






Evaluación de la Ley de Coulomb en un sistema háptico cooperativo Evaluation of Coulomb's Law in a cooperative haptic system

V. V. García-Barrón ^a, J. A. Hernández-Alva ^{a,*}, J. D. Ramírez-Zamora ^b, O. A. Domínguez-Ramírez ^a, J. M. Fernández-Ramírez ^a

^aLicenciatura en Ingeniería en Telecomunicaciones, Área Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bDoctorado en Ciencias en Automatización y Control, Área Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Las leyes de la electrostática, permiten comprender algunos principios fundamentales de la electricidad, sus efectos y aplicaciones. La ley de Coulomb, es considerada en programas académicos de educación media superior y superior; fundamental en la formación académica en ingeniería. Comprender el principio, y las aportaciones a partir de ejercicios analíticos, corresponde a un método clásico de enseñanza y aprendizaje que no necesariamente garantiza el entendimiento y la proyección del conocimiento en la vida cotidiana y actividad profesional. Diversas contribuciones reportadas en la literatura, abordan el problema de estudio y consideran diversas herramientas tecnológicas para fortalecer la sesión académica. La contribución de este artículo de investigación, corresponde a proponer una herramienta novedosa basada en un sistema de interacción física entre un ambiente de realidad virtual y el estudiante. Para ello, el usuario modifica las condiciones del ambiente virtual e instantáneamente se evalúa un algoritmo de cálculo de fuerzas replicadas a través de dos dispositivos hápticos (dos cargas eléctricas virtuales).

Palabras Clave: Ley de Coulomb, método educativo, realidad virtual, interfaz háptica

Abstract

The laws of electrostatics allow understanding some fundamental principles of electricity, its effects and applications. Coulomb's law is considered in academic programs of high school and higher education; fundamental in the academic training in engineering. Understanding the principle, and the contributions from analytical exercises, corresponds to a classical method of teaching and learning that does not necessarily guarantee the understanding and projection of knowledge in everyday life and professional activity. Several contributions reported in the literature address the problem of study and consider various technological tools to strengthen the academic session. The contribution of this research article corresponds to propose a novel tool based on a physical interaction system between a virtual reality environment and the student. For this, the user modifies the conditions of the virtual environment and instantly evaluates an algorithm for calculating forces replicated through two haptic devices (two virtual electric charges).

Keywords: Coulomb's Law, educational method, virtual reality, haptic interface

1. Introducción

La física es una de las ciencias que más ha contribuido al desarrollo y bienestar de las personas, gracias a ella ha sido posible encontrar una explicación clara y útil en muchos casos a los fenómenos que se presentan en la vida. Su objetivo fundamental es anticiparse a los hechos mediante el estudio de las propiedades del universo, a través de los conceptos funda-

mentales de espacio y tiempo, ya sean estos hechos revelados directa o indirectamente a través de la experiencia. Como se ha mencionado, si la enseñanza de las ciencias se fundamenta en la formación de competencias orientadas hacia la construcción de un pensamiento crítico, el presente trabajo toma gran importancia para la física, ya que dicha propuesta didáctica ofrece a los estudiantes un acercamiento a algunos de los conceptos básicos de la electrostática, de ese modo, motiva al alumnado a

* Autor para correspondencia:

Correo electrónico: ga296996@uaeh.edu.mx (Viviana V. García-Barrón), he271535@uaeh.edu.mx (José A. Hernández-Alva), juandaniel_ramirez@uaeh.edu.mx (Juan D. Ramírez-Zamora), omar@uaeh.edu.mx (Omar A. Domínguez-Ramírez).

Historial del manuscrito: recibido el 20/03/2023, última versión-revisada recibida el 18/05/2023, aceptado el 26/05/2023, en línea (postprint) desde el 26/05/2023, publicado el 05/07/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i21.10755>



prepararse a través de prácticas en aula demostrativa y, en este sentido, las variadas estrategias estarán contribuyendo a la formación de aquellas competencias esenciales que los estudiantes necesitan para su desarrollo académico. Se ha sustentado un modelo educativo llamado aprendizaje activo de la física, el cual permite que el estudiante aprenda física sin depender de forma drástica de un libro de texto o del profesor que ofrece la enseñanza de la disciplina, el cual conlleva a trabajar con materiales de bajo costo para desarrollar experimentos en tiempo real. (César Eduardo Mora Ley and B., 2021). Es por ello que a través de la ley de coulomb nos hemos adentrado en experimentar y aplicar dicha ley en el área del aprendizaje, ya que a diferencia de otras herramientas didácticas que hoy en día ya existen, hemos desarrollado una interfaz interactiva con la cual el usuario podrá manipular lo que ocurre en la ley descrita por coulomb, teniendo en sus manos la atracción y repulsión de las cargas, experimentado con los dispositivos hápticos.

1.1. *Breve descripción del estado del arte*

Algunos recursos digitales que han sido elaborados con tecnologías digitales son los simuladores y videojuegos, los cuales han favorecido el aprendizaje tanto en matemáticas como en ciencias naturales, revelando así un gran potencial para promover la comprensión conceptual, la motivación y el desarrollo del discurso científico en torno a fenómenos que, en la realidad, sería imposible observar y manipular. (Sánchez Sánchez and Sánchez-Noroño, 2020) Sin embargo, la mayoría de las investigaciones relacionadas con esta temática se enfocan en el uso de los simuladores como recursos didácticos que coadyuvan a la comprensión y estímulo hacia el estudio de las matemáticas y las ciencias naturales. (Burbano Pantoja et al., 2015) La comprensión de los principios básicos de la Física es, en lo relacionado con el aprendizaje de las ciencias, uno de los objetivos que busca el profesor en el interior del aula. Sin embargo, a menudo los estudiantes presentan una incompleta apropiación de los conceptos elementales ya que, en la mayoría de los casos, los mismos quedan en una explicación teórica tan abstracta y alejada de la realidad que carece de interés para ellos. (García et al., 2014) El aspecto pedagógico de la propuesta está vinculado al proceso de enseñanza-aprendizaje con intenciones de mejorarlo. Puesto a que al ser una propuesta completamente educativa que pretende resolver un problema de aprendizaje en el campo de la física, es menester usar metodologías constructivas como el aula invertida y también recursos tecnológicos que vayan de la mano con estas, facilitando la tarea del docente en su rol de guía para el estudiante. (Ochoa Macías and Bonilla Flores, 2021) Según el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) el índice promedio de egreso en ingeniería es de 67.88 por ciento, así este dato nos permite identificar que el 32.28 por ciento de los estudiantes que se inscriben en ingeniería no concluyen la carrera por desempeño académico. Así como también dice que solo ocho de cada 100 alumnos que inician estudios universitarios los concluyen satisfactoriamente. (Ruiz-Ramírez et al., 2021) La metodología de enseñanza solo se concentra en procesos de memorización de los contenidos y transmisión pasiva de los mismos desde el docente hasta el estudiante, lo que hace que el tema sea aburrido y poco significativo para el estudiante, desencadena en reprobar la asignatura. (Vivas and Zúñiga, 2019). Se busca motivar y

generar interés en el tema a partir de situaciones problema. Se ha comprobado a través de un sondeo propuesto por (Mora Moreno, 2011) con estudiantes de nivel superior y medio superior, que quieren algo más aplicado e interactivo, orientado a valorar la utilidad de lo que se enseña en el aula. Les parece que es una herramienta que puede generar la motivación suficiente para la comprensión y aprendizaje de la temática más que en el laboratorio que lo encuentran un ambiente muy formal y de obligatorio cumplimiento. Los materiales didácticos cumplen varias funciones: incrementan la motivación de los estudiantes con desarrollos serios, interesantes y atractivos. Pero, también, deberán proveer al estudiante de una estructura organizativa capaz de hacerle sentir que está haciendo un curso, no sólo leyendo un material. Se refiere aquí a la estructura que vincula los conocimientos previos con los nuevos aportes y que establece o ayuda a establecer las futuras conexiones de los mismos, apoyando de este modo al estudiante para que teja la trama de relaciones necesarias para el aprendizaje. (Alarcón Cabrera and Armas Sanchez, 2014) Dentro de un panorama de renovación dentro de las líneas de investigación en didáctica de las ciencias, existe una línea pujante que trabaja con la intención de incorporar las metaciencias, disciplinas que tienen como objeto de estudio la ciencia, a la enseñanza de las ciencias naturales. Su interés radica en que las mismas ayudan a superar obstáculos en el aprendizaje de los contenidos, métodos y valores científicos, así como también generar ideas, materiales, recursos, enfoques y textos para diseñar la enseñanza de las ciencias. (Lozano and Orlandini, 2021) Los contenidos digitales basados en simuladores permiten la interactividad y la representación virtual de aspectos de los fenómenos difíciles o imposibles de observar, a la vez que promueven la exploración y permiten la solución de problemas dentro del mismo entorno de aprendizaje. (Benitez, 2015) El desarrollo de escenarios y aplicaciones móviles basados en realidad aumentada (RA) que permitan apoyar y facilitar espacios de práctica de algunas asignaturas es un tema aún reciente, que solo será viable y adecuado, cuando integre el uso apropiado y eficiente de estas tecnologías en función de las necesidades contemporáneas de aprendizaje. (Díaz Salamanca, 2018) Una interfaz háptica permite tener sensaciones que normalmente se experimentan solo en la realidad, tales como el choque contra paredes, la sensación de agarrar objetos, tener percepción de temperatura, presión y formas; es por esto que permite la vinculación con la medicina, haciendo que los costos de entrenamiento disminuyan por no requerir grandes espacios físicos, tiempo de trabajo de especialistas, y limitación de tiempo. (Loaiza Gómez and Vega Uribe, 2015) Otro de los puntos de partida del proyecto fue la introducción de tecnologías interactivas y hápticas, aquellas tecnologías que se basan en lo táctil, que parten de los cuerpos, de la materia, de lo singular como apuesta por una inversión epistemológica transgresora del predominio absoluto de lo visual en “la sociedad del espectáculo”, (López, 2013).

1.2. *El enunciado del problema y solución*

El conocimiento de la electrostática, y de las leyes físicas clásicas que la rigen, se fundamenta en el entendimiento del concepto, la solución de un problema analítico congruente y, en el mejor de los casos, en la experimentación. La ausencia de la validación práctica en un laboratorio, establece estados

de confusión y frustración, promoviendo el desinterés de parte del estudiante. Es claro que esta última fase, establece condiciones idóneas como punto de partida para crear e innovar alrededor de estos principios. Los elementos del método científico adheridos a estrategias de aprendizaje, implican a la observación sistemática a través de conductas y mediciones; información requerida para garantizar un análisis y así poder establecer una conclusión. La captación activa de información asociada a un experimento, no sólo está en dependencia de instrumentos de medición confiables, también y de manera significativa de los canales neurofisiológicos del humano observador (la vista, el oído, el olfato, el gusto y el tacto). Cuanto mayor información se adquirida, de manera directa o indirecta, existe mayor oportunidad de establecer un análisis confiable. El problema de investigación y solución, es establecido a partir de dos aspectos:

- Tanto en el proceso de aprendizaje como en la formulación de un análisis y conclusión en el experimento, la percepción visual y táctil/kinestésica del humano observador, fortalecen significativamente al resultado.

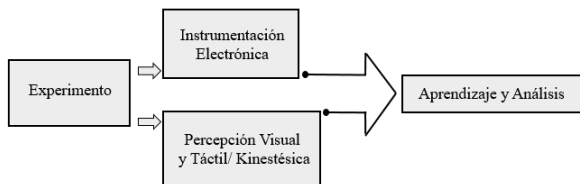


Figura 1: Esquema de percepción global y análisis de un experimento.

- Un sistema cooperativo para interacción física humano-robot, basada en dispositivos hápticos con modelo activo de impedancia, permiten recrear dinámicamente a la Ley de Coulomb, estimulando el sentido del tacto en ambas extremidades superiores.

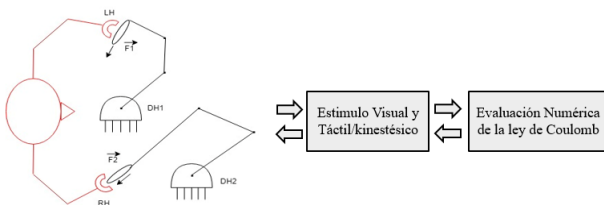


Figura 2: Sistema de interacción física humano-robot cooperativo.

1.3. Contribuciones

La contribución de este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, correspondió en consolidar una plataforma experimental que permita recrear la Ley de Coulomb empleando un sistema cooperativo de dispositivos hápticos de tipo mayor-domo; en el que las fuerzas de interacción son calculadas en tiempo real y conducen al estímulo kinestésico del estudiante.

2. Materiales y métodos

2.1. Fundamentos de electrostática

La electrostática es la rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por distribuciones de cargas

estáticas, esto es, el campo electrostático de un cuerpo cargado. (Escobar Acosta et al., 2020) Históricamente, la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló. Con la postulación de la Ley de Coulomb fue descrita y utilizada en experimentos de laboratorios a partir del siglo XVII, y ya en la segunda mitad del siglo XIX las leyes de Maxwell concluyeron definitivamente su estudio y explicación permitiendo demostrar cómo las leyes de la electrostática y las leyes que gobernaban los fenómenos magnéticos pueden ser estudiados en el mismo marco teórico denominado electromagnetismo. (Escobar Acosta et al., 2020) La carga sobre objetos se debe a un exceso o deficiencia de electrones en sus superficies. Estas cargas se denominan estáticas o electricidad estática. Esto se debe a que pueden permanecer estacionarios en un objeto durante largos periodos de tiempo. La súbita transferencia de esta carga de un cuerpo a otro por cuerpos de carga opuesta que se ponen en la proximidad se llama descarga electrostática, las interacciones entre las cargas eléctricas se describen mediante la Ley de Coulomb. (Dangelmayer, 1990) Para explicar la teoría electrostática, se diseñó una propuesta didáctica que ofreció a los estudiantes un acercamiento a algunos conceptos básicos de dicha rama de la física a través de prácticas de aula demostrativas. La función principal que cumplen las prácticas de aula demostrativas, como forma pedagógica de enseñanza, es propiciar construcción de conocimiento por medio de experimentos y actividades. Esto, para cumplir con el propósito de que los estudiantes aprendan esa teoría, con lo cual se plantea aumentar su nivel de experiencia, ya que de alguna manera la observación genera procesos de descripción, comparación y relación, lo que a su vez lleva a inferir y argumentar. Es decir, que los estudiantes puedan ordenar sus ideas para darle significado a lo que perciben, en otras palabras, que ellos conformen una narrativa propia, con bases sólidas de argumentación. (Beltrán Sánchez et al., 2020) Las prácticas de aula demostrativas dan la oportunidad a los estudiantes de representar algunos conceptos básicos de la electrostática, despertando en ellos la curiosidad y el interés por el estudio de los fenómenos eléctricos presentes en la naturaleza y en gran parte de la tecnología que se usa frecuentemente. (Cruz Solano, 2017) Así, la propuesta didáctica está encaminada hacia la motivación y actitud positiva por el aprendizaje de las ciencias y de la Física, además de los otros campos del intelecto humano, donde la transformación y construcción del conocimiento en el estudiante logren potenciar las habilidades de comprensión, explicación e interpretación del universo, dando lugar a nuevas teorías e inventos. (Cruz Solano, 2017)

2.2. Fundamentos de háptica

Por percepción háptica se entiende la combinación de dos modalidades sensoriales: la táctil y la cinestésica. La percepción táctil adquiere la información exclusivamente a través del sentido cutáneo y está más orientada a la capacitación de la información de superficie. (Navarrete, 2014) Consideran la percepción táctil como un proceso estático, receptivo, que a través del sentido cutáneo capta la temperatura, peso, textura. Por el contrario, considera que la percepción háptica que sea activa, dinámica, exploratoria, y que capta la forma mediante la mano envolvente y móvil. (Navarrete, 2014) El sentido háptico es el que permite obtener información de las características físicas de un objeto, con lo que complementa la información obtenida

inicialmente mediante la visión. La percepción háptica requiere de la interacción con el objeto desconocido, por medio de movimientos propios de la actividad exploratoria. (Chaves, 2017) La interacción con los objetos se puede dar de dos maneras, una pasiva y otra activa (Ramirez-Zamora et al., 2022). La forma pasiva se refiere a que se toca un objeto con los dedos o con la mano sin realizar movimientos, con esto se obtiene información sobre la dureza, temperatura y de alguna forma de la textura y de su contorno. La forma activa hace referencia a que un objeto se manipula y explora su superficie para obtener información acerca de su peso, contorno, textura, dureza, maleabilidad, etc. (Chaves, 2017) De hecho, el sentido del tacto se distribuye por todo el cuerpo, a diferencia de los otros cuatro sentidos convencionales, que se centralizan en partes específicas del cuerpo. El sentido del tacto se asocia principalmente con sentidos táctiles activos como nuestras manos. Tal sentidos se pueden categorizar de varias maneras, y tienen un vínculo con el sentido cinestésico. Los humanos somos muy sensibles al tacto, pero diferentes partes de nuestro cuerpo tienen diferentes sensibilidades. Estas sensibilidades varían porque la piel es una interfaz que discrimina centralmente cuatro modalidades de sensación, a saber, tacto, frío, calor y dolor. (El Saddik et al., 2011) Por otro lado, actualmente existe un crecimiento exponencial de los desarrollos hápticos, pero siempre asociados a la tecnología y al concepto del tacto visual y no autónomo. Desde muy pequeños usamos el tacto, como elemento de percepción fundamental. Gracias a que, con él logramos percibir las cualidades de los objetos (presión, temperatura, textura y dureza). Según explica Diane Acherman, escritora de “Una historia natural de sentidos”. (Rubilar-Medina, 2019) Somos seres sensibles caracterizados por percepciones, en diferentes calibres, utilizando el tacto como medio sensitivo de unión. A lo largo de la educación, habitualmente queda limitado este sentido, ya que se le ha asociado a algo negativo. Normas, protocolos y demás características debido a la famosa frase, que solemos ver en letreros, “No tocar”, debido a que son muchas veces piezas frágiles, que por su manipulación pueden ser estropeadas y alterar la intencionalidad de la composición. (Rubilar-Medina, 2019) La percepción Háptica no depende de lo visual, como han propuesto algunos investigadores sino que suministra importante información sobre ciertas dimensiones de los objetos como su temperatura, peso, rugosidad, etc., que no pueden percibirse a través de otras modalidades sensoriales. (Ballesteros, 1993)

2.3. Propuesta tecnológica

Para la implementación de la plataforma propuesta se realiza una integración de diferentes herramientas computacionales y de hardware, las cuales se describen a continuación.

2.3.1. Unity

Para la generación del ambiente virtual que emula las cargas en la aplicación de la ley de coulomb, se utiliza un motor de videojuego multiplataforma denominado Unity, para este trabajo de investigación se utiliza la versión 2020.3.22fa.1228 Personal. Unity es lo que se conoce como un motor de desarrollo o motor de juegos. El término motor de videojuego, game engine, hace referencia a un software el cual tiene una serie de rutinas de programación que permiten el diseño, la creación y

el funcionamiento de un entorno interactivo; es decir, de un videojuego. Dentro de las funcionalidades típicas que tiene un motor de videojuegos, son las siguientes: • Motor gráfico para renderizar gráficos 2D y 3D • Motor físico que simule las leyes de la física • Animaciones • Sonidos • Inteligencia Artificial • Programación o scripting.

2.3.2. Editor C#

Para generar los Scripts de control y vinculación de elementos 3D y los dispositivos hápticos, se utiliza un editor de lenguaje C# denominado JetBrains Rider en su versión 2021.2.2. JetBrains Rider es un editor de C# rápido y potente para Unity que funciona en Windows, Mac y Linux. Con más de 2500 inspecciones y refactorizaciones de código inteligente, Rider mejora la experiencia C# y permite escribir código a prueba de errores mucho más rápido.

2.3.3. Plataforma experimental

Para la etapa experimental se consideran dos dispositivos hápticos Geomagic Touch, los cuales están clasificados como robots no lineales de tres grados de libertad. La plataforma experimental se ejecuta en una estación de trabajo Intel(R) Core(TM) i7-4720HQ CPU 2.60GHz, 16 GB de RAM con NVIDIA GeForce GTX 980M.

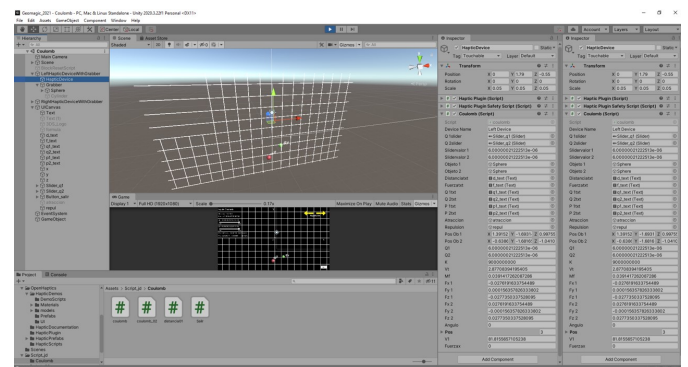


Figura 3: Programación y modelado del sistema de interacción hombre - robot para la recreación virtual de la Ley de Coulomb.

3. Retroalimentación de fuerza cooperativa

3.1. Algoritmo para el cálculo de fuerza

De acuerdo a la formulación de la ley de Coulomb definida en 1.

$$\vec{F} = K \frac{q_1 q_2}{d^2} \quad (1)$$

donde \vec{F} es la fuerza electrostática entre dos cargas, $K = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$ es la constante de proporcionalidad, q_1 y q_2 representan las cargas y d es la distancia que existe entre dichas cargas. Como primer paso se obtienen las posiciones operacionales del efector final de cada dispositivo, los cuales representan a las cargas q_1 y q_2 , como se había mencionado anteriormente, basándonos en la representación de la Figura 4, se determinan los componentes vectoriales para obtener la distancia entre dos cargas de forma general.

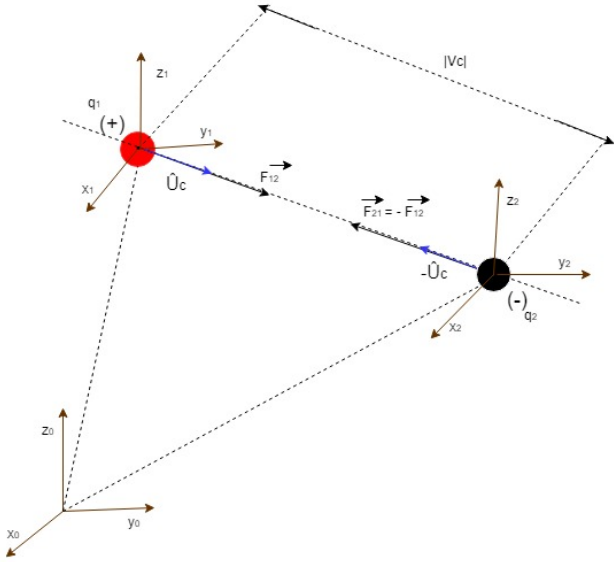


Figura 4: Componentes vectoriales para análisis y cálculo de la fuerza de atracción o repulsión electrostática.

donde \vec{V}_1 corresponde al componente vectorial de la carga q_1 , que se forma a partir del marco de referencia (x_0, y_0, z_0) del espacio de trabajo hasta la posición inicial de la carga, \vec{V}_2 corresponde al componente vectorial de la carga q_2 , que también es formado desde el marco de referencia del espacio de trabajo hasta la posición inicial de la carga q_2 , \vec{V}_c representa el vector distancia entre q_1 y q_2 , \vec{u}_1 y \vec{u}_2 representan el vector unitario de cada una de las cargas y \vec{F}_1 y \vec{F}_2 corresponden a la componente de fuerza que existe entre q_1 y q_2 (Figura 5). Utilizando método de componentes para suma de vectores tenemos que el módulo del vector resultante es:

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_c = \vec{V}_2$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_2 - \vec{V}_1$$

$$\vec{V}_c = (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} + (z_2 - z_1)\hat{k}$$

$$|\vec{V}_c| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

El módulo de \vec{V}_1 esta definido por:

$$\vec{V}_1 = \langle x_1, y_1, z_1 \rangle = x_1\hat{i} + y_1\hat{j} + z_1\hat{k}$$

$$|\vec{V}_1| = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$$

$$\vec{u}_1 = \frac{\vec{V}_1}{|\vec{V}_1|} = \frac{x_1}{|\vec{V}_1|}\hat{i} + \frac{y_1}{|\vec{V}_1|}\hat{j} + \frac{z_1}{|\vec{V}_1|}\hat{k}$$

y el módulo de \vec{V}_2 esta dado por:

$$\vec{V}_2 = \langle x_2, y_2, z_2 \rangle = x_2\hat{i} + y_2\hat{j} + z_2\hat{k}$$

$$|\vec{V}_2| = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$$

$$\vec{u}_2 = \frac{\vec{V}_2}{|\vec{V}_2|} = \frac{x_2}{|\vec{V}_2|}\hat{i} + \frac{y_2}{|\vec{V}_2|}\hat{j} + \frac{z_2}{|\vec{V}_2|}\hat{k}$$

Se puede reescribir la formulación de la ley de Coulomb y tenemos que:

$$\vec{F} = K \frac{q_1 q_2}{|\vec{V}_c|^2} \tag{2}$$

Pero dado que estamos trabajando en un plano de tres dimensiones, se requiere conocer la coordenada sobre la cual estamos trabajando y poder garantizar la respuesta del dispositivo en la dirección correcta, es por ello que se propone definir la fuerza como:

$$\vec{F}_1 = \vec{F} \vec{u}_c \tag{3}$$

donde

$$\vec{u}_c = \frac{\vec{V}_c}{|\vec{V}_c|} = \frac{x_2 - x_1}{|\vec{V}_c|}\hat{i} + \frac{y_2 - y_1}{|\vec{V}_c|}\hat{j} + \frac{z_2 - z_1}{|\vec{V}_c|}\hat{k}$$

Por lo tanto, tenemos que:

$$\vec{F}_1 = \left[K \frac{q_1 q_2}{|\vec{V}_c|^3} \right] [x_2 - x_1\hat{i} + y_2 - y_1\hat{j} + z_2 - z_1\hat{k}] \tag{4}$$

Separando \vec{F}_1 en sus componentes (F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}) tenemos lo siguiente:

$$F_{x1} = K \frac{q_1 q_2}{|\vec{V}_c|^3} (x_2 - x_1) \tag{5}$$

$$F_{y1} = K \frac{q_1 q_2}{|\vec{V}_c|^3} (y_2 - y_1) \tag{6}$$

$$F_{z1} = K \frac{q_1 q_2}{|\vec{V}_c|^3} (z_2 - z_1) \tag{7}$$

Las ecuaciones 5, 6 y 7 son implementadas sobre la plataforma para emular la fuerza ejercida entre las cargas.

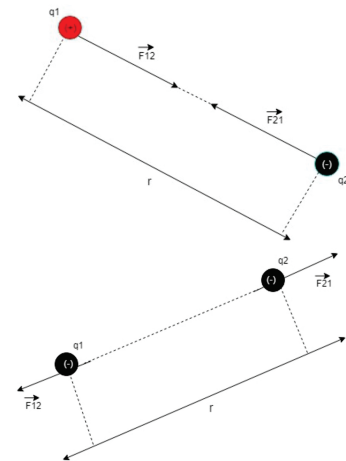


Figura 5: Esquemas representativos de las leyes de la electrostática

En la Figura 7 se describe mediante un diagrama de flujo la evaluación del algoritmo implementado en el sistema háptico, donde en el bloque de decisión es el que evalúa el signo a las cargas, si las cargas q_1 y q_2 tienen signo diferente existe una fuerza de atracción entre ellas, en caso contrario se registra y se emula la repulsión entre ellas.

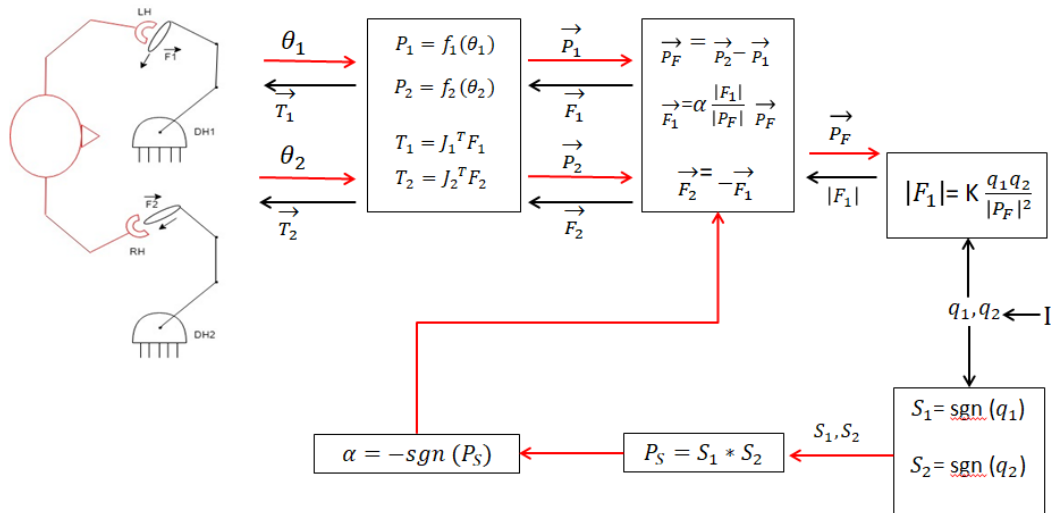


Figura 6: Algoritmo para la simulación háptica de la Ley de Coulomb basado en un Sistema de Interacción Hombre-Robot Cooperativo.

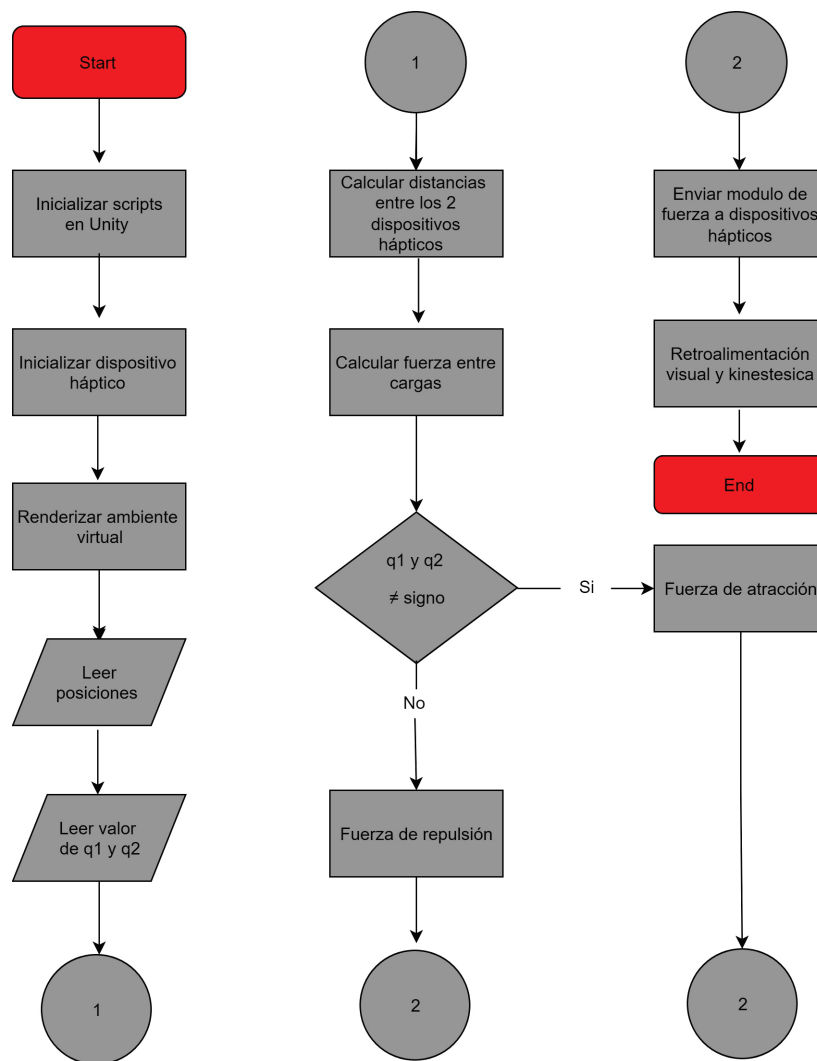


Figura 7: Diagrama de flujo representativo de la evaluación del algoritmo de control en el sistema cooperativo.

3.2. Integración de la plataforma de interacción física

En la Figura 8 se presenta la interfaz de usuario de la plataforma, la cual se pueden realizar configuraciones y cambios de parámetros en tiempo real, en 1) se visualiza la distancia que existe entre q_1 y q_2 , en 2) se muestra la fuerza calculada en ese instante de tiempo, 3) es un control manual para asignar el valor de las cargas q_1 y q_2 , el cual opera en un rango de -6μ coulombs a 6μ coulombs para ambos casos, 5) es una representación visual del sentido de la fuerza que existe entre las cargas, 6) y 7) son las cargas q_1 y q_2 las cuales son representadas y emuladas por el efector final de los dispositivo hápticos y 8) es un botón que tiene como acción finalizar y cerrar la aplicación.

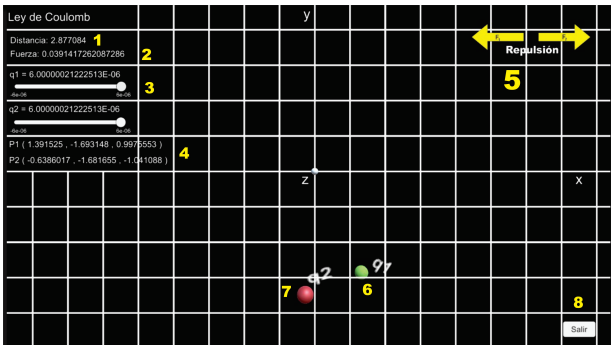


Figura 8: Interfaz de usuario para emular los efectos de la ley de Coulomb.

En la Figura 9, se muestra la plataforma implementada, la cual está integrada por dos dispositivos hápticos en configuración cooperativa, es decir, que navegan e interactúan dentro de un mismo ambiente virtual, teniendo colisiones y contacto entre ellos si se encuentran en las mismas coordenadas de posición sobre el espacio de trabajo.

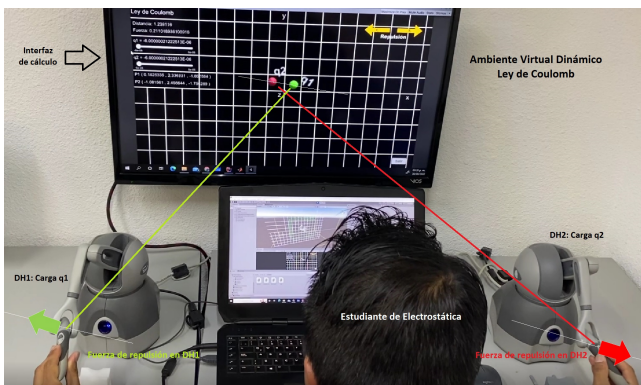


Figura 9: Sistema de interacción hombre - robot para la simulación virtual de fuerzas electrostáticas (Ley de Coulomb).

4. Resultados y discusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la experimentación y utilización de la plataforma por parte de una muestra piloto de estudiantes, en la Figura 12 se muestra el comportamiento de la fuerza en cada eje de acción, recordando que el ambiente generado es 3D, la cual se envía al dispositivo háptico izquierdo y derecho de la plataforma, con la intención de que el estudiante pueda sentir la la fuerza de atracción o repulsión

calculada en ese instante de tiempo, la cual depende de la distancia entre las cargas y valores de las mismas. En la Figura 11 se muestra el comportamiento del valor de las cargas q_1 y q_2 respectivamente, donde el valor de estas cambian durante el experimento, de acuerdo a la necesidad del usuario. Por último, en la Figura 13 se observa el módulo de fuerza del experimento. Con la obtención numérica del comportamiento del experimento por parte del usuario, podemos observar en que momento se tiene interacción entre las cargas, y en esos puntos es donde el usuario tiene mayor retroalimentación de fuerza en los dispositivos y así, poder emular y sentir los efectos derivados de la ley de Coulomb. Cabe resaltar que solo que evidencia las gráficas de un solo experimento debido al tema de espacio en este trabajo de investigación.

4.1. Evaluación de la plataforma

En la Figura 10 se muestra la participación y manipulación de estudiantes, los cuales ayudaron a validar la plataforma tecnológica propuesta.

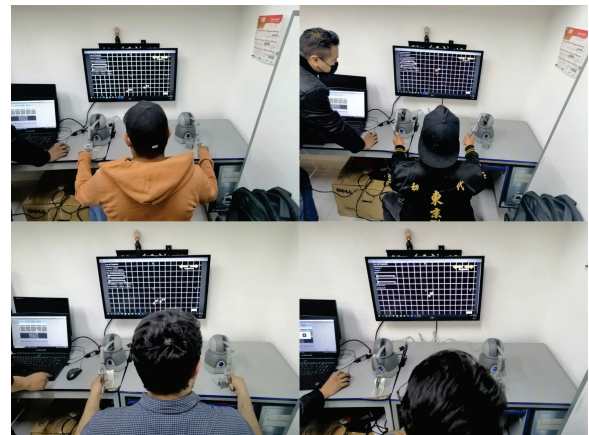


Figura 10: Implementación de la plataforma con usuarios.

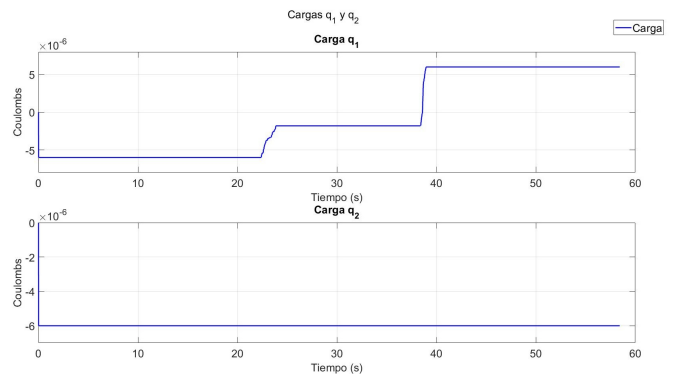


Figura 11: Experimento con cambio de magnitud de carga eléctrica y signo.

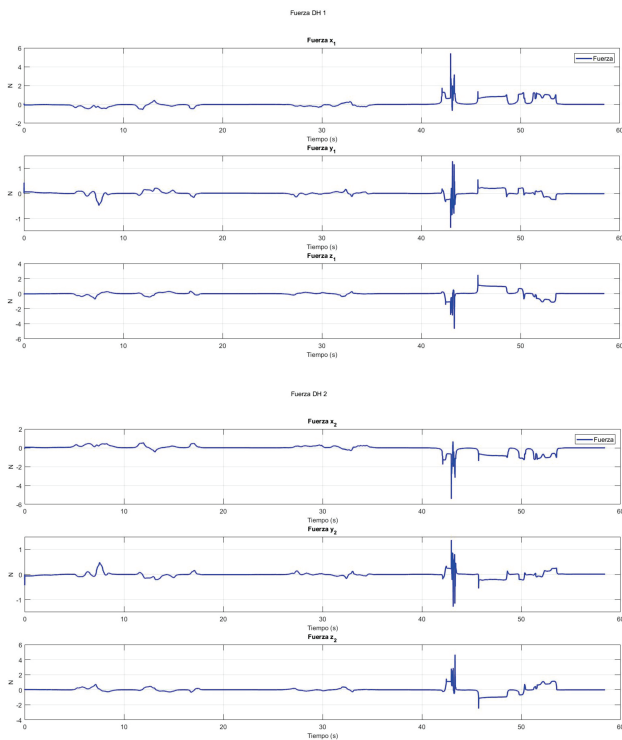


Figura 12: Componentes de las fuerzas electrostáticas asociadas a la percepción háptica (modificación del signo y de la magnitud de carga eléctrica en tiempo real).

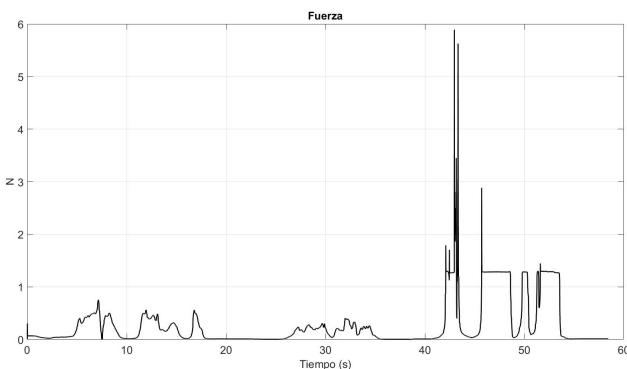


Figura 13: Señal representativa del módulo de la fuerza electrostática con variación de la magnitud de la carga en tiempo real.

4.2. Percepción del usuario

En respuesta y valoración por parte de los usuarios que han llevado a cabo esta experimentación, nos han podido compartir su positiva práctica en el, ya que los hápticos han resultado bastante cómodos e interactivos con los objetos visualizados en el software. De tal modo que han podido comprender a mayor rasgo lo que refiere la ley de Coulomb.

La implementación de plataformas educativas que demuestren los efectos físicos ayuda a demostrar experimentos de una manera práctica y a su vez sencilla. A continuación se presentan algunos comentarios realizados por los estudiantes que validan la plataforma.

- Podemos ver de manera experimental lo que es un Coulomb y así poder entender más el tema.

- La intensidad de la fuerza, así como la repulsión o atracción que se siente por medio de la interfaz háptica ayudan de gran manera al entendimiento y fortalecimiento de la ley de Coulomb.
- Es una manera práctica y entretenida para comprender dicho tema, ayuda realmente a como son las fuerzas de atracción y repulsión.
- Nos permite comprender como funciona e interactúan entre si las cargas de mismo signo o diferentes y en mayor o menos repulsión o atracción.

4.3. Discusiones

De acuerdo a los métodos clásicos de enseñanza en la ingeniería, donde la principal aportación al conocimiento del estudiante es la práctica de laboratorio, la cual provee al usuario una herramienta y conocimiento para comprender los efectos teóricos, físicos, mecánicos, etc., pero que aun teniendo el instrumental o equipo de laboratorio adecuado, no se logran comprender alguno de ellos, es por ellos que la aportación de este trabajo de investigación es incluir un sistema háptico cooperativo para emular mediante la retroalimentación visual y kinestésica (fuerza) para mejorar la comprensión de dichos efectos, en nuestro caso en específico, los efectos de fuerza eléctrica a partir del análisis de la ley de Coulomb. Por lo tanto se determinó hacer hincapié en el aprovechamiento que da la interacción de los dispositivos hápticos, para que esta herramienta pueda expandirse y ser explotada de la misma forma en escuelas, o bien en Centros de Desarrollo y rehabilitación.

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

Al finalizar este proyecto, se recapituló y se analizó repetidamente la funcionalidad, eficiencia y efectividad del software, con lo cual se llegó a una conclusión colectiva, de que este trabajo ha sido diseñado con fines de desarrollo y contribución hacia el progreso de la educación en México, teniendo como antecedente una deficiencia muy notoria en el aprendizaje de ciencias exactas específicamente. Y es así que por medio de este sistema, se pretende iniciar una metodología de enseñanza basada en softwares educativos los cuales trabajen bajo un objetivo específico, direccionado a ser interactivo e interesante.

5.2. Trabajo futuro

Dentro de los rubros que se tomaron en un inicio para el desarrollo de este proyecto, se precisó que el mejoramiento y la evolución del software a futuro, conlleva un desarrollo central, el cual permita ser utilizado en personas con ciertas deficiencias cognitivas, es decir, se pretende escalar este trabajo de investigación, a plataformas que ayuden al proceso de entrenamiento y rehabilitación en el área de la salud.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Laboratorio de Robótica Avanzada e Interfaces Hápticas por el apoyo otorgado durante la gestión y desarrollo de este trabajo de investigación. El tercer autor también agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de Doctorado No. 410284 otorgada durante la realización de este proyecto.

Referencias

- Alarcón Cabrera, J. and Armas Sanchez, N. T. (2014). Aplicación de material didáctico en el área de cta (física) para contribuir al aprendizaje significativo de los estudiantes del 5to año de secundaria del colegio experimental de aplicación de la universidad nacional de educación en el tema de electrostática año 2012.
- Ballesteros, S. (1993). Percepción háptica de objetos y patrones realzados: una revisión. *Psicothema*, 5(2):311–321.
- Beltrán Sánchez, J. R., Escobar Acosta, J. H., and González Acosta, J. (2020). Fundamentos de electrostática y magnetostática para ingenieros.
- Benitez, J. L. V. (2015). Percibiendo lo invisible: la enseñanza de las fuerzas físicas en ambientes multisensoriales.
- Burbano Pantoja, V. M. Á., Pinto Sosa, J. E., and Valdivieso Miranda, M. A. (2015). Formas de usar la simulación como un recurso didáctico. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 45.
- Chaves, M. (2017). Diseño y construcción de un prototipo de interfaz háptica para la reproducción de texturas. *Universidad Pontificia Bolivariana*.
- Cruz Solano, A. (2017). Propuesta didáctica para la enseñanza de algunos conceptos básicos de electrostática.
- César Eduardo Mora Ley, S.-S. R. and B., C. I. (2021). *Aprendizaje activo de la física, clases demostrativas interactivas*. Ediciones Comunicación Científica.
- Dangelmayer, G. T. (1990). Fundamentals of electrostatics. In *ESD Program Management*, pages 33–51. Springer.
- Díaz Salamanca, M. A. (2018). Aplicación móvil basada en realidad aumentada como herramienta de apoyo al aprendizaje de conceptos relacionados con la interacción entre cargas eléctricas estacionarias.
- El Saddik, A., Orozco, M., Eid, M., and Cha, J. (2011). *Haptics technologies: Bringing touch to multimedia*. Springer Science & Business Media.
- Escobar Acosta, J. H., Sánchez, B., Ramón, J., and González Acosta, J. (2020). *Fundamentos de electrostática y magnetostática para ingenieros*. Editorial Unimagdalená.
- García, D., Domínguez, M. A., and Stipcich, M. S. (2014). El modelo tpack como encuadre para enseñar electrostática con simulaciones.
- Loaiza Gómez, P. A. and Vega Uribe, M. A. (2015). *Simulador tridimensional para el desarrollo de la habilidad de transferencia de aros para cirugía laparoscopia usando una interfaz háptica: Silaph 3D*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- López, B. I. (2013). Tecnologías hápticas. *Revista Teknokultura*, 10(3):747–758.
- Lozano, E. and Orlandini, M. L. (2021). Un ciclo de diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica sobre naturaleza de la ciencia que integra la modelización de fenómenos electrostáticos para la formación docente de nivel inicial. *Bio-grafía*.
- Mora Moreno, M. (2011). Propuesta didáctica para la enseñanza y aprendizaje de conceptos físicos básicos de electrostática abordados con estudiantes de educación básica secundaria. *Facultad de Ciencias*.
- Navarrete, A. C. (2014). Acercamiento al diseño háptico: Una breve propuesta de pautas para el desarrollo de imágenes hápticas accesibles a personas con discapacidad visual. In *Reflexiones sobre el diseño para la vida cotidiana*, pages 119–144. Editorial Prado.
- Ochoa Macías, A. A. and Bonilla Flores, A. P. (2021). La enseñanza de la ley de coulomb utilizando el enfoque de la clase invertida implementada en una plataforma virtual. B.S. thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la ...
- Ramírez-Zamora, J. D., Domínguez-Ramírez, O. A., Ramos-Velasco, L. E., Sepulveda-Cervantes, G., Parra-Vega, V., Jarillo-Silva, A., and Escotto-Cordova, E. A. (2022). Hrpi system based on wavenet controller with human cooperative-in-the-loop for neurorehabilitation purposes. *Sensors*, 22(20).
- Rubilar-Medina, J. E. (2019). Percepción háptica, objetos y repertorios visuales: una experiencia para repensar la materialidad en educación artística infantil. *Comuniars. Revista de Imagen, Artes y Educación Crítica y Social*, (2).
- Ruiz-Ramírez, L. R., García-Vargas, M. d. L. E., Molina-Ruiz, H. D., and Reyes-Ruiz, G. (2021). Factores que inciden en la deserción escolar. In *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, pages 1–5.
- Sánchez Sánchez, I. C. and Sánchez-Noroño, I. v. (2020). Elaboración de un simulador con geogebra para la enseñanza de la física. el caso de la ley de coulomb. *REAMEC-Rede Amazônica de Educação Em Ciências e Matemática*.
- Vivas, S. and Zúñiga, J. (2019). Diseño de aplicación móvil para el aprendizaje de la ley de coulomb con estudiantes de ingeniería de sistemas de la corporación universitaria. In *VI Congreso Nacional de Investigación en Educación en Ciencias y Tecnología*.