtrar los datos mediante el cálculo de la media móvil sobre el conjunto de datos para reducir las perturbaciones producidas por el dispositivo encargado de registrar los datos.

¹Las estaciones empleadas son: a. Aeropuerto Matecaña - Pereira, b. Aeropuerto Olaya Herrera - Medellín, c. Universidad Nacional - Bogotá, d. Aeropuerto los Garzones - Montería

²Librería Pandas que hace parte de PYTHON 3.0 Python 3.7.3

Una vez filtrados los datos se obtiene el acumulado diario de radiación, con el fin de usar estos datos en la etapa 3 del desarrollo del modelo. Como ya se mencionó la herramienta permite analizar los datos por medio de gráficas que ayudan a ver el comportamiento a lo largo del periodo de tiempo seleccionado, por lo que el siguiente paso es generar un conjunto de gráficas con las cuales se analizan y comparan los datos antes y después de los procesos anteriores

3.2. Apertura y procesamiento de los datos proporcionados por la base de datos PowerViewer

Los datos obtenidos por la base de datos PowerViewer se encuentran contenidos en un fichero netCDF³, una vez esté cargado el archivo con la metadata con la información correspondiente al nombre de las variables, unidades y longitud de datos. Además, con estos datos, se procede a extraer con la ayuda de numpy⁴ los valores en forma de arrays. Haciendo uso de la función de probabilidad, se comparan los datos medidos en tierra con los datos satelitales antes del procesamiento para entender su comportamiento.

3.3. Método para obtener el modelo de estimación

El modelo de predicción presentado en este trabajo propone el empleo de una red neuronal artificial - RNA. En problemas donde se requiere realizar una predicción en series de tiempo empleando variables climáticas como entrada del modelo, han sido las RNA las cuales entregan una mejor respuesta en comparación a otros métodos [Brentan, Novarini, Luvizotto, Herrera, Izquierdo, and Pérez-García \(2015\)](#). En [Villada, D, and J \(2014\)](#) se desarrolló un modelo para el pronóstico del precio de la energía eléctrica mediante el uso de RNA con una configuración perceptrón multicapa, esta arquitectura ha demostrado ser una de las más útiles en cuanto a la resolución de este tipo de problemas.

El modelo seleccionado para realizar la estimación de la radiación solar fue una RNA con arquitectura perceptrón multicapa sencilla [Brentan et al. \(2015\)](#) [Villada et al. \(2014\)](#). La estructura de la RNA propuesta corresponde a: a. capa de entrada: diferentes variables climáticas, b. capa oculta: contiene la función de activación, c. capa de salida: variable objetivo. La estructura descrita se representa en la [1](#).

El modelo de la RNA se basa en las herramientas proporcionadas por la librería sklearn⁵, la cual provee diferentes módulos que permiten la implementación de distintas arquitecturas. En este caso se emplea el módulo MLPRegressor⁶.

La elección y ajuste de los parámetros se realizó mediante la aplicación de un método experimental, con el fin de replicar el comportamiento de la variable objetivo en el resultado obtenido por la predicción, así mismo se determinaron estos parámetros de tal manera que el error entre la predicción y datos en tierra fuese menor a los datos satelitales y datos en tierra.

El primer argumento definido es *activation* que indica la función de activación para la capa oculta, siguiendo el método anteriormente explicado se elige '*relu*'= función lineal rectificadora, que es una función lineal que genera la entrada directamente si el valor de entrada es positivo, de lo contrario se genera un cero. Luego, se encuentra el parámetro *solver* que se refiere al algoritmo optimizador para calcular el valor mínimo de la función de coste o pérdida, la cual se encarga de reducir el error en la predicción, para este caso se está empleando '*sgd*'= descenso del gradiente estocástico, este algoritmo calcula el gradiente para una muestra en

³El formato netCDF contiene metadata registrada por el satélite y se emplea la librería netCDF4 de PYTHON para su lectura

⁴Librería NUMPY que hace parte de PYTHON 3.0

⁵Librería SKLEARN de PYTHON 3.0

⁶Librería MLPREGRESSOR de PYTHON 3.0

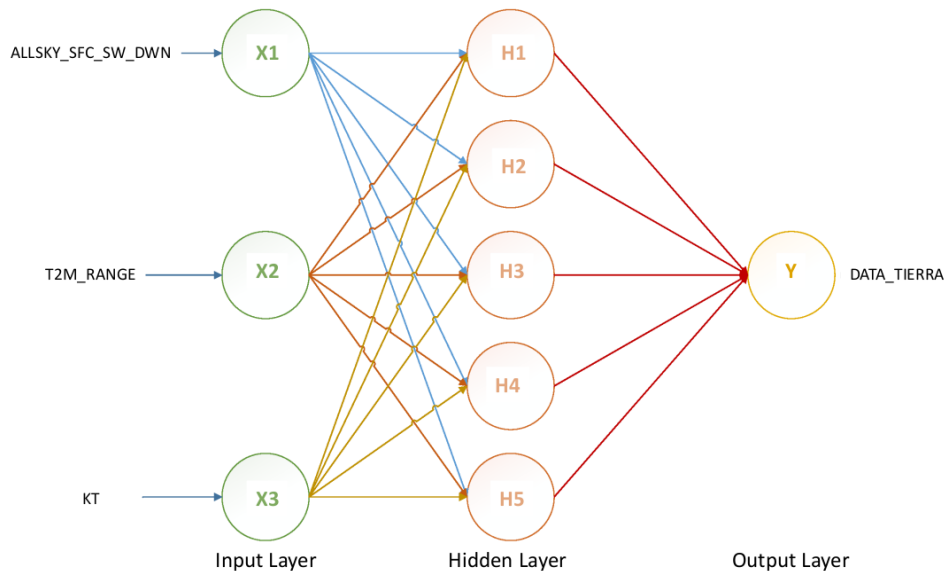


Figura 1: Estructura Red Neuronal perceptron multicapa propuesta.

cada iteración buscando el valor que minimice la desviación a la salida. Además, se tiene el parámetro α que es el término de regularización para la determinación de los pesos, este término α se encuentra ajustado a un valor pequeño.

En cuanto a la configuración de la capa oculta el parámetro $hidden_layer_sizes$ permite estructurar la cantidad de neuronas y la cantidad de capas que conforman esta sección, la RNA propuesta consta de una capa con 5 neuronas. Otro parámetro importante en la configuración de la RNA es max_iter que determina la cantidad de veces que se hacen pasar los datos a través de esta, lo que es conocido como épocas. Acompañado de esto se tiene tol , el cual determina la tolerancia para la optimización del aprendizaje, si la pérdida no mejora al menos del valor fijado el entrenamiento se detiene.

3.4. Entrenamiento de la RNA

De acuerdo con la información consultada en Obando-Paredes (2018), se muestra que la radiación solar presenta alta correlación en los datos registrados por el satélite para las variables de la temperatura, el índice de claridad, por lo cual estas variables climáticas se usan junto con la radiación solar tomada por el satélite como las características predictoras representadas como [X] de la RNA. Por otra parte, la variable objetivo representada como [Y] es la radiación solar promedio medida en tierra.

La siguiente parte del proceso consiste en crear conjuntos de datos, los cuales corresponden a un conjunto de entrenamiento, equivalente al 70% y un conjunto de prueba equivalente al 30% de los datos seleccionados. En esta etapa se emplea la librería sklearn de la cual usamos la clase $sklearn.model_selection$ que permite seleccionar el tamaño de datos para cada uno de los conjuntos (entrenamiento y prueba) mediante el parámetro $test_size$, este parámetro debe tener un valor entre 0 y 1, el cual determina la cantidad de datos de prueba que se van a usar, por ende el restante corresponde a los datos que serán usados para el entrenamiento del modelo propuesto.

4. Resultados

Los resultados obtenidos a partir del modelo de estimación empleando una RNA con confi-

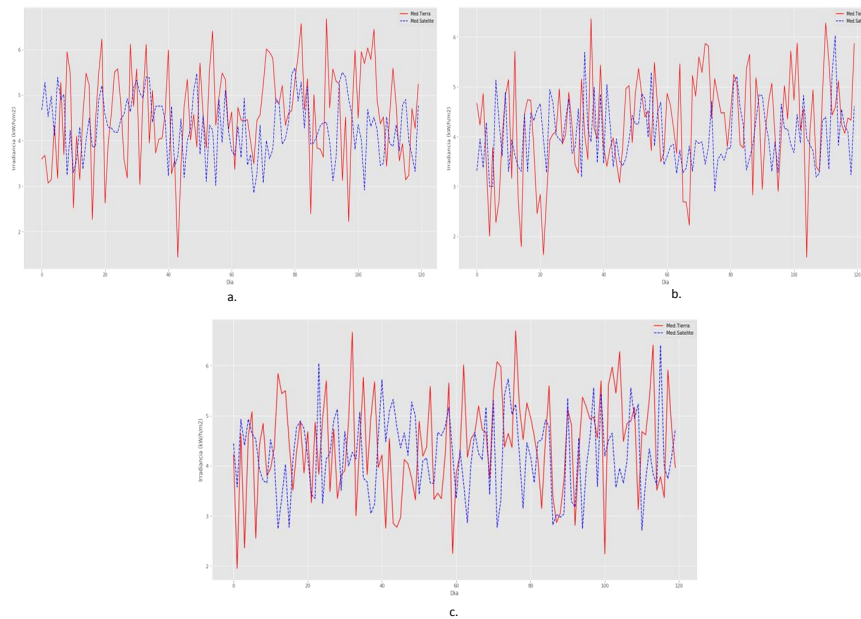


Figura 2: Estimación mediante modelo RNA de la radiación solar en tierra empleando datos medidos por satélite, valores estimados vs valores medidos en tierra separados en 3 periodos para un año Juliano. a) Estimación para los días julianos 1 al 120. b) Estimación para los días julianos 121 al 240. c) Estimación para los días julianos 241 al 360.

guración perceptrón multicapa entre la variable objetivo y las variables predictoras realizado para un periodo de un año, dividido en sub periodos de cuatro meses entregó los siguientes resultados, los cuales aportan la información necesaria para interpretar de manera óptima los resultados entregados por el modelo.

El primer resultado entregado por el modelo corresponde a los valores estimados de radiación solar diaria para el periodo seleccionado, en la gráfica presentada por el programa se encuentran los valores objetivo comparados con los valores predcidos por el modelo, ver Figura 2. Posterior se encuentra la comparación de la distribución normal de los datos presentados y empleada para determinar la concentración de los datos presentados resultantes del modelo, ver Figura 3. Por último se muestra la comparación del error entre los datos satelitales y datos tierra con el error entre los datos estimados por el modelo de la RNA y los datos tierra, esto con el fin de validar el error estimado del modelo, ver Figura 4.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos medidos por la estación Aeropuerto Olaya Herrera de la ciudad de Medellín, durante el periodo del 4 de diciembre de 2014 al 4 de diciembre de 2015, analizados en periodos de cuatro meses. El tamaño de cada muestra fue de 120 datos, el 70% de los datos fueron empleados para el entrenamiento y el 30% para la prueba de la RNA.

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para cada periodo de análisis junto con los valores de referencia medidos por satélite y mediciones en tierra.

En general, la Tabla 1 muestra que el modelo tiene un comportamiento aceptable, ya que logra replicar la variabilidad de la radiación solar a lo largo del tiempo y que mantiene su desempeño al ser evaluado en diferentes épocas del año. Entre los datos obtenidos por el modelo y los datos de referencia se obtuvo una diferencia promedio de 0.1916 kW/m², en comparación a la diferencia con los datos satelitales que presenta una diferencia promedio de 0.5879 kW/m².

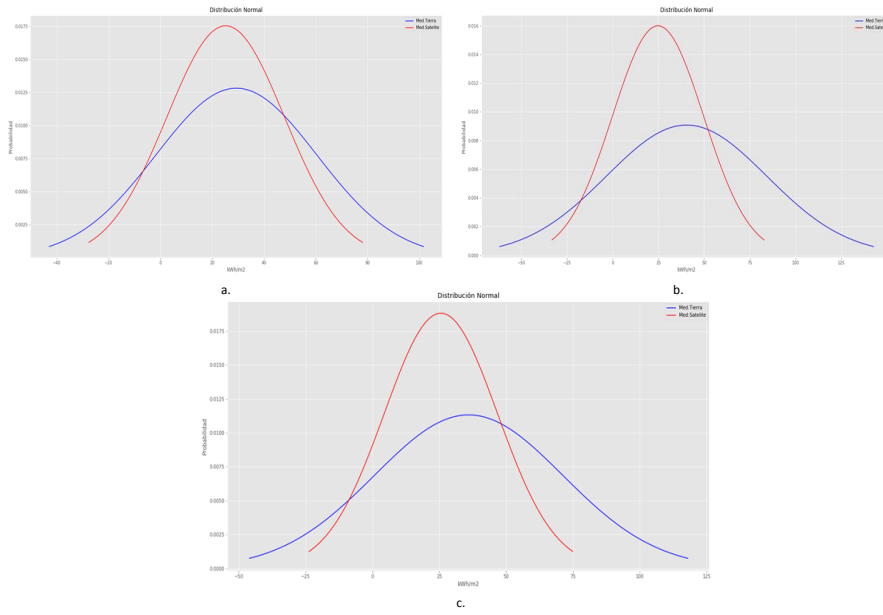


Figura 3: Estimación mediante modelo RNA de la radiación solar en tierra empleando datos medidos por satélite , comparación de la distribución normal de los datos estimados para serie de datos vs datos medidos en tierra. a) Estimación para los días julianos 1 al 120. b) Estimación para los días julianos 121 al 240. c) Estimación para los días julianos 241 al 360.

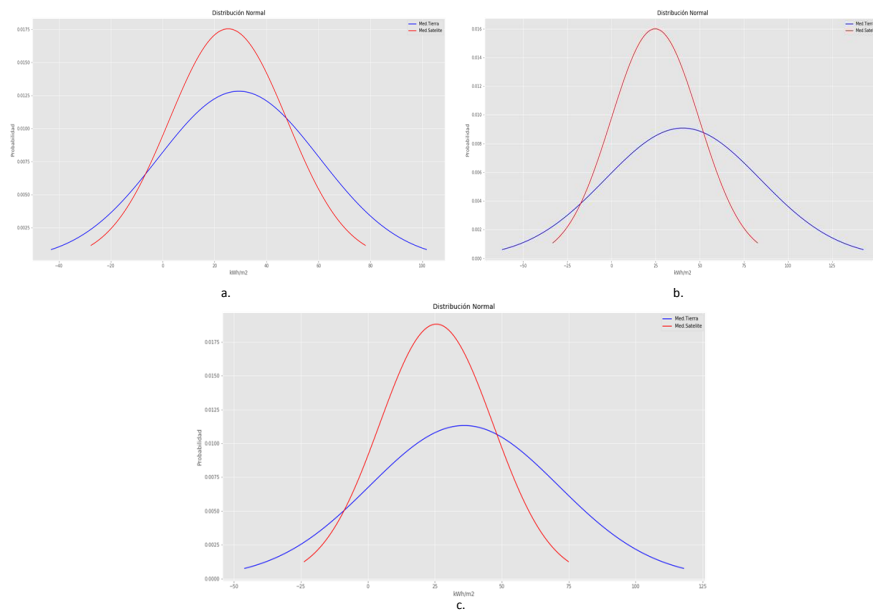


Figura 4: Estimación mediante modelo RNA de la radiación solar en tierra empleando datos medidos por satélite, comparación del error entre el satélite y los datos en tierra vs el error entre los valores estimados y los datos en tierra. a) Estimación para los días julianos 1 al 120. b) Estimación para los días julianos 121 al 240. c) Estimación para los días julianos 241 al 360.

	Mes 1 al 4	Mes 5 al 8	Mes 9 al 12
Datos	Prom. en kW/m ²	Prom. en kW/m ²	Prom. en kW/m ²
Tierra	4.572559	4.247772	4.434122
Satélite	4.640138	5.305578	5.063395
Estimación - RNA	4.297978	4.035805	4.255731
Diferencia (tierra -satélite)	0.067579	1.057806	0.629273
Diferencia (tierra - estimado)	0.274581	0.211967	0.178391

Tabla 1: Resultados del modelo de estimación usando RNA evaluado en 3 periodos de cuatro meses para un año Juliano

	Mes 1 al 4	Mes 5 al 8	Mes 9 al 12
Comparativo	Prom. error (%)	Prom. error (%)	Prom. error (%)
Satélite - tierra	29.268876	40.742404	35.88887
Estimado - tierra	25.389562	25.141444	25.619838
Diferencia	3.879314	15.60096	10.269049

Tabla 2: Error promedio del modelo de estimación empleando RNA vs valores medidos por el satélite evaluado en 3 periodos de 4 meses para un año Juliano

La medida del error promedio para cada periodo se muestra en la Tabla 2. Se muestra el porcentaje de error entre los valores medidos por satélite y medidos en tierra junto con los valores estimados y los valores medidos en tierra. En relación al error promedio obtenido por el modelo, el valor en todos los periodos se mantiene constante, aunque es un valor de error considerable, cumple con el objetivo principal propuesto en este trabajo, logrando una disminución promedio del 10,0448 % de error.

5. Conclusiones

El trabajo presentado, logró proponer un modelo de estimación de la radiación solar directa empleando datos consultados de la base de datos del PowerViewer de la NASA, logrando obtener un índice de error entre el modelo propuesto y los valores medidos en tierra del 25.61 % el cual es inferior al 40.74 % tomado por el satélite.

Los datos que se emplearon para el desarrollo del modelo fueron seleccionados de acuerdo a la correlación que presentan con la radiación solar, estos datos corresponden al índice de claridad y la temperatura, suministrados por la base de datos PowerViewer, el mejor ajuste logrado permitió tener un error promedio entre la variable objetivo y los datos estimados del 25.38 %, con respecto al error de los datos del satélite correspondiente al 40.74 %, lo cual indica que se logró una disminución promedio del 9.91 %.

El modelo logra captar la variabilidad del recurso solar y mantiene una tendencia hacia el valor promedio de los datos objetivo logrando obtener un error promedio en la estimación de $\pm 216.6 \text{ w/m}^2$ que es inferior al obtenido por el satélite correspondiente a 581.3 w/m^2 , lo cual se considera una mejora en el valor de la radiación solar calculada empleando el modelo propuesto.

Referencias

- Bella-Santos J (2018). *Herramientas python para la predicción de energías renovables*. Ph.D. thesis, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España. URL <http://hdl.handle.net/10486/688034>.
- Brentan B, Novarini B, Luvizotto E, Herrera M, Izquierdo J, Pérez-García R (2015). “Hourly water demand forecasting using nonlinear autoregressive with exogenous artificial neural networks.” URL <https://doi.org/10.2166/ws.2021.228>.
- Jimenez V, Will A, Rodriguez S (2017). “Estimación de Radiación Solar Horaria Utilizando Modelos Empíricos y Redes Neuronales Artificiales.” *Ciencia y Tecnología*. URL <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6223470>.
- Obando-Paredes E (2018). “Modelo de pronóstico de radiación solar basado en Machine Learning.” URL <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68984>.
- Obando-Paredes E, Vargas-Cañas R (2016). “Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular.” *Rev. la Acad. Colombia. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, **40**. URL <https://doi.org/10.18257/raccefyn.301>.
- Sánchez Silva JM, Gabriel Maldonado AE (2021). “Anuario estadístico 2020.” URL <https://repositorio.ins.gob.pe/handle/INS/1277>.
- Schallenberg Rodríguez JC, Piernavieja Izquierdo G, Hernández Rodríguez C, Unamunzaga Falcón P, *et al.* (2008). “Energías renovables y eficiencia energética.” URL <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1459>.
- Villada F, D C, J M (2014). “Electricity price forecasting using artificial neural networks.” *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.009>.
- Vélez-Pereira A, Vergara E, Barraza W, Agudelo D (2013). “Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar.” *Ingenium*. URL <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/743>.

Filiación institucional:

Richard Alexander Cortázar Forero
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: racortazarf@libertadores.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5809-480X>

Luis Alejandro Caycedo Villalobos
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: lacaicedov@libertadores.edu.co
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3754-5955>



Estimación de distanciamiento social mediante mapas de calor

Duvan Santiago Beltran

Fundación Universitaria
Los Libertadores

John Petearson Anzola

Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

El control preventivo de distanciamiento social es una de las primeras medidas que se implementaron en lugares públicos para garantizar una distancia mínima de seguridad, aproximada de dos metros entre personas. La clave de esta medida, es garantizar o prevenir a las personas de mantener una distancia mínima de bioseguridad, para ello, en este artículo se propone una herramienta de estimación de distanciamiento social basadas en mapas de calor, con el fin de identificar puntos críticos de circulación peatonal en lugares públicos. El método de construcción del mapa de calor se basó en la trilateración, que consiste en el cálculo de medidas de distancia, interpoladas en píxeles en puntos establecidos a priori. Cada persona genera una nube de puntos de distribución normal con media en las coordenadas de las personas y una varianza de dos metros. La sumatoria de estos puntos genera un histograma que se representa en mapas de calor. La identificación de estas zonas críticas determina una probabilidad de alto contagio, por lo tanto, la herramienta propuesta se puede emplear en la planeación y reestructuración de lugares públicos que pueden prevenir a peatones que transiten es estos lugares con mayores medidas de bioseguridad.

Palabras Clave: yolo, distanciamiento social, mapas de calor, trilateración.

1. Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha emitido varias recomendaciones de índole preventivo con el fin de reducir la propagación y transmisión del virus COVID-19 (SARS-CoV-2), en las que se encuentra: el lavado frecuente de manos, distanciamiento social, uso de tapabocas y medidas de prevención de roce de los ojos, nariz y boca con las manos, adicionalmente se recomienda en personas que presentan síntomas de gripe común el aislamiento preventivo (cuarentena) y al estornudar cubrirse la boca y la nariz, también recomienda mantener una buena ventilación en las lugares cerrados como habitaciones y autos. Por otro lado, la OMS advirtió la abstención de realizar viajes locales, nacionales e internacionales durante el año 2020, año de la pandemia [Espín and Borja \(2020\)](#).

La principal fuente de contagio del COVID-19 se da entre personas que están en contacto cercano, dentro de un rango de cobertura aproximado a los dos metros durante por un período de tiempo prolongado. La propagación se presenta cuando una persona infectada presenta

eventos de tos o estornudos, o simplemente habla. Los fluidos emitidos por boca y nariz pueden permanecer suspendidos en el aire por un periodo de 8 a 14 minutos en ambientes cerrados, antes de desaparecer o quedarse adheridos a una superficie, el virus puede sobrevivir desde horas hasta varios días dependiendo del material, sin embargo la cantidad de virus viable cae drásticamente en las primeras horas [Moreno Grau, Álvarez León, García dos Santos Alves, Diego Roza, Ruiz de Adana, Marín Rodríguez, Rodríguez-Baño, Tomás Carmona, Minguillón, van der Haar *et al.* \(2020\)](#).

La probabilidad de contagio del virus particulado en suspensión que puede ser inhalado y entrar en los pulmones de personas cercanas, se aumenta con la interacción de eventos con personas infectadas asintomáticas, ya que estas pueden propagar el virus, antes de que enfermen o tengan conocimiento del mismo, por lo tanto se resalta la importancia de mantener una distancia de seguridad mínima de al menos dos metros con otras personas, siempre que sea posible como medida de prevención.

Por lo anterior, el distanciamiento social se ha convertido en una de las medidas de prevención más importantes, ya que de presentarse el COVID-19 en personas sintomáticas o asintomáticas, o si estuvo en contacto cercano con una persona con COVID-19, es importante tomar medidas de prevención como aislarse en la casa de otras personas, hasta que sea seguro finalizar el aislamiento o la cuarentena. De igual manera, este aislamiento ayuda a proteger a personas cercanas que presentan comorbilidades o enfermedades de base.

El control preventivo de distanciamiento social es una de las primeras medidas que se implementaron en lugares públicos para garantizar una distancia mínima de seguridad aproximada de dos metros entre personas. La clave de esta medida, es garantizar o prevenir a las personas de mantener una distancia mínima de bioseguridad, para ello, se propone en este artículo un sistema de monitoreo de distancia que permita mediante mapas de calor estimar puntos críticos de circulación de personas en lugares públicos, ya que en estos, se encuentran pasillos, corredores y obstáculos, que involuntariamente obligan a las personas a transitar o circular por estos puntos por un instante de tiempo, convirtiéndose en puntos críticos de probabilidad alta de contagio [Rodríguez Quiroga de Pereira, Bongiardino, Borensztein, Aufenacker, Crawley, Botero, Scavone, and Vázquez \(2021\)](#).

La identificación de estos puntos críticos permitirá la planeación de reestructuración de lugares dentro de un establecimiento, el desvío del tránsito de personas en entradas y pasillos, o simplemente, si no se puede reestructurar o adecuar un lugar mediante obra civil o algún tipo de estrategia de logística peatonal, la colocación de una señal de advertencia de zona de probabilidad de alto contagio, con el fin de prevenir a los peatones que transiten es estos lugares con mayores medidas de bioseguridad.

2. Trabajos Realizados

Desde que se extendió el Covid-19 en el mundo se han establecido diferentes pautas de distanciamiento social como política de intervención y mitigación en salud pública para reducir la propagación. Sin embargo, se ha hecho muy difícil monitorear la eficacia de estas pautas en ambientes internos y externos. Adicionalmente, los métodos tradicionales de observación, como personas que actúan como informadores personales, es considerada una medida de alta peligrosidad, ya que los observadores corren como seres humanos el riesgo de infectarse [Otálora Riaño *et al.* \(2020\)](#).

Una solución que se ha incorporado con un crecimiento alto a las tareas de monitoreo en el mundo, es el monitoreo de actividad social a través de la redes de cámaras de seguridad existentes. Este enfoque es escalable en la mayoría de sistemas de seguridad existentes y garantiza la seguridad de los observadores reduciendo el número de personal de monitoreo expuesto [Lio \(2015\)](#).

En la literatura se encuentran métodos implementados en miles de cámaras vigilancia en el mundo, de las cuales, se recuperan y analizan datos de actividad social, entre los que se tiene

frames de monitoreo de distancia social que utilizan arquitectura de aprendizaje profundo para controlar la transmisión de infecciones de la pandemia COVID-19 [Ahmed, Ahmad, and Jeon \(2021a\)](#); [Ahmed, Ahmad, Rodrigues, Jeon, and Din \(2021b\)](#); [Sathyamoorthy, Patel, Savle, Paul, and Manocha \(2020\)](#), monitoreo del distanciamiento social en diversas condiciones de poca luz con aprendizaje profundo, empleando una sola cámara [Rahim, Maqbool, and Rana \(2021\)](#), aportes en el desarrollo sostenible de ciudades inteligentes a través de la videovigilancia masiva en respuesta a la pandemia COVID-19 [Shorfuzzaman, Hossain, and Alhamid \(2021\)](#), frame de atención médica explicable basado en sistemas de vigilancia masiva e inteligencia artificial para combatir las pandemias similares a COVID-19 [Hossain, Muhammad, and Guizani \(2020\)](#).

Otros trabajos han propuesto, la arquitectura basada en sensores locales para registrar las observaciones en las redes de área corporal (Body Area Network - BAN) que transmite los datos recopilados a un sistema de salud basado en drones que contrasta los datos con imágenes térmicas [Kumar, Sharma, Singh, Naugriya, Gill, and Buyya \(2021a\)](#), distanciamiento social [Lu \(2020\)](#), servicios y entrega de drones en eventos sociales [Tan, Lee, and Gao \(2018\)](#), análisis de comportamiento social en animales [Inoue, Yamamoto, Ringhofer, Mendonça, Pereira, and Hirata \(2019\)](#) y tecnologías de blockchain en drones descentralizados para combatir COVID-19 [Alsamhi, Lee, Guizani, Kumar, Qiao, and Liu \(2021\)](#); [Kumar, Sharma, Singh, Naugriya, Gill, and Buyya \(2021b\)](#).

Trabajos de monitoreo del distanciamiento social de COVID-19 con detección y seguimiento de personas a través de YOLO se han encontrado con la afinación de técnicas de deepsort [Punn, Sonbhadra, Agarwal, and Rai \(2020\)](#), modelo de aprendizaje profundo basado empleando YOLO con ResNet-50 para la detección de mascarillas médicas [Loey, Manogaran, Taha, and Khalifa \(2021\)](#) y otras aplicaciones de YOLO en distintos casos de uso [Sengupta \(2021\)](#).

En la parte gubernamental, Rusia ha implementado soluciones basadas en biometría facial con el fin de proteger a su población del COVID-19. El empleo de las cámaras de vigilancia en Rusia recolectan información estadística y anónima del monitoreo de zonas de cuarentena, plazas públicas, parques, casas individuales o pasillos, teniendo una medida de control el conteo de siluetas en zonas relevantes que identifican violaciones masivas a las medidas de protección de salud estatal. La red de monitoreo de Moscú cuenta con más de 175 mil cámaras que han implementado una solución FindFace de NtechLab, capaz de monitorear y observar el régimen de aislamiento a escala metropolitana [Gabdiev, Yusupova, Smetanina, and Sazonova \(2019\)](#); [Petrella, Miller, and Cooper \(2021\)](#).

Trabajos en el análisis de distanciamiento social empleando medios alternativos al procesamiento de imágenes trabajan la medición en tiempo real entre las personas en establecimientos o espacios de aforo crítico como aeropuertos y transporte público, mediante el conteo de personas en un área determinada a través del empleo de cámaras térmicas [Gupta, Maurya, Mehra, and Kapil \(2021\)](#); [Petrovic and Kocic \(2020\)](#). Otras alternativas al nivel de aplicaciones móviles se han empleado en distintos países del mundo en las que se emplea un sistema de información y reporte de personas contagiadas que mediante google maps se identifican sectores y distancias de personas reportadas empleando algoritmos de detección de contacto cercano [Altmann, Milsom, Zillessen, Blasone, Gerdon, Bach, Kreuter, Nosenzo, Toussaert, and Abeler \(2020\)](#); [Wymant, Ferretti, Tsallis, Charalambides, Abeler-Dörner, Bonsall, Hinch, Kendall, Milsom, Ayres et al. \(2021\)](#); [Zens, Brammertz, Herpich, Südkamp, and Hinterseer \(2020\)](#).

3. Método Propuesto

La detección de objetos es considerada una de las tareas de procesamiento más desafiantes en el campo de la visión por computador. En este aspecto se ha trabajado con YOLO (You Only Look Once), como el conjunto de algoritmo de detección de objetos en tiempo real más extendido y aplicado en la literatura, que identifica objetos específicos en videos, transmisiones

de video en vivo e identificación de objetos en imágenes. La mayor parte del software de inteligencia artificial (IA) emplea sistemas de clasificación de objetos para percibir objetos específicos en una clase de interés, clasificándose en grupos de objetos con características similares, mientras que el procesamiento clásico realiza esta tarea de forma individual.

YOLO emplea una red neuronal convolucional (CNN) para realizar tareas de detección de objetos. Las CNN son sistemas basados en clasificadores que pueden procesar imágenes de entrada como matrices estructuradas de datos e identificar patrones entre ellas, con la ventaja de procesar mayor información en menor tiempo que las redes tradicionales.

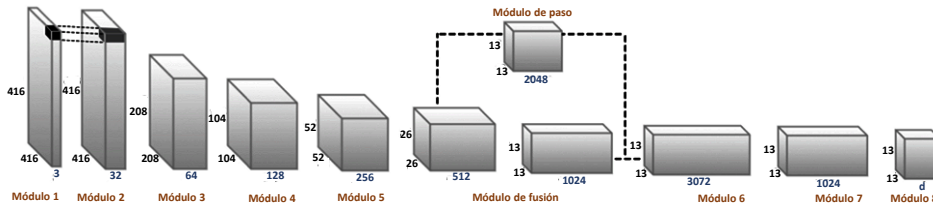


Figura 1: Arquitectura CNN para detección y clasificación de objetos.

En la Figura 1, se muestra el modelo general que en el módulo 1 se toma la imagen completa diezmada en 416 x 416 píxeles, basando las predicciones en el contexto global de la imagen. YOLO en los siguientes módulos puntúa su procesamiento en regiones que están en función de sus similitudes con clases predefinidas. Las regiones de puntuación alta son señaladas en el procesos como detecciones positivas de cualquier clase con la que se identifiquen la cercanía, por ejemplo, una transmisión de video en vivo, YOLO puede detectar diferentes tipos de vehículos según las regiones del video que tengan la puntuación más alta en comparación con las clases predefinidas de vehículos.

La arquitectura de YOLO separa la imagen en una matriz. Cada celda de la matriz predice cierta cantidad de cuadros de límites denominados cuadros de anclaje alrededor de los objetos que obtienen la puntuación más alta con las clases predefinidas para su entrenamiento. Cada cuadro delimitador tiene una puntuación con un umbral de confianza respectiva que establece la precisión con la que asume que la predicción, detectando un solo objeto por cuadro delimitador. Los cuadros de límite se generan agrupando las dimensiones de los cuadros de la imagen verdadera del conjunto de datos original para encontrar las formas y tamaños más comunes. En la literatura se encuentran algoritmos comparables que pueden llevar a cabo el mismo objetivo de detección, que son redes neuronales convolucionales basadas en regiones realizadas (R-CNN), Fast R-CNN y Mask R-CNN. Sin embargo, a diferencia de sistemas como R-CNN y Fast R-CNN, YOLO está capacitado para realizar clasificación y regresión de cuadro delimitador al mismo tiempo.

El modelo propuesto en la Figura 2, adquiere vídeo de cualquier fuente de video inalámbrica a un servidor local con funciones de procesamiento de borde. En el dispositivo de borde a través del uso de Google Colab con OpenCV y YOLO preinstalado (en la nube), cumple con la tarea de detección de personas, deshabilitando los labels de detección de objetos múltiple integrada en YOLO. Para esta tarea, el dispositivo de borde envía tres fotos por segundo a una carpeta compartida de Google Drive integrada con Google Colab, procesando el contenido las imágenes y empleando el centro del rectángulo obtenido como centro de masa y punto de localización relativo para generar puntos en un mapa de calor (ver Figura 3), que indica la criticidad del distanciamiento. La data adquirida, en cuanto al número de personas y su distanciamiento se envían a un servidor EC2 de AWS, en el cual está instalado un dashboard para su visualización y monitoreo.

La visualización de la salida por medio de mapas de calor, se emplea principalmente como herramienta de formulación de estrategias de comportamiento de tráfico peatonal para la prevención del COVID-19. Sin embargo, los mapas de calor pueden generar en el modelo propuesto, más aplicaciones que beneficien otras medidas de bioseguridad, partiendo del prin-



Figura 2: Modelo general para la estimación de distanciamiento social.



Figura 3: Implementación del modelo en video de prueba IPL (2021).

cipio de que los mapas de calor ayudarán a conocer con precisión zonas de tráfico peatonal y zonas de alto impacto. A partir de la información diferida se puede estimar estrategias de bioseguridad y prevención al detectar áreas de exposición y riesgo.

4. Resultados

En esta sección se evalúa el modelo de la Figura 2, mediante el caso de uso: Teatro Ariston Sanremo en Italia. El video se obtuvo de la página web (<https://www.skylinewebcams.com/>). Skyline WebCam es una red de cámaras en “tiempo real” distribuidas alrededor de todo el mundo que permite observar distintos escenarios urbanos. Su enfoque en la actualidad, es servir de herramienta en el sector turístico, permitiendo que cientos de negocios e instituciones puedan mostrar su ambiente social y cultural. La Figura 4, muestra la ubicación geográfica del teatro Ariston sanremo con vista nocturna con audiencia y tráfico de personas en este lugar.

En la Figura 5, se presentan los resultados obtenidos por el modelo plasmado en la Figura 2. Como se mencionó anteriormente, la fuente de video, consta de una grabación online en tiempo real de la calle principal del teatro Ariston Sanremo en Italia. La grabación del video está en formato HD, como experiencia de “vigilancia” con un enfoque turístico. El video de la cámara cuenta con tecnología de color de vision nocturna (Color Night Vision - CNV).

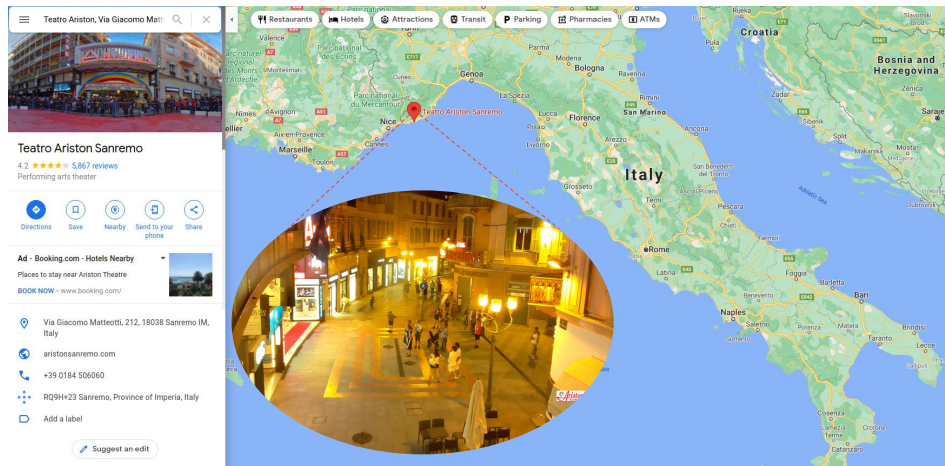


Figura 4: Caso de uso: Teatro Sanremo - Italia.

CNV es una tecnología de visión nocturna, cuya calidad es superior a la tecnología de las cámaras tradicionales que se apoyan en luz infrarroja para la captura de imagen en blanco y negro. Los videos grabados o emitidos en “tiempo real” con cámaras CNV pueden grabar imágenes a todo color en condiciones de poca luz, proporcionando detalles visuales adicionales para ayudar a identificar personas u objetos y ofrecer un mejor contraste en las imágenes para una detección y reconocimiento más fácil.

Está tipo de video presenta ventajas en el preprocesamiento, ya que en el tratamiento de vídeo convencional las imágenes con poca luz tenias que ser procesadas con el modelo Matiz, Saturación, Valor (Hue, Saturation, Value - HSV), también conocido como modelo Matiz, Saturación, Brillo (Hue, Saturation, Brightness - HSB), tratando el preprocesamiento en términos de sus componentes.

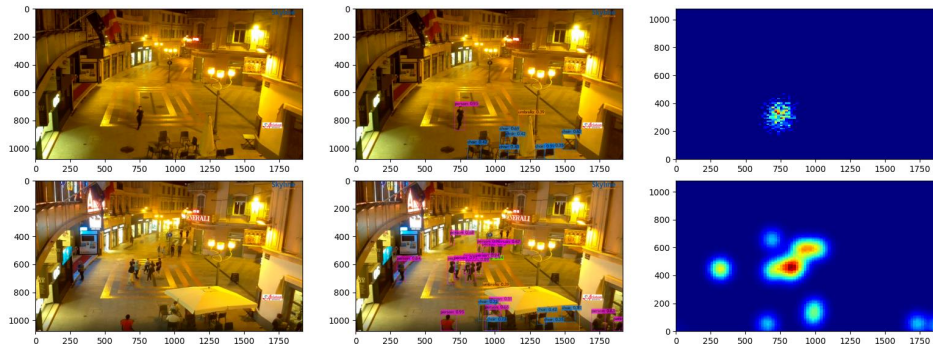


Figura 5: Cámara con tecnología CNV.

El módulo de la nube está compuesto por Google Colaboratory como integrador de “aprendizaje automático” empleando una Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU), a este conjunto se le denomina Colab. En Colab se utilizó Darknet, como framework escrito en C, que permite trabajar con redes neuronales profundas. Dentro de Darknet se empleó el algoritmo de detección de objetos YOLO.

La sesión de Google Colab está compuesta por una máquina virtual que reserva 13 GB de RAM, un procesador y una GPU o Unidad de Procesamiento Tensor (Tensor Processing Unit - TPU), cuyo objetivo es utilizar el framework mediante un script de python que detecte personas, calcule el centro del rectángulo de la persona detectada, considerada como centro de masa. Este punto cumple la función de obtener una coordenada en píxeles que sirve para determinar o estimar el lugar o posición de una persona. Dentro de este script se implementó

un algoritmo que forma un polígono irregular, que permite estimar la distancia entre dos o más puntos de referencia que son los puntos considerados como centros de masa (coordenadas), como se muestra en la Figura 6.

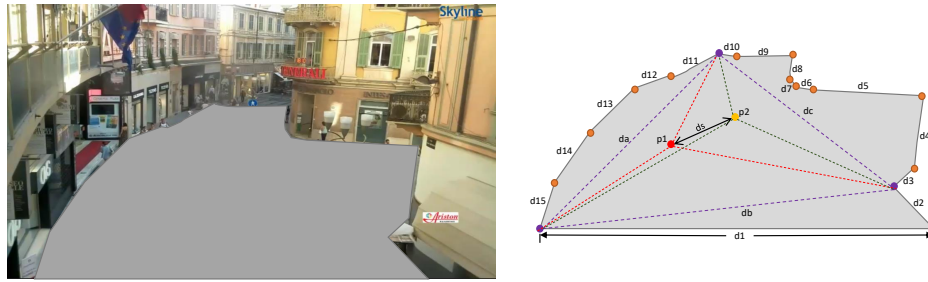


Figura 6: Espacio peatonal(social).

En el polígono mostrado en la Figura 6, se implementó un algoritmo de triangulación basado en el método de Trilateración, el cual permite calcular la distancia de cada una de los puntos vértices exteriores del polígono con relación al punto de referencia denominado p1 (posición persona 1). Una vez conocidas las tres distancias (d_a , d_b y d_c) se determina la posición relativa de p1 respecto a los tres puntos globales de referencia. Dentro del algoritmo implementado se conoce a priori la posición y las distancias aproximadas e interpoladas en píxeles. De esta forma se obtiene la posición absoluta o coordenadas de los puntos p1, p2 y pn.

La Figura 7 muestra los resultados interpretados en zonas de calor que permiten detectar un distanciamiento social inferior a los dos metros, identificando zonas de bioseguridad consideradas “peligrosas” por alta probabilidad de contagio durante el tráfico de personas dentro de un espacio. Así mismo, facilita la identificación de las zonas de circulación peatonal alta y de tránsito moderado seguro.

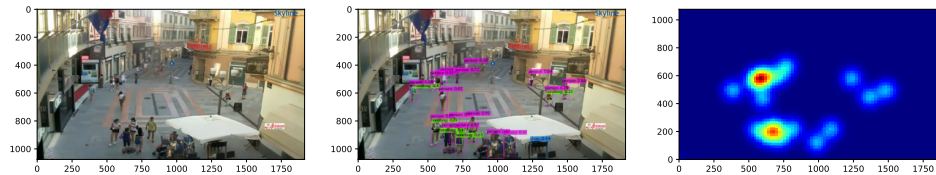


Figura 7: Resultado obtenido con luz día.

5. Conclusiones

El COVID-19 y sus variantes, por la forma de transmisión del virus en aerosol y la exposición de manera constante, se puede adquirir mediante el proceso de tránsito peatonal, generando un alto riesgo para la cotidianidad y actividad de las personas, como lo es el andar. Por lo tanto, es de gran importancia establecer herramientas de prevención, dada la apertura económica y social que se presenta en las principales ciudades del mundo. Por lo anterior, la búsqueda de medidas que disminuyan el riesgo de contagio y que permitan generar un ambiente bioseguro, se reconoce como problemática social, aportando en este artículo una herramienta de estimación de distanciamiento social mediante mapas de calor, como herramienta de vigilancia y prevención.

La generación de mapas de calor basada en la trilateración determina la posición relativa de las personas p_1, p_2, \dots, p_n , usando geometría de triángulos para encontrar una triangulación, basada en información a priori, como lo son las medidas de los ángulos y las distancias de los catetos del polígono, sujeta a las localizaciones de puntos conocidos de dos o más puntos de referencia. La distancia medida entre los p_1, p_2, \dots, p_n con los puntos de referencia, determina

de forma precisa la localización relativa de los puntos (personas) en un plano bidimensional, usando al menos 3 puntos de referencia.

Referencias

- Ahmed I, Ahmad M, Jeon G (2021a). “Social distance monitoring framework using deep learning architecture to control infection transmission of COVID-19 pandemic.” *Sustainable Cities and Society*, **69**, 102777. ISSN 2210-6707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102777>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067072100069X>.
- Ahmed I, Ahmad M, Rodrigues JJ, Jeon G, Din S (2021b). “A deep learning-based social distance monitoring framework for COVID-19.” *Sustainable Cities and Society*, **65**, 102571. ISSN 2210-6707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102571>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307897>.
- Alsamhi SH, Lee B, Guizani M, Kumar N, Qiao Y, Liu X (2021). “Blockchain for decentralized multi-drone to combat covid-19.” *arXiv preprint arXiv:2102.00969*.
- Altmann S, Milsom L, Zillessen H, Blasone R, Gerdon F, Bach R, Kreuter F, Nosenzo D, Toussaert S, Abeler J (2020). “Acceptability of app-based contact tracing for COVID-19: Cross-country survey study.” *JMIR mHealth and uHealth*, **8**(8), e19857.
- Espín E, Borja ING (2020). “Confinamiento y Distanciamiento social: Recomendaciones científicas.” *Microbios*.
- Gabdiev F, Yusupova N, Smetanina O, Sazonova E (2019). “Models and Methods for Solving Face Recognition Problem by Photos.” In *Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019): proceedings of the 21st International Workshop*.
- Gupta A, Maurya S, Mehra N, Kapil D (2021). “COVID-19: Employee Fever detection with Thermal Camera Integrated with Attendance Management System.” In *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science Engineering (Confluence)*, pp. 355–361. doi:[10.1109/Confluence51648.2021.9377079](https://doi.org/10.1109/Confluence51648.2021.9377079).
- Hossain MS, Muhammad G, Guizani N (2020). “Explainable AI and Mass Surveillance System-Based Healthcare Framework to Combat COVID-19 Like Pandemics.” *IEEE Network*, **34**(4), 126–132. doi:[10.1109/MNET.011.2000458](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000458).
- Inoue S, Yamamoto S, Ringhofer M, Mendonça RS, Pereira C, Hirata S (2019). “Spatial positioning of individuals in a group of feral horses: a case study using drone technology.” *Mammal Research*, **64**(2), 249–259.
- IPL (2021). “Ball Detection Datasets.” URL http://ipl.ce.sharif.edu/ball_datasets.html.
- Kumar A, Sharma K, Singh H, Naugriya SG, Gill SS, Buyya R (2021a). “A drone-based networked system and methods for combating coronavirus disease (COVID-19) pandemic.” *Future Generation Computer Systems*, **115**, 1–19. ISSN 0167-739X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.08.046>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X20317064>.
- Kumar A, Sharma K, Singh H, Naugriya SG, Gill SS, Buyya R (2021b). “A drone-based networked system and methods for combating coronavirus disease (COVID-19) pandemic.” *Future Generation Computer Systems*, **115**, 1–19.

- Lio VG (2015). “Ciudades, cámaras de seguridad y video-vigilancia: estado del arte y perspectivas de investigación.” *Astrolabio*.
- Loey M, Manogaran G, Taha MHN, Khalifa NEM (2021). “Fighting against COVID-19: A novel deep learning model based on YOLO-v2 with ResNet-50 for medical face mask detection.” *Sustainable Cities and Society*, **65**, 102600. ISSN 2210-6707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102600>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720308179>.
- Lu D (2020). “Drones keep an eye on people failing to social distance.” *New Scientist*, **246**(3282), 10. ISSN 0262-4079. doi:[https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(20\)30910-6](https://doi.org/10.1016/S0262-4079(20)30910-6). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262407920309106>.
- Moreno Grau S, Álvarez León E, García dos Santos Alves S, Diego Roza C, Ruiz de Adana M, Marín Rodríguez I, Rodríguez-Baño J, Tomás Carmona M, Minguillón MC, van der Haar R, *et al.* (2020). “Evaluación del riesgo de la transmisión de SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones. Documento Técnico. Ministerio de Sanidad.” *Documento Técnico*.
- Otálora Riaño DC, *et al.* (2020). *Desarrollo de un Sistema de Monitoreo y Planificación de Procesos de Desinfección para Ambientes COVID-19*. Ph.D. thesis, Universidad del Rosario.
- Petrella S, Miller C, Cooper B (2021). “Russia’s Artificial Intelligence Strategy: The Role of State-Owned Firms.” *Orbis*, **65**(1), 75–100.
- Petrovic N, Kocic (2020). “Iot-based system for COVID-19 indoor safety monitoring.” *IcE-TRAN Belgrade*.
- Punn NS, Sonbhadra SK, Agarwal S, Rai G (2020). “Monitoring COVID-19 social distancing with person detection and tracking via fine-tuned YOLO v3 and Deepsort techniques.” *arXiv preprint arXiv:2005.01385*.
- Rahim A, Maqbool A, Rana T (2021). “Monitoring social distancing under various low light conditions with deep learning and a single motionless time of flight camera.” *PLOS ONE*, **16**(2), 1–19. doi:[10.1371/journal.pone.0247440](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247440). URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247440>.
- Rodríguez Quiroga de Pereira A, Bongiardino L, Borensztein L, Aufenacker SI, Crawley A, Botero C, Scavone K, Vázquez N (2021). “Sentimientos de soledad y problemas internalizantes frente al distanciamiento social y confinamiento preventivo por el coronavirus COVID-19.”
- Sathyamoorthy AJ, Patel U, Savle YA, Paul M, Manocha D (2020). “COVID-robot: Monitoring social distancing constraints in crowded scenarios.” *arXiv preprint arXiv:2008.06585*.
- Sengupta S (2021). “YOLO Application in COVID-19 Use Cases.”
- Shorfuzzaman M, Hossain MS, Alhamid MF (2021). “Towards the sustainable development of smart cities through mass video surveillance: A response to the COVID-19 pandemic.” *Sustainable Cities and Society*, **64**, 102582. ISSN 2210-6707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102582>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720308003>.
- Tan H, Lee J, Gao G (2018). “Human-Drone Interaction: Drone Delivery & Services for Social Events.” In *Proceedings of the 2018 ACM Conference Companion Publication on Designing Interactive Systems*, DIS ’18 Companion, p. 183–187. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. ISBN 9781450356312. doi:[10.1145/3197391.3205433](https://doi.org/10.1145/3197391.3205433). URL <https://doi.org/10.1145/3197391.3205433>.

Wymant C, Ferretti L, Tsallis D, Charalambides M, Abeler-Dörner L, Bonsall D, Hinch R, Kendall M, Milsom L, Ayres M, *et al.* (2021). “The epidemiological impact of the NHS COVID-19 App.” *Nature*, **594**(7863), 408–412.

Zens M, Brammertz A, Herpich J, Südkamp N, Hinterseer M (2020). “App-based tracking of self-reported COVID-19 symptoms: analysis of questionnaire data.” *Journal of medical Internet research*, **22**(9), e21956.

Filiación institucional:

Duvan Santiago Beltran
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: dsbeltranm@libertadores.edu.co
URL: <https://www.zhaw.ch/de/ueber-uns/person/templ/>

John Petearson Anzola
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jpanzola@libertadores.edu.co
Google Académico: <https://scholar.google.es/citations?user=ep9Cw1QAAAAJ&hl=es>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-5410>

Tutoriales

Tutoriales

27

Tutorial de Regresión lineal: Python con Scikit-Learn





Tutorial de Regresión lineal: Python con Scikit-Learn

Walder de Jesús Canova

Fundación Universitaria
Los Libertadores

John Petearson Anzola

Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

En el aprendizaje de máquina, existen dos tipos de algoritmos de aprendizaje supervisado, que son: aprendizaje por regresión y clasificación. El aprendizaje por regresión predice salidas de valor continuo, mientras que el aprendizaje por clasificación predice salidas discretas. Como ejemplo típico, la predicción del precio de una casa en USD o Pesos, es un problema de regresión, mientras que predecir, si un tumor es maligno o benigno, es un problema de clasificación. En este tutorial, se presenta brevemente la regresión lineal y cómo se puede implementar utilizando librerías de Python Scikit-Learn, ya que es una de las librerías de aprendizaje automático más extendidas y usadas en Python.

Palabras Clave: regresión lineal simple, regresión lineal múltiple.

1. Teoría básica de regresión lineal

El término “linealidad” en álgebra, hace referencia a una relación lineal entre dos o más variables. Al expresar mediante una gráfica esta relación entre dos variables en un espacio bidimensional, se obtiene una línea recta.

Como ejemplo típico se considera un escenario, en el cual, se quiere determinar la relación lineal entre la cantidad de horas que emplea un estudiante en adquirir una habilidad, con el porcentaje de avance que obtiene un estudiante en el desarrollo de la habilidad, con el fin de determinar, qué cantidad de horas debe un estudiante prepararse para desarrollar la habilidad, y de esta manera preguntarse, ¿qué porcentaje de avance puede lograr un estudiante?. Al graficar la variable independiente “tiempo en horas” en el eje x y la variable dependiente “porcentaje” en el eje y, el comportamiento de una nube de puntos se ajusta a un comportamiento dado por una línea recta, como se muestra en la Figura 1.

La ecuación de la línea recta, está dada por:

$$y = mx + b \tag{1}$$

Donde b es la intersección y m es la pendiente de la línea. El principio básico del algoritmo de regresión lineal, consiste en encontrar el valor “más óptimo” para una intersección y una pendiente que disminuyan el error en una nube de puntos. Los valores que se pueden controlar

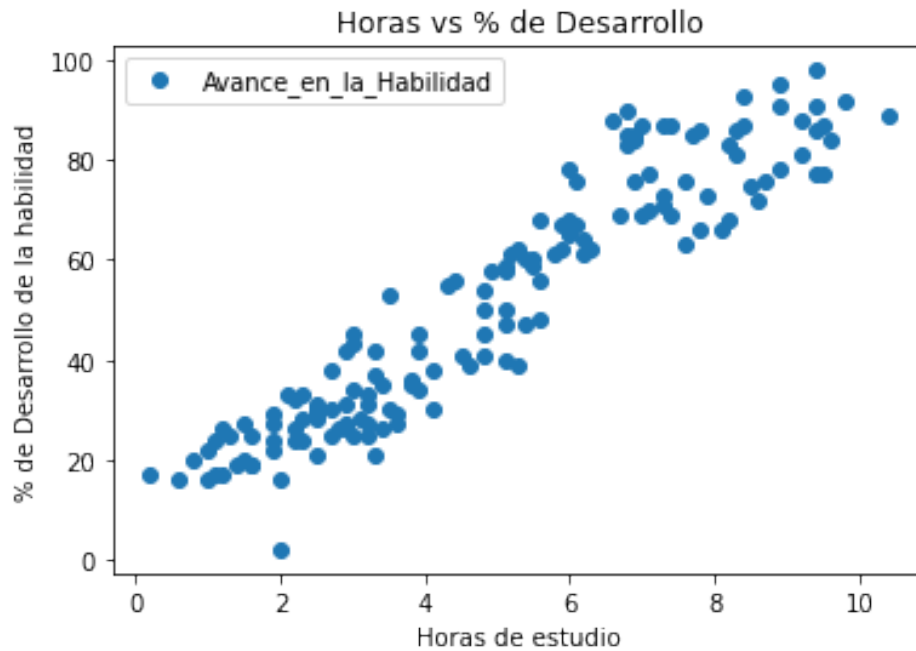


Figura 1: Ejemplo de Regresión Lineal Simple.

son la intersección y la pendiente. La solución a este problema puede arrojar varias líneas rectas como solución, en función de los valores de la intersección y la pendiente. Los valores de b y m se ajustan, de tal forma que puntos de datos que conforma la nube, devuelva los valores de b y m , que den como resultado el menor error [Weisberg \(2005\)](#).

La concepción anterior se puede extender a casos en que existan más de dos variables. A este proceso se le conoce como regresión lineal múltiple. Por ejemplo, se desea desarrollar un módulo adicional de estimación del precio de un inmueble para venta o arriendo, a la aplicación “Finca Raiz”, considerando este escenario como un estimador del precio del inmueble en función de su área, el número de habitaciones, baños, parqueaderos, el estrato socioeconómico, los años de antigüedad y construcción del inmueble, etc. En este caso, la variable dependiente depende de varias variables independientes. Un modelo de regresión que involucra múltiples variables se puede representar como:

$$y = b_0 + m_1b_1 + m_2b_2 + m_3b_3 + \dots + m_nb_n \quad (2)$$

La Ecuación 2, es la ecuación de un hiperplano, recordando que un modelo de regresión lineal en dos dimensiones es una línea recta, en tres dimensiones es un plano, y en más de tres dimensiones, es un hiperplano.

1.1. Utilizando Python Scikit Learn para una Regresión lineal

En esta sección se muestra la utilización de las librerías Python Scikit-Learn para aprendizaje automático en la implementación de funciones de regresión. Se inicia con una regresión lineal simple que involucra dos variables y luego, se avanza con la implementación de una regresión lineal que involucra múltiples variables.

1.2. Regresión lineal simple

Como caso de uso, se tomará el ejemplo descrito anteriormente, en el cual, la tarea de regresión se predecirá el porcentaje de desarrollo de un habilidad que se espera que obtenga

un estudiante en función del número de horas que emplea en su estudio. La problemática anterior, es una tarea de regresión lineal simple, ya que involucra sólo dos variables.

1.3. Importación de librerías

Las librerías necesarias necesarias para esta tarea, son las siguientes:

```
In [1]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
```

2. Resultados

2.1. Conjunto de datos

El conjunto de datos que se utilizó para este ejemplo, está disponible en el siguiente enlace:

<https://1bestlinks.net/myFln>

Diponible en:



Nota: Los datos descargados obedecen a las horas empleadas por 150 estudiantes de Ingeniería en el desarrollo de 10 talleres de tipo ejemplo con problemas correlacionados para el desarrollo de la habilidad de programación en Python ejecutado en Jupyter Lab.

El siguiente comando importa el conjunto de datos CSV usando pandas:

```
In [2]: dataset = pd.read_csv('Horas_desarrollo.csv')
```

Para explorar un poco el conjunto de datos se ejecuta el siguiente comando:

```
In [3]: dataset.shape
Out[3]: (150, 2)
```

El resultado obtenido, indica que el conjunto de datos tiene 150 filas y 2 columnas. Para mostrar una muestra se realiza con el método `head()`:

```
In [4]: dataset.head()
```

```
Out[4]:
```

	Horas	Avance_en_la_Habilidad
0	2.5	21
1	5.1	47
2	3.2	27
3	8.5	75
4	3.5	30

Para ver detalles estadísticos del conjunto de datos, se realiza con método describe():

```
In [5]: dataset.describe()
```

```
Out[5]:
```

	Horas	Avance_en_la_Habilidad
count	150.000000	150.000000
mean	4.926000	51.320000
std	2.593757	24.619608
min	0.200000	2.000000
25%	2.725000	28.250000
50%	4.800000	47.500000
75%	7.000000	73.000000
max	10.400000	98.000000

Finalmente se grafica la nube de puntos de datos en un gráfico 2D para observar el conjunto de datos y analizar, si se puede encontrar una tendencia lineal o alguna relación entre los datos, mediante las siguientes líneas de código:

```
In [6]: dataset.plot(x='Horas', y='Avance_en_la_Habilidad', style='o')
plt.title('Horas vs % de Desarrollo')
plt.xlabel('Horas de estudio')
plt.ylabel('% de Desarrollo de la habilidad')
plt.show()
```

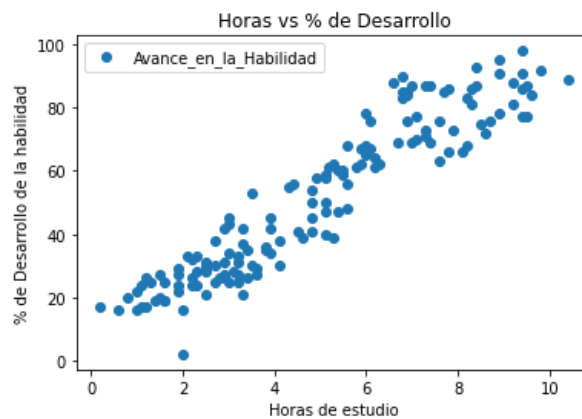


Figura 2:

En el gráfico anterior, se puede observar que existe una relación lineal positiva entre el número de horas estudiadas y el porcentaje de desarrollo de la habilidad.

2.2. Alistamiento de los datos (Preprocesamiento)

La Figura 2, brinda una idea tendencial de los detalles estadísticos de los datos. El siguiente paso consiste en dividir los datos en “atributos” y “etiquetas”. Los atributos son las variables independientes, mientras que las etiquetas son variables dependientes cuyos valores deben predecirse.

El objetivo es predecir el porcentaje de desarrollo de la habilidad en función de las horas de estudio, por lo tanto, el conjunto de atributos estará demarcado por la columna “Horas” y la etiqueta será la columna “Avance_en_la_Habilidad”. Para extraer los atributos y las etiquetas, se ejecuta el siguiente código:

```
In [7]: X = dataset.iloc[:, :-1].values
        y = dataset.iloc[:, 1].values
```

Los atributos se almacenan en la variable X, los especificamos con “-1” como el rango de las columnas ya que se quiere que el conjunto de atributos contuviera todas las columnas excepto la última, que es “Avance_en_la_Habilidad”. De manera similar, la variable “y” contiene las etiquetas y las especificamos en “1” para la columna de etiqueta ya que el índice de la columna “Avance_en_la_Habilidad” es 1, recordando que los índices de columna comienzan con 0, siendo 1 la segunda columna.

En este punto, se tiene los atributos y etiquetas. El siguiente paso consiste en dividir los datos en conjuntos de prueba y entrenamiento. Para esto, se usa el método `train_test_split()` incorporado de Scikit-Learn:

```
In [8]: from sklearn.model_selection import train_test_split
        X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=0)
```

El código anterior divide el 80% de los datos en el conjunto de entrenamiento, mientras que el 20% de los datos en el conjunto de prueba. La variable `test_size` es donde se especifica la proporción del conjunto de prueba.

2.3. Entrenando el algoritmo

En este punto se tiene dividido los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba. Finalmente se entrena el algoritmo mediante las siguientes líneas de código:

```
In [9]: from sklearn.linear_model import LinearRegression
        regressor = LinearRegression()
        regressor.fit(X_train, y_train)

Out[9]: LinearRegression()
```

Con la librería (paquete) de Scikit-Learn es sencillo implementar modelos de regresión lineal, ya que en síntesis, lo que se necesita es importar la clase `LinearRegression`, instanciarla y llamar al método `fit()` junto con los datos de entrenamiento.

El modelo de regresión lineal básicamente encuentra el mejor valor para la intersección y la pendiente, lo que da como resultado una línea que se ajusta al conjunto de datos. Para ver el valor de la intersección y la pendiente calculada por el algoritmo de regresión lineal, se realiza con el siguiente código.

```
In [10]: print(regressor.intercept_)
```

```
7.27320775774362
```

```
In [11]: print(regressor.coef_)
```

```
[9.00877521]
```

Los resultados anteriores indican que por cada unidad de cambio en las horas estudiadas, el cambio en el porcentaje de desarrollo de la habilidad, es aproximadamente 7,72 %. En otras palabras, “... en términos del especialista que analiza los datos ...”, si un estudiante estudia una hora más de lo que estudió anteriormente para el desarrollo de un taller de ejercicios con problemas correlacionados, puede estimar un aumento del 8,94 % en el porcentaje de desarrollo de la habilidad obtenida por el estudiante anteriormente.

2.4. Predicción

En este punto se tiene entrenado el algoritmo con el conjunto de datos, por lo que es necesario realizar algunas predicciones. Para hacerlo, se emplean los datos de prueba y se analiza con qué precisión el algoritmo predice el porcentaje de desarrollo de la habilidad, mediante el siguiente código:

```
In [13]: df = pd.DataFrame({'Actual': y_test, 'Predicted': y_pred})
df.head()
```

```
Out[13]:
```

	Actual	Predicted
0	16	25.290758
1	40	53.217961
2	78	87.451307
3	62	55.019716
4	60	56.821471

Aunque el modelo no es muy preciso, los porcentajes previstos se acercan a los reales.

Nota: Los valores de las columnas anteriores pueden ser diferentes en cada una de las compilaciones, ya que la función `train_test_split` divide aleatoriamente los datos en conjuntos de prueba y de entrenamiento, siendo probable que las divisiones realizadas por el algoritmo sean diferentes de las que se muestran en este tutorial.

2.5. Evaluación del algoritmo

Lo último en el modelo tratado en este tutorial del modelo de regresión lineal como modelo de aprendizaje de máquina, es evaluar el rendimiento del algoritmo. Este paso es el núcleo del modelo que permite comparar qué tan bien funciona el algoritmo en un conjunto de datos en particular. Para los algoritmos de regresión, se utilizan comúnmente tres métricas de evaluación:

El error absoluto medio (MAE) es la media del valor absoluto de los errores. Se calcula como:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |valor_{actual} - valor_{prediccion}| \quad (3)$$

El error cuadrático medio (MSE) es la media de los errores cuadráticos y se calcula como:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |valor_{actual} - valor_{prediccion}|^2 \quad (4)$$

El error cuadrático medio (RMSE) es la raíz cuadrada de la media de los errores cuadráticos:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |valor_{actual} - valor_{prediccion}|^2} \quad (5)$$

La librería de Scikit-Learn tiene implementado los métodos, por lo tanto, no hay que realizar y programar los cálculos manualmente. Los valores para estas métricas, usando los datos de prueba se obtienen con el siguiente código:

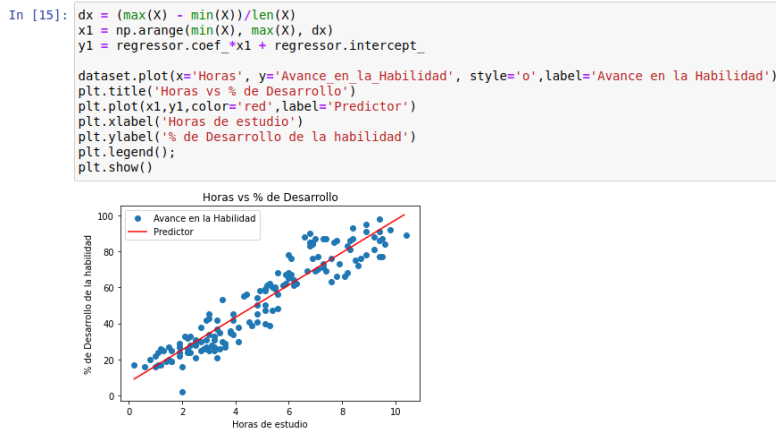
```
In [14]: from sklearn import metrics
print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y_test, y_pred))
print('Mean Squared Error:', metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred)))

Mean Absolute Error: 5.932567878793745
Mean Squared Error: 52.84630838983822
Root Mean Squared Error: 7.26954664266199
```

Se observa que el valor obtenido por la raíz del error cuadrático medio (RMS) es de 7,28, que es menos del 10% del valor medio de los porcentajes de todos los estudiantes, es decir, el 51.44. Esto significa que el algoritmo realizó la predicción de una forma correcta (menor error posible).

<https://stackabuse.com/linear-regression-in-python-with-scikit-learn>

La gráfica con el predictor encontrado es:



3. Regresión Lineal Múltiple

En la sección anterior se realizó una regresión lineal con dos variables, pero en los problemas tradicionales del campo laboral, se van a encontrar más de dos variables. La regresión lineal que involucra múltiples variables se denomina “regresión lineal múltiple”. Los pasos para realizar la regresión lineal múltiple son casi similares a los de la regresión lineal simple. La diferencia radica en la evaluación. Su resultado se puede usar para averiguar qué factor tiene mayor impacto en el resultado previsto y cómo se relacionan las diferentes variables entre sí.

En esta sección del tutorial de regresión lineal múltiple se emplea el caso de predicción del consumo de gas (en millones de galones) en 48 estados de EE. UU. Con base en los impuestos a

la gasolina (en centavos), el Alistamiento de los datos ingreso per cápita (dólares), las carreteras pavimentadas (en millas) y la proporción de población que tiene licencia de conducción.

Los detalles del conjunto de datos se pueden encontrar en el siguiente enlace:

<https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/datasets/regression/x16.txt>

Las primeras dos columnas del conjunto de datos anterior, no proporcionan ninguna información útil, por lo que se han eliminado del archivo del conjunto de datos. En el siguiente enlace encontrará el conjunto de datos con el que se trabajara.

<https://1bestlinks.net/wZGty>



3.1. Importar las librerías

El siguiente código importa las librerías necesarias:

```
In [16]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
```

El siguiente comando importa el conjunto de datos del archivo que contiene la data, descargado en el enlace anterior:

```
In [17]: dataset = pd.read_csv('petrol_consumption.csv')
```

Para visualizar una muestra del conjunto de datos se emplea el método `head()`:

```
In [18]: dataset.head()
```

Out[18]:

	Petrol_tax	Average_income	Paved_Highways	Population_Driver_licence(%)	Petrol_Consumption
0	9.0	3571	1976	0.525	541
1	9.0	4092	1250	0.572	524
2	9.0	3865	1586	0.580	561
3	7.5	4870	2351	0.529	414
4	8.0	4399	431	0.544	410

Para ver detalles estadísticos del conjunto de datos, se realiza con método `describe()`:

```
In [19]: dataset.describe()
```

```
Out[19]:
```

	Petrol_tax	Average_income	Paved_Highways	Population_Driver_licence(%)	Petrol_Consumption
count	48.000000	48.000000	48.000000	48.000000	48.000000
mean	7.668333	4241.833333	5565.416667	0.570333	576.770833
std	0.950770	573.623768	3491.507166	0.055470	111.885816
min	5.000000	3063.000000	431.000000	0.451000	344.000000
25%	7.000000	3739.000000	3110.250000	0.529750	509.500000
50%	7.500000	4298.000000	4735.500000	0.564500	568.500000
75%	8.125000	4578.750000	7156.000000	0.595250	632.750000
max	10.000000	5342.000000	17782.000000	0.724000	968.000000

3.2. Alistamiento de los datos (Preprocesamiento)

El siguiente paso es dividir los datos en atributos y etiquetas como se realizó anteriormente. Sin embargo, esta vez se usan los nombres de las columnas para crear un conjunto de atributos y una etiqueta, ejecute las siguientes líneas de código:

```
In [20]: X = dataset[['Petrol_tax', 'Average_income', 'Paved_Highways', 'Population_Driver_licence(%)']]
y = dataset['Petrol_Consumption']
```

Con las siguientes líneas de código se divide los datos en conjuntos de datos de prueba y de entrenamiento:

```
In [21]: from sklearn.model_selection import train_test_split
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=0)
```

3.3. Entrenamiento del algoritmo

Para entrenar el algoritmo se emplea el método fit() de la clase LinearRegression:

```
In [22]: from sklearn.linear_model import LinearRegression
regressor = LinearRegression()
regressor.fit(X_train, y_train)
```

```
Out[22]: LinearRegression()
```

El modelo de regresión lineal multivariable tiene que encontrar los coeficientes más óptimos para todos los atributos. Para ver qué coeficientes ha elegido el modelo de regresión, se ejecuta las siguientes líneas de comando:

```
In [23]: coeff_df = pd.DataFrame(regressor.coef_, X.columns, columns=['Coefficient'])
coeff_df
```

```
Out[23]:
```

	Coefficient
Petrol_tax	-40.016660
Average_income	-0.065413
Paved_Highways	-0.004741
Population_Driver_licence(%)	1341.862121

Los resultados se pueden interpretar de la siguiente manera, por un aumento unitario en “petrol_tax”, hay una disminución de 24,19 millones de galones en el consumo de gas. De manera similar, un aumento unitario en la proporción de la población con licencia de conducir se relaciona con un aumento de 1,324 billones de galones de consumo de gasolina. Por otro lado, las variables “Average_income” y “Paved_Highways” presentan una relación baja con respecto al consumo de gas.

3.4. Predicción

Para ejecutar el modelo de predicción sobre los datos de prueba, se ejecuta con las siguientes líneas de comando:

```
In [24]: y_pred = regressor.predict(X_test)
```

Para comparar los valores de salida reales para X_test con los valores de predicción, se realiza con las siguientes líneas de código:

```
In [25]: df = pd.DataFrame({'Actual': y_test, 'Predicted': y_pred})
df
```

Out[25]:

	Actual	Predicted
29	534	469.391989
4	410	545.645464
26	577	589.668394
30	571	569.730413
32	577	649.774809
37	704	646.631164
34	487	511.608148
40	587	672.475177
7	467	502.074782
10	580	501.270734

El último paso consiste en la evaluación del rendimiento del algoritmo. Para ello, se emplea el cálculo de los valores de MAE, MSE y RMSE, con la ejecución del siguiente código:

```
In [26]: from sklearn import metrics
print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y_test, y_pred))
print('Mean Squared Error:', metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred)))
```

```
Mean Absolute Error: 56.8222474789647
Mean Squared Error: 4666.344787588363
Root Mean Squared Error: 68.3106491521517
```

El valor del RMSE es de 60,07, que es ligeramente superior al 10 % del valor medio del consumo de gas en todos los estados. Esto se puede interpretar que el algoritmo no fue muy preciso, por lo tanto, para hacer predicciones razonables, no es recomendable por lo que el error de la predicción va a ser mayor al 10 %.

A continuación, se listan algunos factores que se pueden sugerir a la inexactitud del predictor realizado.

- Se necesitan más datos: un año de datos no es información suficiente, se requiere más datos del pasado para poder realizar un mejor entrenamiento.

- Supuestos erróneos: se asume que estos datos presentan una relación lineal, pero puede que ese no sea el caso. Una visualización de los datos puede ayudar a determinarlo.
- Características deficientes: es posible que las características que se asumieron no presentaran una correlación lo suficientemente alta con los valores que se están tratando de predecir.

4. Conclusión

En este tutorial, se presentó uno de los algoritmos de aprendizaje automático más básicos y fundamentales, que es la regresión lineal. Se implementó la regresión lineal simple y la regresión lineal múltiple, empleando la librería de aprendizaje automático de Scikit-Learn en Python.

5. Recomendaciones

El código y los datos de este tutorial sirven de base para explorar datos de otros casos de uso. Se pueden obtener mejoras de los resultados obtenidos con la variación del tamaño de los datos de entrenamiento y prueba, transformar y escalar características de entrada, entre otros. Descargar e implementar otros conjuntos de datos de regresión para ver su comportamiento.

Nota: Está tutorial fue tomado y adaptado de:

<https://stackabuse.com/linear-regression-in-python-with-scikit-learn>

Su uso se realiza con el fin de ilustrar en los espacios académicos de Fundamentos de Programación, Desarrollo de Soluciones Móviles Embebidas e Internet de las Cosas, la implementación de un algoritmo de aprendizaje de máquina básico, en programación de escritorio empleando python, en dispositivos móviles celulares y en servidores.

Referencias

Weisberg S (2005). "Applied linear regression." *John Wiley & Sons*, **528**. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471704091>.

Filiación institucional:

Walder de Jesus Canova
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: wdcanovag@libertadores.edu.co

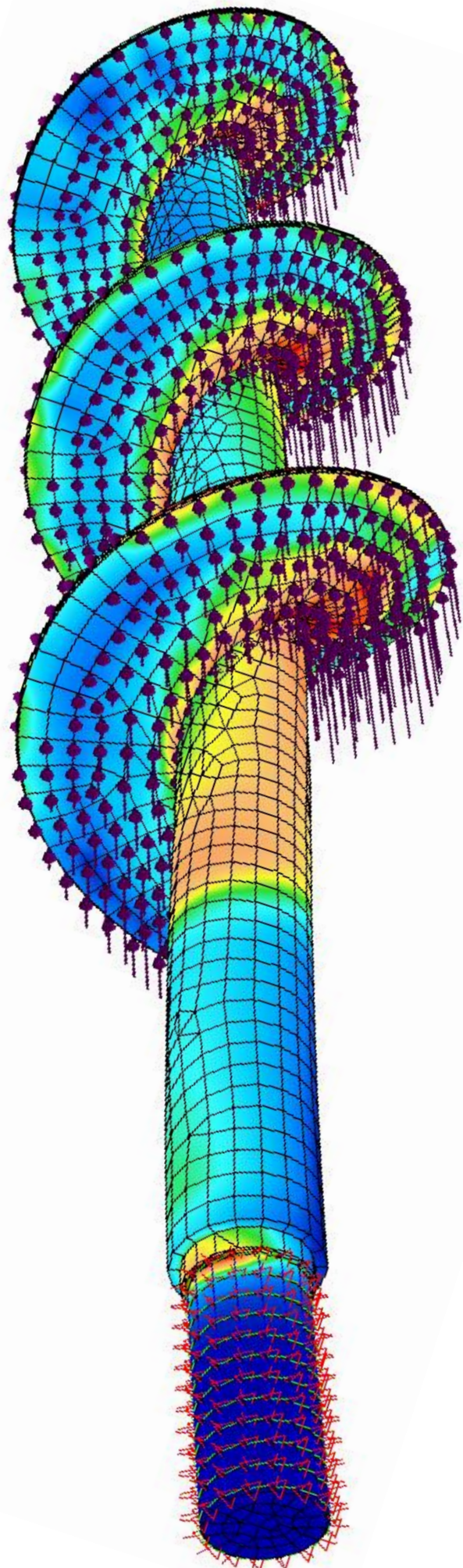
John Petearson Anzola
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jpanzolaa@libertadores.edu.co
Google Académico: <https://scholar.google.es/citations?user=ep9Cw1QAAAAJ&hl=es>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8503-5410>

Casos de Uso

Casos de Uso

41

Diseño aeropónico para cultivos de fresas en Bogotá





Diseño aeropónico para cultivos de fresas en Bogotá

Nelson Eduardo Lozano

Fundación Universitaria
Los Libertadores

José Steven Calderón

Fundación Universitaria
Los Libertadores

Christian Camilo Cruz

Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

En el siguiente trabajo se aborda problemas actuales basados en cultivos tradicionales, y se propone la aeroponía como solución a los problemas que se pueden encontrar en los siguientes apartados, los principales problemas a los que intentaremos dar solución son los de, recursos alimenticios para la población futura que crecerán exponencialmente, a las tierras erosionadas o donde no se pueda plantar nada simplemente por las condiciones ambientales y en una perspectiva futura, un aporte a los proyectos de cultivos espaciales o en otras superficies del Sistema solar. Con este proyecto buscamos reducir al máximo los recursos que un cultivo pueda requerir, generando así ahorros en recursos para la planta y ahorros en recursos de inversión para todo aquel que esté interesado en el proyecto, dentro de este artículo, el lector también puede informar sobre los desarrollos que ha tenido el cultivo aeropónico desde su creación hasta la actualidad, donde tanto empresas colombianas como el resto del mundo comienzan a adoptar este sistema y darle más fuerza y reconocimiento a nivel comercial y social.

Palabras Clave: Aeroponía, Fresa, Machine Learning, PAR, nebulización.

1. Introducción

La aeroponía se define como el proceso de cultivar plantas en un entorno de niebla, sin sumergir la raíz de la planta total o parcialmente es un espacio de suelos sumergidos o acuosos y soluciones nutritivas. La aeroponía es un avance de la tecnología junto con la técnica de los cultivos hidropónicos convencionales y tradicionales. El primer sistema de aeroponía fue desarrollado por el Dr. Franco Massantini de la universidad de Pia en Italia, lo que denominó “*columnas de cultivo*”; el principio de la aeroponía es hacer crecer las plantas en un entorno cerrado o semi cerrado, donde por lo general se utilizan nebulizadores o aspersores, las raíces tienen que estar colgantes y bajo el tallo, deben tener una solución rica en nutrientes, además tenemos que garantizar que la raíz también esté en lo posible en un entorno oscuro ya que las raíces son fotofobias K (2019).

Dentro de los contenedores donde tenemos las plantas se genera un microambiente con alta humedad relativa, esto en consecuencia hace que las raíces crezcan en el aire, con una tasa muy baja de plagas y se garantiza que generen productos con una alta calidad. La presencia de oxígeno en la rizosfera es importante para el desarrollo de la planta, por medio del cultivo aeropónico se sabe que casi cualquier planta puede crecer hasta su madurez en el entorno, es

de tener en cuenta que la parte en la que va la raíz debe contar con un espacio considerable ya que de tener un ambiente reducido la planta puede enfermar y morir.

2. Objetivo General

Proponer una solución para el cultivo aeropónico de fresa en cual se controle la variable de luminosidad y riego, el cual nos permita determinar el beneficio de la luminosidad LED y el riego por nebulización en el crecimiento y producción de la plantas.

2.1. Objetivos Específicos

- Identificar la información requerida, así como las fuentes respectivas referente al crecimiento de la planta de fresa y a los cultivos aeropónicos.
- Obtener y organizar la información sobre el crecimiento de las plantas de fresa.
- Determinar las posibles soluciones y criterios que pueden servir para lograr una configuración adecuada en los requerimientos para las plantas de fresa.
- Seleccionar algoritmos que puedan identificar las necesidades de luminosidad y humedad de la planta cuando esta la requiera.

3. Trabajos Realizados

Hoy en día se ha vuelto muy importante el proceso de desarrollo de tecnologías y métodos que beneficien áreas como la agricultura en la que resalta la producción de materia prima para el consumo de las personas entre ellos los alimentos debido al gran crecimiento de la población y el espacio con el que se cuenta para cultivar y ello la innovación en nuevos métodos de cultivo ha sido necesario entre estos métodos esta los cultivos aeropónica un método que se enfoca en dejar la raíz suspendida sin contacto con los minerales de la tierra con ello se requiere un proceso continuo de aspersión para el crecimiento de los cultivos y un diseño específico para las plantas ya que la raíz está expuesta al exterior, a continuación se hará un resumen de los avances más significativos en esta área.

Tim Youngblood, historiador, escribe dentro del artículo [O \(2013\)](#) que la aeropónica se viene tratando desde la década de 1920 y que se hizo popular entre los científicos por tener raíces fuera del suelo, y esto facilitó el estudio de las mismas, no fue hasta la década de 1970 que los métodos de cultivo en interiores como la hidroponía, la acuaponía y la aeropónica dejaron el laboratorio para el cultivo recreativo y comercial, el método para cultivar incluye separar las raíces de las plantas por una estructura de soporte para la planta, consiste en una espuma de células cerradas comprimida alrededor del tallo inferior, debajo de la barrera de espuma las raíces quedan suspendidas en la cámara aeropónica.

En el trabajo [mundo verde \(2016\)](#) redacta que, en la década de 1990, la NASA comenzó a tomar la aeropónica como una posible solución para el cultivo en el espacio con gravedad 0, pero fue hasta el año 1996 donde se financió la investigación de Richard Stoner, quien patentó el microchip que se encargaba del riego automático para plantas cultivadas aeropónicamente, los experimentos fueron desarrollados en la estación espacial MIR, el centro espacial Kennedy y la universidad estatal de Colorado.

[GroHo \(2021\)](#), describe la tecnología Fogponics o aeropónica 2.0 como sistemas de alta presión que surgieron en la década de los 90, este sistema se encarga de nebulizar la solución acuifera con gotas en el rango de 30-80 micrones, para que la nebulización exista es necesaria una bomba de alta presión entre 80-100 psi. También existen los Foggers ultrasónicos los cuales

consisten en crear gotas de 3-5 micras por medio de la vibración de placas. Vida rural [K \(2019\)](#), presenta una de las principales ventajas que tiene la aeroponía es la aireación del sistema. las ventajas que tiene la aeroponía es la aireación del sistema, consideremos que la cantidad de oxígeno que se diluye en el agua se mide en mg/L, para este caso decimos que la cantidad es de 5 a 10 mg/L a una temperatura de 20°C, mientras que la cantidad de oxígeno en el aire puede estar en el orden de 100000 a 200000 mg/L.

4. Propuesta

La presente investigación se enfocará en el crecimiento de las plantas de fresas en un ambiente controlado haciendo uso del método de cultivo aeropónico, teniendo en cuenta que si se modifica el PAR lumínico de la planta podemos obtener mayor producción de la planta y crecimiento de la misma en un menor tiempo, además como hacemos uso de la aeroponía también podemos ahorrar en recursos que se utilizarían en métodos convencionales, tales como son, la tierra, los minerales, agua y dependencia del clima.

La iluminación LED, es especial para el crecimiento de las plantas, ofreciendo amplias ventajas además del ahorro energético, el cultivo en interiores LED ofrece la oportunidad de manipular el espectro de luz que reciben las plantas que están creciendo bajo estos mismos focos y aumenta la producción de los cultivos, todo lo anterior sin afectar la calidad del producto si lo comparamos con las otras formas de iluminaciones tradicionales. Se podría pensar que tecnológicamente hablando las lámparas incandescentes también pueden cumplir esta función, pero resulta aconsejable sustituir los sistemas de iluminación fotosintética por la iluminación LED, con un 35% de la potencia y el 10% de la luz emitida por halogenuros metálicos es utilizada por las plantas, mientras que en caso de la tecnología LED hasta el 90% puede absorberse por parte de las plantas, ya que estos pueden emitir espectros de manera separada, la vida útil de este tipo de iluminación es más amplia y a su vez estos sistemas no generan acceso de calor dañino al cultivo, también estos sistemas tipo LED tienen una tasa de ahorro de hasta el 90% lo que se traduce en ahorro e inversión para otra etapa de la producción de las plantas [Andrade-Piedra, Kromann, and Otazú \(2015\)](#).

Estos sistemas hacen uso de tres tipos de Leds, color rojo, azul y blanco, cada uno con una razón de ser, los Leds blancos simulan luminosidad, los Leds rojos son los que se encargan de aportar rayos infrarrojos que son necesarios al momento del florecimiento y Leds azules los cuales aportan rayos UV para el crecimiento y fortalecimiento de la planta [Martínez, Altisent, and Gracia \(2000\)](#).

Para el sistemas de alimentación de agua y nutrientes de la planta se opta por tomar el sistema de nebulización, un sistema de bombeo que se encarga de proporcionar la presión y el caudal adecuado a la instalación, un sistema de filtración el cual debe tener un espesor de filtración que garantice que las boquillas no se obstruyan, un sistema de aplicación de fertilizantes y/o nutrientes solubles en agua y Una red de tuberías distribuidas según el diseño para la apropiada distribución de nutrientes y o fertilizantes. Las ventajas de este sistema son las siguientes, se aumenta la humedad relativa de un invernadero, se puede refrigerar si se combina con un sistema de ventilación forzada y es Ideal para cultivo de producción de forrajes [Martínez et al. \(2000\)](#); [wikipedia \(2021\)](#).

El riego mediante nebulización se puede efectuar de forma periódica, para mantener una humedad de suelo óptima, para lo anterior es necesario conocer la humedad a la cual se encuentra dicho suelo, esto mediante una serie de sensores y lectores. Este sistema de bombeo cuenta con bombas, mangueras y boquillas, todo esto en conjunto permiten realizar un regadío de manera correcta. Cada uno se eligió en base al área donde se deberá suministrar el riego con aproximadamente ($6m^2$), es decir el sistema elegido no es sobredimensionado a las necesidades del proyecto. Hay que destacar que al igual que los actuadores del control de Temperatura y Humedad, la bomba no se puede conectar directamente al microcontrolador, es decir, se

necesita obligatoriamente de relés por medio de señales para ejercer la acción de activación o desactivación del proceso de riego nebulizado Rojas Castillo *et al.* (2017); wikipedia (2021).

Teniendo en cuenta lo anterior y con la modificación del PAR lumínico y el sistema de riego, el enfoque de este proyecto puede crear una hipótesis de cómo se puede contribuir al crecimiento acelerado de las plantas de fresa sin estresar la misma, ofreciéndole todo lo necesario en un sistema que sea controlado por medio de un microcontrolador. De ser así, se pueden crear criterios de crecimiento precisos para cada planta, determinando su ciclo de crecimiento, la cantidad de recursos que necesita y cuantas cosechas puede generar en un determinado rango de tiempo Oscaño Fernández (2019); wikipedia (2021).

4.1. Diseño de aspectos metodológicos

El proceso de desarrollo de este proyecto contempla los siguientes aspectos metodológicos para el cumplimiento de los objetivos específicos:

- Consultar como es el crecimiento y las características de luminosidad, humedad, nutrientes y generalidades de la fresa.
- Realizar una comparación entre los métodos de cultivo tradicionales y el modelo aeropónico resaltando ventajas de una sobre la otra.
- Determinar los tiempos de crecimiento y cosecha de la fresa en los métodos de cultivos tradicionales y aeropónicos.
- Acordar el diseño de la estructura que mejor se adapte a la necesidad de cultivo de fresas con el cual se trabajara.
- Determinar los materiales y recursos que se tendrán en cuenta para los sistemas mecánicos y electrónicos del proyecto además de los cambios ambientales dentro de la misma.
- Evaluar el microprocesador que sea más eficiente que se adapte mejor para poder realizar los procedimientos que se propusieron para el correcto crecimiento de la planta.
- Realizar pruebas con el cultivo de fresas para poder determinar un estándar de crecimiento y calidad.

5. Resultados

La agricultura y el manejo de los cultivos siempre han sido parte de la sociedad, ya que con este mercado subsisten y se mantienen a un gran número de personas en diferentes regiones del planeta. El agricultor siempre se pregunta que métodos puede utilizar para que sus cosechas sean más productivas, sean menos costosas al momento de sembrar y además la garantía para que sus cultivos no se dañen por alguna plaga o un repentino cambio brusco en las temperaturas ambientales.

Hablando de esta misma actividad tenemos que tener en cuenta que es una de las que más impacta el ecosistema, ya que para poder trabajar la tierra se genera tala o quema de bosques enteros para la adecuación de nuevos terrenos, además también se genera la erosión del suelo por el uso insistente de químicos y fertilizantes sobre la tierra, también podemos incluir que la tierra en la que se puede trabajar cada vez es menor, ya que la misma agricultura se ha encargado de dejar algunos terrenos estériles y prácticamente improductivos, también existen los métodos hidropónicos, los cuales se basan en la absorción de nutrientes por medio de la sumersión de las raíces en soluciones acuosas conectadas por tubos o canales de agua, los cuales si no son acondicionados de la manera correcta pueden generar un desperdicio de agua

y nutrientes innecesario que se pueden traducir en costos y además si el sistema falla puede hacer morir la planta, por otra parte el crecimiento de la población mundial cada vez se acelera a mayor velocidad, y cada vez por las anteriores razones expuestas, son menores los terrenos donde se puede cultivar sin seguir dañando los entornos naturales.

Como una solución a los sistemas de riego convencionales se opta por un sistema de nebulización, este es el sistema en el cual se expulsa agua en forma de neblina, a través de emisores colocados en la parte superior de los cultivos, el cual además de suministrar agua o fertilizante, contribuye a disminuir temperatura y elevar el nivel de humedad relativa en el proceso de cultivo, a estos emisores se les llaman nebulizadores ya que producen niebla fina, el agua a presión sale por un orificio de pequeño diámetro, de forma que el chorro producido se estrella contra una pared cóncava que lo despieza y distribuye en forma nebulizada, para estos sistemas se manejan altas presiones las cuales pueden ir entre los 2 a 4 bares.

Parte de los inconvenientes en el crecimiento de las plantas se relacionan a las temporadas donde estas reciben menor cantidad de luz y calor solar, lo que provoca que el proceso de fotosíntesis tomen más tiempo y con ello también la maduración y posterior producción de alimentos sea mucho más lenta, además si la planta no recibe los minerales y el agua adecuada para su crecimiento está también podría atrofiar su crecimiento; en la actualidad se cuenta con los sistemas aeropónicos de cultivo, que solucionan inconvenientes como lo son, el reducido espacio para cultivar, el desperdicio de agua y minerales, se libra tanto de pesticidas como de fertilizantes y se genera un producto más limpio.

En base a los beneficios y efectividad de los cultivos aeropónicos, surge la pregunta de si estos podrían mejorar aún más si se controla todo un cultivo de manera artificial, resaltando la modificación de la luminosidad que este caso es el PAR que se le pueda aplicar a la planta, lo anterior tiene lugar en la universidad los libertadores en Bogotá, donde la planta estará excluida de los cambios ambientales de la ciudad, ya que el sistema estaría controlado totalmente. ¿Cómo puede relacionarse el crecimiento y producción de las plantas de fresa teniendo un entorno lumínico controlado en un lapso de seis meses?

6. Conclusiones

Con base en los estudios y a los experimentos que se han llevado a cabo durante las primeras dos décadas desde el año 2000 se observa que la aeroponía es una alternativa sostenible y eficaz al momento de cultivar, además de que se pueden modificar variables como PAR, temperatura y modo de hidratación de la planta para obtener de esta manera mejores resultados tanto en el crecimiento como en el desarrollo de la planta.

Referencias

- Andrade-Piedra J, Kromann P, Otazú V (2015). “Manual para la producción de semilla de papa usando aeroponía: diez años de experiencias en Colombia, Ecuador y Perú.” URL <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=C02019007271>.
- GroHo (2021). “Fogponics: una nueva forma de Aeroponía.” URL <https://www.groho.es/post/fogponics-una-nueva-forma-de-aeroponia>.
- K B (2019). *Aeroponics Cannabis: A Step by Step Guide to Growing Marijuana Using Aeroponics Method*. Salawu Tirimisiyu Lekan.
- Martínez E, Altisent JMD, Gracia LMN (2000). “Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía (I).” *Vida rural*, (101), 40–43. URL <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=183204>.

- mundo verde E (2016). “Aeroponia y la NASA.” URL <https://www.elmundoverde.mx/blog/2016/01/12/138/>.
- O S (2013). “La aeroponia sigue ganando terreno en Colombia.” URL <https://www8.gsb.columbia.edu/sites/valueinvesting/files/files/Buffett1984.pdf>.
- Oscanoa Fernández HH (2019). “Diseño mecatrónico de un ambiente controlado para el crecimiento de hortalizas empleando aeroponia.” URL <http://hdl.handle.net/20.500.12404/12025>.
- Rojas Castillo YD, *et al.* (2017). “Evolución de la Aeroponia en Colombia como innovación ambiental y sostenible.” URL <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/21077>.
- wikipedia (2021). “Aeroponics.” URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroponics>.

Filiación institucional:

Nelson Eduardo Lozano Espinosa
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: nelozanoe@libertadores.edu.co

José Steven Calderón Neira
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jscalderonn@libertadores.edu.co

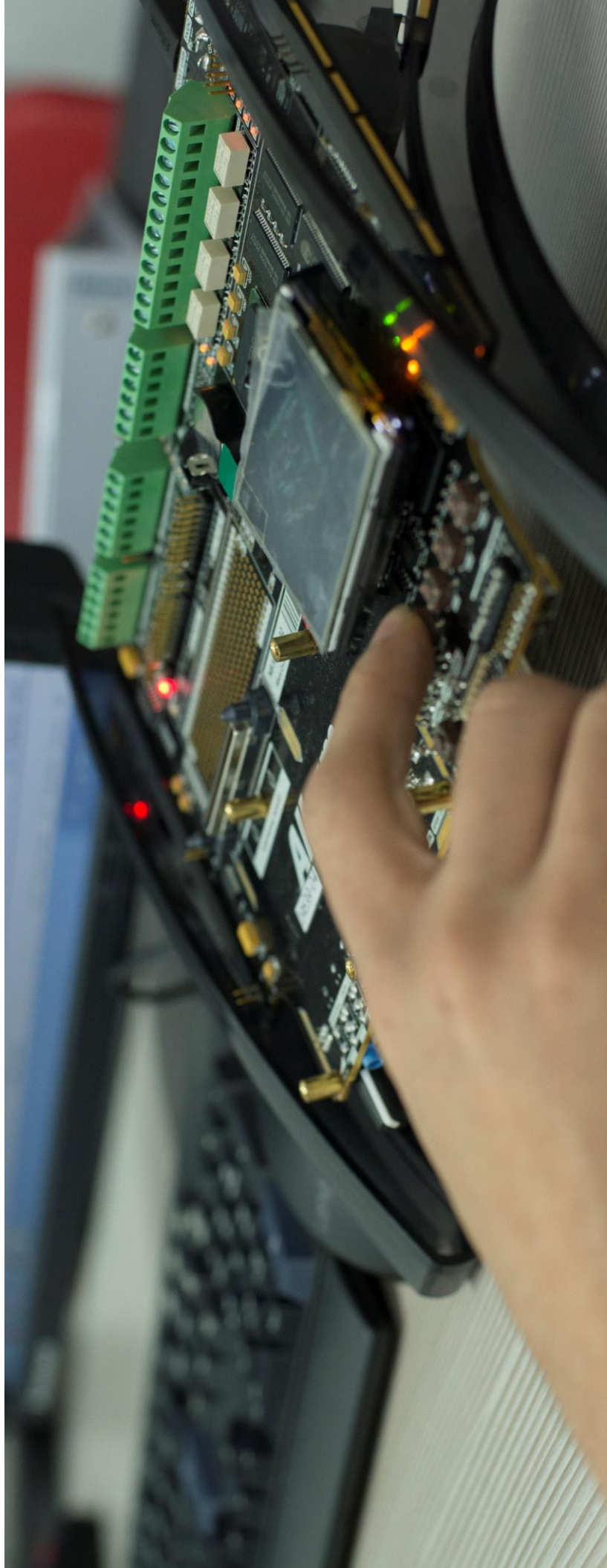
Christian Camilo Cruz
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: cccruzr01@libertadores.edu.co

Tendencias Tecnológicas

Tendencias Tecnológicas

49

Microstrip: desarrollos y aplicaciones





Microstrip: desarrollos y aplicaciones

Jaime Ramírez Artunduaga

Fundación Universitaria

Los Libertadores

Resumen

Microstrips have had a great interest in their development and advances, since they can be used in various applications, offered by some traditional electrical devices, in electronic equipment, but with the particularity that they allow the handling of signals with higher energy intensity, since its robust structure provides a higher degree of heat dissipation. Likewise, they present, in their assembly, a greater degree of assurance and stability. In this work, the main aim is to highlight the structural and functional characteristics of the main applications of these devices.

Palabras Clave: Microstrips (microcintas), microondas, cuasi-TEM., dieléctrico, microondas.

1. Introducción

El contexto del contenido de este trabajo es fundamentalmente de tipo académico. Su pretensión se fundamenta en reseñar algunos servicios que las microcintas prestan en los circuitos electrónicos, sin profundizar en sus aspectos y características de desarrollo tecnológico específico. En el proceso de formación profesional de los estudiantes, se requiere complementar los conocimientos conceptuales, de las temáticas tratadas, con la aplicación que se pueden lograr con estos conceptos, lo cual redundará no sólo en el fortalecimiento de estos, sino también en motivar el interés en su investigación, desarrollo y aprovechamiento.

Por lo tanto, el propósito esencial de este trabajo es referenciar las características estructurales y funcionales básicas de las microcintas, así como algunos de los diversos aplicativos que se pueden lograr mediante la utilización de estas, indicando en que consiste y como de puede implementar estos logros, con orientación académica, en la formación profesional de los estudiantes de las ingenierías afines a esta temática.

2. Trabajos realizados

Teniendo de presente que este artículo no corresponde a la descripción del desarrollo de una investigación científica en particular, ni al de un proyecto específico, sino a la presentación de las estructuras y aplicaciones que tienen las microcintas, y que su carácter es netamente académico, su marco conceptual se fundamentó en la experiencia profesional y académica del

autor en esta temática y en las consultas que se hicieron en la documentación que se relaciona en la Referencia Bibliográficas.

3. Propuesta

Teniendo de presente que la concepción de la estructura y funcionamiento de las microcintas reviste características de alta complejidad, y que el rango de las aplicaciones en las cuales se puede utilizar es muy amplio, a continuación, se describirá, de manera académica, su principio de funcionamiento y algunas de sus diversas aplicaciones.

3.1. Estructura

La estructura de una Microstrip se fundamenta de dos placas conductoras paralelas, una ubicada en la superficie superior de un dieléctrico (substrato) que las separa y la otra en la superficie inferior del mismo. La placa inferior tiene el mismo ancho y longitud del dieléctrico, la cual corresponde al plano de tierra de la cinta, y la placa superior tiene un ancho menor constituyéndose en el conductor de la cinta. En la Figura 1, se ilustra la conformación básica de una microcinta [Catano-Ochoa, Senior, Lopez, and Reyes-Vera \(2016\)](#).

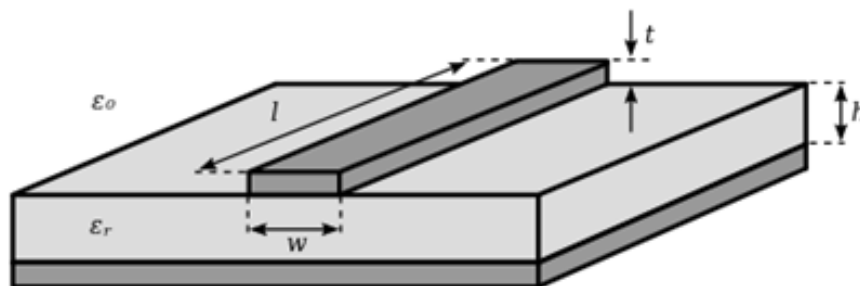


Figura 1: Estructura básica de una microcinta.

El principio de funcionamiento de las microstrips, se fundamenta en la generación de un campo eléctrico entre las cintas conductoras, cuya magnitud es afectada por la geometría de la estructura de la microstrip y de la constante dieléctrica del substrato.

3.2. Modo de propagación

Las ondas electromagnéticas en las microcintas se propagan en forma cuasi-TEM (Transversales Electromagnéticas), diferenciándose de las guías de ondas, en que mientras en estas últimas se propagan dentro de la guía, en las microcintas se propagan tanto en su dieléctrico como en el aire, lo que hace que estas líneas de microcintas sean medios de transmisión dispersivos. En la Figura2 se muestra el modo de propagación de las ondas electromagnéticas (eléctricas y magnéticas), en una línea de microcintas [Sui and Wu \(2017\)](#).

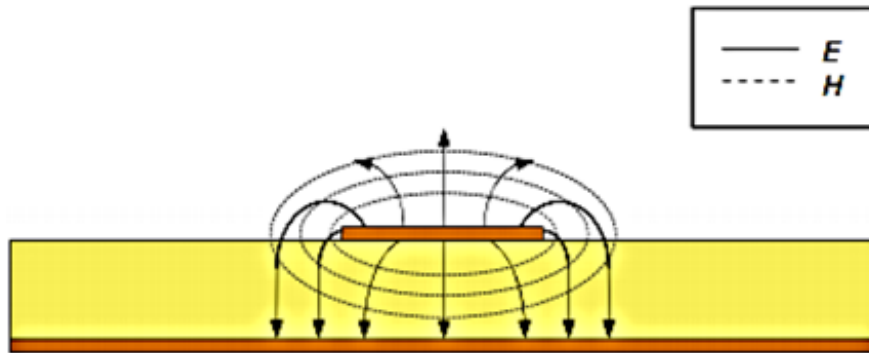


Figura 2: Modo de propagación de los campos electromagnéticos en una línea de transmisión tipo microcintas.

3.3. Impedancia característica

Para determinar la expresión que permitiera calcular la impedancia característica de este tipo de línea de transmisión, se requiere de un proceso más extenso y complejo que el utilizado para el del resto de líneas de transmisión, ya que las microcintas son estructura abiertas, lo que conlleva a que los campos electromagnéticos no se encuentran confinados dentro de la estructura misma de la línea.

El premio nobel de física H. A. Wheeler, desarrolló una expresión matemática, que ha sido reconocida, para calcular la impedancia característica de las microcintas, la cual se indica en la Ecuación 1, donde es despreciada el espesor de la cinta conductora (superior) Kennedy and Davis (1985); Wheeler (1965).

$$\text{si } \frac{w}{h} \leq 1 \rightarrow Z_o = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \quad (1)$$

$$\text{si } \frac{w}{h} \leq 1 \rightarrow Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \frac{1}{(w/h) + 1,393 + 0,667 \ln(w/h + 1,444)}$$

$$\text{donde : } \epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} + 0,04(1 - w/h)^2 \right]$$

ϵ_{ff} : permitividad eléctrica efectiva
 ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico
 h : grosor de la placa dieléctrica
 w : ancho de la cinta conductora (superior)

Ejemplo 1

Calcular la impedancia característica de una línea de transmisión de tipo microcintas, con las características estructurales indicadas en la figura No 1, con una placa dieléctrica de permitividad relativa de 3.4 y con las siguientes dimensionales:

- Grosor del dieléctrico: 0.8 cm
- Ancho de la cinta conductora: 0.6 cm

Solución:

En primer lugar, se calcula la permitividad efectiva:

$$\varepsilon_{ff} : \frac{3,4 + 1}{2} + \frac{3,4 - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(0,8/0,6)}} + 0,04(1 - 0,6/0,8)^2 \right] = 2,49$$

$$\frac{w}{h} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75 \leq 1$$

$$\frac{w}{h} \leq 1 \rightarrow Z_0 = \frac{60}{\sqrt{2,49}} \ln \left(\frac{(8)(0,8)}{0,6} + \frac{0,6}{4(0,8)} \right) = 9,07\Omega$$

En el caso de requerirse un valor de impedancia característica determinado, debe redimensionar la estructura de la línea (grosor del dieléctrico y/o ancho de la cinta conductora).

Existen varias herramientas computacionales para calcular las dimensiones de una línea microstrip, como es el caso de LineCalc, presente en el entorno del programa Advanced Design System (ADS) y el de TXLine de Applied Wave Research, RF-CHART, partiendo de su impedancia característica y de su longitud eléctrica. Por lo general estas herramientas desprecian el grosor de la cinta conductora de las microcintas [Ortiz \(2019\)](#).

3.4. Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente, las líneas microcintas no se emplean como medio para transmisión para enlaces de comunicaciones, debido esencialmente a las altas pérdidas por dispersión que generan, pero si permiten una gama amplia de aplicaciones de gran utilidad, entre las cuales se encuentran: antenas, filtros, divisores de potencia, acopladores direccionales, osciladores, entre otras [Zúñiga-Juárez, Reynoso-Hernández, Maya-Sánchez, and Murphy-Arteaga \(2012\)](#). A continuación, se describe dos de sus aplicaciones más conocidas:

3.5. Antenas microstrip

Estructura

Su construcción se fundamenta en la tecnología de las microcintas, donde la cinta conductora (superior), la cual se le conoce como “parche”, hace las veces del elemento radiador de la antena y la cinta inferior (plano de tierra de la cinta) hace las veces del elemento reflector. Por su estructura, el rango de frecuencia en el cual opera este tipo de antenas es en el de microondas [Balanis \(2015\)](#).

Debido a el tamaño reducido que presenta de este tipo de antenas, su utilización se hace muy práctico en los sistemas de comunicación de a aquellos dispositivos y naves móviles, tales como: misiles, aeronaves, drones, satélites, entre otros.

Las ventajas que ofrecen las antenas microstrip, son principalmente: su tamaño reducido, su peso liviano, facilidad de implementación y la versatilidad en su impedancia, patrón de radiación, polarización y frecuencia de operación. En cuanto a las ventajas que se le anotan se tienen: reducida potencia de radiación, baja eficiencia, ancho de banda angosto, altas pérdidas y además son muy susceptibles a ser afectadas por las condiciones térmicas.

En la Figura 3 se muestra la estructura básica de una antena tipo microstrip rectangular, con sus indicaciones dimensionales.

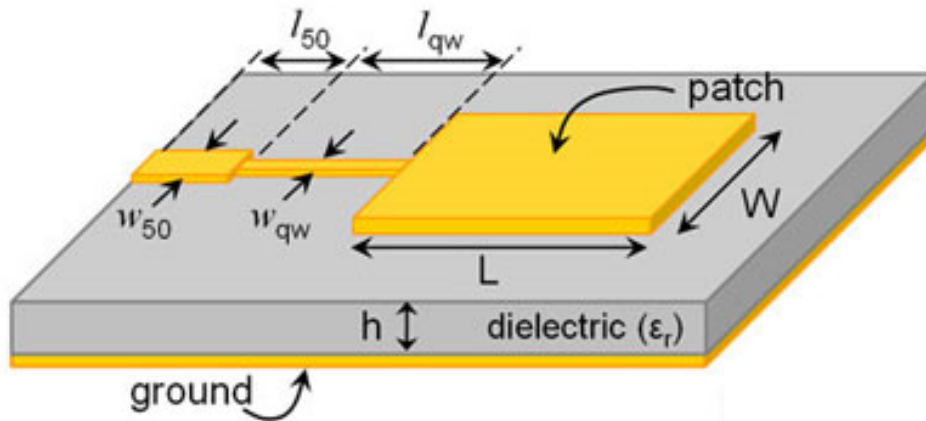


Figura 3: Estructura básica de una antena tipo microstrip rectangular.

El dimensionamiento de una antena tipo microstrip, depende fundamentalmente de la finalidad para la cuál va a hacer utilizada [Saunders and Aragón-Zavala \(2007\)](#). A continuación, se relacionan unos rangos de valores de las dimensiones de sus principales elementos, respecto a una antena de configuración indicada en la Figura 3.

- *Longitud del parche:* $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$
- *Grosor del dieléctrico:* $h \ll \lambda_0$
- *Ancho del parche:* $w \gg h$
- *Permitividad relativa del dieléctrico:* $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$

Donde: λ_0 es la longitud de la onda en el espacio libre

Entre menor sea la permitividad relativa del dieléctrico, se logra aumentar la eficiencia de la antena, ya que en estos casos el dieléctrico presenta menores pérdidas.

Alimentación

Existen diferentes formas de alimentar una antena microstrip, para que funcione de manera eficiente, dependiendo fundamentalmente del área del equipo donde se vaya a implementar. Una de las formas de alimentar una antena tipo microstrip, es la conocida como alimentación por sonda de cable coaxial. En la Figura 4 se muestra este tipo de alimentación.

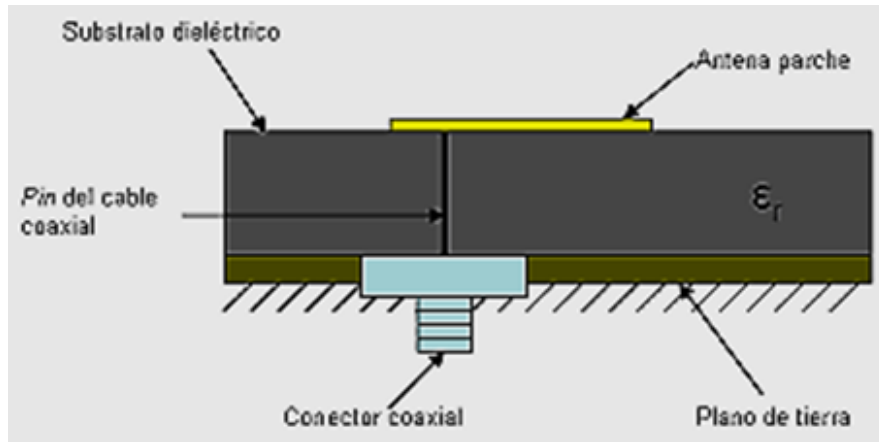


Figura 4: Alimentación por sonda de cable coaxial, de una antena tipo microstrip.

Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena microstrip rectangular, para el caso del que el plano tierra sea infinito, es de forma omnidireccional, pero radiando solamente hacia la parte superior, ya que este plano refleja, idealmente, la totalidad de la potencia radiada. Si embargo como el plano tierra es finito, se presenta ciertos lóbulos posteriores, pero de reducidas intensidades comparadas con las del lóbulo principal.

En la Figura 5 se muestra el lóbulo de radiación ideal de una antena microstrip rectangular, en su representación polar planar.

Diseño

Los pasos que regularmente se emplean para el desarrollo del diseño de una antena microstrip rectangular [Sandeep and Kashyap \(2012\)](#), son los siguientes:

1. Se define la frecuencia de operación en la cual operará la antena: (f_{0p})
2. Se precisa el tipo de substrato (dieléctrico) a ser empleado y el grosor de este:

$$(\epsilon_r \text{ y } h)$$

3. Se calcula el ancho de la cinta parche, a través de la Ecuación 2:

$$w = \frac{1}{2f_{0p}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_{0p}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} (H/m) : \text{permeabilidad del espacio libre (vacío)} \\ \epsilon_0 &= 8,854 \times 10^{-12} (F/m) : \text{permitividad del espacio libre (vacío)} \\ c &= \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8 (m/s) : \text{velocidad de la luz en el espacio libre} \end{aligned}$$

4. Se determina la permitividad eléctrica efectiva, mediante la Ecuación 3 :

$$\epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

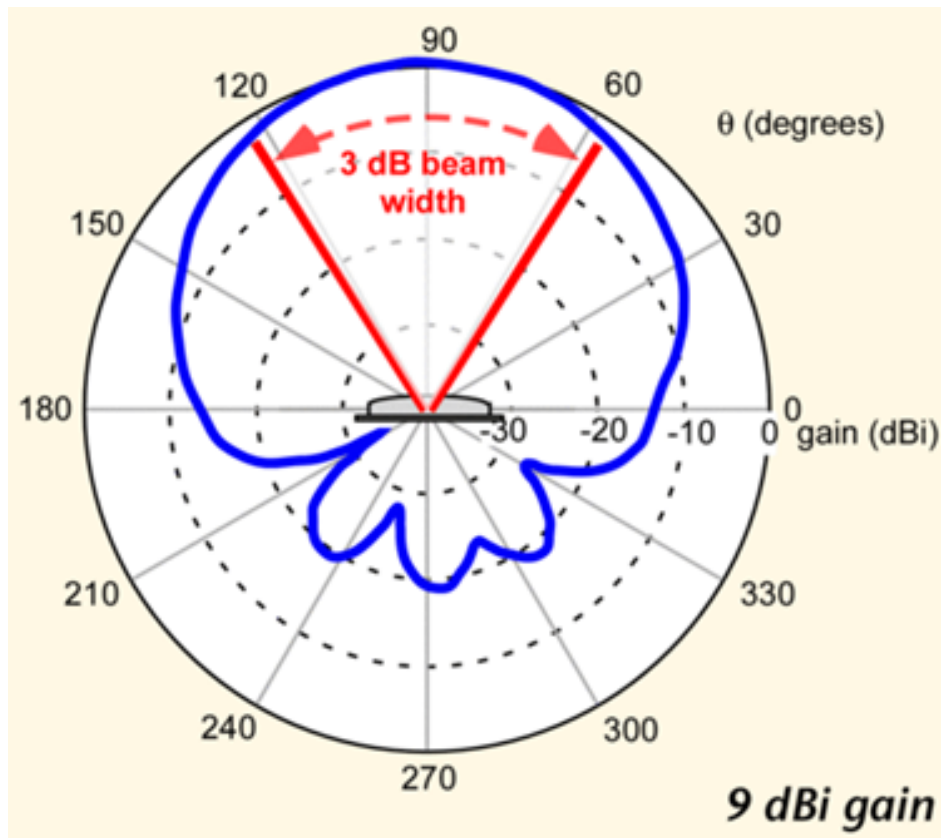


Figura 5: Patrón de radiación de una antena microstrip rectangular en su representación polar planar.

- Se obtiene la extensión de la longitud de la cinta parche (ΔL) (ver Figura 6), mediante la Ecuación 4.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\varepsilon_{ff} + 0,3)[(w/h) + 0,264]}{(\varepsilon_{ff} - 0,258)[(w/h) + 0,8]} \quad (4)$$

- Se obtiene la longitud de la cinta parche, a través de la Ecuación 5.

$$L = \frac{1}{2f_{0p}\sqrt{\varepsilon_{ff}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} - 2\Delta L \quad (5)$$

Ganancia

La ganancia de una antena microstrip, con parche rectangular, oscila entre 2 y 3 dB, dependiendo esencialmente de las características conductivas de la cinta que hace las veces de plano tierra. A mayor sea la característica conductiva de la cinta del plano de tierra, la ganancia de la antena se puede incrementar a unos 3 dB, ya que por esta condición conductiva disminuye la radiación alrededor de la antena, porque la reflexión de la señal radiada se incrementa.

Potencia

Como es el caso para todas las antenas, la potencia radiada por una antena microstrip depende, en buena parte, de la intensidad de señal que se le inyecte. Debido a su estructura reducida, estas antenas no admiten la alimentación de señales intensas, lo que limita el valor de la potencia radiada. La Ecuación 6 contiene la expresión matemática para el cálculo de la



Figura 6: Vista superior de la estructura de la cinta parche de una antena microstrip rectangular.

potencia radiada, por las antenas tipo microstrip con parche rectangular Casu, Moraru, and Kovacs (2014).

$$P_{rad} = \frac{|V_{in}|^2}{240\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin(\frac{K_0 W}{2} \cos(\theta))}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin^3(\theta) d\theta \quad (6)$$

Donde:

V_{in} : voltaje de entrada a la antena

$K_0 = 2\pi/\lambda_0$: constante de fase del espacio libre

θ : ángulo a partir del eje central del patrón de radiación

Impedancia de entrada

Para el cálculo de la impedancia de entrada, en resonancia, de la antena microstrip de parche rectangular, se emplea la expresión indicada en la Ecuación 7. Pozar (2011)

$$R_{in} = \frac{1}{2[G_1 \pm G_{12}]} \quad (7)$$

Donde:

$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2}$: conductancia de la antena

G_{12} : conductancia mutua entre las ranuras de la antena

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin(\frac{K_0 W}{2} \cos(\theta))}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(k_0 L \sin(\theta)) \sin^3(\theta) d\theta$$

J_0 : función de Bessel de primer grado y orden cero

Ejemplo 2

Determinar la frecuencia con la cual debe operar una antena microstrip rectangular, si el ancho del parche es de $w=50$ mm y la permitividad eléctrica relativa del sustrato es de $\epsilon_r = 2,2$

Solución:

A partir de la Ecuación 2, despejamos f_{op} :

$$f_{op} = \frac{c}{2w} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2(50 \times 10^{-3})} \sqrt{\frac{2}{2,2 + 1}} = 2,37 \text{ (GHz)}$$

Además de las de porche rectangular, existe una gran variedad de estructuras de antenas tipo microstrip de un solo elemento entre la que se encuentran las siguientes: cuadrada, pentagonal, triangular, circular, disco con ranura, anillo, semi-disco, anillo elíptico, espiral, entre otras. Así mismo existen antenas microstrip que cuentan con varios elementos como parche.

Cada una de estas variedades de antenas, tienen sus propias características y parámetros estructurales, eléctricas y de operación. Y cuentan con específicas expresiones matemáticas para poder determinar su diseño y funcionamiento.

3.6. Filtros microstrip

En los sistemas y equipos electrónicos los filtros son unos dispositivos esenciales. Los principales filtros son clasificados como: filtros pasa bajo, filtros pasa alto, filtros pasa banda y filtros rechaza banda. El papel fundamental de estos dispositivos es seleccionar las señales dentro de los límites espectrales designados.

La tecnología microstrip es muy empleada para el desarrollo e implementación de estos tipos de filtros para frecuencias de microondas, ya que por su tamaño reducido ocupan poco espacio, permitiendo además ser instalados de forma fijos, lo que hace que no vibren, en el caso de que el equipo donde están operando sea una nave en movimiento, asegurando mayor confiabilidad en su funcionamiento y también demanda costos relativamente bajos en su construcción.

Para lograr que los filtros microstrip sean eficientes en su funcionamiento, se debe emplear substratos cuyas pérdidas sean menores y con una constante dieléctrica homogénea [Kadam and Nandgaonkar \(2015a\)](#).

En la práctica se emplean herramientas computacionales de simulación para el diseño de los filtros tipo microstrip, entre las que se encuentran el programa ADS (Path Wave Advanced Design System) y el programa Visual Studio 2017 de Microsoft. Entre las ventajas que ofrecen estas herramientas, se puede destacar la flexibilidad de seleccionar el tipo y el orden del filtro a diseñar, su tipo de respuesta, la o las frecuencias de corte y la impedancia de carga, así como la constante dieléctrica y el espesor del sustrato a emplear [Peris Cuesta \(2017\)](#).

Cuando se va a diseñar un filtro de microondas, se debe definir la función de transferencia que se ajuste a los requerimientos específicos de funcionamiento del filtro y a continuación sintetizar el circuito correspondiente que cumpla con esta función.

A manera de ilustración en la Figura 7, se hace una representación de una red, conocida como “escalera”, cuya conformación es un conjunto de componentes en serie y paralelo de manera alternada, que se emplea como referencia para el proceso de diseño de los filtros microondas. El circuito indicado en la parte inferior corresponde al dual del indicado en la parte superior [Reyes and González \(2018\)](#).

En la Figura 8 se ilustra la banda de un filtro paso banda de microondas, que se podría lograr mediante redes de estructura “escalera”.

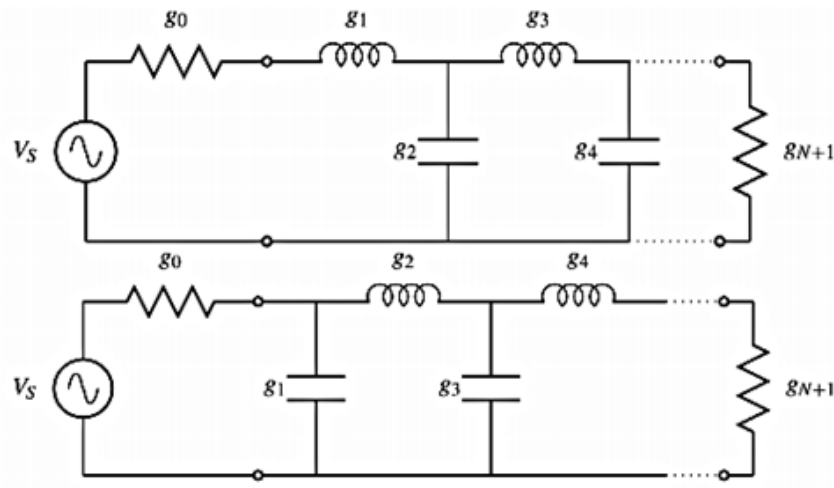


Figura 7: Red en escalera con elementos concentrados.

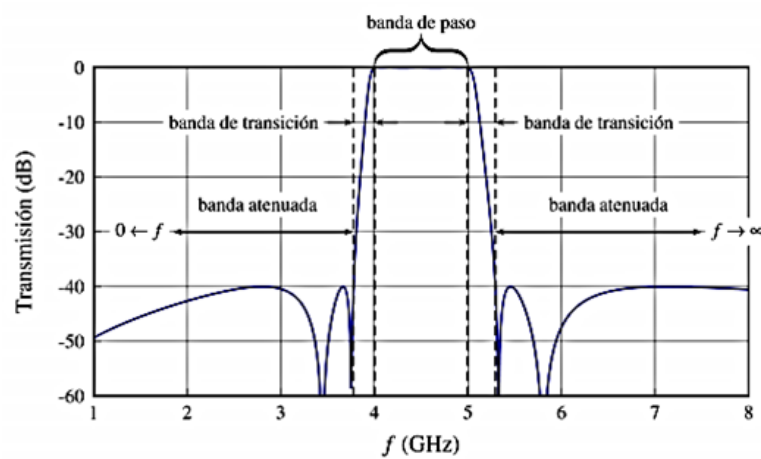


Figura 8: Filtro Paso Banda concentrados.

El algoritmo utilizado para la definición de los componentes y dimensiones de un filtro tipo microstrip [Steer \(2019\)](#), está conformado esencialmente por los siguientes pasos:

1. Definición de las características de funcionamiento del filtro
 2. Cálculo de los coeficientes para una respuesta normalizada
 3. Aplicación de la Transformada de Richard
 4. Aplicación de la Identidad de Kuroda
 5. Cálculo de las dimensiones de las cintas conductoras
- Ejemplo del proceso de diseño de un filtro microstrip pasa bajos, mediante Visual Studio 2017 de Microsoft.

Como ilustración, en la Figura 9 se muestra la ventana de trabajo de la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft, para el diseño de un filtro tipo microstrip pasa bajos.

En la parte izquierda superior se puede observar:

La definición de las características con que se quiere que funcione el filtro: tipo (Butterworth: respuestas planas), respuesta (pasa-bajos), orden (3), frecuencia de corte (1.5 GHz), resistencia del generador (50 ohmios), constante dieléctrica (4.4) y espesor del sustrato (1.544 mm).

En la parte izquierda media se puede observar:

Los resultados del cálculo de los coeficientes para los componentes reactivos: $L1 = 17.76 \mu\text{H}$, $C1 = 1.51 \text{ pF}$, $L2 = 17.16 \mu\text{H}$ y $RL = 50 \text{ ohms}$. (estos valores podrían servir de referencia para contar con la posibilidad de implementar el filtro con componentes discretos).

En la parte izquierda inferior se puede observar:

Los valores de las impedancias, de cada uno de los 7 segmentos (cintas conductoras) que conformaran el circuito del filtro microstrip, así como las respectivas dimensiones de longitud y ancho de cada uno de ellos (mm).

En el lado derecho parte superior se muestra la configuración del circuito del filtro pasa bajo con componentes discretos y en la parte inferior la estructura del filtro con componentes microstrip.

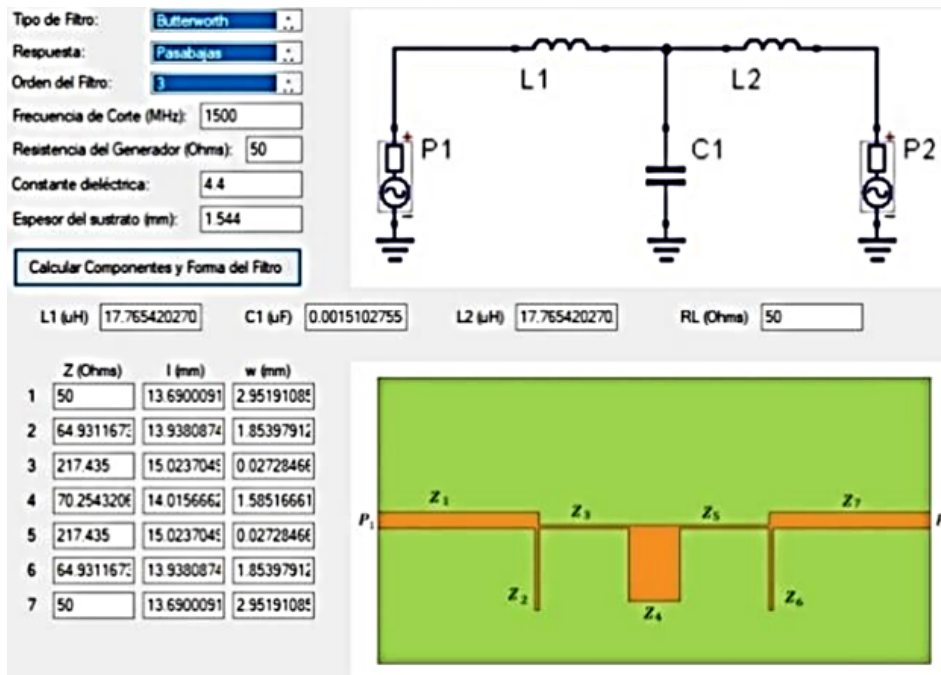


Figura 9: Ventana de trabajo de la herramienta computacional Visual Studio 2018 de Microsoft.

En la Figura 10 se muestra la imagen del filtro microstrip real paso bajos, diseñado mediante la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft.

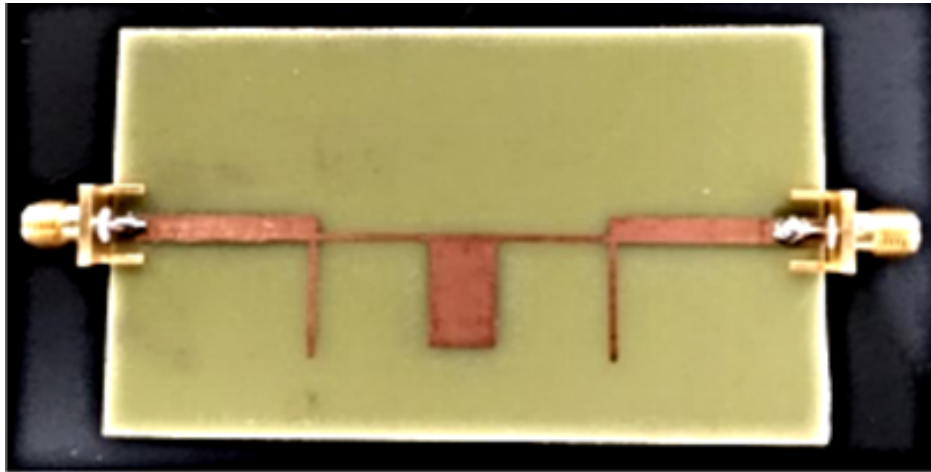


Figura 10: Imagen del filtro microstrip real pasa bajos, diseñado mediante la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft.

En la Figura 11, en la parte superior, se indica la curva característica ideal del filtro en cuestión (resultado del proceso de simulación) y en la parte inferior la correspondiente a la obtenida del filtro en su operación real.

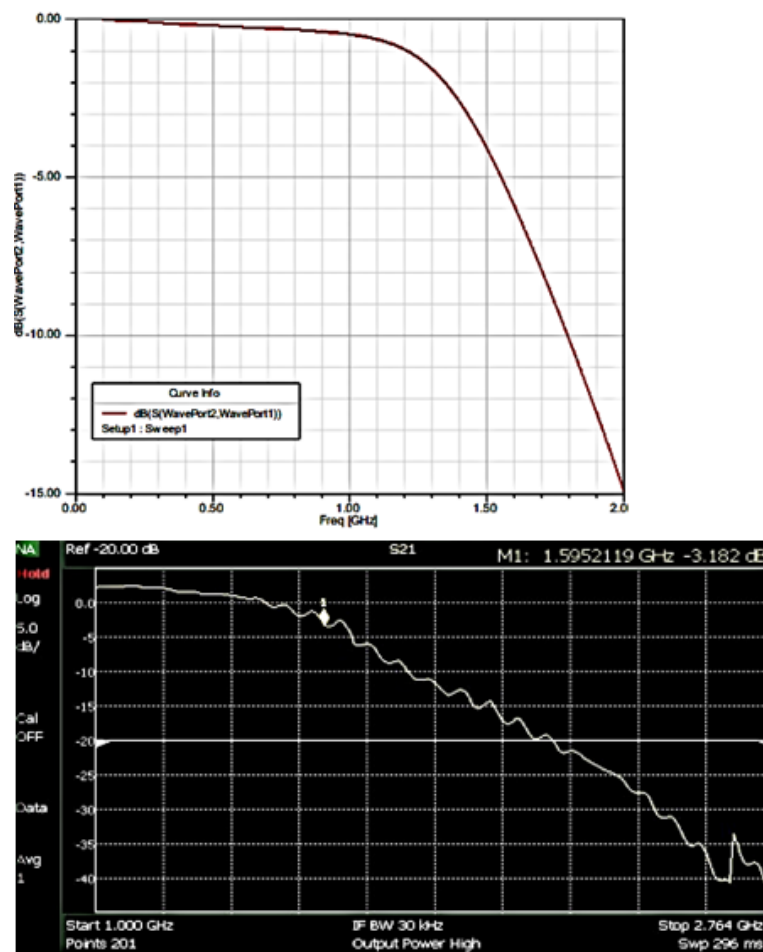


Figura 11: Curva característica del filtro microstrip pasa bajos.

- Ejemplo del proceso de diseño de un filtro pasa banda, en base líneas acopladas microstrip, mediante el programa ADS.

En la Figura 12 se muestra el corte transversal de unas líneas de microstrip simétricamente acopladas, a emplearse para el diseño del filtro pasa banda, de frecuencia central 2 GHz. Peralta Pilla et al. (2018)

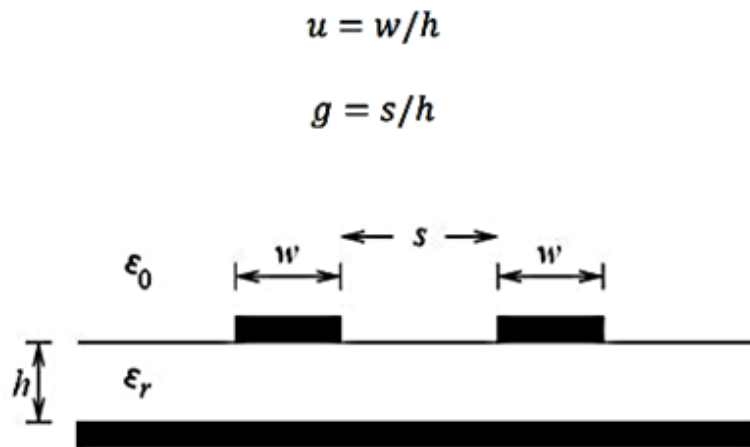


Figura 12: Vista del corte transversal de líneas de microstrip acopladas.

En la herramienta LineCalc de ADS Sheikh, Borah, and Roy (2014); Kadam and Nandgaonkar (2015b); Sattler, Gentili, Teschl, Carceller, and Bösch (2018), se realiza el siguiente proceso:

1. Se identifica la viñeta Type y se elige MCLIN, que corresponde a línea de transmisión acoplada en microstrip
2. Se introduce las características del sustrato a emplear. En la Tabla1 se relacionan las especificaciones técnicas del sustrato seleccionado para el diseño de este filtro

Especificaciones Técnicas	Valor
Constante dieléctrica (ϵ_r)	4.2
Permeabilidad relativa (M_{ur})	1.0
Tangente de pérdidas	0.015
Espesor de la lámina (H)	1.60 mm
Altura superior de la armadura (H_u)	3.9e+34 mil
Espesor del cobre (T)	35 μm

Tabla 1 Especificaciones técnicas del sustrato

3. Se ingresa las impedancias características del modo par e impar previamente definidos, cuyos valores se encuentran en la Tabla 2 y que para este diseño fueron calculados por los autores de la referencia, mediante un programa desarrollado en Matlab.

N	g_n	Admitancia invertida J_n	Impedancia de modo par Z_{0e}	Impedancia del modo impar Z_{0o}
1	3,4817	0,1163	56,4937	44,8598
2	0,7618	0,0289	51,4886	48,5951
3	4,5381	0,0253	51,2993	48,7649
4	0,7618	0,0253	51,2993	48,7649
5	3,4817	0,0289	51,4886	48,5951
6	1	0,1163	56,4937	44,8598

Tabla 2 Parámetros eléctricos de las líneas acopladas

4. Se introducen las dimensiones físicas de las líneas acopladas, para lo cual también utilizó, el autor de la referencia, la herramienta LineCalc de ADS, cuyos valores se indican en la tabla No 3, y en la Figura 13 se muestra la ventana de trabajo de la herramienta computacional, empleada para este cálculo, para diferentes N (ordenes). Así mismo se coloca la frecuencia central con que se desea que opere el filtro: 2 GHz, para este caso.

N	Z_{0e}	Z_{0o}	W (mm)	S (mm)	L (mm)
1	56,4937	44,8598	3,02238	1,82056	21,08881
2	51,4886	48,5951	3,11935	6,04447	21,0206
3	51,2993	48,7649	3,12113	6,81328	21,0265
4	51,2993	48,7649	3,12113	6,81328	21,0205
5	51,4886	48,5951	3,11935	6,04447	21,0206
6	56,4937	44,8598	3,02238	1,82056	21,08881

Tabla 3 Parámetros eléctricos de las líneas acopladas microstrip, calculados en Matlab

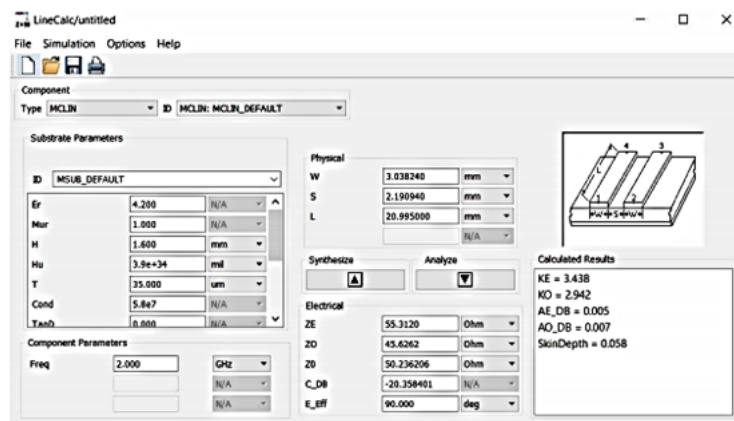


Figura 13: Herramienta LineCalc para el cálculo de las dimensiones físicas de las líneas acopladas en microstrip.

En la Figura14 se muestra la respuesta del filtro pasa banda, con líneas acopladas sin pérdidas, para orden $N = 5$, indicándose la frecuencia central (2 GHz), así como las frecuencias de corte de 1.97 GHz y 2.03 GHz, con un rizado que se encuentra entre 0 dB y -3,0 57 dB.

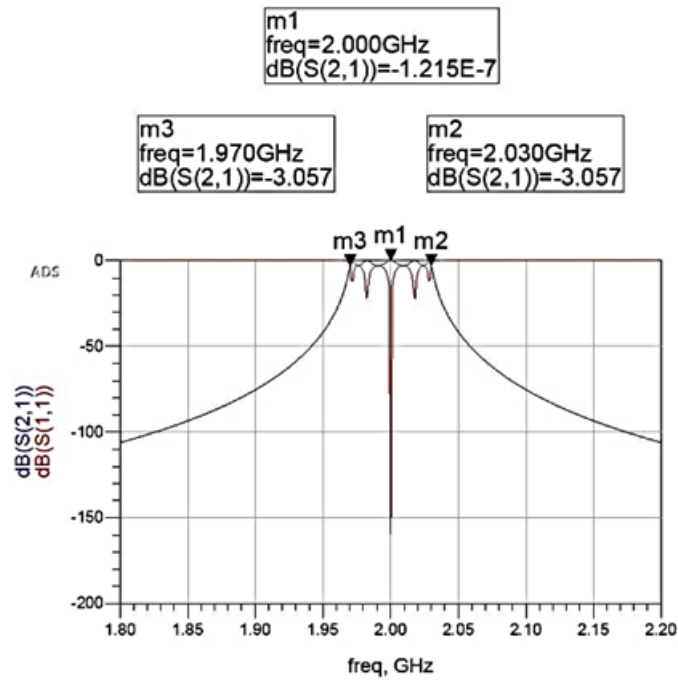


Figura 14: Respuesta de un filtro pasa banda ($N=5$) con líneas acopladas microstrip sin pérdidas.

En la parte superior de la Figura 15 se muestra la estructura física del filtro pasa banda con líneas acopladas microstrip para frecuencia central de 2 GHz y en la parte inferior la medición del filtro mediante un analizador de redes.

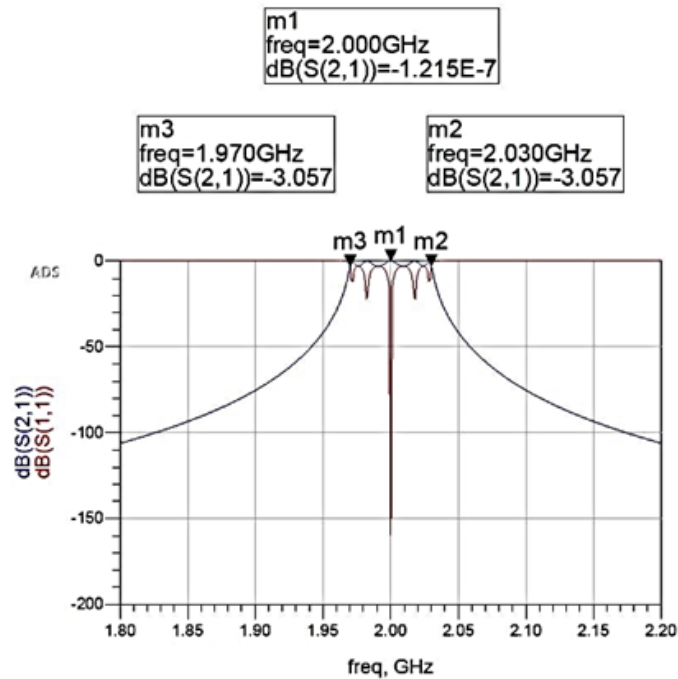


Figura 15: Respuesta de un filtro pasa banda ($N=5$) con líneas acopladas microstrip sin pérdidas.

En la parte superior de la Figura 16 se muestra la estructura física del filtro pasa banda con líneas acopladas microstrip para frecuencia central de 2 GHz y en la parte inferior la medición del filtro mediante un analizador de redes.

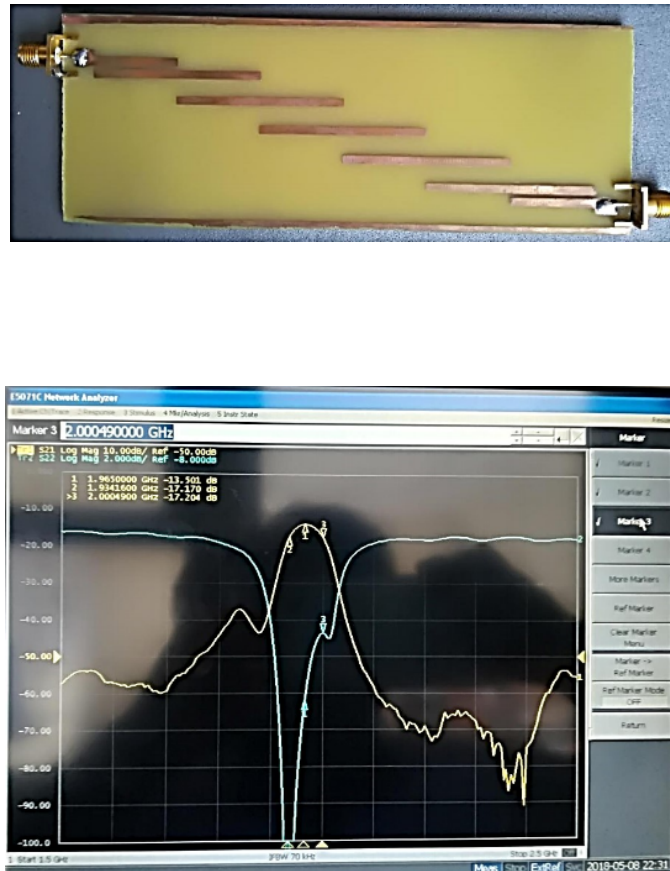


Figura 16: Filtro pasa banda a 2 GHz con líneas acopladas microstrip y su medición mediante analizador de redes.

Como ilustración complementaria en la Figura 17, se enseña una imagen de un filtro microstrip de paso banda para filtrar la señal de 2.3 a 2.,5 GHz, con el cual se puede mejorar la relación señal-ruido. Por ejemplo, antes de la amplificación WIFI, ZIGBEE, Bluetooth y otras señales, primero se coloca este filtro para filtrar las señales del clutter y luego se coloca el amplificador de señal de bajo ruido para la amplificación de la señal. De esta forma es posible mejorar en gran medida la fiabilidad de la transmisión de señal, incrementando la distancia del enlace Vela (1999).



Figura 17: Filtro paso banda microstrip en 2.4 GHz.

4. Resultados

El resultado propio de este trabajo se concreta como el haber logrado poder relacionar y describir las características estructurales y funcionales básicas, de las microstrips, y de algunos de los aplicativos más referenciados de las mismas, dentro de un marco práctico y académico.

Se espera que los resultados correspondientes al propósito de este trabajo, el cual se orienta a que sirva de apoyo a la fundamentación del conocimiento estructural funcional y aplicativo de las microstrips motive el interés de su difusión y aprovechamiento.

5. Conclusiones

- Existe una gran variedad de aplicaciones de las microcintas, cuya difusión y conocimiento podrían ser de interés para el logro de su aprovechamiento.
- La difusión de las características estructurales y funcionales de los aplicativos de las microcintas, podrían reforzar los procesos de la formación profesional afines a esta temática.
- El conocimiento de la existencia posible de diversos aplicativos de las microcintas, pueden contribuir a motivar el interés de la investigación, desarrollo e innovación de estas.

Referencias

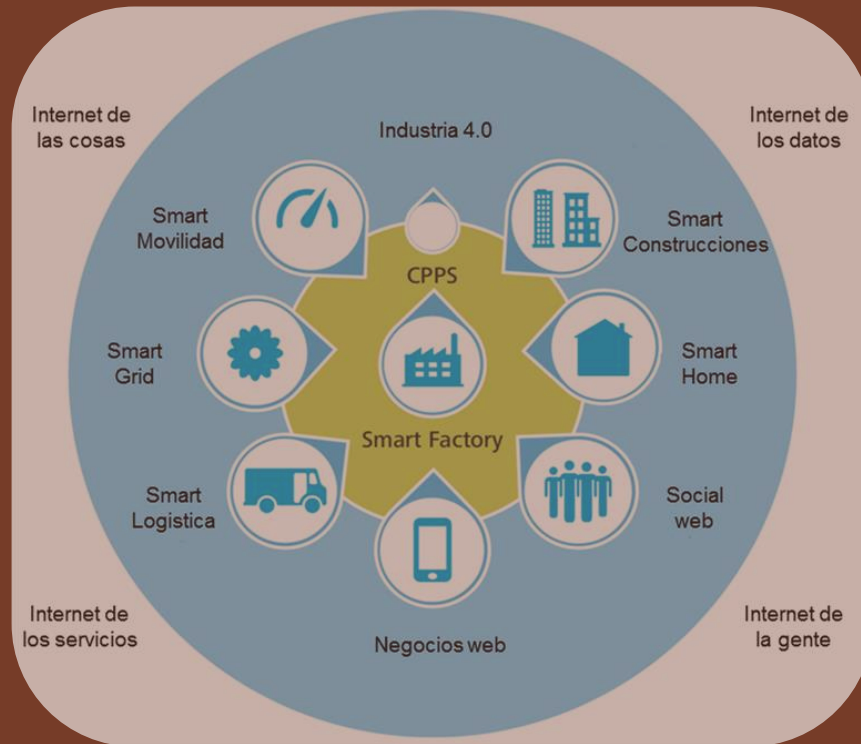
- Balanis CA (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons.
- Casu G, Moraru C, Kovacs A (2014). "Design and implementation of microstrip patch antenna array." In *2014 10th International Conference on Communications (COMM)*, pp. 1–4. IEEE. URL <https://doi.org/10.1109/ICComm.2014.6866738>.
- Catano-Ochoa D, Senior DE, Lopez F, Reyes-Vera E (2016). "Performance analysis of a microstrip patch antenna loaded with an array of metamaterial resonators." In *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 281–282. IEEE. URL <https://doi.org/10.1109/APS.2016.7695849>.
- Kadam RN, Nandgaonkar A (2015a). "Design of a Coupled-Line Microstrip Bandpass Filter at 3.5 GHz." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **2**(06). URL <https://doi.org/10.23919/APMC.2018.8617286>.
- Kadam RN, Nandgaonkar A (2015b). "Design of a Coupled-Line Microstrip Bandpass Filter at 3.5 GHz." *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **2**(06).
- Kennedy G, Davis B (1985). *Electronic communication systems*, volume 20. Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi.
- Ortiz DAC (2019). "Modelo escalable y dependiente de frecuencia para la representación de líneas de transmisión acopladas en tecnología de PCB." *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*. URL <https://207.249.117.40/jspui/handle/1009/1823>.
- Peralta Pillaajo AL, et al. (2018). *Diseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*. B.S. thesis, Quito. URL <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/handle/23000/7381>.

- Peris Cuesta G (2017). *Diseño de filtros paso banda de microondas mediante GAPS y líneas acopladas*. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de València. URL <https://riunet.upv.es/handle/10251/91808>.
- Pozar DM (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & sons.
- Reyes M, González E (2018). “Herramienta Computacional para el Diseño de Filtros de RF de Circuito Impreso Microstrip RF filter design software.” *Herramienta*, **2**(5), 19–26. URL https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Desarrollo_Tecnologico/vol2num5/Revista_del_Desarrollo_Tecnologico_V2_N5.pdf#page=33.
- Sandeep BS, Kashyap SS (2012). “Design and simulation of microstrip patch array antenna for wireless communications at 2.4 GHz.” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **3**(11), 1–5. URL <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=54795e1ecf57d7ef568b4568&assetKey=AS%3A273644075323397%401442253239547>.
- Sattler SW, Gentili F, Teschl R, Carceller C, Bösch W (2018). “Emerging technologies and concepts for 5G applications—A. making additive manufactured ceramic microwave filters ready for 5G.” In *2018 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA)*, pp. 1–6. IEEE. URL <https://doi.org/10.1109/VLSI-TSA.2018.8403809>.
- Saunders SR, Aragón-Zavala A (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons.
- Sheikh TA, Borah J, Roy S (2014). “Bandwidth improvement in BPF using microstrip couple lines.” *ICSSP*, **14**, 105–109. URL <http://pfigshare-u-files.s3.amazonaws.com/3256946/BandwidthImprovementinBPFusingMicrostripCouplelines.pdf>.
- Steer M (2019). *Microwave and RF design*. NC State University.
- Sui J, Wu KL (2017). “A general T-stub circuit for decoupling of two dual-band antennas.” *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, **65**(6), 2111–2121. URL <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2647951>.
- Vela RN (1999). *Líneas de transmisión*. McGraw-Hill.
- Wheeler HA (1965). “Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet.” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **13**(2), 172–185. URL <https://doi.org/10.1109/TMTT.1965.1125962>.
- Zúñiga-Juárez JE, Reynoso-Hernández JA, Maya-Sánchez MdC, Murphy-Arteaga RS (2012). “A new analytical method to calculate the characteristic impedance ZC of uniform transmission lines.” *Computación y Sistemas*, **16**(3), 277–285. URL <http://www.scielo.org.mx/pdf/cys/v16n3/v16n3a3.pdf>.

Filiación institucional:

Jaime Ramírez Artunduaga
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jramireza@libertadores.edu.co

Revista Ciber-Sistemas



La Revista Ciber-Sistemas, es una publicación en formato electrónico que tiene el propósito de contribuir a la difusión de los profesionales de la Ingeniería. Se concibe como medio de presentación de artículos científico-técnicos. La revista publica resultados de investigación, tutoriales, casos de uso y notas de tendencias tecnológicas, en temáticas propias de la ingeniería.

Los Ciber-Sistemas integran sistemas ciber-físicos como mecanismos de control y monitoreo, en donde la algoritmia se estrecha con la computación y el internet (Internet de las Cosas) operando en diferentes escalas espaciales y temporales. Los Ciber-Sistemas presentan un enfoque multidisciplinario, que fusiona la teoría de la cibernética, con la mecatrónica, la ciencia de diseño y sistemas en procesos industriales. El control local, centralizado y distribuido de los procesos es derivado a sistemas embebidos, por sus elementos computacionales y físicos. La revista agradece cualquier aporte que se quiera realizar en estas áreas o en áreas propias de la ingeniería.

