

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES.

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

TRABAJO DE TITULACIÓN

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE PARA
CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN CON TECNOLOGÍA RADAR”**

Autores:

Erika Tatiana Mayorga Mayorga.

Franklin Iván Quinatoa Herrera.

Tutor:

Msc. Edgar Giovanni Cuzco Silva.

Riobamba – Ecuador

2019

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación titulado “**Diseño e implementación de un sistema inteligente para caracterización del hormigón con tecnología radar**”.

Presentado por: Erika Tatiana Mayorga Mayorga, Franklin Iván Quinatoa Herrera y dirigido por: Msc. Edgar Giovanni Cuzco Silva.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia de la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

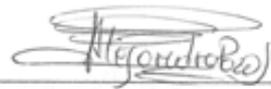
Msc. Giovanni Cuzco

Tutor del Proyecto


Firma

Msc. Alejandra Pozo

Miembro del Tribunal


Firma

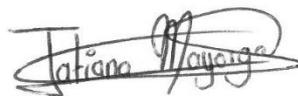
Msc. Ángel paredes

Miembro del Tribunal


Firma

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

“El contenido de este proyecto de titulación está bajo las ideas, experimentación, y resultados que corresponden exclusivamente a: Erika Tatiana Mayorga Mayorga, Franklin Iván Quinatoa Herrera con la tutoría del Msc. Edgar Giovanny Cuzco Silva y el patrimonio intelectual de la Universidad Nacional de Chimborazo”.



Erika Tatiana Mayorga Mayorga

060580777-5



Franklin Iván Quinatoa Herrera

060478588-1

DEDICATORIA.

*“El verdadero fracaso surge cuando dejas de perseverar - **Albert Einstein**”.*

Este trabajo de titulación va dedicado:

A Dios, quien supo guiarme, darme fuerzas para seguir adelante, enseñándome siempre a encarar los problemas sin perder la fe.

A mis padres, Mario O. Mayorga y Martha I. Mayorga, por ser un pilar fundamental en esta etapa de vida, por brindarme su apoyo incondicional, su comprensión ante las dificultades, y su amor absoluto e ilimitado.

A mis hermanos(as), por motivarme a no desfallecer ante las adversidades, y luchar por cumplir mis objetivos, en especial a mi hermano Holger, con quien comparto un vínculo de amor, amistad y complicidad.

A mi hermano Marcelo, que a pesar de su ausencia siempre vivirá en mi corazón, aunque no pudo compartir este logro conmigo su cariño y amor está presente todos los días.

A mi pareja Henry, por su apoyo en momentos difíciles, por ser mi compañero y ser parte importante de mi vida.

Tatiana Mayorga.

DEDICATORIA.

*“Todos los finales son también comienzos. Simplemente no lo sabemos en el momento” (Las cinco personas que conocerás en el cielo, **Mitch Albom**).*

El presente trabajo de titulación está dedicado:

A Dios, por darme la oportunidad e inspiración para continuar y alcanzar uno de los anhelos más deseados.

A mis padres José Quinatoa y Herlinda Herrera, por su amor, confianza, trabajo y sacrificio durante estos años, gracias a ustedes he conseguido llegar hasta aquí y convertirme en la persona que soy. Ha sido un orgullo y un privilegio ser su hijo.

A mis hermanos (as), especialmente a mi hermano Marco Herrera, por estar siempre presente y por el apoyo moral que me ha brindado a lo largo de mi vida.

Y finalmente todos quienes nos han apoyado y compartido sus conocimientos para que este trabajo se realice con éxito.

Franklin Iván Quinatoa Herrera

AGRADECIMIENTO.

Queremos agradecer a Dios por guiarnos y darnos fortaleza en todo el camino recorrido.

A nuestros padres y familiares por apoyarnos de manera incondicional en todo el trayecto de nuestras vidas, con su sabiduría y afecto.

A nuestro tutor Mgs. Giovanni Cuzco e Ing. Aníbal Llanga, por su valiosa guía y asesoramiento en la realización de este proyecto de tesis.

A la Universidad Nacional de Chimborazo por habernos brindado la oportunidad de formarnos profesionalmente, especialmente a nuestros docentes, por el conocimiento que nos han transmitido durante nuestra formación profesional.

A nuestros amigos por su apoyo incondicional, y por su valiosa amistad.

Tatiana y Franklin.

Índice General	
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
Índice General.....	VII
Índice de Ilustraciones.....	XIII
Índice de Tablas.....	XV
Índice de Ecuaciones.....	XVI
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
CAPITULO I.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPITULO II.....	5
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	5
2.2 RADAR.....	7
2.2.1 DEFINICIÓN DEL RADAR.....	7
2.2.2 ORIGENES DEL RADAR.....	7
2.2.3 FUNCIONAMIENTO DEL RADAR.....	8
2.2.3.1 Radar biestático.....	9
2.2.3.2 Radar de onda continua.....	9
2.2.4 FRECUENCIAS DE RADAR.....	9
2.2.5 RADAR FM-CW.....	10
2.2.6 RADAR DE TIPO IMPULSO.....	11
2.2.6.1 Forma y espesor de los pulsos GPR.....	11

2.2.7	RESOLUCIÓN Y ZONA DE INFLUENCIA.....	13
2.2.7.1	Resolución lateral	13
2.2.7.2	Resolución longitudinal.....	13
2.3	PRINCIPALES PROPIEDADES DEL HORMIGÓN.....	14
2.3.1	ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN.....	14
2.3.2	PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN	14
2.3.2.1	Densidad	14
2.3.2.2	Compacidad	14
2.3.2.3	Permeabilidad	14
2.3.2.4	Resistencia	15
2.3.2.5	Dureza.....	15
2.3.2.6	Retracción.....	15
2.3.2.7	Protección y curado del hormigón.....	15
2.4	PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE UN MEDIO.....	15
2.4.1	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y ATENUACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	17
2.4.2	PROPIEDADES DIELECTRICAS	18
2.4.2.1	Relación entre la variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón y sus propiedades físicas	18
2.4.2.1.1	Variación de la permitividad dieléctrica relativa en el hormigón	19
2.4.2.1.2	Variación de la conductividad eléctrica en el hormigón	20
2.5	APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	21
2.5.1	FUNCIONAMIENTO DEL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO.....	21
2.5.1.1	Aprendizaje sin supervisión.....	21
2.5.1.1.1	Agrupamiento	21
2.5.1.2	Aprendizaje supervisado.....	21
2.5.1.2.1	Algoritmos comunes de clasificación.....	22
2.5.1.2.1.1	Clasificación binaria vs. multiclase	22

2.5.1.2.1.2	Regresión logística.....	22
2.5.1.2.1.3	k Vecinos más cercanos (kNN).....	22
2.5.1.2.1.4	Máquina de vectores de soporte (SVM)	22
2.5.1.2.1.5	Red neuronal	22
2.5.1.2.1.6	Naïve Bayes	22
2.5.1.2.1.7	Análisis discriminante.....	23
2.5.1.2.1.8	Árbol de decisión	23
2.5.1.2.1.9	Árboles de decisión embolsados y potenciados.....	23
2.5.1.2.2	Algoritmos comunes de regresión	23
2.5.1.2.2.1	Modelo de Regresión del Proceso Gaussiano.....	23
2.5.1.2.2.2	Regresión SVM.....	23
2.5.1.2.2.3	Modelo lineal generalizado.....	23
2.5.1.2.2.4	Árbol de regresión.....	24
2.6	ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS	24
2.6.1	Tecnología Field Programmable Gate Array (FPGA).....	24
2.6.2	Radio Definido por Software (SDR).....	25
2.6.3	MatLab.....	26
2.6.4	ANSYS HFSS	26
CAPÍTULO III.....		27
3	METODOLOGÍA	27
3.1	HIPÓTESIS	27
3.2	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	27
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	28
3.4	TIPO DE INVESTIGACIÓN	30
3.4.1	Investigación bibliográfica.....	30
3.4.2	Investigación de campo	30
3.5	MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	30

3.5.1	Método investigativo experimental	30
3.5.2	Técnicas de recolección de datos.	31
3.5.3	Instrumentos	31
3.6	POBLACIÓN Y MUESTRA	31
3.6.1	Población.....	31
3.6.2	Muestra.....	31
3.7	PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS	31
3.7.1	Diseño y construcción de una antena UWB para transmisión y recepción....	34
3.7.1.1	Elección del sustrato	34
3.7.1.2	Cálculos para el diseño	34
3.7.2	Adquisición de datos	36
3.7.2.1	Configuración de los componentes tecnológicos	36
3.7.2.1.1	Arranque del Radio Definido por Software con el transceptor RF.....	36
3.7.2.1.2	Comunicación Ethernet/IP	38
3.7.2.1.3	Conexión de dispositivos Linux Industrial.	41
3.7.2.1.4	Instalación y configuración de herramientas en MATLAB R2018B ..	42
3.7.2.1.5	Comunicación entre dispositivos Linux industrial y transceptor AD9364	44
3.7.2.2	Transmisión y recepción de paquetes de información.....	46
3.7.2.2.1	Cálculo de la distancia mínima de no interferencia	46
3.7.2.2.2	Zona de incidencia de radiación	46
3.7.2.3	Tratamiento e interpretación de paquetes de información.....	47
3.7.2.3.1	Análisis del cero de la antena.....	48
3.7.2.3.2	Presupuesto del enlace inalámbrico	49
3.7.2.3.3	Amplificación de la señal recibida.....	49
3.7.2.3.4	Filtrado y suavizado de la señal recibida para su procesamiento	50
3.7.2.3.5	Registro de amplitudes.....	51

3.7.3	Método para la obtención de los parámetros electromagnéticos.....	51
3.7.4	Diseño de la interfaz de usuario de control del sistema.	53
3.7.5	Algoritmo de aprendizaje automático para procesamiento y clasificación de datos obtenidos de probetas de hormigón.	56
3.7.5.1	Algoritmo clasificador.....	57
3.7.5.2	Preparación de variables para el entrenamiento del algoritmo.....	59
CAPÍTULO IV.....		61
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1	Resultados obtenidos en la adquisición de datos.....	61
4.2	Resultados de la obtención de los parámetros electromagnéticos.....	67
4.3	Resultados del sistema de aprendizaje automático.....	68
4.4	Resultados con probetas de características desconocidas.....	75
CAPITULO V.....		77
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	77
5.1	Conclusiones.....	77
5.2	Recomendaciones.	78
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	79
7.	ANEXOS.....	84
	Anexo 1. Documento técnico de las propiedades del dieléctrico.....	84
	Anexo 2. Código de configuración del AD9364.....	84
	Anexo 3. Características eléctricas del cable coaxial RG-58.....	85
	Anexo 4. Pérdidas en del material según la frecuencia.....	86
	Anexo 5. Variación de velocidades (cm/ns) en las distintas probetas de hormigón.	87
	Anexo 6.Tabla de las características electromagnéticas de las muestras de hormigón y sus funciones estadísticas.	89
	Anexo 7. Medición de la resistencia de las probetas de hormigón mediante la máquina de ensayo.....	91

Anexo 8. Muestras de probetas de hormigón de diferentes valores a la resistencia a la compresión.	92
Anexo 9. Envío y recepción de la onda electromagnética sobre el hormigón para su caracterización.....	92
Anexo 10. Documento técnico del transceptor AD9364.....	93
Anexo 11. Certificado emitido por el laboratorio de ingeniería civil de pruebas de ensayo de las probetas de hormigón.....	95

Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1. Principio de funcionamiento de un radar	9
Ilustración 2. Gráficas de la expresión normalizada a 2Kfc y representado frente a la dimensión variable adimensional t/c. Panel a: $\Theta=0$. Panel b: $\Theta=\pi/4$. Panel c: $\Theta= \pi/2$. Panel d: $\Theta=3 \pi/4$	12
Ilustración 3. Diagrama de bloque de ZedBoard.....	25
Ilustración 4. Transceptor de radio frecuencia	26
Ilustración 5. Esquema general del sistema inteligente para caracterización del hormigón ..	33
Ilustración 6. Parámetros de diseño de la antena vivaldi antipodal.....	35
Ilustración 7. Esquema general para arranque del sistema.....	36
Ilustración 8. Instalación/cableado.	37
Ilustración 9. Archivo “interfaces” configurado con una IP estática	39
Ilustración 10. Asignación de IP estática al protocolo IPV4.....	40
Ilustración 11. Comunicación entre Matlab y transceptor AD3964.....	44
Ilustración 12: Esquema de una traza donde se indican los tiempos como cero de la antena: (a) primera ruptura de tendencia; (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo. 48	
Ilustración 13. Señal recibida, antes de ser procesada.	50
Ilustración 14. Señal filtrada y suavizada.....	51
Ilustración 15. Pantalla principal de la interfaz de usuario.	54
Ilustración 16. Interfaz de usuario.	54
Ilustración 17. Interfaz configuraciones avanzadas	56
Ilustración 18. Ventana principal del Clasification Learner.....	57
Ilustración 19. Modelos de clasificación entrenados.....	58
Ilustración 20. Matriz de confusión.....	59
Ilustración 21: Onda directa y Onda reflejada.....	61
Ilustración 22.- Puntos característicos de la onda directa y la onda reflejada.....	62
Ilustración 23: a) Coeficiente de correlación de la combinación R2-D1, b) Coeficiente de correlación de la combinación D1-R1.	65
Ilustración 24. a) Coeficiente de correlación de la combinación D4-R4, b) Coeficiente de correlación de la combinación D3-R4	66
Ilustración 25: Comportamiento de la velocidad de propagación vs. Resistencia a la compresión ordenada ascendentemente.....	67

Ilustración 26. Variación de la permitividad relativa según las muestras de hormigón.....	68
Ilustración 27. Distribución de datos estadísticos de niveles de energía y permitividad relativa para el algoritmo Weighted KNN.	71
Ilustración 28. Coordenadas paralelas de la distribución de datos para el algoritmo Weighted KNN.....	72
Ilustración 29. Características de funcionamiento del receptor para los datos de la categoría D, para el algoritmo Weighted KNN.	73
Ilustración 30. Matriz de confusión para el algoritmo Weighted KNN.	74
Ilustración 31. Matriz de confusión con porcentajes de predicciones acertadas vs. erradas..	75
Ilustración 32. Resultado con probetas de características desconocidas.....	76
Ilustración 33. Obtención del valor de la resistencia a compresión por medio de la máquina de ensayos.	91
Ilustración 34. Probetas de hormigón de diferentes resistencias a compresión.	92
Ilustración 35. Prototipo para la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón.	92

Índice de Tablas.

Tabla 1. Rango de frecuencias asignados a radar	10
Tabla 2. Influencia de la relación A/C y el tiempo de curado en la resistividad (Ωm) de pastas de cemento Portland (Neville, 1997).	20
Tabla 3: Operacionalización de variables	29
Tabla 4: Características del dieléctrico FR4.	34
Tabla 5: Variables geométricas determinadas en el diseño de una línea microstrip.	35
Tabla 6. Credenciales de acceso al sistema.....	37
Tabla 7.- Presupuesto de potencia.....	49
Tabla 8: Resultados de la ecuación de correlación ajustada para cada uno de los intervalos de tiempo.	64
Tabla 9: Algoritmos clasificadores con porcentajes de fiabilidad más significativos.....	69
Tabla 10. Predicción del algoritmo de aprendizaje automático vs. valores de resistencia proporcionados por la máquina de ensayos de hormigón.....	75

Índice de Ecuaciones.

Ecuación 1. Pulso GPR	11
Ecuación 2. Longitud de resolución lateral.....	13
Ecuación 3. Resolución longitudinal	13
Ecuación 4. Conductividad eléctrica.....	16
Ecuación 5. Permitividad dieléctrica absoluta	16
Ecuación 6. Permitividad dielectrica del material	16
Ecuación 7. Velocidad de propagación.....	17
Ecuación 8. Velocidad de propagación a partir de parámetros de la onda electromagnética. 17	
Ecuación 9. Velocidad de propagación en términos de permitividad relativa.....	18
Ecuación 10. Nivel de energía	18
Ecuación 11. Distancia mínima de no interferencia	46
Ecuación 12. Radio de la primera zona de Fresnel	47
Ecuación 13. Longitud de onda.....	47
Ecuación 14. Huella de la antena.	47
Ecuación 15. Velocidad de propagación en términos de tiempos de llegada.	52
Ecuación 16. Permitividad dieléctrica relativa efectiva.....	53

RESUMEN

En la actualidad el estudio de la durabilidad del hormigón es un tema de gran importancia, ya que una gran cantidad de estructuras construidas durante el siglo XX muestran signos de deterioro prematuro, las técnicas para la obtención de la resistencia a compresión del hormigón más utilizadas representan costes elevados y máquinas relativamente grandes, limitando su movilidad, razón por la cual este estudio trata de la técnica no destructiva de ondas electromagnéticas.

La técnica se basa, en la propagación de impulsos electromagnéticos, una antena situada sobre la superficie del hormigón transmite una onda que se propaga hacia su interior, siendo reflejada en las interfaces donde existe un contraste dieléctrico. La respuesta del material, constituida por todas las ondas reflejadas en las mediciones, es analizada mediante el estudio de la variación de la velocidad, entre intervalo de pares de máximos de las ondas electromagnéticas. El entrenamiento del algoritmo KNN vecinos más próximos, presentó una confiabilidad del 92.3%, teniendo la capacidad de estimar valores de la probabilidad a posteriori de que una probeta pertenezca al rango de resistencias.

Finalmente, la validación se realizó con la ayuda de una máquina de ensayos, donde se comparó la resistencia de las probetas de hormigón con las predicciones obtenidas mediante el sistema desarrollado, en 4 de 5 probetas se tuvo un resultado favorable. Demostrando de esta manera, la posibilidad de valorar la resistencia del hormigón combinando la tecnología radar y el uso de algoritmos de aprendizaje automático.

Palabras Clave: Algoritmo KNN, aprendizaje automático, resistencia a la compresión, tecnología radar.

ABSTRACT

ABSTRACT

Nowadays, the study of the durability of concrete is a subject of great importance, since a large number of structures built during the twentieth century have shown signs of premature deterioration. The techniques for obtaining the compressive strength of concrete most used represent high costs and relatively large machines, limiting their mobility. For this reason, this study deals with the non-destructive technique of electromagnetic waves.

The technique is based on the propagation of electromagnetic impulses. An antenna located on the surface of the concrete transmits a wave that propagates towards its interior; which reflects in the interfaces where there is a dielectric contrast. The response of the material, made up of all the waves reflected in the measurements, is analyzed by studying the variation in velocity between the interval of maximum pairs of electromagnetic waves. The training of the nearest neighbor KNN algorithm, presented reliability of 92.3%, having the ability to estimate values of the posterior probability that a test tube belongs to the range of resistances.

Finally, the validation was carried out with the help of a testing machine, where the resistance of the concrete specimens was compared with the predictions obtained through the developed system, in 4 out of 5 specimens had a favorable result, demonstrating in this way, the possibility of assessing the resistance of concrete by combining radar technology and the use of automatic learning algorithms.

Keywords: KNN algorithm, automatic learning, resistance to comprehension, radar technology



Reviewed by: Solís, Lorena

LANGUAGE CENTER TEACHER

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Durante la segunda guerra mundial se desarrollaron los primeros equipos de radar, para la detección de aviones y barcos, consecuentemente se lo empleó en la localización de objetos en el subsuelo, llamándolo ground penetrating radar. La década de los cincuenta marcaron un hito en el desarrollo de la tecnología del georradar, ya que comenzó a ser empelado en otras áreas como la minería, la ingeniería, y la geología.

Actualmente en el área de la ingeniería civil, esta técnica se ha utilizado como herramienta no destructiva para estudios como el análisis del estado de pavimentos, puentes, túneles, edificios, detección y localización de instalaciones, así como en la caracterización de materiales de construcción (Matrinez Sala, Mene Aparicio, & Rodriguez Abad, 2017).

En la caracterización de materiales de construcción, se emplea el georradar el cual se basa en la propagación y detección de las ondas electromagnéticas, siendo capaz de registrar las variaciones de las propiedades electromagnéticas de los materiales, que están estrechamente relacionadas con las propiedades físicas como la densidad, contenido de humedad entre otras. Es por ello que su aplicación en el estudio del hormigón, material en el que se enfoca este trabajo, está dando resultados satisfactorios, con investigaciones como la estimación del contenido de agua libre en el hormigón por medio del estudio de distintos parámetros de la onda electromagnética (Laurens, 2005), caracterizar el sistema poroso del hormigón endurecido (Lai & F Tsang, 2008), determinar el contenido volumétrico de agua en el hormigón y la estimación del grado de penetración del agua (Abad, 2009), se analiza la relación entre los parámetros de onda registrados por el georradar, con la constante dieléctrica y contenido de agua, entre otros indicadores relacionados con la durabilidad (Villain, Derobert, Mehdi Sbartai, & Balayssac, 2010).

Los cambios en las propiedades electromagnéticas del hormigón se relacionan con los cambios en las propiedades físicas del mismo, por ello éste trabajo de investigación se orienta al estudio de la técnica no destructiva del georradar para evaluar los efectos que producen las variaciones de ciertas propiedades físicas en las señales. Una antena ubicada sobre la superficie del hormigón transmite una onda electromagnética, que se propaga hacia el interior del mismo, siendo reflejada en las interfaces donde exista una constante dieléctrica, la respuesta constituida por la onda reflejada es registrada, procesada y analizada, el análisis de datos se lo realiza mediante el estudio de los parámetros de onda como son la velocidad de propagación, y puntos característicos de las señales.

Este documento obedece a la siguiente estructura: En el capítulo I, se aborda el planteamiento del problema, además de la justificación y los objetivos de la investigación. El capítulo II, conlleva lo que es marco teórico relacionado a la temática; la metodología es abordada en el capítulo III en la cual contempla el procedimiento a realizar para la toma de datos, en el capítulo IV se visualiza los resultados obtenidos durante la aplicación del algoritmo de aprendizaje supervisado.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años el estudio de durabilidad del hormigón ha tenido un crecimiento exponencial, ya que una gran cantidad de estructuras construidas durante el siglo XX presentan signos de deterioro prematuro (Neville, 2001).

La durabilidad de las estructuras del hormigón se define como la habilidad de las estructuras para mantenerse en servicio sin presentar un deterioro relevante, se lo ha estudiado relacionándolo con la resistencia a la compresión y con las buenas prácticas que generan fraguados y acabados correctos (Castilla, 2015).

Las técnicas para la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón más utilizadas se lo realizan con el uso de una máquina de ensayo hidráulica y del esclerómetro. La máquina de ensayo emplea una técnica destructiva, ya que aplica una carga axial en compresión a los moldes cilíndricos produciendo una falla en la probeta. El esclerómetro emplea una técnica de ensayo no destructiva, que consiste en el impacto de una pesa tensada contra el hormigón y la medida de su rebote, haciéndolo poco fiable.

Una técnica que garantice una medida precisa de la resistencia a la compresión del hormigón representa costes elevados y máquinas relativamente grandes, con limitada libertad para trasladarse de un lugar a otro.

Este proyecto de investigación proporciona una alternativa a los elevados costes y destructivos ensayos, con la tecnología radar como técnica no destructiva, debido a que las respuestas electromagnéticas no ocasionan ningún tipo de daño a la probeta y las propiedades dieléctricas varían dependiendo de las propiedades físicas del hormigón, siendo esta característica la más importante a la hora de estimar la resistencia a la compresión de los moldes de hormigón.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar e implementar un sistema inteligente, basado en algoritmos de aprendizaje supervisados para caracterización del hormigón, empleando la técnica no destructiva de ondas electromagnéticas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la técnica para caracterizar las propiedades físicas del hormigón que afectan a la valoración de su resistencia a la compresión.
- Establecer un patrón de comportamiento electromagnético del hormigón frente a la radiación electromagnética, para una frecuencia de emisión determinada.
- Desarrollar y entrenar un algoritmo de aprendizaje supervisado, que sea capaz de estimar la resistencia a la compresión del hormigón.
- Evaluar los resultados obtenidos del prototipo, realizando una comparativa entre valores obtenidos por el prototipo y valores obtenidos por métodos tradicionales.

CAPITULO II

2.1 ESTADO DEL ARTE

La técnica del georradar como técnica de inspección ha sido aplicada exitosamente durante décadas en campos como la ingeniería civil, arqueología y en los últimos años se la viene usando en el campo de la edificación, obteniendo buenos resultados, gracias a ser una técnica no destructiva, además de ser un sistema aplicable” in situ”.

El carácter no destructivo de esta técnica lo hace óptimo para el estudio y caracterización de materiales de construcción, así como para el diagnóstico y estudio de las manifestaciones patológicas de los mismos, investigaciones como (Bungey, 2003), (Rodriguez Abad, Klysz, Martinez Sala, Balayssac, & Mene Aparicio, 2016), (Rodriguez Abad, Garcia Garcia, & Perez Garcia, sciencedirect, 2008) abordan dicha problemática.

Los trabajos que analizan el potencial que tiene la técnica del georradar en el estudio del hormigón, por sus resultados obtenidos se destacan: estudio en estructuras de hormigón armado mediante el uso de un radar de penetración terrestre (Lovera, 2006), este estudio busca detectar la armadura de acero del hormigón armado, así como tuberías de PVC u otros elementos, evaluando el estado en el que se encuentran.

Efecto de la penetración de agua bajo presión en concreto endurecido sobre señales GPR, (Martinez Sala, Rodriguez Abad, & Val Muedra, 2013) analiza el efecto sobre las señales de radar de penetración en la inserción de agua bajo presión, en probetas de hormigón endurecido en diferente relación agua cemento, se lo realizó midiendo las velocidades (permitividad real) y las amplitudes de la onda (nivel de energía), dando por resultado que los valores de la permitividad real obtenidos con la antena de 1.6Ghz no permitieron distinguir el área de las muestras afectadas por la inyección.

Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón de los autores (Matrinez Sala, Mene Aparicio, & Rodriguez Abad, 2017), para la evaluación se realiza el análisis de los parámetros de onda electromagnética, que son registrados por un equipo de georradar, utilizando una antena de 2GHz, en probetas de hormigón endurecido de diferentes contenidos de humedad, demostrando que la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el hormigón es menor a medida que el contenido de agua en la probetas aumenta, mientras que la amplitud de las ondas disminuye.

El aprendizaje automático consiste en desarrollar algoritmos para aprender de la experiencia, dado un conjunto de datos de entrenamiento, se trata de seleccionar la hipótesis más probable que genera dichos datos. Los métodos de aprendizaje automático son útiles en casos donde las soluciones algorítmicas no están disponibles o el conocimiento sobre el dominio de la aplicación se defina pobremente (López, 2006).

Además se debe considerar las técnicas para el aprendizaje automático a emplearse, artículos como modelo de clasificación dinámico de arritmias cardiacas mediante aprendizaje de máquina con interfaz de usuario (López, 2006), desarrolla un modelo de clasificación de arritmias cardiacas, basado en duración de las ondas de registros electrocardiográficos, utilizando técnicas de clasificación supervisada, obteniendo excelentes resultados al implementar clasificadores desarrollados en técnicas de aprendizaje de máquina.

Clasificación de las señales de electrocardiograma (ECG) utilizando técnicas de aprendizaje automático: la encuesta (Jambukia, Dabhi, & Prajapi, 2015), presenta técnicas de preprocesamiento, bases de datos de ECG, técnicas de extracción de características, clasificadores basados en ANN (redes neuronales artificiales).

2.2 RADAR

2.2.1 DEFINICIÓN DEL RADAR

La tecnología radar es un sistema electrónico de comunicación constituido por un transmisor, un canal o medio y un receptor. Son utilizados para la detección de objetos que interfieren con una onda electromagnética emitida por el transmisor a través de un medio no guiado, y que generan una onda reflejada con parte de la energía de la onda original, la cual es detectada por el receptor donde se procesa la señal para estimar su posición. En el mundo moderno el uso de radares se ha convertido en una práctica frecuente.

2.2.2 ORIGENES DEL RADAR

El año de 1864, marcó un antes y un después en la física, en este año James Maxwell desarrolló las ecuaciones que hoy son base de la física moderna, de la misma manera para el año de 1886 Heinrich Hertz contribuyó experimentalmente lo propuesto por Maxwell, dando como resultado que la propagación de ondas de radio viajan a la velocidad de la luz.

Hertz siguió su línea de investigación, contribuyendo avances como un dispositivo capaz de medir la velocidad de las ondas de radio, la demostración de que las ondas electromagnéticas pueden ser reflejadas o rebotar en ciertos materiales.

Los descubrimientos ejecutados por Hertz sirvieron de referencia para el alemán Cristian Hülmesyer, quien en 1900 continuó con las investigaciones acerca de la reflexión de las ondas de radio e inventa el “Telemobinoscopio”, un aparato diseñado para medir el tiempo de ida y regreso de las ondas electromagnéticas al chocar en un objeto. Años más tarde los ingenieros (Albert Taylor y Leo Young) mejoran el invento de Hülmesyer llegando a alcanzar mayores distancias.

La segunda guerra mundial, provocó un avance acelerado en investigaciones del radar, por la necesidad de la detección de objetos a grandes distancias. Durante la preguerra,

Inglaterra da surgimiento a un sistema radar para la vigilancia aérea denominado “Chain Home”, el cual permaneció hasta el final de la guerra.

Durante la década de los años 40 Gran Bretaña y EEUU comienzan a intercambiar información acerca del desarrollo del radar, que hasta la actualidad trabaja en rangos de HF y VHF, el aporte británico acerca del tubo de potencia de magnetrón de microondas y la creación del laboratorio de radiación de microondas en Estados Unidos crearon las bases para desarrollo del radar en las frecuencias de microondas que han predominado desde entonces.

En la actualidad los sistemas radar se han visto beneficiados de la tecnología pudiendo ser usados en una amplia gama de aplicaciones tanto en ámbitos civiles como militares, teniendo como objetivo facilitar el estilo de vida de la humanidad.

2.2.3 FUNCIONAMIENTO DEL RADAR

Para comprender el principio de funcionamiento del radar es primordial entender dos conceptos:

El eco y el efecto Doppler.

Eco: Onda electromagnética emitida por un radar que vuelve a él después de haber sido reflejada por un obstáculo.

Efecto Doppler: Se denomina efecto Doppler al cambio de frecuencia y longitud de onda producto del movimiento de la fuente de ondas o del receptor (Peña, 2015).

A partir de los conceptos antes mencionados el transmisor cumple con la función de emitir una onda electromagnética a través de una antena, que se propaga en el espectro electromagnético, colisionando en un blanco reflejando su señal, la cual es recibida por la antena del receptor para luego procesar los datos recibidos y determinar la posición del blanco o velocidad a la cual viaja el objeto.

En la Ilustración 1 se puede apreciar el principio de funcionamiento de un radar, donde se muestra la atenuación de la señal reflejada versus la señal transmitida, debido a la distancia que recorre la onda, para lo cual es necesario que el sistema radar cuente con un buen amplificador de potencia tanto en transmisión como en la recepción.

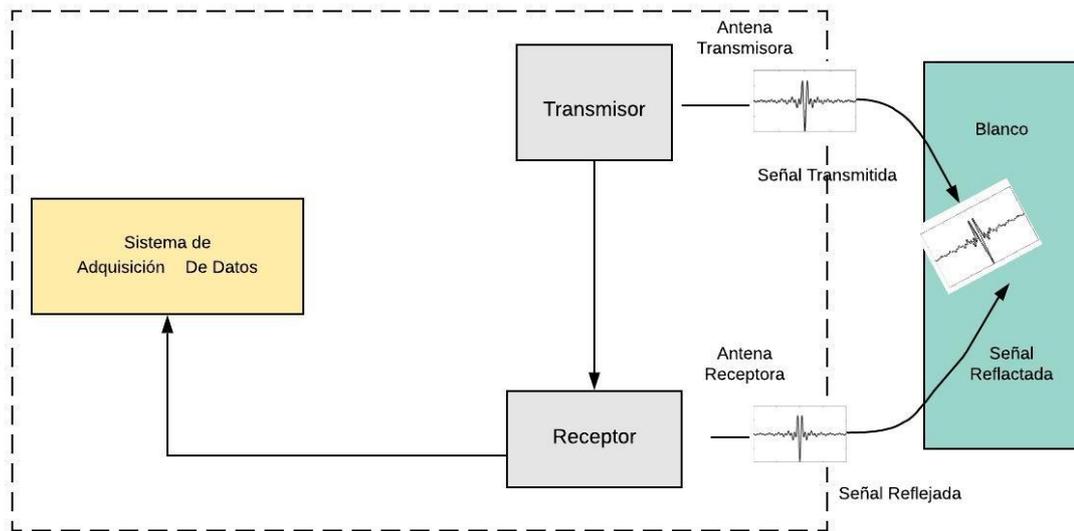


Ilustración 1. Principio de funcionamiento de un radar

Fuente: Autores

2.2.3.1 Radar biestático

Posee una antena para transmisión y una para recepción, la información es receptada en un mismo o distintos emplazamientos.

2.2.3.2 Radar de onda continua

Transmite una señal de forma continua, su finalidad es poder medir fenómenos físicos como el efecto Doppler que se utiliza para medir la velocidad de un objeto.

2.2.4 FRECUENCIAS DE RADAR

Según las aplicaciones del radar se han asignado frecuencias específicas, estas frecuencias se eligen considerando diferentes factores comerciales tales como: resolución espacial, materiales de penetración, propagación, interferencias electromagnéticas,

interferencias de radiofrecuencia y limitaciones de ancho de banda. Las frecuencias en las que operan los radares van desde 220MHz a 35GHz, estas frecuencias pueden variar debido a su aplicación, en radares de tierra de alta frecuencia en 2MHz o en radares milimétrico los cuales trabajan a frecuencias mayores a 94GHz. La banda de operación de los sistemas radar se pueden ubicar dentro del espectro electromagnético (Cuno, 2016, pág. 16).

Para mejor entendimiento se muestra en la Tabla 1 la asignación de rangos de frecuencias para radares.

Designación de Frecuencias	Rango de Frecuencias en GHz (estándar IEEE)	Rango de Frecuencias en GHz (estándar IEEE)
HF	0.003-0.03	A
VHF	0.03-0.3	A<0.25; B>0.25
UHF	0.3-1.0	B<0.5; C>0.5
L_Band	1.0-2.0	D
S_Band	2.0-4.0	E<3.0; F>3.0
C_Band	4.0-8.0	G<6.0; H>6.0
X_Band	8.0-12.5	I<10.0; J>10.0
Ku_Band	12.5-18.0	J
K_Band	18.0-26.5	J<20.0; K>20.0
Ka_Band	26.5-40.0	K
V & W o MMW	Normal >34.0	

Tabla 1. Rango de frecuencias asignados a radar

Fuente: (Mahafza, 2013).

2.2.5 RADAR FM-CW

El radar básico de onda continua CW emite una señal con ancho de banda muy pequeño (su espectro es estrecho). El radar Doppler CW-FM emite onda continúa modulada

en frecuencia, de modo que la frecuencia de la señal transmitida varía en función del tiempo de forma periódica. Cada recepción de la señal está formada por una línea ascendente en frecuencia, seguida de otra descendente y, por último, otra ascendente (Rueda, 2007, pág. 776).

2.2.6 RADAR DE TIPO IMPULSO

Los radares que adquieren datos en el dominio del tiempo se conocen generalmente como radar de tipo impulso. Se transmite un pulso en el dominio del tiempo y la energía reflejada se recibe en función del tiempo.

La forma de onda resultante indica la amplitud de la energía dispersada desde los objetos subsuperficiales frente al tiempo. La información del rango se basa en el principio de tiempo de vuelo, y una simple visualización del retorno del radar (amplitud en función del rango) es una presentación de "alcance A".

La mayoría de los sistemas GPR que incorporan la técnica de impulso envían un impulso a una antena, que produce una onda electromagnética (EM). Las características de la antena determinan la frecuencia central de la onda EM y el ancho de banda asociado está determinado por el ancho del pulso. La antena desempeña una función importante en la dinámica del sistema GPR de impulsos (Jol, 2009, pág. 50).

2.2.6.1 Forma y espesor de los pulsos GPR

La forma del pulso depende de la función $\hat{g}(f)$, donde $\hat{g}(f)$ es una función constante. Ésta constante es generalmente compleja y, por lo tanto, se indicará como $\hat{g}(f) = K \exp(j\theta)$, el pulso en el dominio del tiempo viene dado por la Ecuación 1.

$$g(t) = 2K \operatorname{Re} \left\{ \exp(j\theta) \int_{0.5f_c}^{1.5f_c} \exp(j2\pi ft) df \right\} = 2K f_c \operatorname{sinc}(\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad \text{Ecuación 1. Pulso GPR}$$

Donde la función sinc se define como $\operatorname{sinc}(x) = \operatorname{sinc}(x)/x$.

En la Ilustración 2 se proporcionan los gráficos de los pulsos relativos a cuatro valores diferentes de θ , tomando en cuenta que el valor a usarse dependerá del análisis posterior de la traza, en este estudio se optó por el valor $\Theta=3\pi/4$. Las gráficas se expresan frente a la variable adimensional tf_c ; cómo se puede ver, la duración en este tiempo normalizado es aproximadamente unitaria; es decir, la duración real del pulso es inversamente proporcional a su frecuencia central (y por lo tanto a su banda). Además, los pulsos tienen un comportamiento de tiempo oscilatorio, debido al hecho de que su espectro no se extiende hasta la frecuencia cero, por lo tanto, su valor promedio es sustancialmente igual a cero (Persico, 2014).

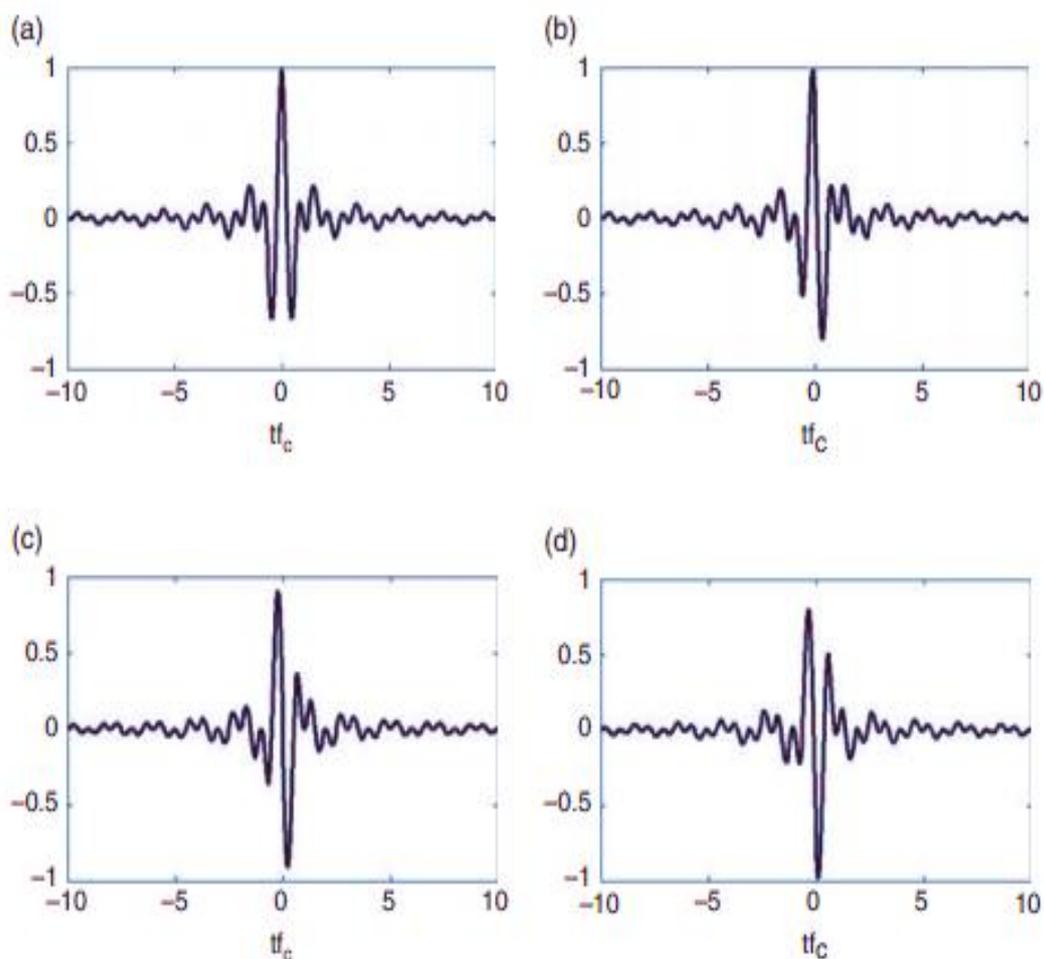


Ilustración 2. Gráficas de la expresión normalizada a $2Kf_c$ y representado frente la dimensión variable adimensional tf_c . Panel a: $\Theta=0$. Panel b: $\Theta=\pi/4$. Panel c: $\Theta=\pi/2$. Panel d: $\Theta=3\pi/4$.

Fuente: (Persico, 2014).

2.2.7 RESOLUCIÓN Y ZONA DE INFLUENCIA

La resolución es un concepto fundamental en la mayoría de los métodos de detección basados en fenómenos de ondas, ésta indica el límite de certeza para determinar la posición y los límites geométricos de un objetivo, es decir el tamaño, la forma y el grosor. La resolución del radar de penetración está compuesta por: la resolución longitudinal (rango o profundidad), y la longitud de resolución lateral (desplazamiento angular o lateral) (Jol, 2009).

2.2.7.1 Resolución lateral

Capacidad para diferenciar dos elementos contiguos en la dirección de su desplazamiento. Esta resolución depende de parámetros como la velocidad de desplazamiento de la antena sobre la superficie, el ancho del pulso y la distancia del sistema. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será la longitud de resolución lateral. La resolución lateral está estrechamente relacionada con el concepto de zona de Fresnel, que expresa el concepto en términos de interferencia de señales sinusoidales. Por ello la longitud de resolución lateral se puede expresar como se indica en la Ecuación 2.

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad \text{Ecuación 2. Longitud de resolución lateral}$$

donde λ_c longitud de onda de frecuencia central.

2.2.7.2 Resolución longitudinal

Tiene la capacidad de diferenciar dos señales muy cercanas en el tiempo, es decir separa dos reflexiones producidas en un mismo medio por diferentes anomalías consecutivas en el tiempo de propagación. La resolución longitudinal se la puede expresar como se indica en la Ecuación 3.

$$R_v = e_{medio} \frac{v.T}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad \text{Ecuación 3. Resolución longitudinal}$$

donde v es la velocidad de propagación de las ondas en el medio, T la duración de la señal y λ la longitud de onda de la señal (Youmana, 2018).

2.3 PRINCIPALES PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

El hormigón o concreto es un material compuesto empleado en construcción, la palabra hormigón viene del latín, "formicus" o "concretus", que traducido al español quiere decir homogéneo con molde o forma (Universidad de Salamanca, 2010, pág. 43).

2.3.1 ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN

El concreto está constituido de 70-80% de agregados como son grava y arena, el resto es pasta de cemento, la misma que a su vez está compuesta de un 30-50% de cemento en volumen el resto es agua.

2.3.2 PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN

2.3.2.1 Densidad

Es la relación de la masa del hormigón y el volumen ocupado, este valor puede oscilar según el tipo de áridos usados en su composición (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 81).

2.3.2.2 Compacidad

Es la cualidad de tener la máxima densidad que los materiales empleados permiten. Un hormigón de alta compacidad proporciona mayor protección contra el acceso de sustancias perjudiciales (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 81).

2.3.2.3 Permeabilidad

Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón (A/C). Cuanto mayor es esta relación la permeabilidad aumenta y por lo tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 81).

2.3.2.4 Resistencia

El hormigón endurecido presenta resistencia a las acciones de compresión, tracción y desgaste. La principal es la resistencia a compresión, se mide en Mpa (Megapascales) y llegan hasta 50 Mpa en hormigones normales y 100 Mpa. en hormigones de alta resistencia. La resistencia a tracción es más pequeña, su importancia varía según su aplicación (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 81).

2.3.2.5 Dureza

Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 82).

2.3.2.6 Retracción

Es el fenómeno de acortamiento del hormigón debido a la evaporación progresiva del agua absorbida que forma meniscos en la periferia de la pasta de cemento, y el agua capilar. Es el agua menos fijada en los procesos de hidratación (Garrido Hernández, Ortega Ortega, & Lazón Torres, 2007, pág. 82).

2.3.2.7 Protección y curado del hormigón

La resistencia potencial y la durabilidad del hormigón se desarrollarán totalmente sólo si éste se cura de manera adecuada durante un periodo apropiado antes de entrar en servicio. Por lo tanto, continuamente, durante la hidratación de los materiales cementantes, es necesario mantener un contenido de humedad satisfactoria y una temperatura favorable (Guzmán, 2001, pág. 297).

2.4 PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE UN MEDIO

La conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética son los parámetros que definen la propagación de una onda electromagnética en un medio.

La conductividad proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica, está representada por el símbolo (σ), se la mide en (Ωm^{-1}) o Siemens/m (S/m). La conductividad eléctrica se representa como un valor complejo, como se observa en la Ecuación 4.

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad \text{Ecuación 4. Conductividad eléctrica}$$

Donde, la parte real determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo y la imaginaria la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de la conducción del material en presencia de un campo eléctrico variable con el tiempo (Youmana, 2018, pág. 12).

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante física de proporcionalidad entre el vector desplazamiento eléctrico y la intensidad del campo eléctrico externo aplicado, se la representa (ϵ), y sus unidades son F/m. También está definida mediante la Ecuación 5.

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad \text{Ecuación 5. Permitividad dieléctrica absoluta}$$

Donde ϵ_r , es el producto entre una permitividad relativa del material (ϵ_r), y la permitividad dieléctrica del vacío ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

La permitividad dieléctrica del material es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico, también según, (Youmana, 2018, pág. 12) es una magnitud compleja, en la que la componente real corresponde a la corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria la corriente en desfase respecto al mismo campo eléctrico y denominado factor de pérdidas, como se la puede observar en la Ecuación 6.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad \text{Ecuación 6. Permitividad dieléctrica del material}$$

La permeabilidad magnética es representada por (μ), su unidad es Henrios/metros (H/m), y está definida como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) y la permeabilidad relativa del material (μ_r), así como también es la que relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético. En la mayoría de los estudios empleados a caracterización de materiales con georradar, exceptuando los que contengan materiales ferromagnéticos, cumplen con que la permeabilidad magnética es próxima a la unidad, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético (Youmana, 2018, pág. 13).

2.4.1 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y ATENUACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de la frecuencia y su longitud de onda como se muestra en la Ecuación 7, estos parámetros serán alterados por las propiedades electromagnéticas del medio por el que se propaguen.

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{Ecuación 7. Velocidad de propagación}$$

Se la puede expresar a partir de los parámetros que definen la propagación de una onda electromagnética como son: la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética del medio, cómo en la Ecuación 8.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}} \quad \text{Ecuación 8. Velocidad de propagación a partir de parámetros de la onda electromagnética.}$$

Donde μ es la permitividad magnética, ϵ es la permitividad dieléctrica absoluta, y σ es la conductividad. En medios no magnéticos la expresión es simplificada ya que μ_r es igual a la unidad, además cuando los medios son poco conductores el termino asociado con la conductividad es pequeño. Por ello la velocidad de propagación se puede calcular como la Ecuación 9 (Youmana, 2018, pág. 14).

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad \text{Ecuación 9. Velocidad de propagación en términos de permitividad relativa.}$$

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados por una distancia r . Si se toman logaritmos decimales, puede obtenerse un valor del nivel de decaimiento de la energía (α) por medio del decaimiento de la amplitud (A) de la onda conforme ésta se propaga por el medio material en decibelios, como se puede observar en la Ecuación 10 (Youmana, 2018, pág. 15).

$$\alpha = 20 \cdot \log \left(\frac{A_i}{A_0} \right) \quad \text{Ecuación 10. Nivel de energía}$$

Donde A es la amplitud registrada en un momento de la propagación y A_0 es la amplitud registrada que se toma como referencia.

“Las señales de georradar son ondas electromagnéticas generadas por un emisor que se propagan por un medio, cuya velocidad de propagación está relacionada con la permitividad dieléctrica relativa del material y cuya atenuación dependerá principalmente de la conductividad” (Youmana, 2018, pág. 15).

2.4.2 PROPIEDADES DIELECTRICAS

2.4.2.1 Relación entre la variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón y sus propiedades físicas

En la propagación de ondas electromagnéticas generadas por un equipo de georradar a través de hormigón, se puede apreciar cómo estas ondas pueden cambiar dependiendo de las propiedades electromagnéticas, como son la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica relativa y la permeabilidad magnética, de dicho material. Hay que tener en cuenta que la permeabilidad magnética del hormigón es considerada $\mu_o = 4\pi 10^7 \frac{H}{m}$, es decir, igual que la del aire o el vacío. Esto es debido a que el hormigón es un material no magnético. Por

tanto, los parámetros electromagnéticos, referidos al hormigón, que pueden cambiar son la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad eléctrica, siendo los factores causantes de ellos los que se van a exponer a continuación (Youmana, 2018, pág. 16).

2.4.2.1.1 Variación de la permitividad dieléctrica relativa en el hormigón

Según (Youmana, 2018, pág. 16), la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) de un material es una constante física que se encuentra relacionada con la capacidad de polarización de dicho material en presencia de un campo eléctrico. La variación de permitividad dieléctrica puede estar entre 4, cuando el hormigón está seco, hasta 8-9 cuando el hormigón está húmedo. Sin embargo, los factores que hacen que la permitividad varíe son: la frecuencia de emisión, el proceso de hidratación, los componentes, el contenido de agua y la presencia de cloruros, los cuales se van a explicar a continuación. Dependencia de la frecuencia el hormigón es un material poroso y heterogéneo, relleno de una solución electrolítica. Como sucede con todos los materiales, su permitividad depende de la frecuencia de las ondas electromagnéticas. Halabe (1990) hizo una teoría sobre la permitividad dieléctrica relativa del hormigón y más tarde demostró que, tanto la parte real como la imaginaria, varían dependiendo de la frecuencia, para una determinada temperatura, salinidad, porosidad y saturación de los poros. Otro estudio es el realizado por Robert (1998), en el que se analizó la variación de permitividad relativa del hormigón dependiendo de la frecuencia. Para ello investigó sobre el comportamiento en frecuencias que van entre los 50 MHz a 1 GHz. Este estudio fue posible tras la fabricación de muestras de hormigón de varios tipos y la comprobación de sus comportamientos a lo largo de un año. Estas pruebas fueron realizadas en probetas de hormigón con relación A/C de 0,55 y un proceso de curado en inmersión de agua.

2.4.2.1.2 Variación de la conductividad eléctrica en el hormigón

En el estudio realizado por (Youmana, 2018, pág. 18) se menciona que Neville (2007) se encargó de describir detalladamente las propiedades eléctricas del hormigón. En este documento se describe como el hormigón fresco, es decir antes del curado, tiene el comportamiento de un material electrolito, que incluso llega a alcanzar una resistividad de $100\Omega\text{m}$. Esto puede considerarse como si el hormigón fuera un semiconductor, aunque una vez curado al aire, la resistividad aumenta de forma importante, llegando a alcanzar un valor en torno a $10^4 \Omega\text{m}$. Si el curado fuera en horno, estos valores serían de $10^9 \Omega\text{m}$, lo que entonces se consideraría como un material aislante. La corriente eléctrica se conduce en el hormigón fresco gracias a los iones del agua evaporable. Por esa razón aumenta su resistividad una vez curado. Además, la resistividad de los áridos convencionales es enormemente más grande, algo que es importante saber. Cuando el agua ya se ha evaporado, la corriente eléctrica se conduce por el agua combinada. Esto hace que la resistividad disminuya significativamente conforme aumenta la relación A/C. En la Tabla 2 se puede ver un ejemplo numérico realizado por el mismo Neville (2007), para diferentes tipos de pasta de cemento.

	Días de curado (1000 Hz, 4V)		
A/C	7	28	90
0,4	10,3	11,7	15,7
0,5	7,9	8,8	10,9
0,6	5,3	7,0	7,6

Tabla 2. Influencia de la relación A/C y el tiempo de curado en la resistividad (Ωm) de pastas de cemento Portland (Neville, 1997).

Fuente: (Youmana, 2018, pág. 21).

2.5 APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Los algoritmos de aprendizaje automático utilizan métodos computacionales para "aprender" información directamente de los datos sin depender de una ecuación predeterminada, su rendimiento es proporcional al número de muestras disponibles para el aprendizaje. Estos algoritmos encuentran patrones naturales en los datos que generan información y lo ayudan a tomar mejores decisiones y predicciones.

2.5.1 FUNCIONAMIENTO DEL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

El aprendizaje automático utiliza dos tipos de técnicas: aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado.

2.5.1.1 Aprendizaje sin supervisión

El aprendizaje no supervisado encuentra patrones ocultos o estructuras intrínsecas en los datos sin respuestas etiquetadas.

2.5.1.1.1 Agrupamiento

Es la técnica de aprendizaje no supervisado más común. Se utiliza para el análisis exploratorio de datos para encontrar patrones ocultos o agrupaciones en los datos.

2.5.1.2 Aprendizaje supervisado

El objetivo del aprendizaje automático supervisado es construir un modelo que haga predicciones basadas en evidencia en presencia de incertidumbre, utiliza técnicas de clasificación y regresión para desarrollar modelos predictivos (Mathworks, 2016).

- Técnicas de clasificación. - Clasifican los datos de entrada en categorías.
- Técnicas de regresión. - Predicen respuestas continuas.

2.5.1.2.1 Algoritmos comunes de clasificación

2.5.1.2.1.1 Clasificación binaria vs. multiclase

En un problema de clasificación binaria, un solo elemento de entrenamiento solo se puede dividir en dos clases. En un problema de clasificación multiclase, se puede dividir en más de dos.

2.5.1.2.1.2 Regresión logística

Se ajusta a un modelo que puede predecir la probabilidad de que una respuesta binaria pertenezca a una clase u otra.

2.5.1.2.1.3 k Vecinos más cercanos (kNN)

Las predicciones de kNN suponen que los objetos cercanos entre sí son similares. Las métricas de distancia, como Euclides, bloque de la ciudad, coseno y Chebychev, se utilizan para encontrar al vecino más cercano.

2.5.1.2.1.4 Máquina de vectores de soporte (SVM)

Clasifica los datos encontrando el límite de decisión lineal (hiperplano) que separa todos los puntos de datos de una clase de los de la otra clase.

2.5.1.2.1.5 Red neuronal

Inspirada en el cerebro humano, una red neuronal consiste en redes de neuronas altamente conectadas que relacionan las entradas con las salidas deseadas.

2.5.1.2.1.6 Naïve Bayes

Un clasificador de Bayes ingenuo asume que la presencia de una característica particular en una clase no está relacionada con la presencia de cualquier otra característica. Clasifica los nuevos datos según la probabilidad más alta de que pertenezca a una clase en particular (Mathworks, 2016).

2.5.1.2.1.7 Análisis discriminante

El análisis discriminante clasifica los datos al encontrar combinaciones lineales de características. El análisis discriminante asume que las diferentes clases generan datos basados en distribuciones gaussianas.

2.5.1.2.1.8 Árbol de decisión

Un árbol de decisión le permite predecir las respuestas a los datos siguiendo las decisiones en el árbol desde la raíz (principio) hasta un nodo de hoja. Un árbol consiste en condiciones de ramificación donde el valor de un predictor se compara con un peso entrenado (Mathworks, 2016).

2.5.1.2.1.9 Árboles de decisión embolsados y potenciados

En estos métodos de conjunto, varios árboles de decisión "más débiles" se combinan en un conjunto "más fuerte". Un árbol de decisión empaquetado consiste en árboles que se entrenan de forma independiente en los datos que se arrancan desde los datos de entrada (Mathworks, 2016).

2.5.1.2.2 Algoritmos comunes de regresión

2.5.1.2.2.1 Modelo de Regresión del Proceso Gaussiano

Los modelos de regresión del proceso gaussiano (GPR) son modelos no paramétricos que se utilizan para predecir el valor de una variable de respuesta continua.

2.5.1.2.2.2 Regresión SVM

Los algoritmos de regresión SVM funcionan como los algoritmos de clasificación SVM, pero se modifican para poder predecir una respuesta continua.

2.5.1.2.2.3 Modelo lineal generalizado

Un modelo lineal generalizado es un caso especial de modelos no lineales que utilizan métodos lineales.

2.5.1.2.2.4 Árbol de regresión

Los árboles de decisión para la regresión son similares a los árboles de decisión para la clasificación, pero se modifican para poder predecir respuestas continuas (Mathworks, 2016).

2.6 ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS

2.6.1 Tecnología Field Programmable Gate Array (FPGA)

Matriz de puertas programables, es un dispositivo programable que posee bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada, mediante un lenguaje de descripción especializada.

En la actualidad la tecnología System On Chip (SoC), es una de las más reconocidas, gracias a su lógica programable que permite reprogramar parte de un hardware según las necesidades requeridas, dentro de esta tecnología se encuentra el ZedBoard, que consiste en una placa de evaluación y desarrollo basada en la plataforma de procesamiento extensible Xilinx Zynq-7000, consiste en un SoC único que contiene un microprocesador ARM y una FPGA.

El chip está formado por dos partes interconectadas, la parte física donde se encuentra el sistema de procesamiento o PS (Processing System) y las entradas/salida multiplexadas, por otro lado, la parte lógica programable o PL (Programmable Logic) que es utilizada para adaptarla según las necesidades (Torrejón, 2013, pág. 24). En la Ilustración 3, se puede apreciar la ubicación de cada interfaz que controla el SoC.

El equipo utiliza la última versión de la suite de Xilinx ISE, que contiene todas las herramientas de desarrollo necesarias para la puesta en marcha, además el sistema utiliza un SSOO GNU/Linux y diversas herramientas de drivers de software libre para la puesta a punto del software de desarrollo.

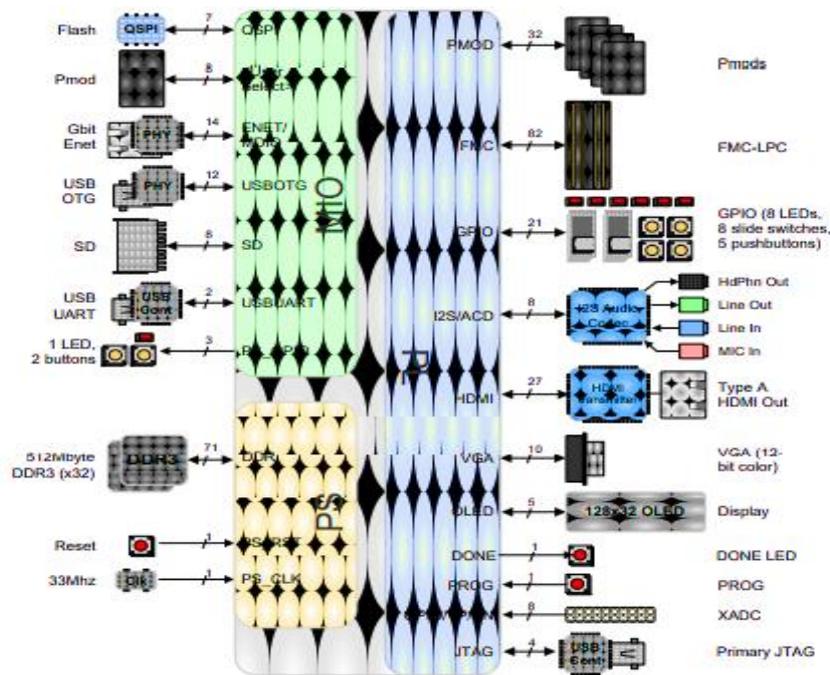


Ilustración 3. Diagrama de bloque de ZedBoard

Fuente: (xilinx, 2012)

2.6.2 Radio Definido por Software (SDR)

Wireless Innovation Forum, establece que un radio definido por software es un “*radio en el que algunas o todas las funciones de la capa física son definidas por software*” (W. I. Forum, 2011), esta tecnología se aplica en distintas áreas dentro de la industria inalámbrica, y es capaz de dar soluciones eficientes a menor costo a problemas de arquitecturas de radio tradicionales.

Los transceptores de radio frecuencia, AD-FMCOMMS [2345] -EBZ son módulos analógicos de alta velocidad basado en el AD9361 o AD9364, diseñado para su uso en aplicaciones de RF, tales como aplicaciones de estación base 3G, 4G y radios definidos por software. El dispositivo combina un extremo frontal de RF con una sección de banda base de señal mixta flexible y sintetizadores de frecuencia integrados, proporciona una interfaz digital configurable a un procesador o FPGA. Los chips AD9361 y AD9364 operan en el rango de 70 MHz a 6 GHz.

La diferencia entre el AD9361 (2 Rx, 2 Tx) y AD9364, que se puede observar en la Ilustración 4 (1 Rx, 1 Tx), es el número de canales, tanto el Software, HDL, pinout, entre otros, es exactamente lo mismo (Analog Devices, 2018).



Ilustración 4. Transceptor de radio frecuencia

Fuente: (Tepa Terraelectronica, 2019)

2.6.3 MatLab

MATLAB (Matrix Laboratory) es un lenguaje de alto nivel, diseñado para proveer facilidades de cálculos numéricos, visualización y programación (lenguaje M) (Ignacio, 2012).

2.6.4 ANSYS HFSS

ANSYS HFSS es un software de simulación electromagnética (EM) 3D para diseñar y simular productos electrónicos de alta frecuencia, como antenas, conjuntos de antenas, componentes de RF o microondas, placas de circuito impreso entre otras (ANSYS, 2019).

CAPÍTULO III.

3 METODOLOGÍA

3.1 HIPÓTESIS

Hi= Es posible reconocer la resistencia aproximada del hormigón, mediante un sistema inteligente, basado en tecnología radar.

Ho= No es posible reconocer la resistencia aproximada del hormigón, mediante un sistema inteligente, basado en tecnología radar.

3.2 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Variables Independientes

Propiedades dieléctricas del hormigón.

Resistencia a compresión de hormigón.

Variables Dependientes

Variación de la onda reflejada.

Estimación de la resistencia del hormigón proporcionada por el sistema.

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

VARIABLE	TIPO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADORES
Resistencia a compresión del hormigón.	Independiente.	El esfuerzo máximo que puede soportar el hormigón hasta producirse la fractura o rotura, bajo una carga de aplastamiento.	Cantidad de agua. Cantidad de cemento. Cantidad de agregado fino y grueso.	Carga aplicada.
Propiedades dieléctricas del hormigón.	Independiente.	Consiste en la relación entre la variación de las propiedades electromagnéticas del hormigón y sus propiedades físicas	Permitividad dieléctrica relativa. Conductividad eléctrica.	Frecuencia de emisión de la señal electromagnética. Proceso de Hidratación. Contenido de agua y presencia de cloruros. Proceso de curado.
Variación de la onda reflejada.	Dependiente	Transmisión de una onda electromagnética a 1.2 GHz, a través del hormigón para su posterior recepción.	Velocidad de propagación y atenuación de las ondas electromagnéticas	Frecuencia y longitud de onda. Puntos característicos de la onda, tras propagarse por el medio.

Estimación de la resistencia del hormigón proporcionada por el sistema.	Dependiente	Evaluar el proceso de estimación de la resistencia a la compresión del hormigón.	Algoritmo de aprendizaje supervisado	Técnicas de clasificación. Técnicas de regresión.
--	-------------	--	--------------------------------------	--

Tabla 3: Operacionalización de variables

Fuente: Autores.

3.4 TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.4.1 Investigación bibliográfica

La recolección de información para la elaboración de este trabajo tuvo como finalidad la obtención de conocimientos previos, de revistas, papers, libros e investigaciones relacionadas con la técnica no destructiva del georradar, en la caracterización de materiales de construcción, que proporcionaron la guía necesaria para la obtención de parámetros electromagnéticos del hormigón.

Además, para la realización del algoritmo de aprendizaje automático, se obtuvo información del estudio modelo de clasificación dinámico de arritmias cardíacas mediante aprendizaje de máquina con interfaz a usuario, asimismo se revisó manuales y datasheets de los implementos tecnológicos usados.

3.4.2 Investigación de campo

El presente estudio, reúne las condiciones metodológicas de una investigación de campo, la recolección de datos, mediante la tecnología SDR, se obtuvo una vez terminado el prototipo donde se ubicó de forma estática y a una distancia fija la antena transmisora, receptora, y el reflector metálico, posteriormente se procedió a realizar pruebas con probetas de diferentes resistencias, para comprobar su funcionamiento.

3.5 MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

3.5.1 Método investigativo experimental

- Diseñar un prototipo de sistema para la adquisición de las propiedades dieléctricas del hormigón.
- Añadir un algoritmo predictivo al sistema capaz de valorar la resistencia a la compresión del hormigón.
- Diseñar la interfaz gráfica para el control del sistema.

- Realizar las pruebas finales del sistema inteligente.

3.5.2 Técnicas de recolección de datos.

Se empleó la técnica de medición de variables, que tiene como finalidad la recolección de datos mediante, la recepción de la onda electromagnética, que bajo una programación establecida se, almacenan para su posterior análisis.

3.5.3 Instrumentos

Este trabajo, empleó el instrumento de observación de campo, ya que, se analizó, sintetizó y se procesó la información recolectada de las probetas de hormigón.

3.6 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.6.1 Población

El universo o la población, consta del total de probetas cilíndricas existentes en la Universidad Nacional de Chimborazo.

3.6.2 Muestra

Para la evaluación del prototipo inteligente la muestra será no probabilística intencional que en la presente investigación se enfocará en 39 probetas de hormigón.

3.7 PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS

Para el desarrollo del diseño e implementación de un sistema inteligente para, aproximar el valor de resistencia del hormigón se efectuará el siguiente proceso:

1. Recopilar información bibliográfica, antecedentes e información correspondiente a las técnicas de valoración de calidad hormigón en estructuras, sistemas radar y sistemas inteligentes.
2. Analizar las características y funcionalidades de la tecnología System On Chip y de la tecnología Radio Definido por Software (SDR).

3. Diseño e implementación de una antena Vivaldi de Ultra Ancho de Banda (UWB).
4. Configuración de la comunicación entre MatLab y SDR.
5. Implementación de los recursos necesarios para el desarrollo y puesta en marcha del sistema.
6. Desarrollo de una aplicación inteligente para el análisis y procesamiento de datos del sistema inteligente mediante el uso del software MATLAB.
7. Diseño de una interfaz gráfica para el control del sistema amigable con el usuario.
8. Comprobación del funcionamiento completo del sistema.
9. Evaluar el desempeño del sistema mediante una comparativa con instrumentos de medición existentes para la medición de la resistencia del hormigón.

El prototipo planteado para mejorar las técnicas de valoración, de la resistencia a la compresión del hormigón, por profesionales en el área de la construcción está conformado por: antenas UWB para transmisión y recepción de señales RF, método para la obtención de los Parámetros Electromagnéticos, interfaz de usuario, y sistema de aprendizaje automático, cómo se lo puede observar en la Ilustración 5.

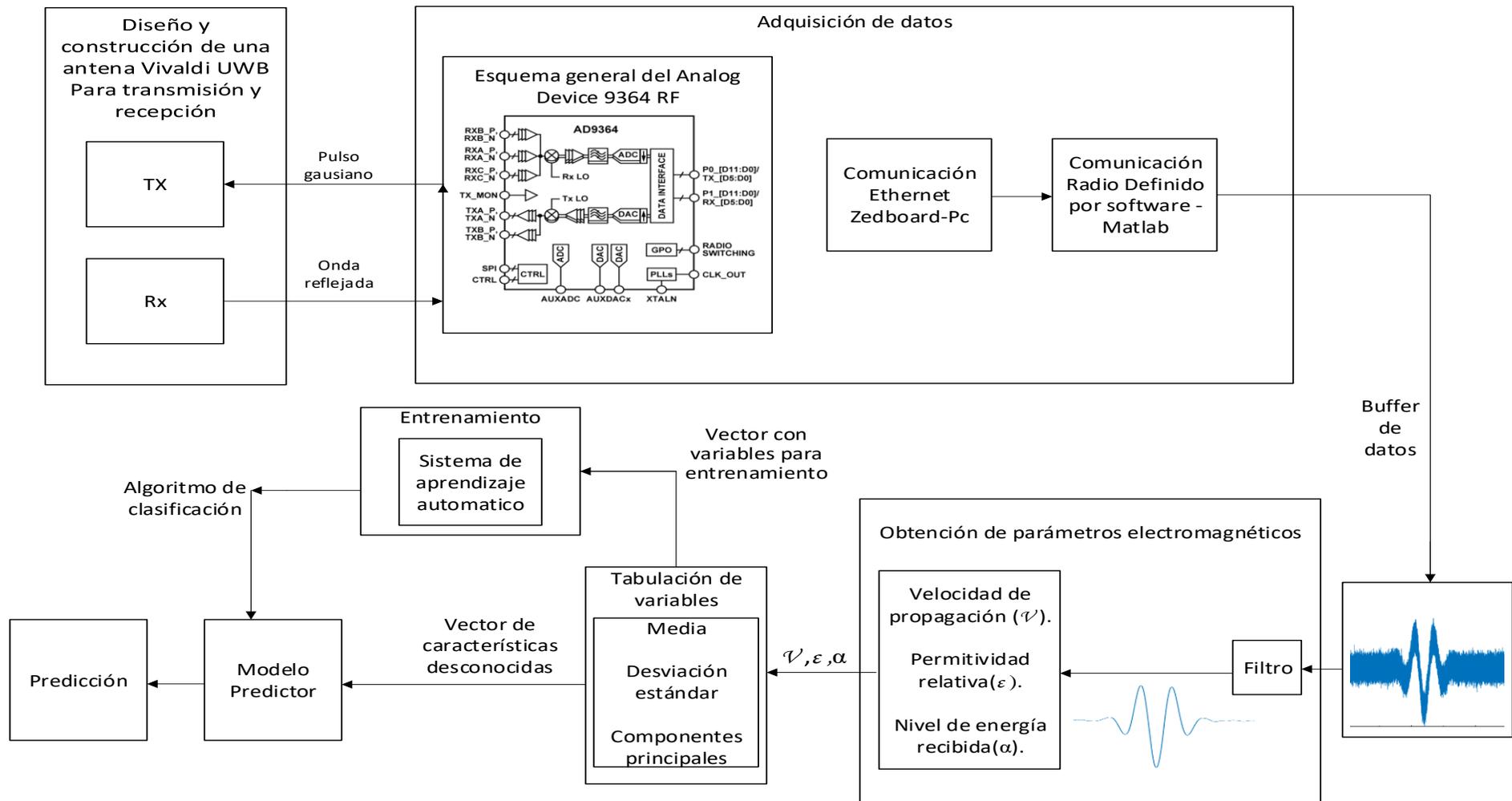


Ilustración 5. Esquema general del sistema inteligente para caracterización del hormigón

Fuente: Autores.

3.7.1 Diseño y construcción de una antena UWB para transmisión y recepción

Se realizó una investigación de los diferentes tipos de antenas y sus principales características, de donde se optó por utilizar una antena vivaldi, ya que, ésta es usada para aplicaciones GPR por ser una estructura coplanar de bajo peso y perfil, patrones de radiación simétricos en los planos E y H, una alta directividad y gran ancho de banda.

Éste trabajo aplicó la técnica antipodal, la cual nos permite miniaturizar y mantener buenos parámetros de desempeño en bajas frecuencias. Para el diseño y construcción de la antena vivaldi antipodal se siguió los siguientes pasos:

3.7.1.1 Elección del sustrato

Dada la facilidad de adquisición, por ser el sustrato más común y accesible, se optó por diseñar la antena sobre el sustrato FR4, cuyas características se pueden observar en la Tabla 4 (ver Anexo 1).

Característica	Valor
Permitividad Relativa	4.4
Tangente de pérdidas	0.2
Grosor	1.6mm

Tabla 4: Características del dieléctrico FR4.

Fuente: Autores.

3.7.1.2 Cálculos para el diseño

Para el diseño se utilizó una estructura de alimentación microstrip-slotline, es preciso tener en cuenta que una de sus especificaciones de diseño exige un ancho de banda acoplado a 50Ω . El diseño de la antena vivaldi antipodal se realizó en el software Ansoft HFSS 13.0, las variables geométricas necesarias para el diseño de la línea microstrip se los observa en la en la Tabla 5.

Característica	Valor
ϵ_r (Permitividad Relativa)	4.4
h(Altura)	1.6 mm
Z_0 (Impedancia)	50 Ω
f_1 (Frecuencia mínima)	900 MHz
f_2 (Frecuencia máxima)	9 GHz

Tabla 5: Variables geométricas determinadas en el diseño de una línea microstrip.

Fuente: Autores

Con los datos de la Tabla 5 y las características del sustrato de la Tabla 4, se procedió a realizar los respectivos cálculos, para determinar las dimensiones y diseño de la antena vivaldi antipodal, para el rango de frecuencias propuesto, para lo cual, se utilizó la herramienta Web Antipodal Vivaldi, Antenna Designer, donde se obtuvo los valores del ancho de la antena W [mm], Longitud de la antena L [mm], ancho del alimentador de transmisión [mm], longitud del alimentador de transmisión [mm], eje mayor S1[mm], eje menor R1[mm] y radio del círculo [mm]. Estas dimensiones se observan en la, Ilustración 6, posteriormente se fabricó de la antena.

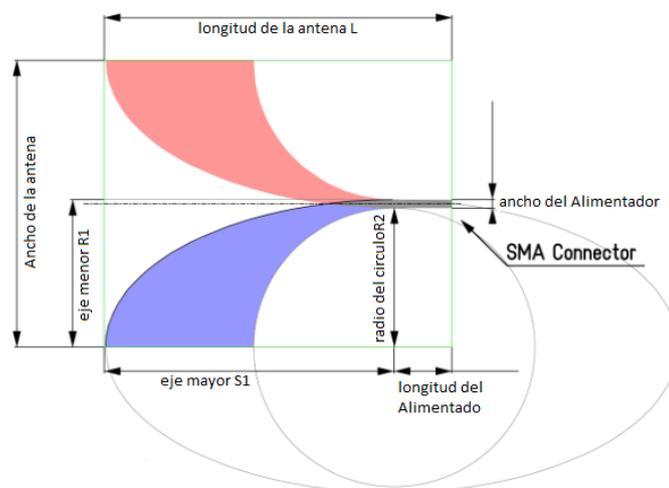


Ilustración 6.Parámetros de diseño de la antena vivaldi antipodal

Fuente: Autores.

3.7.2 Adquisición de datos

3.7.2.1 Configuración de los componentes tecnológicos

3.7.2.1.1 Arranque del Radio Definido por Software con el transceptor RF

1. Preparar la imagen del sistema operativo

La tarjeta FMCOMMS4-EBZ viene con su respectiva tarjeta SD donde se incluye algunas imágenes en su partición BOOT, como kit de desarrollo Arria 10 SoC, SoC Kit, ADRV9361, ADRV9364, AD-FMCOMMS3/S5/S4, ADRV9009/9371. Antes de que el sistema arranque, debe seleccionarse la imagen correspondiente a la tarjeta FMCOMMS4, los cuales deben ser copiados a la raíz de la partición BOOT (Devices, 2016). Por último, se debe insertar la TARJETA -SD en el conector de interfaz de la tarjeta SD (J12).

2. Preparar el System on Chip (SoC)

Ajustar los puentes y los interruptores, para arrancar el sistema desde la tarjeta SD, como se muestra en la Ilustración 7.

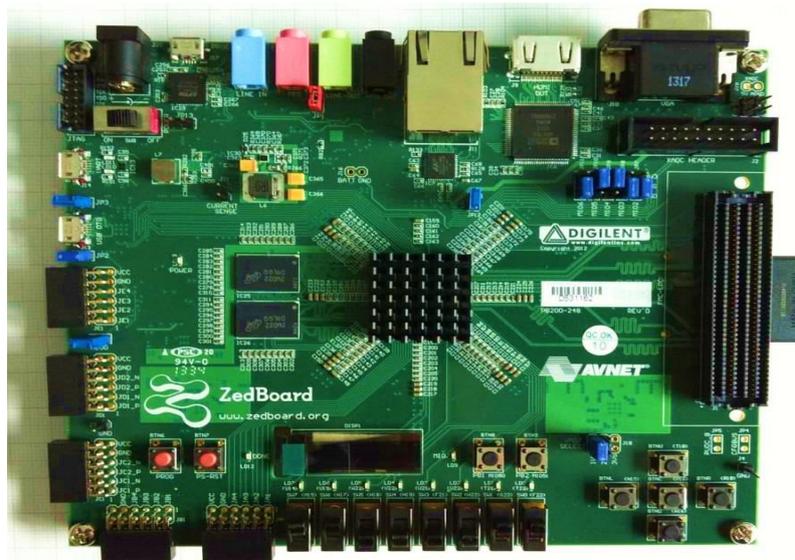


Ilustración 7.Esquema general para arranque del sistema

Fuente: (wiki.analog, 2014)

3. Instalación / cableado.

Todas estas conexiones se muestran en la Ilustración 8.

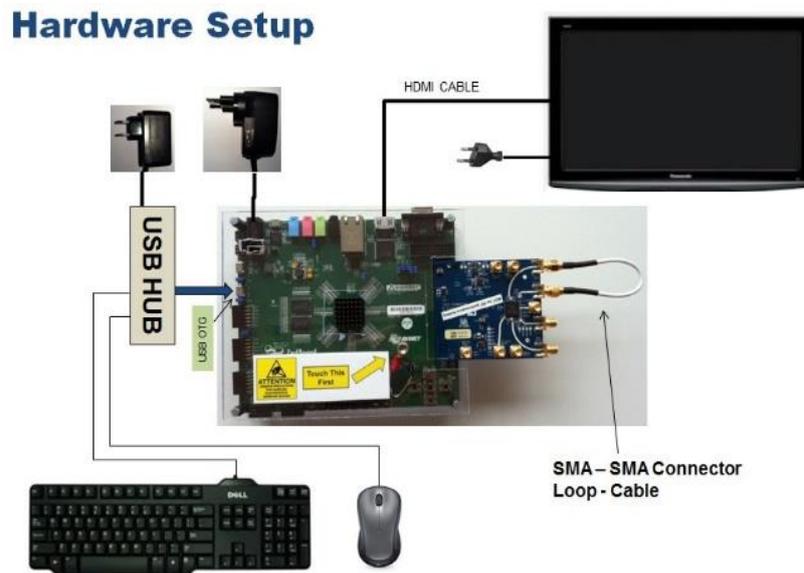


Ilustración 8. Instalación/cableado.

Fuente: (Analog Devices, 2014)

4. Encender el tablero ZED

En caso de que solicite al arranque del sistema, el usuario y contraseña, se debe digitar las credenciales que se muestran en la Tabla 6.

Administrador	
Usuario	Root
Contraseña	Analog
Usuario Normal	
Usuario	Analog
Contraseña	Analog

Tabla 6. Credenciales de acceso al sistema.

Fuente: Autores.

5. Protección

Para una correcta protección, es necesario agregar, un “tornillo de contacto” (A2, de acero inoxidable) y conectarlo a través de una resistencia de 270 k Ω a un pin de GND, tocar este tornillo antes de manipular cualquier tablero asegura una descarga de ESD adecuada (Analog Devices, 2016).

3.7.2.1.2 Comunicación Ethernet/IP

La comunicación entre Matlab y el ZedBoard Zynq700, se realiza mediante el protocolo TCP/IP, por ello se debe configurar los dispositivos en red, para esto se realiza los siguientes pasos:

a. Asignar una ip estática al Zedboard

Se lo puede realizar de dos maneras, mediante consola o por interfaz gráfica, en esta investigación, se lo realizó por medio de consola, ya que su configuración es más rápida, los pasos a seguir son:

1. Acceder al sistema con privilegios de administrador.
2. Abrir un terminal de Linux con las teclas Ctrl + Alt + T o haciendo clic directamente sobre el icono de consola.
3. Comprobar las interfaces de red que tiene el equipo, mediante los comandos:

```
ifconfig -a
```

Se observa que la interfaz de red ethernet lleva la abreviatura eth0, y también la interfaz de red de loopback, que sirve para comprobar si tienes conectividad con tu propia máquina en la dirección IP 127.0.0.1.

Acceder al directorio `/etc/networks/` utilizando el comando.

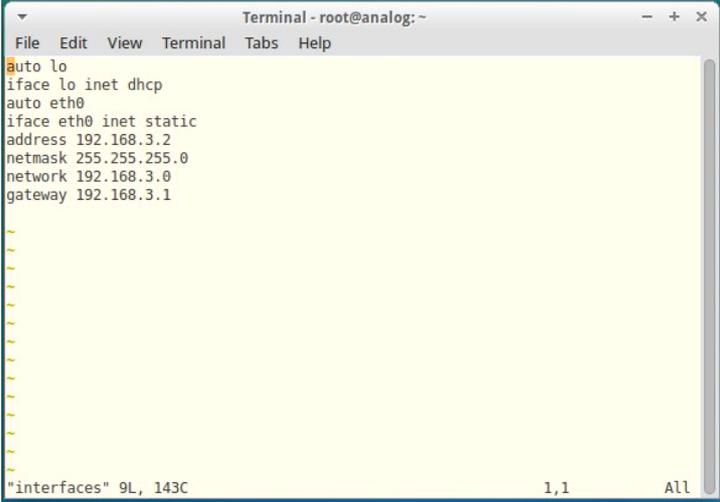
```
$ cd /etc/network/
```

Una vez dentro del directorio editamos el archivo `interfaces` (en ese archivo asigna una dirección IP fija las interfaces de red `eth0`), con el comando:

```
$ vim interfaces
```

Las líneas de código en el archivo de configuración de las interfaces de red deben ser las que se muestran en la Ilustración 9, dónde:

- `address` es la dirección IP que asignamos al ZedBoard, en este caso `192.168.3.2`, puesto que por defecto Analog Device trabaja con esta IP.
- `netmask` es la máscara de subred.
- `network` es la red a la que pertenece esa dirección IP.
- `broadcast` es la dirección IP de difusión de esa red.
- `gateway` es la dirección IP de la puerta de enlace predeterminada.



```
Terminal - root@analog: ~
File Edit View Terminal Tabs Help
auto lo
iface lo inet dhcp
auto eth0
iface eth0 inet static
address 192.168.3.2
netmask 255.255.255.0
network 192.168.3.0
gateway 192.168.3.1
"interfaces" 9L, 143C 1,1 All
```

Ilustración 9. Archivo “`interfaces`” configurado con una IP estática

Fuente: Autores.

3.7.2.1.3 Conexión de dispositivos Linux Industrial.

El software MatLab, cuenta con una caja de herramientas llamada “Communications Tollbox”, diseñada con la finalidad de intercambiar datos a través de Ethernet, con un sistema de hardware ADI, dando soporte a todas las variantes de placa FMComms, ADALM-PLUTO y ADRV, también permite conectar dispositivos basados en sistemas de interfaces industriales de entrada/salida (IIO) a una plataforma FPGA / SoC que se ejecuta sobre una distribución ADI Linux.

En este trabajo se usó el objeto del sistema IIO, el cual permite, que MATLAB o Simulink pueda transmitir datos desde y hacia un objetivo, controlar la configuración de un objetivo y monitorear diferentes parámetros de destino (Analog Devices, 2019).

Además, del uso de la biblioteca Libbio, desarrollada por Analog Devices para facilitar el impulso del software, que interconecta dispositivos Linux Industrial, proporciona una interfaz de programación amigable, está compuesta por una ‘Application Programming Interface de alto nivel, es decir, conjunto de reglas y especificaciones que las aplicaciones pueden seguir para comunicarse entre ellas y varios backends, uno local el backend “local”, que interconecta el kernel de Linux a través del sistema de archivos virtual de sysfs, y un backend de "red", que conecta el iiod servidor (Analog Devices, 2019).

a. Instalación y configuración de herramientas Libbio Linux/Zynq

Para la construcción de Libbio se mostrará paso a paso los comandos a usarse en la distribución GNU / Linux.

1. Recuperar las dependencias, que a partir de ahora solo es libxml2.

```
analog@analog: ~$ sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev bison flex libcdk5-dev  
cmake.
```

2. Dependiendo de cómo se desea conectar el dispositivo IIO, ya sea con el backend local o de red, es necesario que use al menos uno de los siguientes:

```
analog@analog: ~$ sudo apt-get install libaio-dev libusb-1.0-0-dev libserialport-dev libxml2-dev libavahi-client-dev doxygen graphviz.
```

3. Después, se clona el repositorio GIT

```
analog@analog: ~$ git clone https://github.com/analogdevicesinc/libiio.git
```

4. Finalmente se puede observar la biblioteca libiio / directorio.

```
analog@analog: ~/libiio$ cmake ./
```

```
analog@analog: ~/libiio$ make all
```

```
analog@analog: ~/libiio$ sudo make install
```

- b. Instalación y configuración de herramientas Libiio Windows

El instalador de Libiio en Windows se puede descargar desde <https://github.com/analogdevicesinc/libiio/releases>, como archivo libiio-0.18.g4e22517-Windows-setup.exe, con el tamaño de 2.32 MB.

La biblioteca Libiio requiere un sistema de compilación CMake el cual se encuentra disponible en la página <http://www.cmake.org/download/>, para compilar Libiio en Windows se requiere también de una biblioteca de enlace dinámico conocido como DLL, aquí se encontrará, archivos con código ejecutable, que serán cargados bajo demanda por parte del sistema operativo, pre compilados en el siguiente enlace <http://swdownloads.analog.com/cse/build/libiio-win-deps.zip>.

3.7.2.1.4 Instalación y configuración de herramientas en

MATLAB R2018B

Es indispensable tener dos elementos importantes en la PC como:

- a. Microsoft Visual C ++ 2013 Redistribuible

El cuál se encuentra disponible en la página oficial de Microsoft.

- b. Un compilador adecuado para su MATLAB. (Por ejemplo, Microsoft Windows SDK).

Microsoft Windows SDK proporciona los encabezados, las librerías, los metadatos y las herramientas actualizadas, para crear aplicaciones para Windows.

1. SDK se instaló desde el sitio oficial de Microsoft.
2. Configúrelo con 'mex -setup' en la ventana de comandos de MATLAB, aquí podremos observar un error, ya que el paquete de compatibilidad con MATLAB para el compilador C / C ++ de MinGW-w64, no se encuentra instalado.

2.1 Instalación de MinGW-w64

MinGW-w64 es un conjunto de compiladores para Windows, basado en la cadena de herramientas GNU, incluye un compilador GCC y herramientas relacionadas para compilar aplicaciones C y C ++ para Windows. Las aplicaciones C y C ++ compiladas con MinGW-w64 GCC se pueden llamar desde MATLAB usando MEX, éste compilador GCC también puede ser útil para otros productos de MathWorks que requieren un compilador C o C ++ (Mathworks, 2019).

- c. Analog Devices board support packages

Esta caja de herramientas, contiene el conjunto de bloques de radio frecuencia del transceptor AD9361 y AD9371 , además posee bibliotecas de los bloques Simulink de transmisor y receptor de RF adecuados para AD9361 , AD9363 o AD9364, los cuales nos permite:

- Predecir el impacto de las imperfecciones de RF en sus señales de prueba

- Generar o importar vectores de prueba y evalúe los efectos de la no linealidad, el ruido, la ganancia y el desequilibrio de fase, la fuga espectral y otras imperfecciones introducidas por el transmisor y receptor de RF.
- Evaluar los resultados en los dominios de tiempo o frecuencias de las señales de interferencia.
- Configurar el modelo de transceptor con la misma configuración que puede usar para programar el hardware.
- Diseñar sistemas de RF con una rápida simulación a nivel del sistema.
- Transmitir datos de RF a MATLAB y Simulink utilizando el hardware AD9361 y Xilinx Zynq-7000, siendo esta característica de gran significado para nuestro trabajo.

3.7.2.1.5 Comunicación entre dispositivos Linux industrial y transceptor AD9364

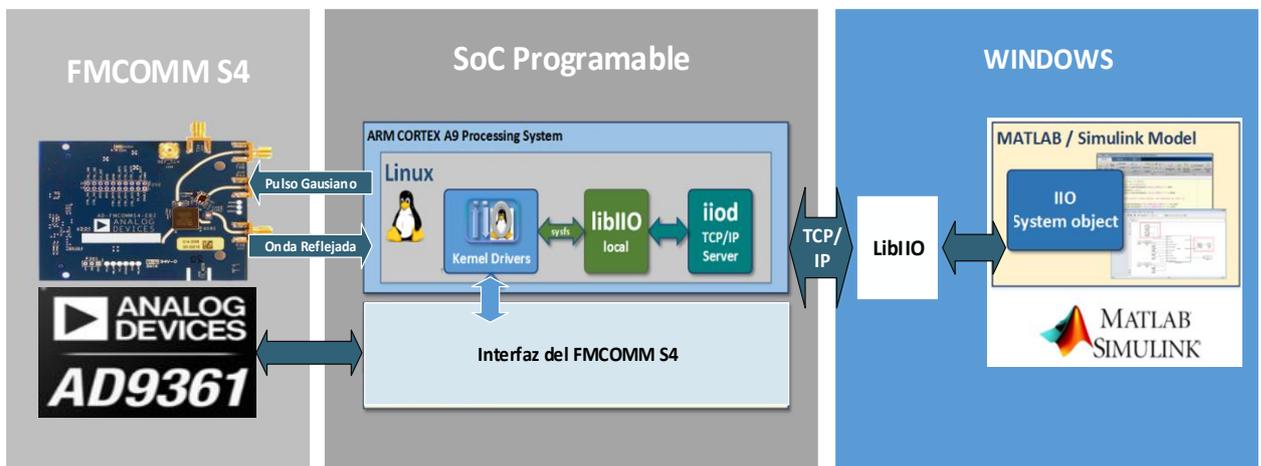


Ilustración 11. Comunicación entre Matlab y transceptor AD3964.

Fuente: Autores.

Empleando el enlace de red y el protocolo TCP/IP, el host fue conectado al zedboard 7000 (SDR), ya que tanto en el computador, como en la tarjeta FMCOMMS4, se

pudo instalar la biblioteca Libiio, con esta instalación la comunicación es transparente entre Matlab y las entradas y salidas del AD9364.

Para una exitosa comunicación en MatLab se debe trabajar con los archivos `iio_sys_obj.m`, `iio.h`, `libiio.dlla`, `libiio_if.m`, `libiio_if_daq2.m`, los cuales se los puede descargar de la página oficial mathworks.com, teniendo en claro que todos estos deben estar ubicados en una sola carpeta, además de configurar el archivo `.cfg` (configure file generic), en este caso se lo nombró `ad9364.cfg`, en este fichero fueron configurados los atributos, canales y drivers Linux asociados a la tarjeta AD9364, la cual se la puede ver en el Anexo 2.

En Matlab se creó un archivo de configuración que es específico del dispositivo ADI seleccionado que hace referencia al fichero `iio_sys_obj.m`. Los puertos de entrada y salida respectivamente se clasifican, como puertos de control y datos, los puertos de control se utilizan para configurar y monitorear diferentes parámetros, del sistema destino estos se pueden definir en el archivo de configuración, mientras que, los puertos de datos se usan para recibir/transmitir buffers de datos continuos desde / hacia el sistema de destino, el número y el tamaño de esto puertos se lo configura desde el script `iio_sys_obj_matlab.m`.

Este script fue configurado con dos canales de entradas I y Q, los cuales conforman una señal de salida vectorial a través de la tarjeta AD-FMCOMMS4-EBZ por el transmisor TXIA_A, también se configuró el parámetro del bloque de funciones, aquí se asignó la dirección IP, la cual representa la dirección IP de la plataforma destino, nombre del dispositivo, se debe asignar el nombre del archivo `.cfg`, número de canales de datos de entrada , en este caso dos, tamaño del canal de datos de entrada que es el número de muestras que tendrá un búfer de datos de entrada 32768, número de canales de datos de

salida, cuatro canales de salida para conformar dos señales vectoriales de entrada a Matlab, tamaño del canal de datos de salida, que es, el número de muestras que tendrá un búfer de datos 8192.

3.7.2.2 Transmisión y recepción de paquetes de información

La adquisición de los datos depende del problema a estudiar, así como de los resultados que se desea obtener estos métodos pueden ser perfiles o puntuales. En este estudio se optó por el método de adquisición de datos de forma puntual, ya que la antena transmisora y receptora se colocó en punto definido y no se los desplazó en ningún momento, emitiendo y receptando los datos de esa zona en concreto. Así se obtendrá la información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se sitúan las antenas. Para la colocación, tanto de la antena transmisora como receptora, es necesario tomar en cuenta ciertos parámetros, como:

3.7.2.2.1 Cálculo de la distancia mínima de no interferencia

Consisten en averiguar la distancia mínima a partir de la cual no se produce un solapamiento de la señal directa por el aire y la primera reflexión en el medio. Para ello se realiza un ensayo, en el cual se emite un pulso al aire, y se observa su duración de este modo y aplicando la Ecuación 11, la separación entre las antenas, y una placa metálica debe ser superior a x para que no exista este solapamiento.

$$\Delta t_{(teorico)} = \frac{2x}{c} \quad \text{Ecuación 11. Distancia mínima de no interferencia}$$

Donde x es la distancia de separación entre la antena y el reflector y c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el aire.

3.7.2.2.2 Zona de incidencia de radiación

Las antenas empleadas en tecnología radar, tienen la característica de ser direccionales, donde, el lóbulo principal contiene el 90 % de la energía radiada, la

intersección entre el cono principal y el reflector se la conoce como huella de la antena o zona de incidencia de radiación.

El cálculo del radio de la huella de la antena se la puede calcular de distintas formas, pero la más aceptada es, la primera zona de Fresnel y la propuesta por (Conyers & Goodman, 1997).

Según el estudio de las zonas de Fresnel, dada la Ecuación 12, se considera que la huella de la antena pertenecerá a la primera zona de Fresnel, con radio $d/2$.

$$d_1/2 = \left(\frac{\lambda^2}{4} + x \cdot \lambda\right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 12. Radio de la primera zona de Fresnel}$$

Donde x es la distancia de separación medida en centímetros entre la antena y la superficie reflectora y λ_0 es la longitud de onda en el vacío, la cual se la puede calcular según la Ecuación 13.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c} \quad \text{Ecuación 13. Longitud de onda.}$$

Donde c es la velocidad de propagación en el vacío y f_c es la frecuencia central de emisión de la antena.

Según los autores (Conyers & Goodman, 1997) la huella de la antena es el área iluminada por la antena, cuyo radio se calcula, mediante la Ecuación 14.

$$ra = \frac{\lambda}{4} + \frac{x}{\sqrt{\epsilon_{ef} + 1}} \quad \text{Ecuación 14. Huella de la antena.}$$

Donde ϵ_{ef} es la permitividad efectiva promedio del medio que atraviesa.

3.7.2.3 Tratamiento e interpretación de paquetes de información.

Para que los resultados finales sean fiables se debe realizar una correcta interpretación de los registros que proporciona el georradar conocido como radargrama, razón por la cual es necesario conocer los principales parámetros de registro como:

3.7.2.3.1 Análisis del cero de la antena

El cero de la antena es el punto en el radargrama a partir del cual hay que empezar a contar el tiempo de propagación, la posición de este punto dependerá si a la antena se coloca cerca o sobre el medio a estudio. Según el estudio (Yelf, 2004) del autor Richard Yelf, existen variadas opciones por las que se puede optar como punto cero de la antena como: a) primera ruptura de tendencia) punto de amplitud cero y c) primer máximo positivo, las cuales se visualiza en la Ilustración 12.

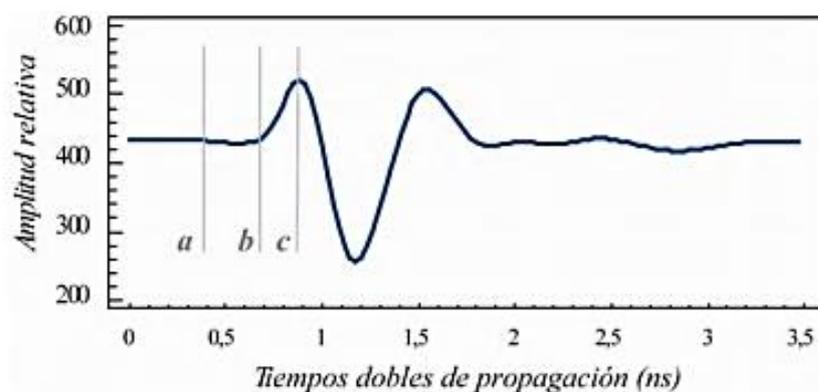


Ilustración 12: Esquema de una traza donde se indican los tiempos como cero de la antena: (a) primera ruptura de tendencia; (b) punto de amplitud cero y (c) primer máximo positivo.

Fuente: (Abad, 2009, pág. 139).

La posición cero depende de cada antena, de la distancia entre transmisor y receptor, de la distancia las antenas y el medio a estudio y de las propiedades eléctricas de dicho medio (Yelf, 2004).

En la toma del punto cero de la antena sobre el hormigón se realizaron varios ensayos, siguiendo el principio de (Abad, 2009) en el cual sitúan, las antenas a distancias conocidas sobre una superficie metálica, de forma que se pueda distinguir perfectamente la señal directa y la reflexión en la placa metálica. La placa metálica permanece fija y se van realizando mediciones puntuales a diferentes distancias de separación, las dimensiones del

reflector metálico son tales que la huella de la antena queda dentro de la superficie metálica.

La lectura del cero de la antena al situarla sobre el hormigón, siguiendo el criterio ya establecido se observó que, en la mayoría de los casos la primera ruptura de tendencia no puede ser identificada, porque está demasiado atenuada, motivo por el cual para poder comparar tiempos de llegada, tanto de la onda directa como de la reflejada, se aplicó la toma de datos desde el primer máximo positivo de cada señal, es decir la posición c), ya que su mayor amplitud hace más sencilla su identificación.

3.7.2.3.2 Presupuesto del enlace inalámbrico

MEDIO	dB
Potencia de salida	40dBm
4m cable Rg-58 para Tx	-2.12dB
Antena Rx	8dBi
Hormigón	-20dB
Antena Tx	8dBi
4m cable Rg-58 para Rx	-2.12dB
4 conectores SMA	-0.3dBx4= -1.2 dB
Potencia Recibida	30.56dBm

Tabla 7.- Presupuesto de potencia

Fuente: Autores

3.7.2.3.3 Amplificación de la señal recibida

Amplificar la señal recibida durante la adquisición de datos o durante el procesamiento, tiene como objetivo la disminución de los efectos de atenuación, aunque el aplicar una ganancia elevada puede amplificar el ruido electrónico del aparato, y del cableado o de emisiones a las mismas frecuencias que se estén registrando, dando lugar a

registros confusos, es por ello que se optó por el control automático independiente de ganancia.

3.7.2.3.4 Filtrado y suavizado de la señal recibida para su procesamiento

La opción de aplicar un filtrado simultáneo con la adquisición de datos resulta no idónea, ya que esta impedirá que se pueda registrar parte de la señal que llega a la antena receptora, pudiendo perder datos que pudiesen ser de interés, razón por la cual no se optó por aplicar un filtrado simultaneo, en su lugar se filtró la señal recibida por el receptor para su procesamiento.

La señal recibida, se puede observar en la Ilustración 13, evidenciando la necesidad de realizar un filtrado, para la eliminación del ruido, el filtro usado, es un pasa banda, el cual, permitió pasar el rango donde se encuentra los datos que conforman la señal, y atenuó el resto.

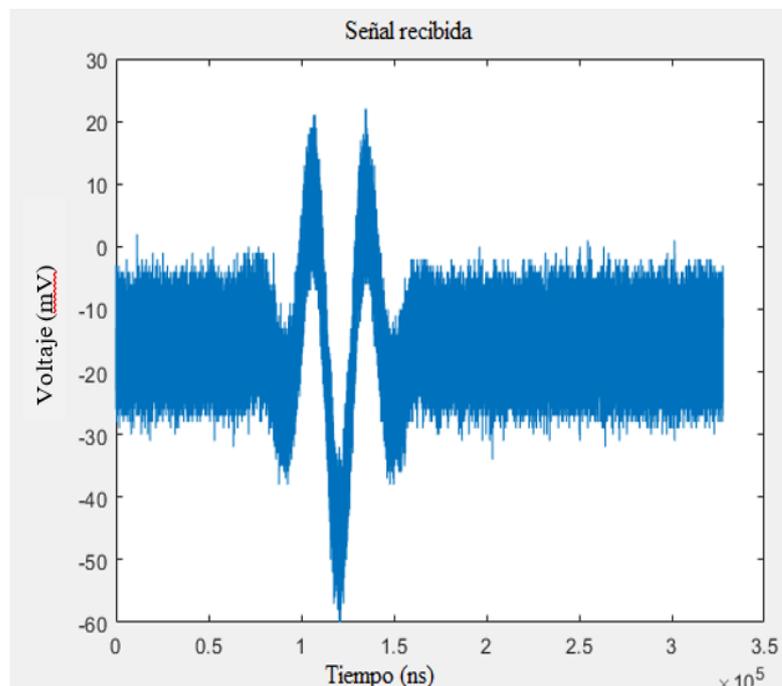


Ilustración 13. Señal recibida, antes de ser procesada.

Fuente: Autores

Una vez, realizado el filtrado, para la toma correcta, de datos de las amplitudes que conforman la señal, se procede a realizar un suavizado, dando como resultado una onda óptima para ser analizada, como se puede observar en la Ilustración 14.

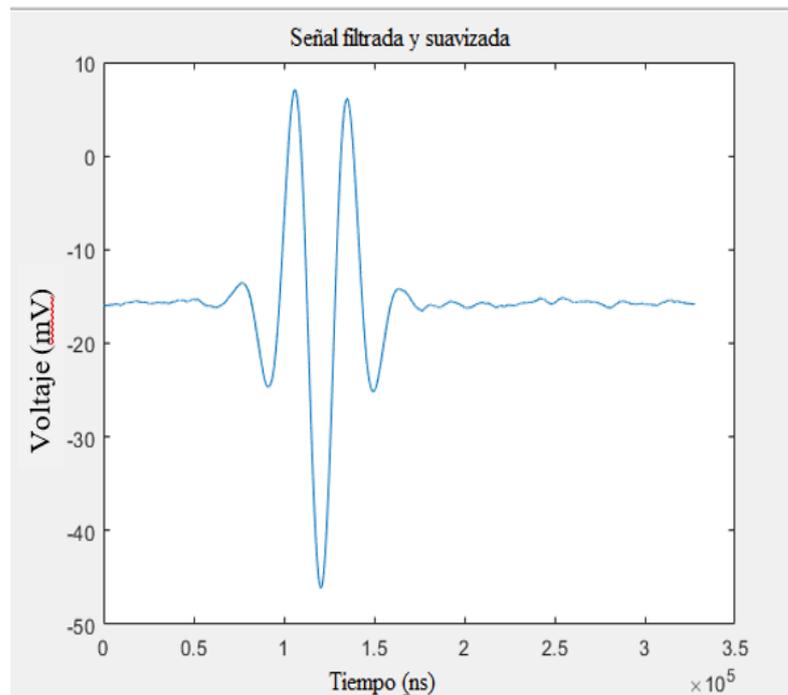


Ilustración 14. Señal filtrada y suavizada.

Fuente: Autores.

3.7.2.3.5 Registro de amplitudes

Cada traza que forma parte del radargrama es un registro de las amplitudes correspondientes a las reflexiones producidas en el interior del hormigón, los incrementos de amplitud que se produzcan en las trazas, son debido al aporte de la energía proveniente de las reflexiones, ocasionadas durante la propagación de la señal por el medio, estos registros son de amplitudes y de tiempos de propagación.

3.7.3 Método para la obtención de los parámetros electromagnéticos.

La antena transmisora emite un impulso electromagnético que se transite por el interior del hormigón y es reflejado por toda la superficie que presenta una impedancia

eléctrica diferente, las reflexiones en distintas interfaces son recogidas por la antena receptora.

En primer lugar, se registra la señal directa, consiste en la suma de la energía propagada directamente entre el transmisor y el receptor en el aire, y la que se propaga en la parte más superficial de la muestra de hormigón.

Después, se registra la onda electromagnética que se refleja en el material metálico situado en la parte inferior de la probeta, a esta se le denomina onda reflejada, se observa que la onda directa y la onda reflejada son de distintas polaridades, esto en consecuencia a la colocación del reflector metálico, el cual se lo coloca para evitar el efecto de borde, ya que la energía de las ondas reflejadas en el contorno es despreciable frente al valor de la energía reflejada en la interfaz hormigón-metal.

Con estas trazas se puede medir los parámetros de las ondas directas y reflejadas es decir tiempos de llegada y amplitudes de cada uno de los máximos y mínimos por los que están compuestos (D1, D2, D3, D4-R1, R2, R3, R4), a partir de estos se procede a calcular la velocidad de propagación para determinar el mejor coeficiente de correlación ajustado de las ondas al interior de la probeta y el nivel de energía recibido por la antena.

Por medio del diferencial de tiempos Δt_D^R de llegada entre la onda directa y la onda reflejada, se calcula la velocidad de propagación, según la Ecuación 15.

$$v = \frac{2 \cdot d}{\Delta t_D^R} = \frac{\left(2x \sqrt{h^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}\right)}{\Delta t_D^R} \quad \text{Ecuación 15. Velocidad de propagación en términos de tiempos de llegada.}$$

Donde d es la semidistancia que recorre la onda reflejada, d_0 la distancia entre transmisor y receptor y h es el espesor del medio.

Una vez, calculada la velocidad de propagación, se determina las propiedades dieléctricas del mismo, un cambio en estas propiedades indicará una variación entre las

propiedades físicas de cada probeta, como es de conocimiento, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio están relacionadas con la permeabilidad magnética, la conductividad y la permitividad dieléctrica de ese medio, pero ya que el hormigón es un material no magnético de baja conductividad y de bajas pérdidas dieléctricas, la permitividad dieléctrica relativa efectiva del material (ϵ_r) se la puede calcular mediante la Ecuación 16.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad \text{Ecuación 16. Permitividad dieléctrica relativa efectiva.}$$

Donde c es la velocidad de propagación en el vacío, y v es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas al interior del medio.

El nivel de energía recibido de las ondas en dB se lo calcula según la Ecuación 10 donde A_i es la amplitud registrada en la traza y A_0 es la amplitud del primer máximo positivo cuando se realiza la primera emisión en el aire, es decir onda directa.

Con la obtención de estos datos como tiempos de propagación, velocidades de propagación de las ondas electromagnéticas, permitividad dieléctrica relativa efectiva, amplitudes del máximo de las ondas y niveles de energía recibidos se procede a la tabulación de datos para su posterior entrenamiento en el machine learning.

3.7.4 Diseño de la interfaz de usuario de control del sistema.

Para la interfaz de usuario se utilizó el software GUIDE MATLAB, el cual nos permite por interfaz gráfica llamar a funciones, dibujar, entre otras, además que la finalidad del desarrollo de esta interfaz gráfica es hacerlo lo más amigable posible.

La pantalla principal cuenta con dos botones inicio y salir, que se visualiza en la Ilustración 15, al presionar el botón inicio se cargará una ventana llamada sistema, donde se puede observar, varias opciones como se observa en la Ilustración 16.



Ilustración 15. Pantalla principal de la interfaz de usuario.

Fuente: Autores.



Ilustración 16. Interfaz de usuario.

Fuente: Autores.

1. El botón enviar pulso

La caja de herramientas de Matlab posee una aplicación llamada Classification Learner, la cual entrena modelos para clasificar datos, además que

explora el aprendizaje automático supervisado utilizando varios clasificadores, selecciona características, especifica esquemas de validación, y evalúa resultados

Este botón llama a la función btn-cargar, la cual recolecta los datos procesados, además de importar el modelo generado por el Classification Learner, para dar como resultado una predicción.

2. El botón configuraciones avanzadas. - abrirá una ventana que se puede observar en la Ilustración 17, en la cual se podrá configurar las muestras con las cuales se entrena el modelo, este modelo será capaz de, predecir una resistencia aproximada del hormigón, esta ventana cuenta con:

1. **Enviar Pulso.** - se encarga de la comunicación entre Libio-matlab, es decir, aquí se genera el impulso para que posteriormente se envíe por la antena transmisora y sea receptada por la antena receptora la cuál al ingresar la señal y ser procesada se obtendrá la diferencia de tiempos y amplitudes entre la onda directa y la onda reflejada, datos que serán requeridos para el cálculo de la velocidad, permitividad y niveles de energía.
2. **Lista de opciones a asignar.** - aquí se asigna la señal a la probeta correspondiente según se requiera.
3. **Generar tabla D-R.** - este botón cumple la función de mostrar las diferentes combinaciones entre la onda directa y reflejada de todas las probetas ingresadas, aquí se debe inclinar por la gráfica con menores alteraciones es decir la más constante.
4. **Lista de combinaciones.** - según las gráficas se selecciona la combinación ideal.
5. **Velocidad.** - este botón proporciona el valor de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas de cada probeta.

6. **Permitividad.** - este botón proporciona el valor de la permitividad relativa efectiva de cada probeta.
7. **Niveles de energía.** - este botón proporciona el valor de los niveles de energía de cada probeta.
8. **Reset.** -elimina todos los archivos generados por el sistema.
9. **Generar datos para entrenamiento.** - este botón cumple una de las funciones más importantes de toda la interfaz, ya que, aquí se genera la tabla que sirve como entrada para el Classification Learner aplicación, que permite generar el modelo de machine learning óptimo según lo requiera.



Ilustración 17.Interfaz configuraciones avanzadas

Fuente: Autores.

3. **El botón salir.** – Una vez finalizado el proceso de caracterización, el botón salir permite cerrar la interfaz del sistema.

3.7.5 Algoritmo de aprendizaje automático para procesamiento y clasificación de datos obtenidos de probetas de hormigón.

La totalidad del Algoritmo de aprendizaje automático se realizó en Matlab, mediante la interfaz desarrollada, específicamente a través la ventana “configuraciones avanzadas”.

3.7.5.1 Algoritmo clasificador

Cuando existe la necesidad de un clasificador, se dispone de un gran número de algoritmos. Matlab posee una APP llamada “Classification Learner” para dar soporte a tareas de aprendizaje automático. Esta aplicación se ejecuta desde la ventana “configuraciones avanzadas” de la interfaz del sistema, cuando se haya generado todos los buffers con las variables necesarias para este proyecto.

En la APP mencionada, se debe completar tres pasos antes de iniciar el entrenador para distintos algoritmos de clasificación, como se observa en la Ilustración 18.

- Importar los datos.
- La APP distingue y etiqueta automáticamente los predictores y la variable respuesta.
- Con la opción Cross- validation, se dividen los datos en datos de entrenamiento y de validación.

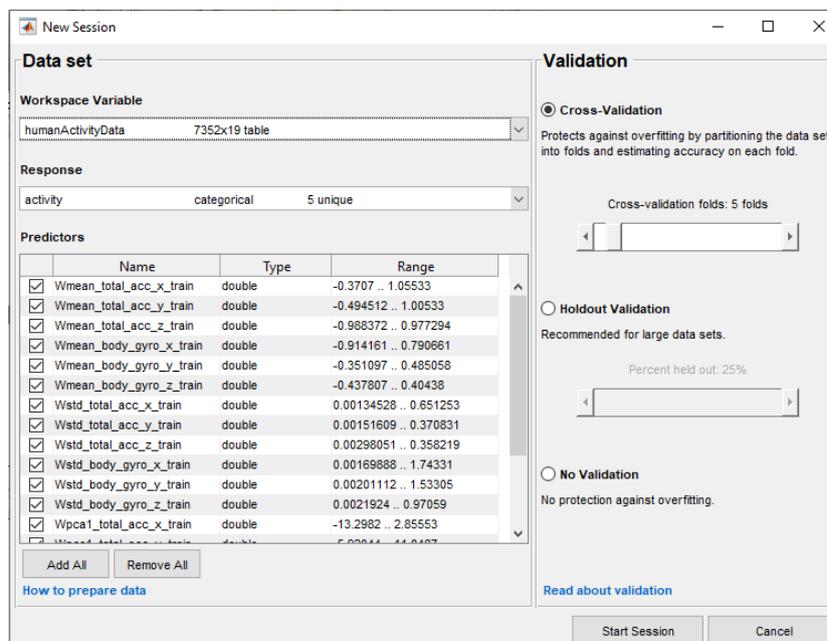
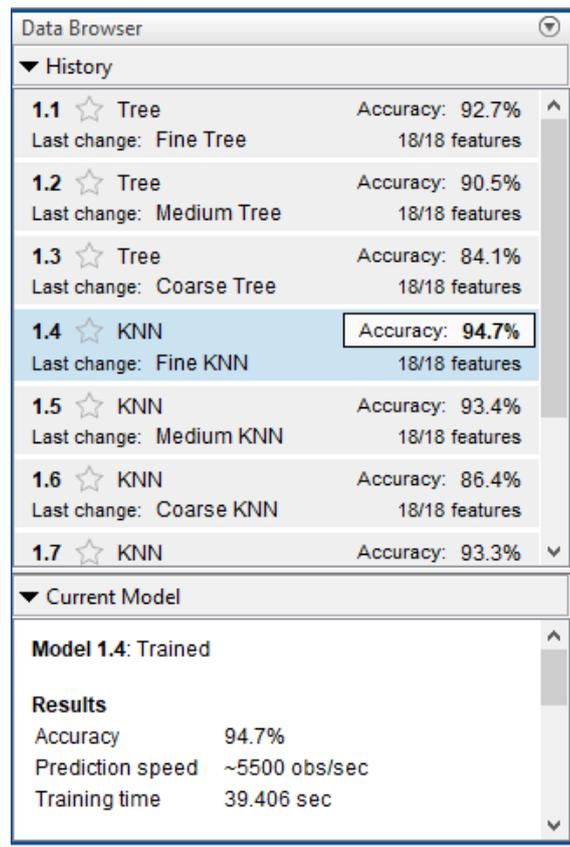


Ilustración 18. Ventana principal del Classification Learner.

Fuente: Autores.

Se explora diferentes algoritmos de clasificación y se testea cada uno para encontrar el algoritmo que posea mayor precisión.

Cuando el entrenamiento finaliza la herramienta indica la precisión con la que el algoritmo es capaz de predecir y señala en color blanco el mejor de ellos, como se puede observar en la Ilustración 19.



Data Browser		
▼ History		
1.1 ☆ Tree	Accuracy: 92.7%	18/18 features
Last change: Fine Tree		
1.2 ☆ Tree	Accuracy: 90.5%	18/18 features
Last change: Medium Tree		
1.3 ☆ Tree	Accuracy: 84.1%	18/18 features
Last change: Coarse Tree		
1.4 ☆ KNN	Accuracy: 94.7%	18/18 features
Last change: Fine KNN		
1.5 ☆ KNN	Accuracy: 93.4%	18/18 features
Last change: Medium KNN		
1.6 ☆ KNN	Accuracy: 86.4%	18/18 features
Last change: Coarse KNN		
1.7 ☆ KNN	Accuracy: 93.3%	
▼ Current Model		
Model 1.4: Trained		
Results		
Accuracy	94.7%	
Prediction speed	~5500 obs/sec	
Training time	39.406 sec	

Ilustración 19. Modelos de clasificación entrenados

Fuente: Autores.

La misma APP contiene distintas herramientas de diagnóstico, por ejemplo, la matriz de confusión, que indica el porcentaje de aciertos y errores, respecto al valor real. Una diagonal entera verde sin nada fuera, indica el 100% de aciertos en la predicción. (Ver Ilustración 20).

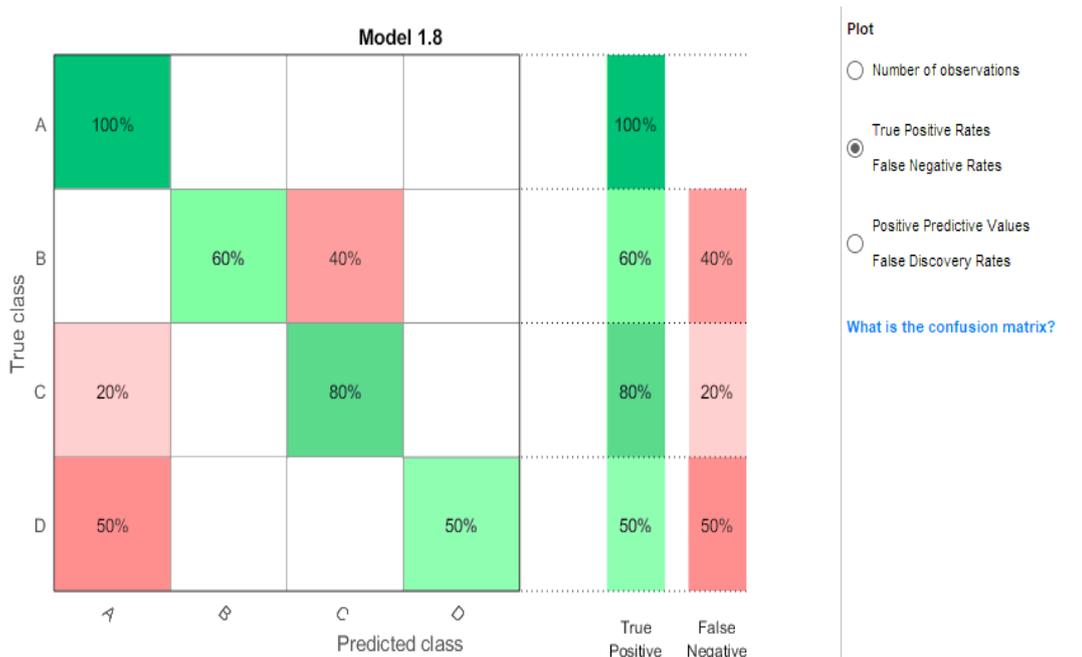


Ilustración 20. Matriz de confusión.

Fuente: Autores.

El código del modelo se genera y exporta de manera interactiva a la carpeta del proyecto, para de esta manera automatizar el trabajo.

Dentro de este modelo es importante definir tres parámetros; definición de las variables, entrenamiento y validación del clasificador. Esto genera un clasificador disponible para utilizarlo sobre un vector de características desconocidas.

3.7.5.2 Preparación de variables para el entrenamiento del algoritmo

Para el desarrollo del algoritmo se cuenta con las variables obtenidas a partir de la toma de datos de cada una de las probetas de hormigón, estas variables son: los valores de constante dieléctrica, velocidades de propagación y los niveles de energía transmitida, que se encuentran contenidas dentro de un buffer respectivo.

Mediante la función “varfun” se hace uso de las funciones Wmean, Wpcal y Wstd, desarrollados y guardados en el “Current folder”, para extraer las características de los datos, tales como; la media, y desviación estándar, respectivamente. Posteriormente se

guardan en una tabla, de manera que haya nombres asociados a cada una de las características, esta tabla también incluye una columna al final, llamada ActivityID, donde se encuentra un valor asociado a la resistencia que corresponde a cada variable (ver Anexo 6).

CAPÍTULO IV.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la adquisición de datos, métodos para obtención de los parámetros electromagnéticos, y sistema de aprendizaje automático.

4.1 Resultados obtenidos en la adquisición de datos.

En la Ilustración 21, se presenta la señal adquirida de uno de los 20 puntos de registros tomados por cada muestra, tras la emisión de la onda por medio de una antena a 1.2 GHz sobre la placa metálica (onda directa), y su señal reflejada a través de la probeta de hormigón, con una altura reflector- antena de 32cm, una distancia de 37cm entre antenas, y un ángulo de incidencia de 65° .

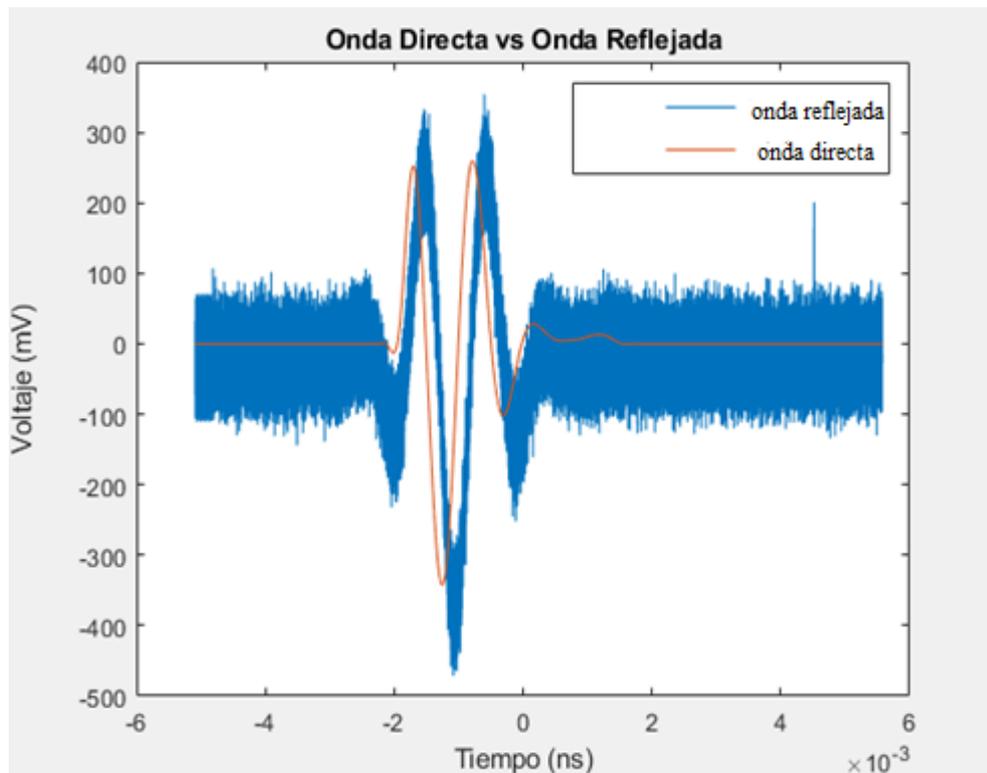


Ilustración 21: Onda directa y Onda reflejada.

Fuente: Autores

Todas las señales registradas tienen un mismo patrón, en la que se puede identificar las siguientes: onda directa (azul) y la onda reflejada(naranja). La onda directa es la señal receptada tras la emisión del pulso electromagnético que se refleja directamente sobre la superficie de la placa metálica, y la onda reflejada es la que se propaga al atravesar toda la probeta de hormigón, tras rebotar en el reflector metálico.

Al tener reconocidas tanto la onda directa como la reflejada, se identifica los puntos característicos de cada una de las reflexiones, se denominó D1, D2, D3, D4 a los máximos que corresponden a la onda directa y R1, R2, R3, R4, a los máximos de la onda que viaja a través del hormigón y se refleja en el metal, como se observa en la Ilustración 22

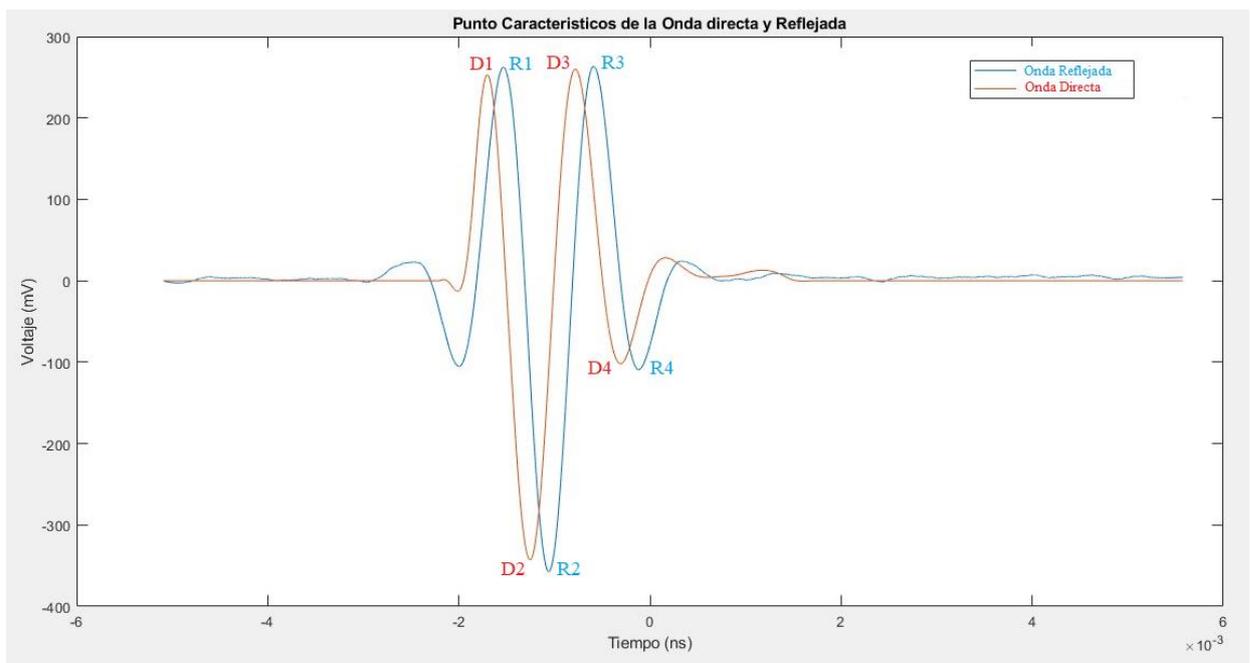


Ilustración 22.- Puntos característicos de la onda directa y la onda reflejada.

Fuente: Autores.

La onda está conformada por diversos máximos, es complejo establecer cuál de ellos debe ser elegido como el más representativo de llegada inicial de la onda, por ello, se calculan todos los intervalos de tiempo de llegada posibles, de cada uno de los máximos que componen las ondas y se analiza cuál de ellos tiene un comportamiento más representativo según la resistencia a la compresión, una vez analizadas todas las

combinaciones como se puede ver en el Anexo 5, se promediaron los valores obtenidos en los puntos de registro de la probeta.

Promediado estos valores, para la obtención de la velocidad de propagación, permitividad relativa y niveles de energía, se realizó el cálculo del coeficiente de correlación ajustado (R^2), para el análisis y obtención del intervalo de tiempo (Δt) más representativo de entre todas las combinaciones posibles de Δt .

	$y(x)=a+bx+cx^2$			
Intervalos de tiempo (Δt)	a	b	c	R^2
R1-D1	-0,9139	-28,29	221,1	0,956
R1-D2	-0,1777	-97,132	-3644	0,921
R1-D3	0,9876	55,944	-1041,4	0,882
R1-D4	-15,589	-624,33	5221	0,961
R2-D1	-1,062	74,793	6811	0,973
R2-D2	3,050	-506,97	3942	0,872
R2-D3	-0,0308	-0,4227	2048	0,06
R2-D4	-0,0006	0,2216	309,61	0,026
R3-D1	0,0001	0,0663	-338	0,166
R3-D2	0,0014	-2,2876	3359	0,693
R3-D3	1,54	-944,04	4510	0,048

R3-D4	0,001	-0,3518	-2973,2	0,025
R4-D1	-0,0003	0,2413	-3035,6	0,426
R4-D2	-7e5	0,3311	-8852,2	0,968
R4-D3	0,0002	0,0122	-202,09	0,386
R4-D4	0,0009	0,5344	-2718,5	0,075

Tabla 8: Resultados de la ecuación de correlación ajustada para cada uno de los intervalos de tiempo.

Fuente: Autores.

En la Tabla 8, se puede observar que el mejor coeficiente de correlación ajustado ($R^2=0,97$) se obtienen cuando las velocidades son calculadas con los tiempos transcurridos, entre los tiempos de llegada de los máximos R2-D1. También se obtuvo buenos resultados con R1-D1, como se puede observar en la Ilustración 23. Por otro lado, los peores resultados se obtuvieron con las combinaciones donde se involucran R3 y R4, como se puede observar en la Ilustración 24, debido a que son los máximos con menor amplitud.

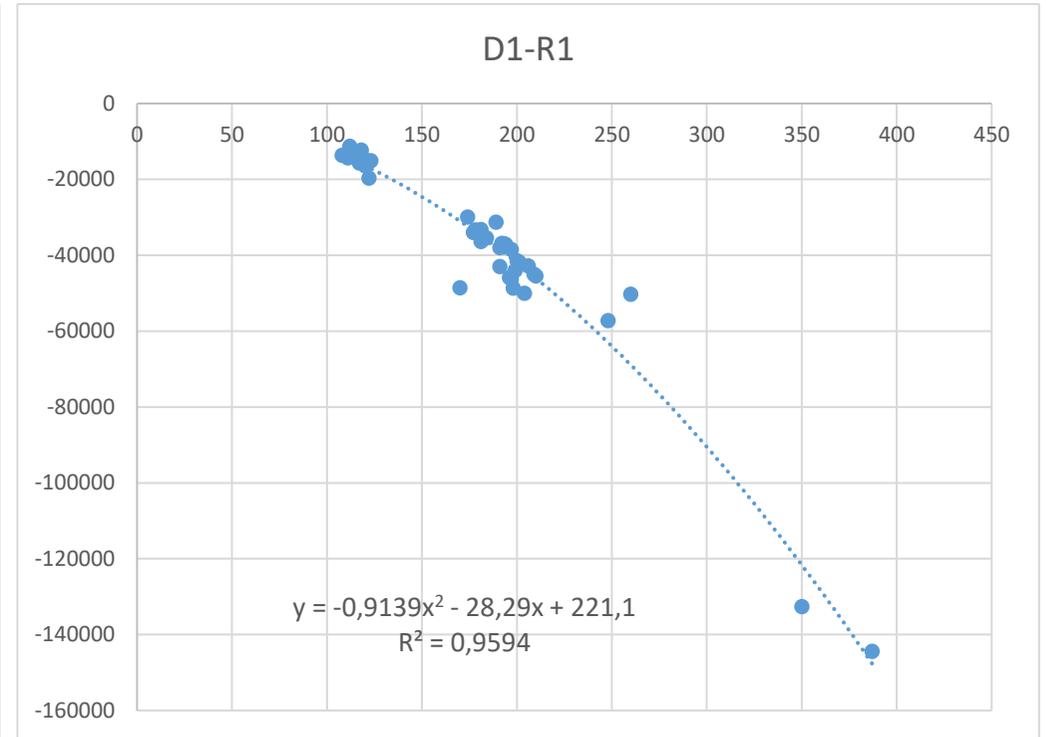
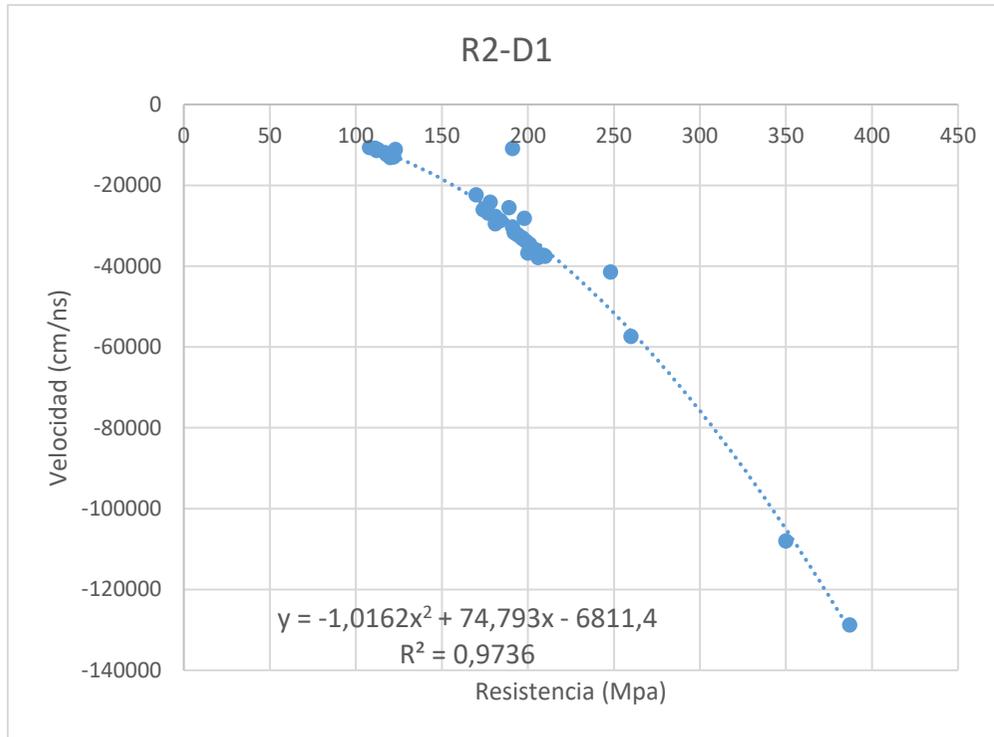


Ilustración 23: a) Coeficiente de correlación de la combinación R2-D1, b) Coeficiente de correlación de la combinación D1-R1.

Fuente: Autores.

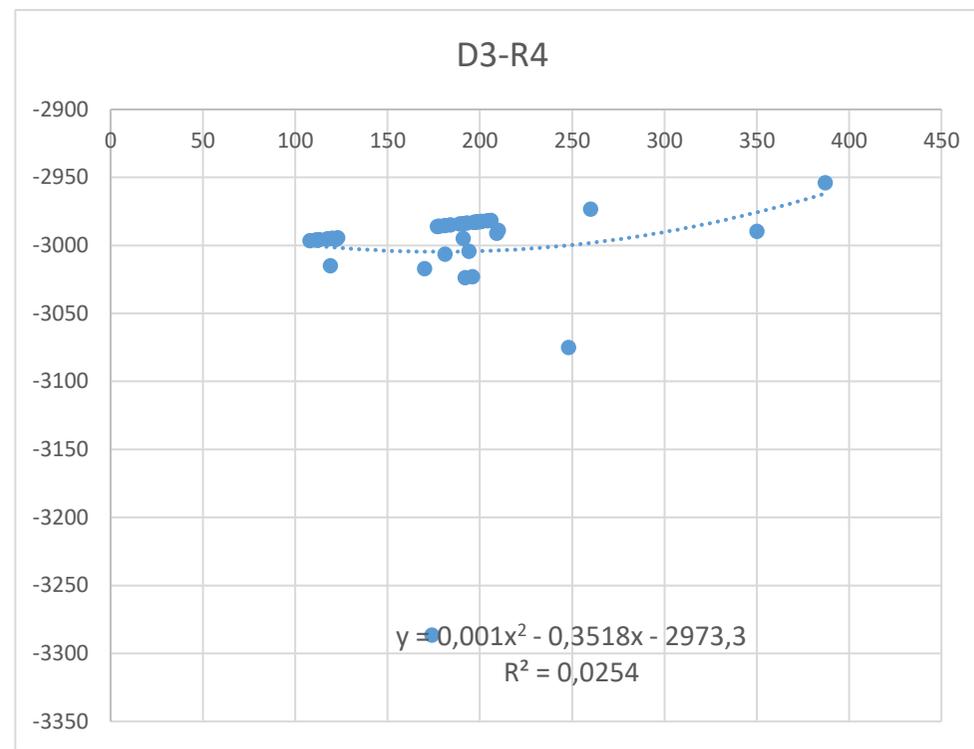
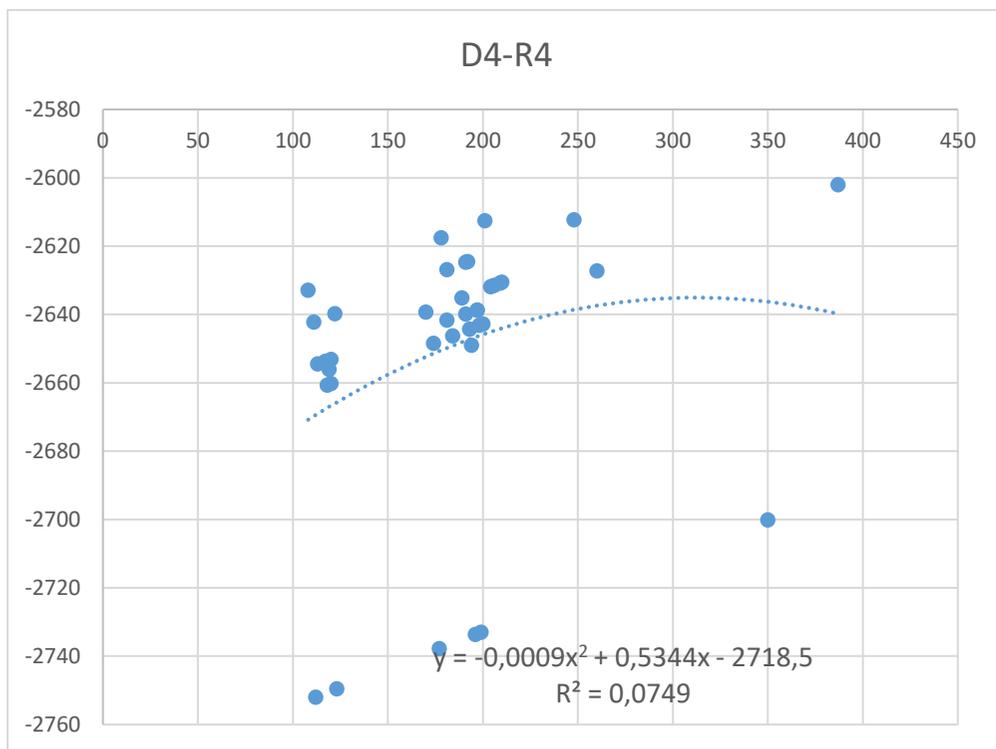


Ilustración 24.a) Coeficiente de correlación de la combinación D4-R4, b) Coeficiente de correlación de la combinación D3-R4

Fuente: Autores

4.2 Resultados de la obtención de los parámetros electromagnéticos.

Tras la obtención del mejor coeficiente de correlación de la combinación, más representativa R2-D1, se calcula la velocidad de propagación para cada probeta, en la Ilustración 25, se puede observar el comportamiento que tiene la velocidad de propagación, en relación con su resistencia.

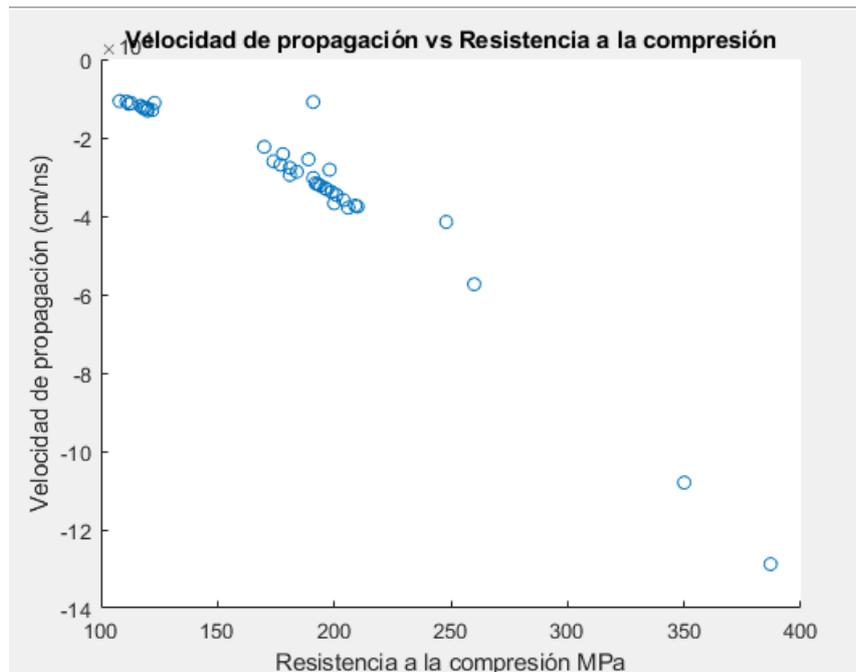


Ilustración 25: Comportamiento de la velocidad de propagación vs. Resistencia a la compresión ordenada ascendentemente.

Fuente: Autores.

En la Ilustración 25, el eje X representa a las 39 probetas de hormigón con distintos valores de resistencias, el eje Y representa a la velocidad de propagación de cada una de ellas, donde se puede evidenciar que no existe una correlación directa entre las dos características.

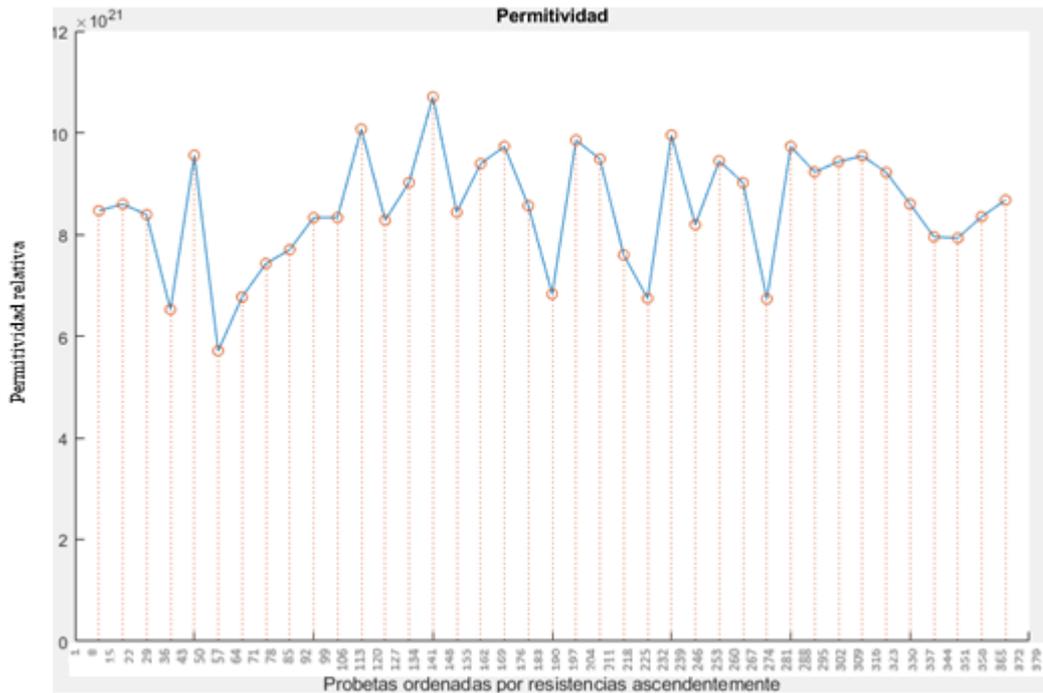


Ilustración 26. Variación de la permitividad relativa según las muestras de hormigón.

Fuente: Autores

En la Ilustración 26, se observa el comportamiento de la permitividad relativa según las muestras de hormigón, notando que desde la probeta 6 con el valor de la resistencia 119MPa hasta la probeta 18 con 189MPa tiene un comportamiento ascendente es decir la permitividad aumenta a medida que la resistencia sube, entre estos dos rangos.

4.3 Resultados del sistema de aprendizaje automático.

En la Tabla 9, muestra los algoritmos que presentan un porcentaje de fiabilidad aceptable, entrenados mediante variables que son funciones estadísticas (media, desviación estándar y los componentes principales), aplicadas a los parámetros electromagnéticas de las probetas, utilizando el método de validación cruzada que proporciona una estimación alta a la predicción de pequeños conjuntos de datos, que dan un rango de valores aproximados a la resistencia a la compresión del hormigón.

Algoritmo	Porcentaje
KNN	92.3%
Weighted KNN	
KNN	92.3%
Fine KNN	
Ensemble	89.7%
Bagged Trees	
Ensemble	85.9%
Boosted Trees	
SVM	50%
Linear SVM	
Linear Discriminant	Failed
Quadratic Discriminant	Failed

Tabla 9: Algoritmos clasificadores con porcentajes de fiabilidad más significativos.

Fuente: Autores.

Se puede observar que los algoritmos KNN vecinos más próximos, presentan una fiabilidad del 92.3%, esto puede deberse a que este tipo de algoritmos tienen la capacidad de estimar valores de la función de densidad de probabilidad o directamente la probabilidad a posteriori de que un elemento x pertenezca a la clase; es decir de que los datos pertenecientes a una nueva muestra pertenezcan a la clase o rango de resistencias en nuestro caso.

Los algoritmos ensemble, presentan 85% -89% de fiabilidad, probablemente porque este tipo de algoritmos divide al conjunto de datos de entrenamiento en subconjuntos para generar múltiples modelos y establecer un modelo general a partir de estos, la combinación de algoritmos de aprendizaje supervisado en este trabajo produce un modelo sobre ajustado, haciéndolo no óptimo en nuestro estudio.

EL algoritmo de máquinas de vectores de soporte (SVM) presenta un 50% de fiabilidad, está estrechamente relacionado con problemas de clasificación y regresión, se entrena con un conjunto de muestras etiquetando clases, para construir un modelo SVM que prediga a la clase que pertenece la nueva muestra, se puede observar que tiene un margen de separación débil, ya que los datos de las distintas observaciones no son perfectamente separables dándonos un índice de error elevado.

El análisis discriminante lineal presenta 0% de fiabilidad ya que este algoritmo solo puede ser usado para problemas de clasificación con dos clases, haciéndolo descartable para este estudio, mientras que el análisis mediante el modelo discriminante cuadrático se encuentra estrechamente relacionado con el método de análisis discriminante lineal, las mediciones de los datos no se distribuyen normalmente, haciendo que este algoritmo también sea descartado.

La implementación del algoritmo K-vecinos más cercanos (KNN Weighted KNN), en la Ilustración 27, muestra que el número de respuestas erróneas es poco significativo en relación con el número de predicciones acertadas, usando los predictores; la media de la permitividad relativa y la media de los niveles de energía. Este comportamiento se ve reflejado en el resto de las variables estadísticas usadas.

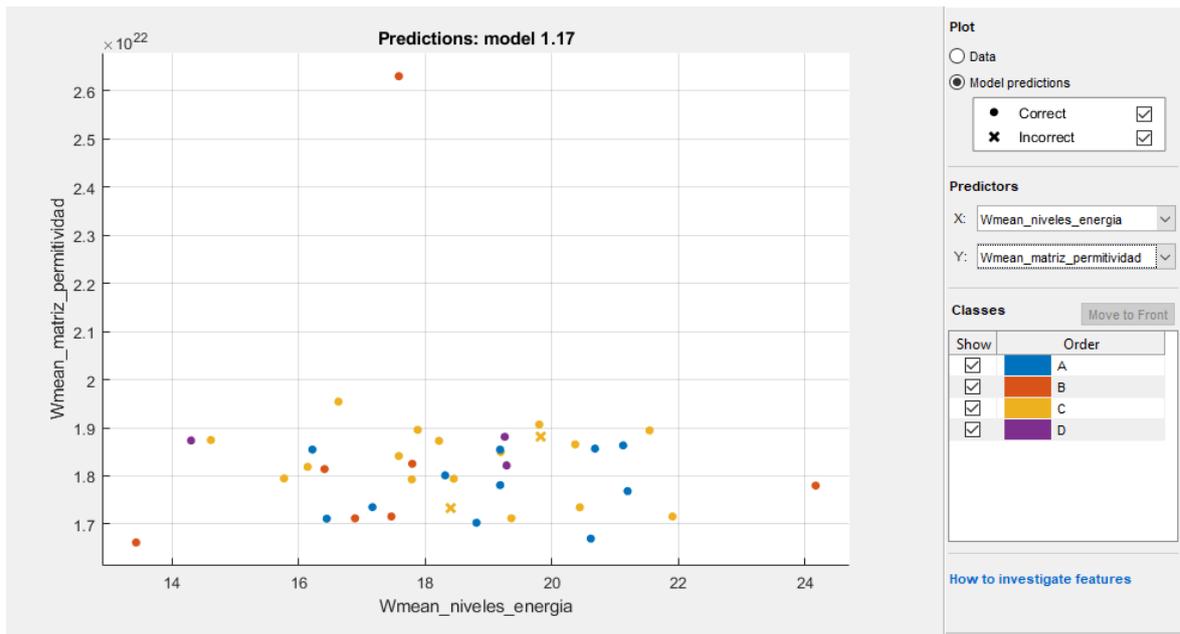


Ilustración 27. Distribución de datos estadísticos de niveles de energía y permitividad relativa para el algoritmo Weighted KNN.

Fuente: Autores.

En la Ilustración 28, se puede observar los patrones en 2D de los datos de alta dimensión, esta ilustración ayuda a relacionar las distintas características para identificar los predictores idóneos que separan eficientemente las clases, notando que al clasificar los grupos las líneas discontinuas muestran los puntos mal clasificados, en este caso la característica más relevante es la permitividad relativa.

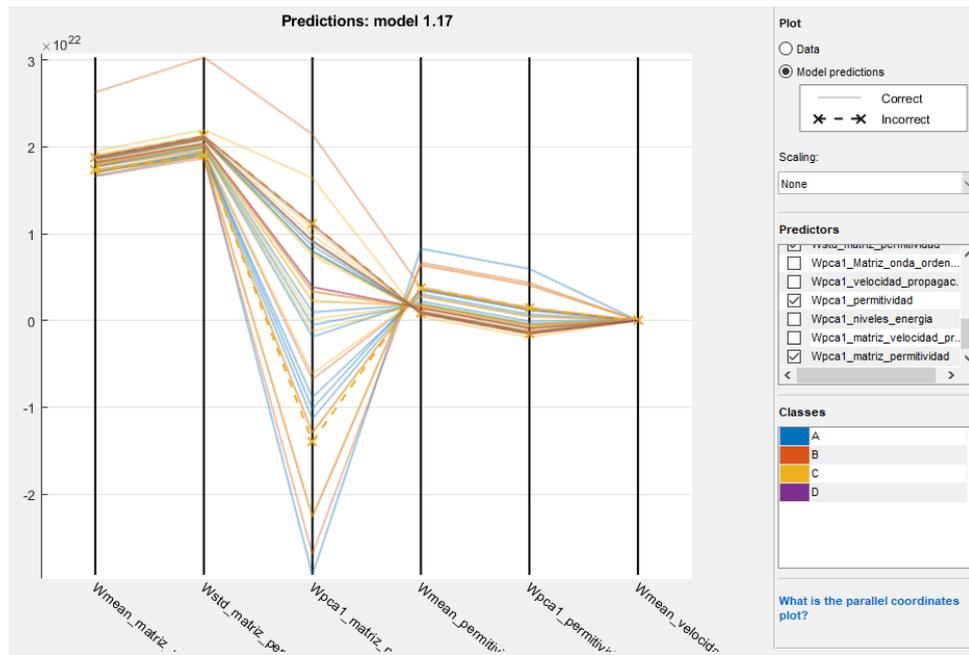


Ilustración 28. Coordenadas paralelas de la distribución de datos para el algoritmo Weighted KNN.

Fuente: Autores.

En la Ilustración 29, se observa la curva de características de funcionamiento del receptor (ROC), muestra una tasa positiva verdadera (TPR) frente a una tasa de falsos positivos (FPR). La FPR de 0.0 indica que el clasificador KNN Vecinos más cercanos asigna el 0% de las observaciones incorrectamente a la clase positiva, y la TPR de 0.75 asigna el 75% de las observaciones correctamente a la clase positiva. El valor del área bajo la curva (AUC) es la medida de la calidad del clasificador, en este caso 98% para la categoría D.

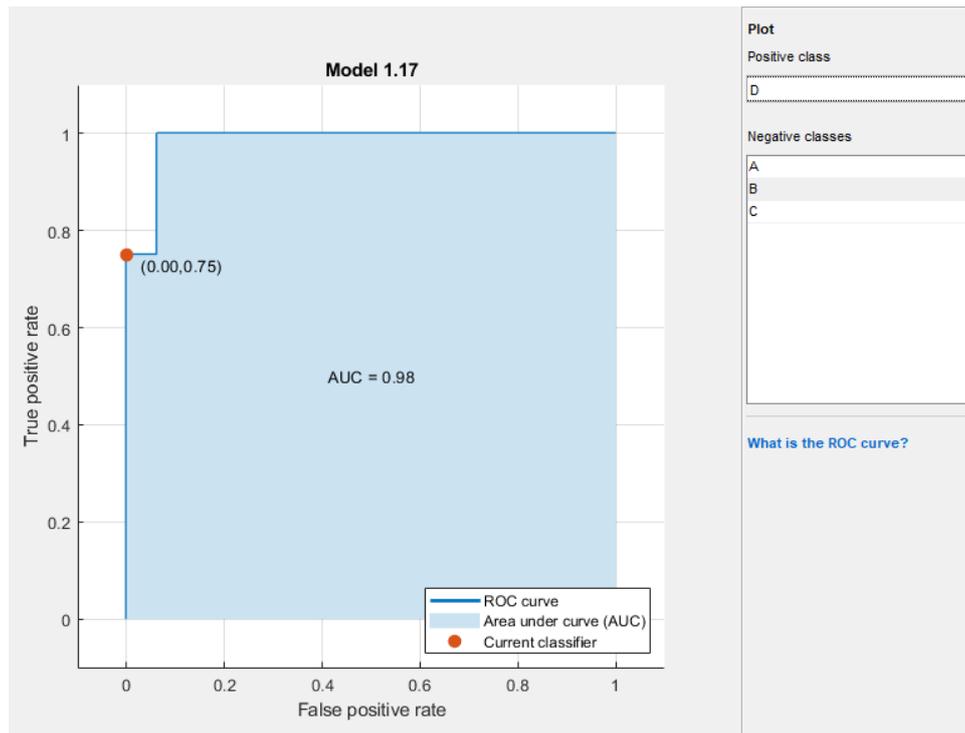


Ilustración 29. Características de funcionamiento del receptor para los datos de la categoría D, para el algoritmo Weighted KNN.

Fuente: Autores.

La Ilustración 30 indica que, de cada 22 muestras correspondientes a la categoría A, el algoritmo podría acertar exitosamente 20 muestras y posiblemente dará 2 predicciones erróneas, estas 2 predicciones erradas podrían asignarse equivocadamente a la categoría C, también, de las 16 muestras catalogadas como B, 14 de ellas podrían ser predichas exitosamente y 2 tomarían rangos erróneos y ser asignados a la categoría C, por otro lado, de las 32 muestras de la categoría C, 30 de ellas podrían ser asignadas correctamente y las resultantes probablemente serán catalogadas de manera errónea como muestras clase A, finalmente el total de muestras asignadas a la categoría D podrían ser predichas correctamente.



Ilustración 30. Matriz de confusión para el algoritmo Weighted KNN.

Fuente. Autores.

La Ilustración 31, presenta una matriz de confusión con el porcentaje de predicciones acertadas y predicciones erradas, de cada categoría, donde se puede observar que las predicciones realizadas a muestras pertenecientes a las categorías B y D serán 100% fiables, mientras que, tras aplicarse el modelo predictivo a muestras pertenecientes a las categorías A y C, presentan un porcentaje de error del 9 % y 12% respectivamente.

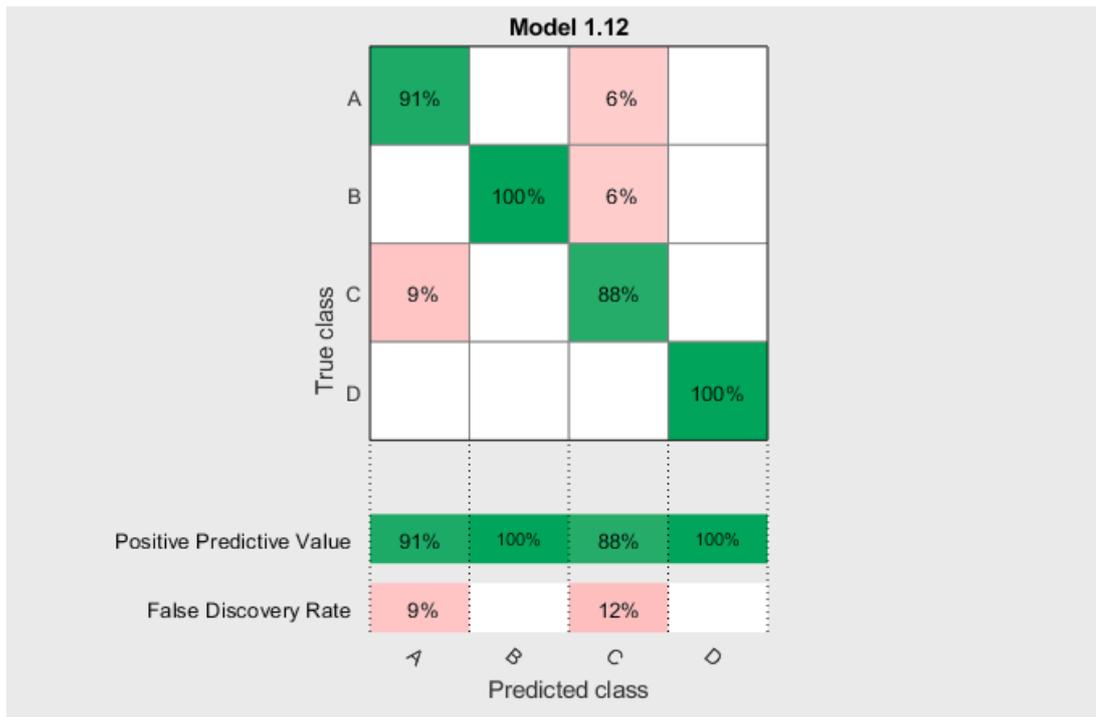


Ilustración 31. Matriz de confusión con porcentajes de predicciones acertadas vs. erradas.

Fuente: Autores.

4.4 Resultados con probetas de características desconocidas.

Probeta de hormigón	Predicciones realizadas por el sistema de para caracterización del hormigón.	Valores de Resistencia a compresión, calculados por la máquina de ensayos.
1	Cat. D (212 MPa -380 MPa)	350 MPa
2	Cat. C (190 MPa – 211 MPa)	124MPa
3	Cat. C (190 MPa – 211 MPa)	195MPa
4	Cat. A (108 MPa – 124MPa)	111 MPa
5	Cat. B (124 MPa – 190 MPa)	170 MPa

Tabla 10. Predicción del algoritmo de aprendizaje automático vs. valores de resistencia proporcionados por la máquina de ensayos de hormigón.

Fuente: Autores.

En la Ilustración 32, se observa los resultados obtenidos de la validación del prototipo, donde se tomaron 5 probetas de diferentes resistencias de las cuales 4 tuvieron un resultado favorable denotadas en color verde, la probeta número 2 nos da como resultado el rango de resistencia C de 190 MPa a 211MPa, siendo un resultado desfavorable visualizado en color rojo, su predicción debería ser el rango B de 124MPa a 190 MPa, comprobando así que el algoritmo implementado y el porcentaje de predicción está acorde a los resultados de campo obtenidos en la Ilustración 30, donde de 14 muestras correspondientes a la clase B 2 de ellas podrían dar como resultado la clase C.

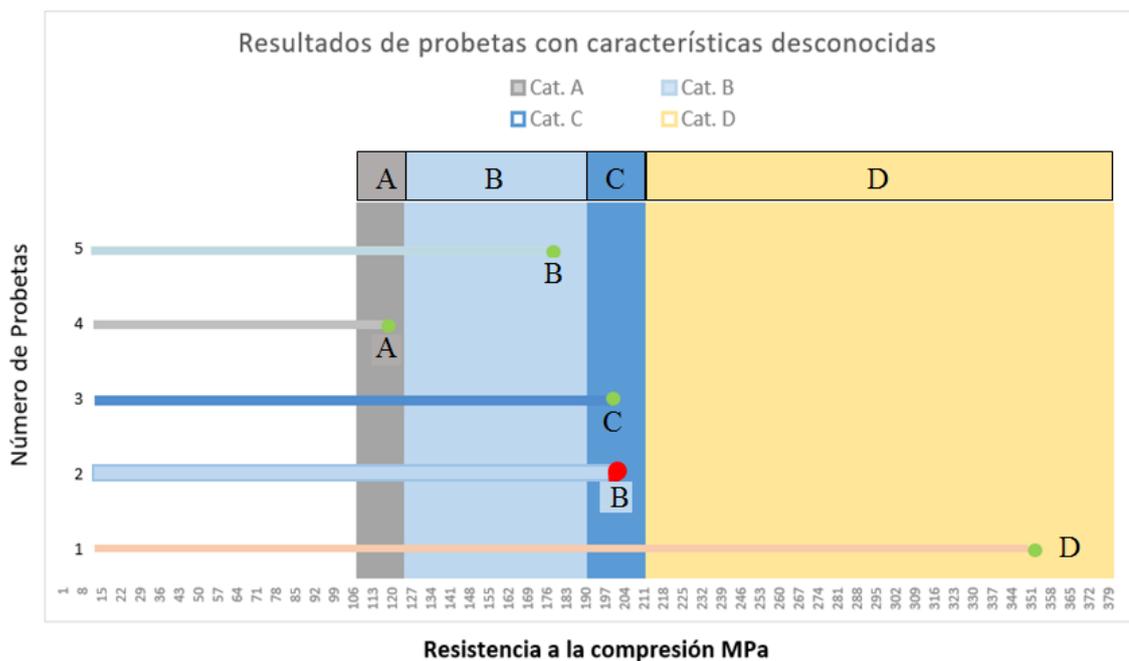


Ilustración 32. Resultado con probetas de características desconocidas

Fuente: Autores.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio de campo presentado en este trabajo muestran que las señales receptadas, utilizando una antena vivaldi de 1.2GHz, en probetas de hormigón de diferentes valores de resistencias a compresión, presentan variaciones en sus propiedades electromagnéticas, por lo tanto, este trabajo revela el potencial de la técnica radar, para ser usado como herramienta no destructiva en la caracterización de materiales de construcción.

La investigación llevada a cabo permitió comprobar la utilidad del análisis de los puntos característicos de la onda electromagnética, los tiempos dobles de propagación a partir de los cuales se obtendrá: la velocidad de propagación, permitividad relativa, y niveles de energía, parámetros que mediante el uso de un algoritmo de aprendizaje automático entrenado, permiten caracterizar al hormigón.

Las características de la onda electromagnética varían según la composición física del hormigón, como lo es su resistencia a compresión, con la implementación de algoritmos de aprendizaje automáticos, se logró dar resultados de aproximación a valores de resistencia. El algoritmo usado fue el KNN vecinos más próximos, que presentó un 92.3% de precisión de clasificación en los conjuntos de datos de entrenamiento y prueba.

El prototipo diseñado para la investigación logró cumplir con los objetivos planteados, siendo una técnica viable al reducir costos frente a técnicas destructivas, y de resultados fiables frente a la técnica como el esclerómetro, además de ser una base para futuras investigaciones.

5.2 Recomendaciones.

El grado de certeza del sistema depende del número de muestras y sus diferentes características, por ello es necesario una mayor cantidad de probetas con distintos valores de resistencia a la compresión, para que los rangos sean lo más pequeño posible, ya que el desempeño del algoritmo de aprendizaje automático es proporcional al número de datos utilizados para su entrenamiento.

Para sistemas similares a este proyecto, se recomienda trabajar con antenas donde su patrón de radiación sea lo más directivo posible, además operen en un amplio rango de frecuencias, evitando así una recepción directa de la onda entre transmisor y receptor, asegurando una mayor profundidad de penetración de la onda en la detección de objetos.

Para evitar pérdidas de información en la recepción de la onda, se recomienda el envío de un preámbulo antes de la trama de datos, para asegurar la sincronización entre la transmisión y recepción.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abad, I. R. (2009). *Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Analog Devices. (19 de 03 de 2014). *Analog Devices*. Obtenido de Analog Devices: https://wiki.analog.com/_detail/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms2-ebz/quickstart/zed_sw.jpg?id=resources%3Aeval%3Auser-guides%3Aad-fmcomms2-ebz%3Aquickstart%3Azynq&fbclid=IwAR2HBsKZZz_gA1FgmMhZkhdQIHK-_32KEIE55PjJmw-Hh4PlpJ3swXY1uk8
- Analog Devices. (30 de 05 de 2016). *Analog Devices*. Obtenido de Analog Devices: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/building_libiio_for_windows
- Analog Devices. (01 de enero de 2018). *Wiki Analog*. Obtenido de Wiki Analog: <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms2-ebz/introduction?fbclid=IwAR2pn4j5VD1lxY4E-q00ffrt4KPihXLhiH3fUA3QLdLSAHSrNlxmsHtjx0>
- Analog Devices. (02 de 01 de 2019). *Analog Devices*. Obtenido de Analog Devices: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/libiio/clients/matlab_simulink
- ANSYS. (07 de mayo de 2019). *ANSYS*. Obtenido de ANSYS: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss?fbclid=IwAR1cZTCF-cccoxURyljjQhyw_L3kk7a3xtD69-BJZd549N5BUoOyxdlV12M
- Bungey, J. (23 de agosto de 2003). *researchgate*. Obtenido de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/222602827_Sub-surface_radar_testing_of_concrete_A_review
- Castilla, A. F. (2015). *Aplicacion de la Técnica no Destructiva del Georradar para evaluar la absorcion de agua en Hormigon endurecido*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

- Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. MIAMI: AltaMira Press.
- Cuno, C. V. (noviembre de 2016). *DSpace ESPOCH*. Obtenido de DSpace ESPOCH: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6417/1/98T00121.pdf>
- Devices, A. (18 de 03 de 2016). *Analog Devices*. Obtenido de Analog Devices: https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/zynq_images#preparing_the_image
- Garrido Hernández, A., Ortega Ortega, M., & Lazón Torres, M. (2007). *Materiales II*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Santa Fé de Bogotá: Quebecor World Bogotá S.A.
- Ignacio, R. F. (10 de diciembre de 2012). *Repositorio Ucsg*. Obtenido de Repositorio Ucsg: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/8531/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-202.pdf>
- Jambukia, S. H., Dabhi, V. K., & Prajapi, H. B. (2015). *Classification of ECG signals using Machine Learning Techniques: A Survey*. India: International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications (ICACEA) IMS Engineering College, Ghaziabad, India .
- Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Amsterdam, The Netherland: ELSEVIER.
- Lai, W. W., & F Tsang, W. (marzo de 2008). *researchgate.net*. Obtenido de researchgate.net: https://www.researchgate.net/publication/223644858_Characterization_of_pore_systems_of_airwater-cured_concrete_using_ground_penetrating_radar_GPR_through_continuous_water_injection
- Laurens, S. (noviembre de 2005). *researchgate.net*. Obtenido de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/269614072_Non-destructive_evaluation_of_concrete_moisture_by_GPR_experimental_study_and_direct_modeling

- López, L. R. (2006). *Modelo de Clasificación Dinámico de Arritmias Cardíacas mediante Aprendizaje de Máquina con Interfaz a Usuario*. Bogotá: Ciencia e Ingeniería Neogranadina.
- Lovera, G. F. (2006). *Estudio en Estructuras de Hormigón Armado Mediante el Uso de un Radar de Penetración Terrestre*". Valdivia: Universidad de Chile.
- Mahafza, B. R. (2013). *Researchgate*. Obtenido de Researchgate: https://www.researchgate.net/profile/Vitalii_Pertsevyi/post/What_is_best_signal_processing_approaches_for_Bio-Inspired_Signal_Detection/attachment/59d63e4079197b807799ae7c/AS:423291941855232@1477932071595/download/Mahafza%2C+Bassem+R.-Radar+Systems+Analys
- Martinez Sala, R., Rodriguez Abad, I., & Val Muedra, I. (2013). *Effect of penetration of water under pressure in hardened concrete on GPR signals*. Valencia: IEEE.
- Mathworks. (6 de julio de 2016). *la.mathworks.com*. Obtenido de la.mathworks.com: https://la.mathworks.com/content/dam/mathworks/tag-team/Objects/i/88174_92991v00_machine_learning_section1_ebook.pdf
- Mathworks. (07 de mayo de 2019). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks: <https://nl.mathworks.com/discovery/machine-learning.html#machine-learning-with-matlab>
- Matrinez Sala, R., Mene Aparicio, J., & Rodriguez Abad, I. (2017). *Aplicación de la técnica del georradar en ingeniería civil: evaluación de la variación del contenido de agua en el hormigón*. Valencia: ACHE.
- Neville, A. (marzo de 2001). *link.springer*. Obtenido de link.springer: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02481560>
- Peña, I. R. (2015). *Astronomía Elemental: Volumen II: Astrofísica y Astrobiología*. Valparaiso: USM.
- Persico, R. (2014). *Introduction to Ground Penetrating Radar Inverse Scattering and Data Processing*. Canadá: IEEE Press.

- Rodriguez Abad, I., Garcia Garcia, F., & Perez Garcia, V. (julio de 2008). *sciencedirect*.
Obtenido de sciencedirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869508000066>
- Rodriguez Abad, I., Klysz, G., Martinez Sala, R., Balayssac, J. P., & Mene Aparicio, J. (15 de diciembre de 2016). *geosci-instrum-method-data-syst.net*. Obtenido de geosci-instrum-method-data-syst.net:
<https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/5/567/2016/gi-5-567-2016.pdf>
- Rueda, J. M. (2007). *Sistemas eléctricos y electrónicos de las aeronaves*. Madrid: Paraninfo S.A.
- Tepa Terraelectronica. (07 de mayo de 2019). *terraelectronica*. Obtenido de terraelectronica: <https://www.terraelectronica.ru/product/1865260>
- Torrejón, J. C. (10 de julio de 2013). *e-archivo UC3M*. Obtenido de e-archivo UC3M:
https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17883/PFC_Javier_Castrejon_Torrejon.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Universidad de Salamanca. (2010). *Hormigones ingeniería en edificación*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Villain, G., Derobert, X., Mehdi Sbartai, Z., & Balayssac, J. P. (julio de 2010). *researchgate*. Obtenido de researchgate:
https://www.researchgate.net/publication/224167994_Evaluation_of_concrete_water_content_and_other_durability_indicators_by_electromagnetic_measurements
- W. I. Forum. (Abril de 2011). *Wireless Innovation Forum*. Obtenido de Wireless Innovation Forum:
<http://data.memberclicks.com/site/sdf/SoftwareDefinedRadio.pdf>.
- wiki.analog. (19 de marzo de 2014). *wiki.analog.com*. Obtenido de wiki.analog.com:
https://wiki.analog.com/_detail/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms2-ebz/quickstart/zed_sw.jpg?id=resources%3Aeval%3Auser-guides%3Aad-fmcomms2-ebz%3Aquickstart%3Azynq
- xilinx. (01 de Agosto de 2012). *Reference Digilentinc*. Obtenido de Reference Digilentinc:
https://reference.digilentinc.com/_media/zedboard:zedboard_ug.pdf

Yelf, R. (2004). *Where is True Time Zero ?* Australia: IEEE.

Youmana, B. C. (23 de julio de 2018). *RiuNet UPV*. Obtenido de RiuNet UPV:
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107681/TFM_YOUMANA%20BOTE
LLA.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/107681/TFM_YOUMANA%20BOTE%20LLA.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

7. ANEXOS

Anexo 1. Documento técnico de las propiedades del dieléctrico



FR4 Data Sheet :-

Test/Specification	FR4 Laminate Typical Values
Thermal Stress, Solder bath 288 deg. C	>60
Dimensional Stability, E-2/150	<0.04% Warp/fill
	<1.00% Bow/Twist
Flammability, Classification UL94	V0
Water Absorption E-1/105	0.10%
Peel Strength After Thermal Stress	11 lb./in After 10s/288 Deg. C
Flexural Strength	100,000 lbf/in ² Lengthwise
	75,000 lbf/in ² Crosswise
Resistivity After Damp Heat Volume	10 ⁸ M ohms cm
Resistivity After Damp Heat Surface	10 ⁸ M ohms
Dielectric Breakdown. Parallel to laminate	>60KV
Dielectric Constant @ 1MHz	4.7
Dissipation Factor @ 1MHz	0.014
Q-Resonance @ 1 MHz	>75
Q-Resonance @ 50 MHz	>95
Arc Resistance	125 s
Glass Transition Temperature	135 Deg. C
Temperature Index	130 Deg. C
A Few Other Relevant Facts from other Sources	
Specific Gravity	1.8-1.9
Rockwell Hardness (M scale)	110
Coefficient of Thermal Expansion	11 microns/m/Deg.C Lengthwise
	15 microns/m/Deg.C Crosswise
Thermal Conductivity	2.2-2.5 cal/h. cm Deg C

Anexo 2. Código de configuración del AD9364

data_in_device = cf-ad9361-dds-core-lpc

data_out_device = cf-ad9361-lpc

ctrl_device = ad9361-phy

channel = RX_LO_FREQ,IN,out_altvoltage0_RX_LO_frequency,

channel = RX_SAMPLING_FREQ,IN,in_voltage_sampling_frequency,

channel = RX_RF_BANDWIDTH,IN,in_voltage_rf_bandwidth,
channel = RX_GAIN_MODE,IN,in_voltage0_gain_control_mode,
channel = RX_GAIN,IN,in_voltage0_hardwaregain,
channel = RX_RSSI,OUT,in_voltage0_rssi,
channel = TX_LO_FREQ,IN,out_altvoltage1_TX_LO_frequency,
channel = TX_SAMPLING_FREQ,IN,out_voltage_sampling_frequency,
channel = TX_RF_BANDWIDTH,IN,out_voltage_rf_bandwidth,
channel = DC_Calibration,IN,calib_mode,
channel = RX_Port,IN,in_voltage0_rf_port_select,

Anexo 3. Características eléctricas del cable coaxial RG-58

Características Eléctricas	
Impedancia: 50 ohms	
Capacidad: 101 pF/m	
Velocidad nominal de propagación: 66%	
Tensión máxima: 1.9Kv	
Atenuación	
Frecuencia MHz	dB x100m
100	15
200	22
400	31
1000	53

Anexo 4. Pérdidas en del material según la frecuencia

Tipo de Material	Pérdida en dB	Frecuencia
Metal	26	815Mhz
Aluminio	20.4	815Mhz
Aislamiento de hoja	3.9	815Mhz
Bloques de concreto	13	1300Mhz
Pérdidas por un piso	20-30	1300Mhz
Pérdidas por un piso y una pared	40-50	1300Mhz
Atenuación observada cuando el transmisor toma un ángulo recto en la esquina del corredor	10-15	1300Mhz
Cubierta de metal-12ft ²	4-7	1300Mhz
Maquinaria ligera	1-4	1300Mhz
Maquinaria en General	5-10	1300Mhz
Maquinaria Pesada	10-12	1300Mhz
Escaleras de caracol	5	1300Mhz
Textil ligero	3-5	1300Mhz
Textil Pesado	8-11	1300Mhz
Area en donde los obreros inspeccionan el metal defectuoso	3-12	1300Mhz
Racks metálicos	4-9	1300Mhz
Cajas vacías de inventario	3-6	1300Mhz
Pared bloques de concreto	13-20	1300Mhz
Ducto del el techo	1-8	1300Mhz
Caja de metal de 4m	10-12	1300Mhz
Rack de almacenamiento con papeles	2-4	1300Mhz
Rack de 2.5m con partes metalicas	4-6	1300Mhz

Anexo 5. Variación de velocidades (cm/ns) en las distintas probetas de hormigón.

Probeta	Resistencias	R1-D1	R1-D2	R1-D3	R1-D4	R2-D1	R2-D2	R2-D3	R2-D4	R3-D1	R3-D2	R3-D3	R3-D4	R4-D1	R4-D2	R4-D3	R4-D4
1	108	-13646,0288	-	16862,9008	-220405,496	-10679,2013	18202,8168	-21275,6508	-375,92	-328,180976	-	-	-	-	-8809,81459	-	-2632,88666
			15510,3284								33878,8316	57190,1412	2996,59133	3006,59133		207,896656	
2	111	-14335,2369	-	17527,7645	-231286,03	-10790,1894	10482,7818	-21275,9471	-	-331,833089	-	-	-	-	-8818,54966	-202,6305	-2642,22928
			15899,6099						264,19661		33783,7766	57228,4562	2996,13064	3016,13064			
3	112	-11251,072	-	17740,3272	-234970,119	-11383,2488	13782,8685	-21278,5504	-	-331,675296	-	-	-	-	-8818,57203	-198,10376	-2752,01018
			16030,5413						264,37824		33851,9507	57233,5616	2995,97709	2995,97709			
4	117	-15645,8387	-	19258,1504	-240130,953	-11901,2175	21967,8508	-21288,7382	-	-326,417201	-	-	-	-	-8816,82007	-193,41826	-2653,74756
			16693,9811						354,27689		33861,6536	57241,0916	2995,20938	3005,20938			
5	118	-12254,6648	-	30547,1016	-257675,806	-12436,1774	22312,6935	-21359,6762	-	-326,221316	-	-	-	-	-8814,50177	-193,34476	-2660,6957
			22398,0257						265,46844		33797,0777	57266,1982	2995,05585	3025,05585			
6	119	-14351,4841	-	19398,0012	-264593,576	-12359,0691	22660,4717	-21292,814	-	-330,571249	-	-	-	-	-8816,19548	-193,27134	-2656,0844
			-16993,456						265,65021		33865,5351	-57269,305	3014,90232	3016,56832			
7	120	-16367,2	-	19796,5215	-267201,407	-12557,1392	22169,6492	-21294,852	-261,104	-330,4136	-33871,832	-57264,412	-2994,7488	-3004,7488	-8813,8432	-193,198	-2653,176
			-17161,28						-265,832		-33839,432	-57274,412	-2994,7488	-3014,7488			
8	120	-16347,2	-	19584,6067	-265162,367	-13107,392	23025,5552	-22018,32	-265,832	-327,9896	-33839,432	-57274,412	-2994,7488	-3014,7488	-8815,8832	-193,198	-2660,2576
			-17161,28														
9	122	-19642,8304	-	20133,5524	-228733,543	-12975,5131	23721,4157	-21298,9284	-	-326,413956	-	-	-	-	-8813,18465	-	-2639,81954
			-17372,061						358,98884		33802,5865	57064,6266	2995,44177	3014,44177		206,649536	
10	123	-15074,9133	-	20882,3065	-277384,565	-11112,3233	24080,932	-22065,75	-	-329,940761	-33873,299	-	-	-	-8805,15549	-202,6869	-2749,60052
			17509,4341						266,37749		-	57289,7342	2994,28826	3014,28826			
11	113	-12757,7103	-	17983,0354	-238682,833	-11172,6372	46155,8438	-21280,5878	-	-329,234921	-	-	-	-	-8817,92241	-198,02376	-2654,51076
			21269,6582						260,10769		33853,8912	57008,6672	2995,82354	3015,82354			
12	174	-29943,1976	-	36345,7474	-519334,371	-26014,9494	46296,81	-21405,0552	-	-321,927284	-	-	-	-	-8799,32463	-189,35644	-2648,4411
			25322,6985						275,67836		33874,2883	-57550,487	3286,46455	3006,46455			
13	178	-33298,0248	-	37312,9834	-573149,595	-24191,872	48182,2901	-3149,41842	-	-349,5312	-	-	-	-	-8797,78105	-189,08116	-2617,56674
			25967,6766						276,41004		34074,2506	55570,9602	2985,85137	2995,85137			
14	181	-33249,0259	-	38357,2965	-558365,394	-29490,987	8845,3568	-21517,6452	-	-323,48469	-33994,828	-	-	-	-8793,76828	-188,87554	-2626,91104
			26480,0744						275,98161		-	57586,3172	2985,39152	3005,39152			
15	177	-33951,4767	-	36894,3626	-473231,738	-26903,6556	9411,58855	-22037,7662	-387,8309	-321,457361	-	-	-	-	-8795,08399	-	-2737,78532
			16824,4152								33993,0887	57565,8416	2986,00466	2986,00466		191,960016	
16	181	-36349,0259	-	38357,2965	-525604,394	-27682,4357	49938,4619	-21525,0481	-312,035	-320,831049	-	-	-	-	-8796,84528	-204,5835	-2641,71044
			26480,0744								33877,9798	56586,3172	3006,39152	2995,39152			
17	184	-35457,0496	-	39538,5896	-507811,553	-28691,6578	51542,8171	-23116,6024	-280,5552	-323,10384	-	-	-	-	-8792,78157	-	-2646,25542
			40540,1564								33991,8165	-56601,676	2984,93171	3014,93171		201,145424	
18	189	-31234,8731	-	41382,844	-604694,71	-25528,1072	52924,6431	-21542,882	-	-319,579289	-	-	-	-	-8784,67146	-205,0563	-2635,16288
			27902,3045						278,42381		33888,7646	-57627,278	2984,16544	3006,81144			
19	170	-48601,7	-	34414,077	-445642,322	-22347,78	44279,9246	-21396,882	-274,947	-322,5541	-33964,596	-58530,017	-3017,0778	-2997,0778	-8800,0557	-193,596	-2639,3156
			-24627,112														
20	191	-42975,2129	-	42201,8244	-638452,78	-30275,8799	56318,7459	-21439,8092	-282,0735	-322,22149	-	-	-	-	-8794,05114	-188,19534	-2639,85924
			28226,2349								34005,4311	57637,5202	2983,85896	3003,85896			
21	193	-36923,0943	-	42945,5115	-531701,124	-31894,7819	56512,8698	-21443,8998	-	-326,403641	-	-	-	-	-8793,10275	-188,06026	-2644,289
			28582,5148						279,15669		33902,8647	57647,7632	-2983,5525	-2983,5525			
22	194	-37119,8616	-	43341,3802	-634583,778	-32220,7835	57177,7859	-23325,8634	-	-321,84604	-	-	-	-	-8789,49291	-187,99284	-2648,9744
			28761,5359						279,33996		34011,2669	-58752,885	3004,39927	2983,39927			
23	197	-38441,4627	-	44541,4773	-652861,877	-33208,7103	59850,5533	-21644,1867	-318,3108	-321,47221	-	-	-	-	-8788,50643	-187,79106	-2638,75236
			29302,1241								34017,1032	57668,2516	2982,93962	2992,93962			

24	198	-48648,7608	-	45566,6662	-659012,027	-28174,2989	59375,6784	-23412,3678	-282,5324	-318,172436	-	-	-	-	-8791,54361	-187,72396	-2643,19682
			29483,4952								33907,4361	59673,3742	2982,78641	3012,78641			
25	191	-37975,2129	-	42856,8042	-470640,18	-10894,9897	50998,3144	-23268,701	-	-319,266529	-	-	-	-	-8790,47944	-	-2624,72592
			28266,2349						281,57881		33897,7644	57637,5202	2994,85896	3006,53296		200,525924	
26	196	-45859,0464	-	44139,3627	-795825,266	-32877,7477	58221,8455	-21467,3236	-	-321,59664	-	-	-	-	-8782,50045	-205,512	-2733,63366
			29161,3405						279,70656		34015,1577	57663,1292	3023,09283	2993,09283			
27	197	-46241,4627	-	44617,9311	-652861,877	-33208,7103	58797,3107	-21452,0822	-	-318,328681	-	-	-	-	-8791,59933	-191,58936	-2638,75236
			29342,1241						282,76609		34017,1032	59668,2516	2982,93962	2992,93962			
28	200	-41400	-29448	45760,32	-671398,51	-36735,52	60541,12	-21458,22	-280,44	-317,86	-34142,4	-57683,62	-2982,48	-2992,48	-8791,26	-187,59	-2642,76
29	201	-41789,9399	-	46170,7685	-677634,845	-34629,5323	28645,789	-21460,2662	-	-232,89809	-	-	-2982,3268	-2992,3268	-8790,6082	-187,52314	-2612,5416
			30031,1338						290,62341		33989,8857	57688,7432					
30	192	-36848,2112	-	42551,724	-625373,147	-31647,8483	56016,9668	-21441,8544	-	-319,455776	-	-	-	-	-8790,15059	-188,12776	-2624,50746
			28035,4412						278,97344		34006,3763	58642,6416	3023,70573	3013,70573			
31	199	-44011,9401	-	45351,9556	-665190,904	-33859,756	59956,9483	-23550,44	-	-318,016209	-	-58878,497	-2982,6332	-3005,4192	-8787,8488	-	-2732,9784
			29665,4538						290,25661		34020,9943					190,037304	
32	204	-50020,0336	-	59554,8424	-696516,24	-35904,6788	62906,8158	-23664,24	-322,3736	-317,235344	-	-57704,114	-	-	-8789,67285	-206,0808	-2631,88646
			30584,0611								34030,7233		2981,86723	2991,86723			
33	206	-42816,8184	-	49128,4689	-709247,506	-37874,3562	64107,0634	-23796,1766	-285,36	-320,36044	-	-	-	-	-8785,54731	-	-2631,44974
			31355,6177								34034,6153	58714,3622	2981,56087	3001,56087		199,199744	
34	209	-44977,0671	-	51355,3004	-765077,25	-37309,2465	150836,499	-23658,5049	-	-320,36929	-	-57729,736	-	-	-8778,46934	-206,4623	-2630,79472
			31517,3607						282,09141		34037,4537		2991,10136	2981,10136			
35	210	-45383,9	-32105,784	114137,389	-779154,889	-37555,4256	72740,9417	-21478,686	-286,244	-316,2989	-34042,4	-57734,861	-2988,9482	-3000,9482	-8787,5293	-189,0774	-2630,5764
36	248	-144359,94	-64339,129	155566,21	-2338530,64	-128791,099	333187,198	-21842,5892	-	-288,965321	-34398,835	-	-	-	-8733,37621	-	-2602,05908
									315,08549			58645,1366	2953,90154	2979,31954		173,764776	
37	260	-57226,7008	-	67362,8762	-1428188,8	-41486,9676	92009,4898	-22005,8	-294,8016	-365,1832	-	-	-	-	-8776,38211	-	-2612,28602
			39531,6776								34166,4027	568929,759	3075,13101	2998,60301		185,768816	
38	350	-132562,5	-63898	158162,625	-2259936,02	-107981,748	180790,504	-28194,5	-308,175	-294,6325	-34035,47	-59454,335	-2989,545	-2984,445	-8744,8125	-176,945	-2700,09
39	387	-50294	-41876,944	74091,234	-1131624,94	-57393,0691	132871	-24957,786	-295,276	-308,5204	-34039,79	-57991,366	-2973,2952	-2996,9352	-8772,6648	-184,7264	-2627,304

Anexo 6.Tabla de las características electromagnéticas de las muestras de hormigón y sus funciones estadísticas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wmean_velocidad_propagacion_n	Wmean_permittividad	Wmean_niveles_energia	Wstd_velocidad_propagacion	Wstd_permittividad	Wstd_niveles_energia	Wpeca_velocidad_propagacion	Wpeca_permittividad	Wpeca_niveles_energia	Categoria
0,0054	3,05E+25	17,167	0,0211	1,93E+26	173,505	-0,0021	7,22E+20	-1,2821	A
0,0097	9,55E+20	21,129	0,0061	2,09E+26	138,003	0,0022	-1,37E+21	2,6799	A
0,0033	8,28E+25	20,618	0,0059	1,90E+26	115,623	-0,0042	5,95E+21	2,1689	A
0,007	1,84E+21	19,186	0,007	2,02E+26	71,764	-5,40E-04	-4,93E+20	0,7369	A
0,0069	1,90E+25	18,317	0,0076	2,00E+26	80,005	-6,53E-04	-4,33E+20	-0,1321	A
0,005	3,57E+25	18,811	0,1294	1,94E+26	129,666	-0,0025	1,24E+20	0,3619	A
0,0063	2,23E+25	21,201	0,0082	1,99E+26	90,641	-0,0012	-9,62E+19	2,7519	A
0,0095	9,90E+24	20,685	0,006	2,10E+26	106,933	0,0012	-1,34E+21	2,2359	A
0,005	3,53E+25	16,445	0,2591	1,91E+26	179,010	0,002	1,20E+21	-2,0041	A
0,0093	1,04E+25	16,219	0,0061	2,08E+26	184,592	-0,0025	-1,29E+21	-2,2301	A
0,0093	1,04E+25	19,186	0,0061	2,08E+26	134,134	0,0018	-1,29E+21	0,7369	A
0,0057	2,80E+25	24,172	0,0143	1,96E+26	184,592	-0,0019	4,68E+20	5,7229	B
0,0078	1,49E+21	16,410	0,0064	2,03E+26	141,680	2,43E-04	-8,44E+20	-2,0391	B
0,0037	6,69E+25	13,432	0,0065	1,87E+26	141,605	-0,0039	4,36E+21	-5,0171	B
0,0049	3,78E+25	18,403	0,0349	1,91E+26	140,567	-0,0027	1,45E+21	-0,0461	B
0,008	1,41E+25	17,196	0,0063	2,04E+26	77,504	4,36E-04	-9,15E+20	-6,53E-01	B
0,0038	6,38E+21	16,892	0,0067	1,91E+26	136,455	-0,0038	4,05E+21	-1,5571	B
0,005	3,65E+21	17,467	0,0629	1,90E+26	89,140	-0,0026	1,33E+21	-0,9821	B
0,0049	3,82E+21	17,584	0,0094	3,03E+26	113,534	-0,0027	1,49E+21	-0,8651	B
0,0057	2,79E+21	20,372	0,0135	1,95E+26	111,519	-0,0019	4,62E+20	1,9949	C
0,0071	1,44E+21	16,143	0,0075	2,01E+26	74,939	-3,96E-04	-5,66E+20	-2,31E+00	C
0,0079	9,29E+20	17,789	0,0068	2,04E+26	135,561	3,73E-04	-8,92E+20	-0,8651	C
0,0098	1,72E+21	21,547	0,006	2,11E+26	135,561	0,0023	-1,40E+21	1,9229	C
0,0072	8,89E+20	19,196	0,0067	2,03E+26	93,249	-3,05E-04	-6,11E+20	-0,6601	C
0,0101	1,09E+21	16,630	0,0068	2,11E+26	121,668	2,50E-03	-1,44E+21	3,0979	C
0,0091	4,18E+20	17,882	0,0061	2,08E+26	141,668	1,50E-03	-1,24E+21	0,7459	C
0,0147	8,11E+20	15,770	0,0068	2,20E+26	14,605	7,10E-03	-1,91E+21	-1,8191	C
0,0105	1,72E+21	21,909	0,0062	2,12E+26	151,366	2,90E-03	-1,51E+21	-0,5671	C
0,0072	6,50E+21	19,363	0,0067	2,03E+26	151,366	-3,08E-04	-6,09E+20	-2,6791	C
0,005	1,96E+21	18,453	0,0629	1,90E+26	88,720	-2,60E-03	1,32E+21	3,4599	C
0,0037	1,01E+21	14,615	0,0065	1,91E+26	145,384	-3,80E-03	4,18E+21	0,9139	C
0,0068	7,56E+20	19,803	0,0077	1,99E+26	93,584	-7,61E-04	-3,72E+20	-3,8341	C
0,0094	1,41E+21	19,286	0,0065	2,09E+26	89,621	1,90E-03	1,32E+21	1,3539	C
0,0109	6,69E+21	16,410	0,0063	2,13E+26	77,466	3,40E-03	-1,57E+21	3,097	C
0,0097	9,49E+20	18,219	0,0061	2,10E+26	118,329	2,20E-03	-1,38E+21	-0,2301	C
0,0106	8,07E+20	19,258	0,006	2,12E+26	173,065	3,00E-03	-1,52E+21	0,8089	D
0,0105	8,17E+20	19,830	0,006	2,13E+26	107,936	3,00E-03	-1,51E+21	1,3809	D
0,0079	1,45E+21	19,287	0,0064	2,04E+26	88,342	3,46E-04	-8,83E+20	0,8379	D
0,0098	9,30E+20	14,301	0,0061	2,10E+26	81,115	2,30E-03	-1,40E+21	-4,1481	D
0,0054	3,05E+21	17,167	0,0211	1,93E+26	173,505	-2,30E-03	7,21E+20	-1,2821	A
0,0097	9,55E+20	21,129	0,0061	2,09E+26	138,003	-2,20E-03	-1,37E+21	2,6799	A
0,0033	8,28E+21	20,618	0,0059	1,90E+26	136,641	-5,40E-04	5,95E+21	2,1689	A
0,007	1,84E+21	19,186	0,007	2,02E+26	115,623	-6,53E-04	-4,93E+20	0,7369	A

0,0069	1,90E+21	18,811	0,0076	2,00E+26	73,764	-2,50E-03	1,24E+21	-0,1321	A
0,005	2,23E+21	18,317	0,1294	1,94E+26	80,005	-1,20E-03	-9,62E+19	0,3619	A
0,0063	9,90E+20	21,201	0,0082	1,99E+26	129,666	2,00E-03	-1,34E+21	2,7519	A
0,0095	3,53E+21	20,685	0,006	2,10E+26	90,641	-2,50E-03	1,20E+21	-2,0041	A
0,005	1,04E+21	16,445	0,2591	1,91E+26	106,933	1,80E-03	-1,29E+21	0,7369	A
0,0093	1,04E+21	16,219	0,0061	2,08E+26	179,010	1,80E-03	-1,29E+21	5,7229	A
0,0093	2,80E+21	19,186	0,0061	2,08E+26	184,592	-1,90E-03	4,68E+20	-2,0391	A
0,0057	1,49E+21	24,172	0,0143	1,96E+26	141,680	2,43E-04	-8,44E+20	-0,2301	B
0,0078	1,45E+21	16,410	0,0064	2,03E+26	180,153	-3,90E-03	4,36E+21	0,8089	B
0,0037	6,69E+21	13,432	0,0065	1,87E+26	141,605	-2,70E-03	1,45E+21	1,3809	B
0,0049	3,78E+21	18,403	0,0349	1,91E+26	81,006	4,36E-04	-9,15E+20	0,8379	B
0,008	1,41E+21	17,796	0,0063	2,04E+26	70,552	-3,80E-03	4,05E+21	-4,1481	B
0,0038	6,38E+21	16,892	0,0067	1,91E+26	77,504	-2,60E-03	1,32E+21	-1,2821	B
0,005	3,65E+21	17,467	0,0629	1,90E+26	136,455	-2,70E-03	1,49E+21	2,6799	B
0,0049	3,82E+21	17,584	0,0094	3,03E+26	97,283	-1,90E-03	4,62E+20	2,1689	B
0,0057	2,79E+21	20,444	0,0135	1,95E+26	89,140	-3,96E-04	-5,66E+20	0,7369	C
0,0071	1,76E+21	16,143	0,0075	2,01E+26	113,534	3,73E-04	-8,92E+20	-0,1321	C
0,0079	1,44E+21	17,584	0,0068	2,04E+26	111,519	2,30E-03	-1,40E+21	0,3619	C
0,0098	9,19E+20	20,372	0,006	2,11E+26	74,939	-3,05E-04	-6,11E+20	2,7519	C
0,0072	1,72E+21	17,789	0,0067	2,03E+26	135,561	2,50E-03	-1,44E+21	-2,0041	C
0,0101	8,89E+20	21,547	0,0068	2,11E+26	93,260	1,50E-03	-1,24E+21	-2,2301	C
0,0091	1,09E+21	19,195	0,0061	2,08E+26	121,668	7,10E-03	-1,91E+21	0,7369	C
0,0147	4,18E+20	16,630	0,0068	2,20E+26	141,605	2,90E-03	-1,51E+21	0,7459	C
0,0105	8,21E+20	17,882	0,0065	1,94E+26	134,659	-3,08E-04	-6,09E+20	-2,6791	C
0,0072	1,72E+21	15,770	0,0646	1,89E+26	139,313	3,05E-03	-1,32E+21	3,0979	C

Anexo 7. Medición de la resistencia de las probetas de hormigón mediante la máquina de ensayo.



Ilustración 33. Obtención del valor de la resistencia a compresión por medio de la máquina de ensayos.

Fuente: Autores

Anexo 8. Muestras de probetas de hormigón de diferentes valores a la resistencia a la compresión.



Ilustración 34. Probetas de hormigón de diferentes resistencias a compresión.

Fuente: Autores

Anexo 9. Envío y recepción de la onda electromagnética sobre el hormigón para su caracterización.



Ilustración 35. Prototipo para la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón.

Fuente: Autores



RF Agile Transceiver

Data Sheet

AD9364

FEATURES

- RF 1 × 1 transceiver with integrated 12-bit DACs and ADCs
- Band: 70 MHz to 6.0 GHz
- Supports time division duplex (TDD) and frequency division duplex (FDD) operation
- Tunable channel bandwidth (BW): <200 kHz to 56 MHz
- 3-band receiver; 3 differential or 6 single-ended inputs
- Superior receiver sensitivity with a noise figure of <2.5 dB
- Rx gain control
 - Real-time monitor and control signals for manual gain
 - Independent automatic gain control
- 2-band differential output transmitter
- Highly linear broadband transmitter
 - Tx EVM: ≤−40 dB
 - Tx noise: ≤−157 dBm/Hz noise floor

- Tx monitor: ≥66 dB dynamic range with 1 dB accuracy
- Integrated fractional-N synthesizers
 - 2.4 Hz maximum local oscillator (LO) step size
- Multichip synchronization
- CMOS/LVDS digital interface

APPLICATIONS

- Point to point communication systems
- Femtocell/picocell/microcell base stations
- General-purpose radio systems

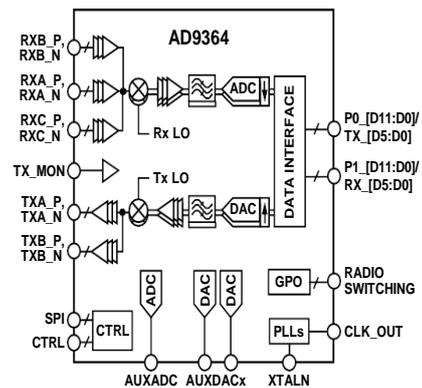
GENERAL DESCRIPTION

The AD9364 is a high performance, highly integrated radio frequency (RF) Agile Transceiver™ designed for use in 3G and 4G base station applications. Its programmability and wideband capability make it ideal for a broad range of transceiver applications.

The device combines an RF front end with a flexible mixed-signal baseband section and integrated frequency synthesizers, simplifying design-in by providing a configurable digital interface to a processor. The AD9364 operates in the 70 MHz to 6.0 GHz range, covering most licensed and unlicensed bands. Channel bandwidths from less than 200 kHz to 56 MHz are supported.

The direct conversion receiver has state-of-the-art noise figure and linearity. The receive (Rx) subsystem includes independent automatic gain control (AGC), dc offset correction, quadrature correction, and digital filtering, thereby eliminating the need for these functions in the digital baseband. The AD9364 also has flexible manual gain modes that can be externally controlled. Two high dynamic range ADCs digitize the received I and Q signals and pass them through configurable decimation filters

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



NOTES

1. SPI, CTRL, P0 [D11:D0]/TX [D5:D0], P1 [D11:D0]/RX [D5:D0], AND RADIO SWITCHING CONTAIN MULTIPLE PINS.

Figure 1.

11946-001

and 128-tap FIR filters to produce a 12-bit output signal at the appropriate sample rate.

The transmitter uses a direct conversion architecture that achieves high modulation accuracy with ultralow noise. This transmitter design produces a Tx EVM of ≤−40 dB, allowing significant system margin for the external power amplifier (PA) selection. The on-board transmit (Tx) power monitor can be used as a power detector, enabling highly accurate Tx power measurements.

The fully integrated phase-locked loops (PLLs) provide low power fractional-N frequency synthesis for all Rx and Tx channels. All VCO and loop filter components are integrated.

The core of the AD9364 can be powered directly from a 1.3 V regulator. The IC is controlled via a standard 4-wire serial port and four real-time input control pins. Comprehensive power-down modes are included to minimize power consumption during normal use. The AD9364 is packaged in a 10 mm × 10 mm, 144-ball chip scale package ball grid array (CSP_BGA).

THEORY OF OPERATION

GENERAL

The AD9364 is a highly integrated radio frequency (RF) transceiver capable of being configured for a wide range of applications. The device integrates all RF, mixed signal, and digital blocks necessary to provide all transceiver functions in a single device. Programmability allows this broadband transceiver to be adapted for use with multiple communication standards, including frequency division duplex (FDD) and time division duplex (TDD) systems. This programmability also allows the device to be interfaced to various baseband processors (BBPs) using a single 12-bit parallel data port, dual 12-bit parallel data ports, or a 12-bit low voltage differential signaling (LVDS) interface.

The AD9364 also provides self calibration and automatic gain control (AGC) systems to maintain a high performance level under varying temperatures and input signal conditions. In addition, the device includes several test modes that allow system designers to insert test tones and create internal loopback modes that can be used by designers to debug their designs during prototyping and optimize their radio configuration for a specific application.

RECEIVER

The receiver section contains all blocks necessary to receive RF signals and convert them to digital data that is usable by a BBP. It has three inputs that can be multiplexed to the signal chain, making the AD9364 suitable for use in multiband systems with multiple antenna inputs. The receiver is a direct conversion system that contains a low noise amplifier (LNA), followed by matched in-phase (I) and quadrature (Q) amplifiers, mixers, and band shaping filters that downconvert received signals to baseband for digitization. External LNAs can also be interfaced to the device, allowing designers the flexibility to customize the receiver front end for their specific application.

Gain control is achieved by following a preprogrammed gain index map that distributes gain among the blocks for optimal performance at each level. This can be achieved by enabling the internal AGC in either fast or slow mode or by using manual gain control, allowing the BBP to make the gain adjustments as needed. Additionally, each channel contains independent RSSI measurement capability, dc offset tracking, and all circuitry necessary for self calibration.

The receiver includes 12-bit, Σ - Δ ADCs and adjustable sample rates that produce data streams from the received signals. The digitized signals can be conditioned further by a series of decimation filters and a fully programmable 128-tap FIR filter with additional decimation settings. The sample rate of each digital filter block is adjustable by changing decimation factors to produce the desired output data rate.

TRANSMITTER

The transmitter section consists of two differential output stages that can be multiplexed to the transmit channel. The transmit channel provides all digital processing, mixed signal, and RF blocks necessary to implement a direct conversion system. The digital data received from the BBP passes through a fully programmable 128-tap FIR filter with interpolation options. The FIR output is sent to a series of interpolation filters that provide additional filtering and data rate interpolation prior to reaching the DAC. Each 12-bit DAC has an adjustable sampling rate. Both the I and Q channels are fed to the RF block for upconversion.

When converted to baseband analog signals, the I and Q signals are filtered to remove sampling artifacts and fed to the upconversion mixers. At this point, the I and Q signals are recombined and modulated on the carrier frequency for transmission to the output stage. The combined signal also passes through analog filters that provide additional band shaping, and then the signal is transmitted to the output amplifier. The transmit channel provides a wide attenuation adjustment range with fine granularity to help designers optimize signal-to-noise ratio (SNR).

Self calibration circuitry is built into each transmit channel to provide automatic real-time adjustment. The transmitter block also provides a Tx monitor block. This block monitors the transmitter output and routes it back through the receiver channel to the BBP for signal monitoring. The Tx monitor block is available only in TDD mode operation while the receiver is idle.

CLOCK INPUT OPTIONS

The AD9364 operates using a reference clock that can be provided by two different sources. The first option is to use a dedicated crystal with a frequency between 19 MHz and 50 MHz connected between the XTALP and XTALN pins. The second option is to connect an external oscillator or clock distribution device (such as the AD9548) to the XTALN pin (with the XTALP pin remaining unconnected). If an external oscillator is used, the frequency can vary between 10 MHz and 80 MHz. This reference clock is used to supply the synthesizer blocks that generate all data clocks, sample clocks, and local oscillators inside the device.

Errors in the crystal frequency can be removed by using the digitally programmable digitally controlled crystal oscillator (DCXO) function to adjust an on-chip variable capacitor. This capacitor can tune the crystal frequency variance out of the system, resulting in a more accurate reference clock from which all other frequency signals are generated. This function can also be used with on-chip temperature sensing to provide oscillator frequency temperature compensation during normal operation.

Anexo 11. Certificado emitido por el laboratorio de Ingeniería Civil de pruebas de ensayo de las probetas de hormigón.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL

Riobamba, 16 de septiembre de 2019

CERTIFICADO

A petición verbal de los interesados, Mayorga Mayorga Erika Tatiana con C.I. 060580777-5 y Quinatoa Herrera Franklin Iván con C.I. 060478588-1, estudiantes de la Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, debo certificar que los dos estudiantes antes mencionados, durante los meses de julio y agosto del año en curso, elaboraron probetas de hormigón y realizaron ensayos de Rotura de Cilindros de Hormigón en los Laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que puedo informar, pudiendo los interesados hacer uso del presente certificado como creyeran conveniente.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Cristina Polo Funes'.

M.Sc. María Cristina Polo Funes.

TÉCNICA DE LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
UNACH



Campus Universitario Ms.C. Edison Riera R.
Av. Antonio José de Sucre Km. 1 ½ vía a Guano
Teléfono: (593)33730880 Ext: 1428
RIOBAMBA – CHIMBORAZO – ECUADOR

Tecnología. Humanismo y Calidad