



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Sistema de entrenamiento de realidad virtual para el  
monitoreo de indicadores de calidad de la energía en  
subestación eléctrica**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias (Mecatrónica)**

**Presenta:**

David Jaramillo Arteaga

**Dirigido por:**

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

San Juan del Río, Querétaro  
Marzo 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



SISTEMA DE ENTRENAMIENTO DE REALIDAD VIRTUAL PARA EL MONITOREO DE  
INDICADORES DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS (MECATRÓNICA)**

Presenta

**DAVID JARAMILLO ARTEAGA**

Dirigido por

**DR. LUIS ALBERTO MORALES HERNANDEZ**

SINODALES

**DR. LUIS ALBERTO MORALES HERNÁNDEZ**  
Presidente

**DR. ROQUE ALFREDO OSORNIO RÍOS**  
Secretario

**DR. IRVING ARMANDO CRUZ ALBARRÁN**  
Vocal

**DR. DAVID ALEJANDRO ELVIRA ORTIZ**  
Suplente

**DR. MARTÍN VALTIERRA RODRÍGUEZ**  
Suplente

## RESUMEN

En los últimos años, los problemas de la Calidad de la Energía han incrementado exponencialmente generando altos costos de producción para los usuarios y proveedores de la energía eléctrica, quienes buscan capacitar al personal eléctrico en dicha área. Los cursos existentes en calidad de la energía son escasos, teóricos, de difícil acceso a las instalaciones y equipos, costosos, con un grado de aprendizaje reducido y con un riesgo latente para el usuario en práctica. En este contexto, la realidad virtual se presenta como una tecnología de vanguardia y de última generación que permite superar las desventajas de los cursos teóricos en cuanto a la capacitación de los recursos humanos del área eléctrica, específicamente de la calidad de la energía. Por esta razón, en este trabajo se implementa un aula virtual y una subestación de potencia para capacitación y entrenamiento de usuarios relacionados al área de la Calidad de la Energía mediante el uso de un visor Oculus Quest. Diferentes softwares son utilizados durante el proceso, tales como Unreal Engine 4, Autodesk 3Ds Max y Visual Studio. Los entornos virtuales presentan la capacitación en cuanto a disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, equipos de medición y eléctricos, adquisición de señales en subestación, entre otros. Los resultados muestran que los conocimientos adquiridos por un usuario utilizando realidad virtual en el área de la calidad de la energía pueden incrementar hasta en un 21.42% respecto a cursos teóricos, el tiempo de identificación de disturbios eléctricos, indicadores estadísticos, equipo de seguridad y eléctrico, es reducido desde 1.5 hasta 3.48 veces cuando se capacita con realidad virtual. El precio final del sistema desarrollado se reduce hasta en un 300% respecto a los cursos teóricos existentes cuando se capacita a un grupo de usuarios. El desarrollo de este trabajo genera ventajas tales como seguridad, accesibilidad, practicidad y eficacia para capacitar en el área de la calidad de la energía.

**Palabras clave:** Realidad Virtual, Oculus Quest, Capacitación Eléctrica, Calidad de la Energía, Disturbios Eléctricos

## SUMMARY

In recent years, Power Quality problems have increased exponentially, generating high production costs for electricity users and suppliers, who seek to train electrical personnel in this area. The existing courses on Power Quality are scarce, theoretical, with difficult access to facilities and equipment, expensive, with a low degree of learning and with a latent risk for the user in practice. In this context, virtual reality is presented as a cutting-edge and next-generation technology that allows overcoming the disadvantages of theoretical courses in terms of training human resources in the electrical area, specifically Power Quality. For this reason, in this work a virtual classroom and a power substation are implemented for training of users related to the area of Power Quality through the use of an Oculus Quest viewer. Different softwares are used during the process, such as Unreal Engine 4, Autodesk 3Ds Max and Visual Studio. The virtual environments present training on electrical disturbances and statistical indicators, electrical and measurement equipment, signal acquisition in substations, among others. The results show that the knowledge acquired by a user using virtual reality in the area of Power Quality can increase up to 21.42% with respect to theoretical courses, the time of identification of electrical disturbances, statistical indicators, safety and electrical equipment, is reduced from 1.5 to 3.48 times when trained with virtual reality. The final price of the developed system is reduced by up to 300% compared to the existing theoretical courses when training a group of users. The development of this work generates advantages such as safety, accessibility, practicality and efficiency to train in the area of Power Quality.

**Keywords:** Virtual Reality, Oculus Quest, Electrical Training, Power Quality, Electrical Disturbances

## **DEDICATORIA**

A mi familia, especialmente a mis padres con mucho cariño, de quienes he recibido su apoyo incondicional y he contado con ellos toda la vida.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## AGRADECIMIENTOS

El primer y más preciado agradecimiento va dirigido a mi familia. A mis padres, Gudelia y Adelaido, quienes me han dado el mejor ejemplo a seguir en la vida, por su incansable trabajo día a día para salir adelante, por ser los mejores pilares para mi formación en todos los aspectos, este logro es de ustedes. A mis hermanos, Norma Karina, Javier y Damián, por siempre apoyarme en todas las condiciones.

Al Dr. Luis Alberto Morales Hernández por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por todas las enseñanzas y el apoyo brindado a lo largo de esta trayectoria.

A el Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, Dr. David Alejandro Elvira Ortiz, Dr. Martín Valtierra Rodríguez y Dr. Irving Armando Cruz Albarrán, por su invaluable apoyo para la revisión, corrección, aportación de ideas y retroalimentación para el desarrollo de este trabajo, muchas gracias por su tiempo.

A mis compañeros del posgrado, Karen, Rogelio, Christian y Juan por todos los momentos que compartimos dentro y fuera de la UAQ.

A todos mis profesores, por compartir sus conocimientos y enseñanzas brindadas a lo largo de estos dos años de preparación.

Finalmente, a la Universidad Autónoma de Querétaro y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la oportunidad de realizar este programa de posgrado.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	III
SUMMARY .....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
1 Introducción .....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Hipótesis y objetivos.....	7
1.3 Descripción del problema .....	8
1.4 Justificación .....	9
1.5 Planteamiento general.....	10
<b>CAPÍTULO II</b> .....	11
2 Fundamentación teórica .....	11
2.1 Calidad de la energía.....	11
2.2 Subestación eléctrica.....	11
2.2.1 PQ en Subestaciones eléctricas.....	12
2.3 Normas referentes a la PQ .....	13
2.4 Clasificación de los disturbios eléctricos.....	14
2.4.1 Transitorios.....	16
2.4.1.1 Transitorio Impulsivo .....	16
2.4.1.2 Transitorio Oscilatorio.....	17
2.4.2 Variaciones de corta duración .....	17
2.4.2.1 Interrupciones .....	18
2.4.2.2 Depresiones de voltaje SAGS.....	18
2.4.2.3 Swells.....	18
2.4.2.4 Desbalance de voltaje .....	19

2.4.3	Variaciones de larga duración .....	19
2.4.3.1	Interrupciones sostenidas .....	19
2.4.3.2	Sub-voltaje (Subtensión).....	20
2.4.3.3	Sobre-voltaje (Sobretensión) .....	20
2.4.3.4	Corriente de sobrecarga .....	20
2.4.4	Desequilibrio .....	20
2.4.5	Desequilibrio de tensión .....	21
2.4.6	Desequilibrio de corriente .....	21
2.4.7	Distorsión de forma de onda.....	21
2.4.7.1	Componente de DC (DC Offset) .....	22
2.4.7.2	Armónicos.....	22
2.4.7.3	Interarmónicos .....	23
2.4.7.4	Notching.....	23
2.4.7.5	Ruido eléctrico.....	24
2.4.8	Fluctuaciones de tensión.....	25
2.4.9	Variación de frecuencia .....	25
2.4.10	Disturbios eléctricos más comunes.....	25
2.5	Indicadores de la PQ .....	26
2.5.1	Valores pico.....	26
2.5.1.1	Envolvente .....	27
2.5.2	Valor eficaz (RMS) .....	27
2.5.3	Factor Cresta.....	28
2.5.4	Conteo de cruces por cero .....	28
2.5.5	Factor de potencia (FP).....	28
2.5.5.1	Potencia Activa (P) .....	29
2.5.5.2	Potencia Reactiva (Q) .....	29
2.5.5.3	Potencia Aparente (S) .....	29
2.5.6	Relación voltaje de secuencia negativa y positiva.....	30
2.5.7	Relación de transformación .....	30
2.6	Realidad Virtual (VR).....	30
2.7	Desarrollo de videojuegos .....	31

2.7.1	Unreal Engine .....	33
2.7.1.1	Entorno de desarrollo .....	33
2.7.1.2	Microsoft Visual Studio .....	34
2.7.2	3D MAX .....	35
2.7.3	Oculus VR .....	35
2.7.3.1	Oculus Quest .....	36
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>37</b>
3	Metodología .....	37
3.1	Interfaz de Disturbios e Indicadores .....	38
3.1.1	Proceso de generación de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos.....	40
3.2	Elementos 3D .....	40
3.3	Aula Virtual: Diseño y construcción .....	43
3.3.1	Componentes del espacio .....	43
3.3.2	Modelos matemáticos .....	46
3.3.2.1	Cálculo de Disturbios e Indicadores .....	47
3.3.2.2	Ordenamiento de datos .....	47
3.3.2.3	Mostrar datos y gráficos al usuario .....	48
3.3.2.4	Variación de parámetros (usuario).....	48
3.3.3	Áreas de entrenamiento .....	49
3.3.3.1	Importancia de la calidad de la energía.....	49
3.3.3.2	Principal equipo eléctrico .....	52
3.3.3.3	Partes principales del transformador de potencia .....	53
3.3.3.4	Interacción con la onda real de voltaje .....	56
3.3.3.5	Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores .....	61
3.3.3.6	Otras áreas.....	63
3.4	Subestación de potencia virtual: Diseño y Construcción.....	64
3.4.1	Componentes del espacio .....	64
3.4.2	Etapas de entrenamiento.....	65
3.4.2.1	Reconoce la subestación eléctrica.....	65
3.4.2.2	Proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica .....	67
3.4.2.3	Medir señales eléctricas y reconocer disturbios eléctricos .....	76

3.4.2.4	Evaluación del conocimiento adquirido.....	78
3.5	Norma IEEE 1159-2019 .....	79
3.6	Oculus Quest.....	80
3.6.1	Manos virtuales .....	80
3.6.2	Construcción del proyecto para Oculus Quest .....	81
3.7	Características del ordenador.....	81
3.8	Evaluación del sistema mediante usuarios.....	82
<b>CAPÍTULO IV</b>	.....	<b>84</b>
<b>4</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>84</b>
4.1	Instrucciones de uso.....	84
4.2	Aula virtual .....	87
4.2.1	Importancia de la calidad de la energía .....	88
4.2.2	Principal equipo eléctrico .....	89
4.2.3	Partes principales del transformador de potencia .....	90
4.2.4	Interacción con la onda real de voltaje .....	91
4.2.5	Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores.....	91
4.2.6	Otras áreas .....	97
4.3	Subestación eléctrica virtual .....	98
4.3.1	Reconoce la subestación eléctrica .....	99
4.3.2	Proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica .....	100
4.3.3	Medir señales eléctricas y reconocer disturbios eléctricos.....	104
4.3.4	Evaluación del conocimiento adquirido .....	105
4.4	Evaluación del sistema mediante usuarios.....	105
4.5	Retroalimentación de los usuarios .....	110
4.6	Comparación de costos .....	112
4.6	Comparación de contenidos con otros cursos.....	114
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS .....</b>	<b>116</b>
5.1	Conclusiones.....	116
5.2	Prospectivas .....	117
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>118</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>122</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Clasificación de disturbios eléctricos (terminología IEEE, norma 1159-2019) .....	15
Tabla II Comparativa de Unity vs Unreal Engine 4 .....	31
Tabla III Disturbios e indicadores implementados .....	39
Tabla IV Elementos 3d del área de PQ.....	52
Tabla V Tabla de verdad para generar un cortocircuito dentro del tablero de control.....	74
Tabla VI Temarios a aplicar durante los cursos .....	82
Tabla VII Costo total del software de realidad virtual en pesos mexicanos.....	112
Tabla VIII Comparación del software contra cursos existentes en pesos mexicanos .....	113
Tabla IX Comparación de contenidos .....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama general del sistema .....	10
Figura 2.1 Esquema de la red eléctrica convencional (álvarez, 2015) .....	12
Figura 2.2 Usuarios y proveedores conectados a una red eléctrica.....	13
Figura 2.3 Entorno de desarrollo unreal engine 4 .....	34
Figura 3.1 Diagrama general del sistema .....	37
Figura 3.2 Gui en matlab de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos.....	38
Figura 3.3 Ejemplo de ejecución en matlab con verificación de modelos matemáticos.....	39
Figura 3.4 Generación de disturbios y aplicación de indicadores estadísticos.....	40
Figura 3.5 Edición de elementos 3d en 3ds max .....	41
Figura 3.6 Propiedades generadas por autodesk 3ds max en modelos 3d.....	42
Figura 3.7 Pantalla inicial de construcción del aula virtual en ue4.....	44
Figura 3.8 Implementación de modelos matemáticos y visualización del usuario .....	46
Figura 3.9 Cálculo de modelos matemáticos en visual studio.....	47
Figura 3.10 Herramienta para desarrollo de interfaces gráficas en ue4: widget .....	48
Figura 3.11 Bideo en el ambiente virtual .....	49
Figura 3.12 Trigger box.....	50
Figura 3.13 Reproducción de video dentro del ambiente virtual .....	51
Figura 3.14 Widget en elementos 3d.....	52
Figura 3.15 Widget para equipo eléctrico.. .....	53
Figura 3.16 Reproducción de animaciones en el transformador de potencia.....	54
Figura 3.17 Proceso de creación de animaciones .....	55
Figura 3.18 Widget y panel de animaciones.....	56
Figura 3.19 Metodología en el área de interacción con la onda .....	56
Figura 3.20 Diseño de widget para el cambio de parámetros en la onda senoidal.....	57
Figura 3.21 Interfaz desarrollada para generar la gráfica senoidal.....	58
Figura 3.22 Proceso para graficar función senoidal .....	59
Figura 3.23 Proceso de ejecución en el área de interacción con la onda.....	60
Figura 3.24 Menú de la pantalla touch .....	61
Figura 3.25 Secuencia de información en aplicación de disturbios e indicadores .....	62
Figura 3.26 Diseño de animación en widget para mostrarle la ruta al usuario.....	66
Figura 3.27 Vista aérea de subestación de potencia .....	67
Figura 3.28 Pasos a realizar por el usuario en el widget .....	68
Figura 3.29 Equipo de seguridad y cápsula de colisión en el usuario .....	69
Figura 3.30 Widget y medidor de la calidad de la energía.....	70
Figura 3.31 Actor bloc de notas.....	71
Figura 3.32 Proceso de medición .....	72

Figura 3.33 Interruptor de medición dentro del tablero de control .....	73
Figura 3.34 Medidor de la calidad de la energía, cables y puntas de medición .....	74
Figura 3.35 Elementos del medidor de la calidad de la energía .....	75
Figura 3.36 Inyección de disturbios eléctricos en la subestación.....	77
Figura 3.37 Pantalla de reporte de disturbios eléctricos.....	78
Figura 3.38 Diseño de widget para la evaluación en la etapa cuatro.....	79
Figura 4.1 Sistema oculus quest: casco y controles.....	85
Figura 4.2 Pasos para ejecutar los ambientes virtuales .....	85
Figura 4.3 Controles de usuario.....	86
Figura 4.4 Aula virtual .....	88
Figura 4.5 Video dentro del aula virtual.....	89
Figura 4.6 Principal equipo eléctrico.....	89
Figura 4.7 Algunas partes del transformador. ....	90
Figura 4.8 Interacción del usuario con la onda sinusoidal .....	91
Figura 4.9 Área de entrenamiento mediante la pantalla táctil .....	92
Figura 4.10 Disturbios eléctricos.....	92
Figura 4.11 Pantalla táctil: ruido eléctrico.....	93
Figura 4.12 Indicadores estadísticos.....	93
Figura 4.13 Aplicación de disturbios e indicadores .....	94
Figura 4.14 Menú aprende.....	95
Figura 4.15 Evaluación del usuario en el aula virtual .....	96
Figura 4.16 Láminas de disturbios e indicadores .....	97
Figura 4.17 Subestación de potencia virtual.....	98
Figura 4.18 Reconocimiento de la subestación eléctrica.....	99
Figura 4.19 Inicio del ambiente virtual y equipo de seguridad .....	100
Figura 4.20 Medidor de calidad de la energía .....	101
Figura 4.21 Bloc de notas: requisitos a definir y diagrama unifilar .....	101
Figura 4.22 Medición de señales eléctricas en tablero de control .....	102
Figura 4.23 Explosión debida a un cortocircuito.....	103
Figura 4.24 Reconocimiento de disturbios eléctricos inyectados en la subestación .....	105
Figura 4.25 Evaluación del usuario .....	105
Figura 4.26 Comparación de resultados de las evaluaciones en diferentes temas utilizando una clase virtual y realidad virtual .....	107
Figura 4.27 Tiempo promedio en responder los cuestionamientos .....	109
Figura 4.28 Retroalimentación de usuarios .....	1100

# CAPÍTULO I

## 1 Introducción

El término Calidad de la Energía (PQ, por sus siglas en inglés *Power Quality*) se refiere a las características de la electricidad en un punto dado de un sistema eléctrico evaluado contra un conjunto de parámetros técnicos de referencia. Cuando las características de la electricidad están fuera del conjunto de parámetros de referencia, se le conoce como disturbio eléctrico o problemas de PQ. Los problemas de PQ han aumentado exponencialmente en las últimas décadas debido, principalmente, al enorme incremento de equipo electrónico y fuentes de energía renovable en conjunto con que los equipos de reciente creación son más susceptibles a disturbios eléctricos respecto a los anteriores. Estos problemas generan altos costos de producción en cualquier tipo de empresa que utilice energía eléctrica. Por este motivo, los proveedores y usuarios de la energía eléctrica capacitan al personal con el fin de atacar estos problemas mediante futuras acciones a través del monitoreo. El monitoreo de la PQ es el procedimiento de recolectar, analizar e interpretar datos provenientes de mediciones continuas de voltaje y corriente para convertirlos en información útil acerca del proceso en marcha.

La capacitación suele ser teórica y en algunos casos práctica, lo cual conlleva riesgos tanto para el personal como para los equipos que son de alto costo. Recientemente, la Realidad Virtual (VR, por sus siglas en inglés *Virtual Reality*), que había estado usándose comúnmente en aplicaciones de ocio y entretenimiento, ha tomado un nuevo camino dirigido hacia la enseñanza y entrenamiento en tareas que involucran situaciones de peligro y requieren de alta precisión, tal es el caso del área eléctrica.

En este trabajo se propone el desarrollo de dos ambientes virtuales, un aula de capacitación y una subestación eléctrica de potencia que le permitan al usuario aprender modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, así como entrenar el proceso para monitorear los problemas de la PQ más comunes a través de sus modelos

matemáticos. Esta técnica permitirá generar la seguridad para el usuario y para los equipos, el entrenamiento del proceso de recolección de información en una subestación eléctrica, el reconocimiento de disturbios eléctricos y la aplicación de un indicador específico dado el disturbio, es decir, su monitoreo.

El trabajo está dirigido a la formación de los recursos humanos en el área de la ingeniería eléctrica y a cualquier empresa en donde se requiera la capacitación de ingenieros eléctricos en el área de la calidad de la energía. Es deseable que el participante tenga conocimientos básicos de electricidad CA/CC, cableado y matemáticas.

## 1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, tanto las empresas de servicios eléctricos como los usuarios finales de la energía eléctrica están cada vez más preocupados por la calidad de la energía eléctrica. El término PQ se ha convertido en una de las palabras de moda más prolíficas en la industria energética, que de acuerdo con Dugan *et al.* (2002) se refiere a cualquier problema de energía manifestado en desviaciones de voltaje, corriente o frecuencia que resulte en falla o mal funcionamiento del equipo del cliente. Existen diferentes razones que han incrementado el interés hacia la PQ eléctrica. En primera parte, el equipo se ha vuelto menos tolerante a los disturbios de PQ, los procesos se han convertido menos tolerantes de la operación incorrecta del equipo y las compañías han llegado a ser menos tolerantes a los paros de producción, que resulta en altos costos de producción. En segunda, los equipos producen más disturbios de corriente de lo que solían hacerlo. La cantidad de equipo electrónico ha aumentado enormemente en los últimos años, por lo tanto, la distorsión armónica ha incrementado significativamente. En tercera, la generación incorporada y las fuentes de energía renovables crean nuevos problemas de la PQ como variaciones de voltaje, parpadeo y distorsión de la forma de onda. Por último, los equipos eficientes en energía son una fuente importante de perturbaciones en la PQ, y los cuales han incrementado considerablemente en los últimos años (Bollen y Gu, 2006).

Debido a que los problemas relacionados con la PQ están creciendo exponencialmente año tras año, es necesario que el personal encargado de la manipulación y mantenimiento de los sistemas eléctricos posea los conocimientos, habilidades y destrezas

que garanticen al usuario final una buena PQ a través de la monitorización de los indicadores de la PQ. Esta situación se logra a través de un entrenamiento especial. Galván *et al.* (2011) establecen que la capacitación del personal en el área eléctrica es una prioridad para las empresas de energía eléctrica, como la Comisión Federal de Electricidad (CFE, que es la empresa encargada de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica en México), ya que estas generan la práctica, la seguridad del trabajador y el equipo, aumenta la productividad y disminuyen costos, todo ello debido a que estas son actividades complejas.

Una subestación eléctrica es la parte de un sistema de energía en la que el voltaje se transforma de mayor a menor o viceversa para la transmisión, distribución, transformación y conmutación. Debido a que las subestaciones eléctricas son parte del sistema eléctrico, estas se ven sometidas a disturbios eléctricos. Los disturbios eléctricos han incrementado considerablemente en los últimos años ya que la demanda ha crecido más rápido que la generación de energía eléctrica. Los disturbios eléctricos generan impactos económicos en las empresas de servicios públicos, sus clientes y proveedores de equipos de carga, especialmente en los procesos de producción (Dugan *et al.*, 2002). Por lo tanto, las compañías suministradoras enfrentan grandes retos en el abastecimiento de energía eléctrica de manera eficiente y con alta calidad. La gran cantidad de quejas y pérdidas económicas requieren que las empresas de servicios eléctricos proporcionen personal para manejarlas (Dugan *et al.*, 2002), por tal motivo, es necesario la capacitación de los mismos en el área de PQ, concientizando acerca de los problemas generados.

Los disturbios eléctricos más comunes se encuentran ligados a las variaciones de frecuencia (en la onda de voltaje), variaciones de voltaje (magnitud), desbalance trifásico, fluctuaciones de voltaje (flicker), distorsión de la onda (armónicos), el desfase de corriente directa (CD) y el ruido. Para cada una de estas variaciones hay una característica, o un conjunto de características, de voltaje o corriente que definen al disturbio (Bollen y Gu, 2006) y (Dugan *et al.*, 2002), su detección y con ello la identificación de fuentes que causan tal perturbación (Yildirim *et al.*, 2016). Diferentes trabajos se han desarrollado para la detección y análisis de los disturbios eléctricos. Gomes *et al.* (2010) presentaron una técnica mejorada a través del uso de estadística de orden superior que detecta disturbios en la señal de voltaje, tales como caídas de tensión (SAGS), aumentos de tensión (swells), interrupciones, transitorios oscilatorios, notches y armónicos para su futuro análisis de la PQ. La principal

ventaja de la técnica propuesta recae en la capacidad para detectar disturbios cuando la frecuencia de la señal varía en el tiempo. El desarrollo es implementado y comprobado únicamente en simulación por computadora. Dughir (2010) desarrolló un algoritmo de detección de disturbios eléctricos relacionados a la magnitud del voltaje en base a un umbral que pueden inspeccionarse en línea a través de un servidor web para el análisis posterior de cualquier red eléctrica. Yildirim *et al.* (2016) realizaron un sistema de monitoreo en línea basado en un Arreglo de Compuertas Lógicas Programables en Campo (FPGA, por sus siglas en inglés *Field-Programmable Gate Array*) para la detección de los disturbios de la calidad eléctrica. El sistema desarrollado tiene la capacidad de detectar instantáneamente disturbios tales como sags, swells e interrupciones de voltaje que ocurren en tiempo real. Utilizan la técnica del valor cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés *Root Mean Square*) y un umbral establecido para detectar alguno de los disturbios antes mencionados. Bollen y Gu (2006) en su libro *Signal Processing of Power Quality Disturbances* describen de manera matemática diferentes técnicas utilizadas para la detección de disturbios eléctricos en la red; establecen que dos métodos de los más comunes son el método del valor RMS utilizando umbrales y la Transformada Rápida de Fourier. Una vez realizada la detección del disturbio eléctrico es necesario el monitoreo, que es el proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento al progreso de un programa en pos de la consecución de sus objetivos y con ello poder detectar alguna anomalía en el sistema. En este contexto, existen sistemas comerciales de alto costo que evalúan los disturbios eléctricos, tal es el caso de Fluke y sus diferentes sistemas de monitoreo de la Calidad Eléctrica.

Dados los problemas que se generan en el área eléctrica, diferentes empresas extranjeras han iniciado programas de entrenamiento dirigidos a los recursos humanos, aunque la mayoría de estas ofrecen cursos relacionados a la instalación y mantenimiento de equipos eléctricos. Con respecto al área de la calidad de la energía, estos cursos suelen ser manejados de forma muy superficial. Algunas de estas compañías son *Atlanta JATC Electrical Training Center, Electrical Training Institute, AVO Training Institute* y *Quality Systems Certification*. En muchos de los casos, la capacitación se genera de manera teórica a través de clases, videoconferencias y en el mejor de los casos existe la práctica. Bajo esta problemática, la CFE creó el software de Adiestramiento en Líneas Energizadas en tercera dimensión

(ALEn3D), que permite capacitar a los recursos humanos de esta empresa eléctrica a través un simulador virtual, en donde el usuario puede realizar más de 40 pruebas eléctricas para mejorar su aprendizaje antes de enfrentarse a la situación real (Hernández y Pérez, 2016). Conforme la tecnología avanza, los métodos de enseñanza se mejoran. La VR es una tecnología que permite al usuario interactuar con un entorno simulado por computadora en tiempo real, de modo que el usuario tiene la sensación de estar inmerso en dicho entorno (Mandal, 2013) aumentando así la receptividad y las tasas de aprendizaje (Chen *et al.* 2013, Katsionis y Virvou 2013). Diferentes investigaciones en distintas áreas del conocimiento han tomado ventaja de esta situación y han implementado sus trabajos sobre esta tecnología emergente para diferentes fines. En el área de la cultura médica, Oikonomou *et al.* (2017), desarrollaron un juego artístico de VR que toma lugar en el interior del cuerpo humano y donde el usuario puede desplazarse libremente. Este entorno de VR muestra al usuario la transformación del cuerpo humano cuando pasa de la vida a la muerte basándose en conocimiento científico. Tiene como objetivo concientizar al usuario que, aunque el cuerpo muera, la vida siempre continua. El usuario puede desplazarse dentro del cuerpo humano. En el área de la salud, Bernardo (2017), realizó un sistema de VR para reducir la curva de aprendizaje en neurocirujanos a través de simulaciones quirúrgicas inmersivas que el usuario realiza, tomando en cuenta los avances biotecnológicos recientes. Concluye que el trabajo mejora la comprensión conceptual de la anatomía compleja y mejora las habilidades visuo-espaciales del neurocirujano en desarrollo. En el área ingenieril, Guan *et al.* (2013), crearon un sistema virtual que simula el proceso de marcha de un tren en cuanto a la tracción y frenado ligándolo con cálculos matemáticos como velocidad, aceleración, masas y fuerzas, observando así su desempeño mediante diversos ambientes realísticos. Quishpe-Armas *et al.* (2015) generaron un entorno de aprendizaje de VR usando el sistema Oculus Rift (OR) para la enseñanza de las estructuras atómicas de materiales mono cristalinos relevantes para los sistemas microelectromecánicos (MEMS). Permite al usuario el aprendizaje de los parámetros clave para cada una de cada una de las estructuras atómicas como el número de átomos, factor de empaquetamiento, densidad atómica, entre otros. Checa *et al.* (2016), desarrollaron un entorno de VR de Briviesca en el siglo XV para propósitos de enseñanza histórica de la ciudad. El usuario es capaz de observar detalles y aspectos importantes de aquella época, concluyendo que el recorrido virtual es una solución equilibrada para la

adquisición de conocimientos sobre el patrimonio cultural por parte de los estudiantes universitarios.

La VR ha llamado la atención al desarrollo de trabajos relacionados al área eléctrica puesto que las tareas que se realizan en esta área son peligrosas y muchas veces inaccesibles. Arendarski *et al.* (2008) realizaron un Sistema de VR donde se explora una visualización interactiva en 3D de equipos como transformadores y generadores con fines de mantenimiento. Su objetivo es entrenar al usuario para realizar pruebas sobre estos equipos. Las pruebas son limitadas. Cabral *et al.* (2016) desarrollaron un entorno VR para entrenamiento del usuario respecto al mantenimiento de las líneas eléctricas de distribución con enfoque a la seguridad del empleado haciendo uso del sistema OR. Leiqing-Ding *et al.* (2017) generaron un sistema de entrenamiento para la operación y mantenimiento de un transformador inteligente de una subestación usando VR y Realidad Aumentada (AR). El desarrollo es utilizado en el área de entrenamiento de una empresa eléctrica. Tanaka *et al.* (2017) presentan en su trabajo una subestación eléctrica virtual para el entrenamiento de personal eléctrico que operan los equipos en las subestaciones con el objetivo de prepararlos en tareas complejas antes de enfrentarse a la práctica real. Concluyen que su software mejorará los programas de entrenamiento existentes para las personas relacionadas al área.

Por otro lado, los indicadores estadísticos (IE) son herramientas indispensables en la obtención de información relevante y oportuna que permite medir la gestión y dar una idea del comportamiento de cualquier proceso en diferentes ciencias, tales como la Astronomía, la Física, la Biología, la Sociología, entre otras. Además, estos indicadores son parámetros numéricos que convenientemente utilizados pueden ofrecer una oportunidad de mejora continua en el desarrollo, aplicación de métodos y técnicas específicas para el mantenimiento. La magnitud de los indicadores normalmente se suele comparar con valores o niveles de referencia previamente establecidos, esto con el objetivo de realizar acciones correctivas, preventivas o predictivas según sea el caso (Saucedo-Dorantes *et al.*, 2017). Particularmente, los indicadores han sido utilizados para el monitoreo y detección en PQ. Molano *et al.*, (2013) desarrollaron un analizador de PQ basado en la tecnología FPGA para ayudar a la evaluación de la calidad de energía en sistemas trifásicos haciendo uso de índices estadísticos y otras técnicas. Bollen y Gu (2006) y Dugan *et al.* (2003) presentan diferentes

indicadores estadísticos para el monitoreo y detección de problemas de PQ con referencias y aplicaciones para diferentes casos de estudio.

## 1.2 Hipótesis y objetivos

### a) *Hipótesis.*

Un aula y una subestación eléctrica de distribución virtuales permitirán al usuario adquirir la capacidad y habilidad de reconocer disturbios eléctricos tales como variaciones de corta y larga duración, transitorios, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, variaciones de frecuencia, ruido, notching y componente DC, así como identificar indicadores de Calidad de la Energía para la detección de los disturbios eléctricos anteriores mediante la implementación de sus modelos matemáticos además de equipo de seguridad y eléctrico.

### b) *Objetivos*

#### **General.**

Desarrollar el entorno de realidad virtual de un aula de capacitación y una subestación eléctrica de potencia donde se generen variaciones de corta y larga duración, transitorios, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, variaciones de frecuencia, ruido, notching y componente DC, así como realizar el monitoreo de indicadores de Calidad de la Energía mediante Unreal Engine 4 para el entrenamiento y capacitación de usuarios.

#### **Específicos.**

1. Desarrollar los elementos virtuales que componen a un aula de capacitación y a una subestación eléctrica de distribución usando un software de diseño (3D MAX) para la interacción del usuario.

2. Generar dentro del aula virtual etapas de entrenamiento en base a los modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos para darlos a conocer al usuario y este sea capaz de reconocerlos.
3. Generar dentro de la subestación virtual una etapa de entrenamiento dirigida al usuario en base a la norma IEEE 1159-2019 del proceso que se sigue para medir señales eléctricas y obtener indicadores estadísticos.
4. Realizar un generador de disturbios eléctricos que contenga variaciones de corta y larga duración, transitorios, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, variaciones de frecuencia, ruido, notching y componente DC a partir de señales sintéticas para inyectarlos a la subestación eléctrica virtual mediante su modelo matemático.
5. Implementar un bloque con los indicadores de la calidad de la energía (valor RMS, valor pico, envolvente, factor cresta, factor de potencia y relación de transformación) mediante su modelo matemático en el sistema de realidad virtual para el análisis de disturbios eléctricos y su visualización del usuario.
6. Evaluar la capacidad y habilidad de ocho usuarios para reconocer los modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, equipo de seguridad y equipo eléctrico mediante el uso del sistema Oculus Quest para compararlo con el método clásico de enseñanza.

### **1.3 Descripción del problema**

Los problemas de PQ han aumentado exponencialmente en los últimos años convirtiéndose en grandes pérdidas económicas para los proveedores y usuarios de la energía eléctrica. En esta condición, los recursos humanos deben estar mejor preparados para enfrentar tales problemas, en cuanto a la identificación de disturbios y aplicación de indicadores para detección de dichos disturbios, ya que los recursos humanos dedicados al área de PQ son insensibles a estos problemas de reciente aparición. En este contexto, el acceso al entrenamiento de la Calidad de la Energía es limitado debido al alto costo de los equipos con que se realizan las pruebas, el nulo acceso a las instalaciones donde se llevan a

cabo los ensayos y los riesgos presentes en todo momento tanto para el operador como para las instalaciones. Los cursos existentes son costosos y teóricos, con un grado de enseñanza reducido (Hernández y Pérez, 2016, Zhang *et al.* 2018), de los cuales solo se presentan muy raramente en el extranjero de manera superficial, es decir, si bien existen capacitaciones referidas al área eléctrica, la parte de la calidad de la energía no ha sido bien abordada comparada con los problemas que se generan. Los trabajos de VR, relacionados al área eléctrica, que se han desarrollado hasta el momento son puramente simulaciones de pruebas eléctricas que no toman en cuenta ecuaciones matemáticas y en consecuencia no se presentan situaciones realísticas que pudieran ocurrir en la realidad. Por consiguiente, el entrenamiento del usuario no es el adecuado. Además, no existe un software VR de entrenamiento dirigido al área de PQ.

## **1.4 Justificación**

Debido a las grandes pérdidas económicas que los problemas de PQ generan, los actores involucrados en este ambiente están obligados a proporcionar recursos humanos con las habilidades y destrezas para identificar los disturbios eléctricos y aplicar indicadores estadísticos para su correcta detección y monitoreo para proveer soluciones necesarias.

A través del uso de la VR, que es un método que ha demostrado científicamente su validez en la capacitación y adiestramiento, se capacitará al usuario en el área de la calidad de la energía eléctrica obteniendo distintas ventajas: el acceso a las pruebas será ilimitado puesto que estas se pueden realizar cuantas veces se quiera debido a que no hay costo extra cada vez que el adiestramiento se realice en diferentes usuarios, por lo tanto, los costos disminuyen. El entrenamiento puede darse en cualquier espacio de trabajo una vez que se tenga el software evadiendo así la asistencia al lugar de clases teóricas o prácticas. El método de VR permitirá al usuario, a los equipos e instalaciones condiciones de seguridad y un aprendizaje mayor respecto a los cursos teóricos existentes. Los temas que se abordarán en el ambiente virtual a crear no son abordados en los cursos de calidad de la energía existentes en cuanto a los modelos matemáticos de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos y algunos otros temas se complementan con esta nueva tecnología. Nuevos disturbios que aparecen pueden simularse de manera inmersiva, es decir, el software está abierto a la aplicación de

conocimiento nuevo. Además, hasta la fecha y de acuerdo con los antecedentes no se han reportado trabajos de VR que involucren el entrenamiento en el área de PQ, ni con la capacidad de incorporar modelos matemáticos que simulen las fallas. Por esta razón, el trabajo a desarrollar se basa en que el usuario identifique y se familiarice con los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos (y sus modelos matemáticos) para aplicar estos últimos a la detección de los primeros y con ello proveer soluciones.

## 1.5 Planteamiento general

El planteamiento general del trabajo es mostrado en la Fig. 1.1 en donde como primer paso se validarán los modelos matemáticos de los disturbios e indicadores propuestos en el objetivo de este trabajo, haciendo uso de Matlab a través de una interfaz de usuario teniendo en cuenta la norma IEEE-Std 1159-2019. Posteriormente se diseñarán y crearán los modelos en tercera dimensión (3D) en Autodesk 3DS que conformarán el entorno virtual tales como medidores de voltaje, transformadores, cables, entre otros. Estos modelos serán exportados a Unreal Engine que es el motor gráfico para asignarles propiedades tales como iluminación, texturas, colisiones, gravedad, entre otros. Luego se dará paso al entorno de realidad virtual en donde el usuario podrá interactuar con dos ambientes virtuales a desarrollar, un aula de clases y una subestación eléctrica. En este paso se programarán los modelos matemáticos, las rutinas de conexión en el transformador y todo lo que se desee que el usuario observe y con lo que interactúe. Finalmente, el entorno de Realidad Virtual será probado en usuarios haciendo uso de los visores Oculus Quest y sus controles.

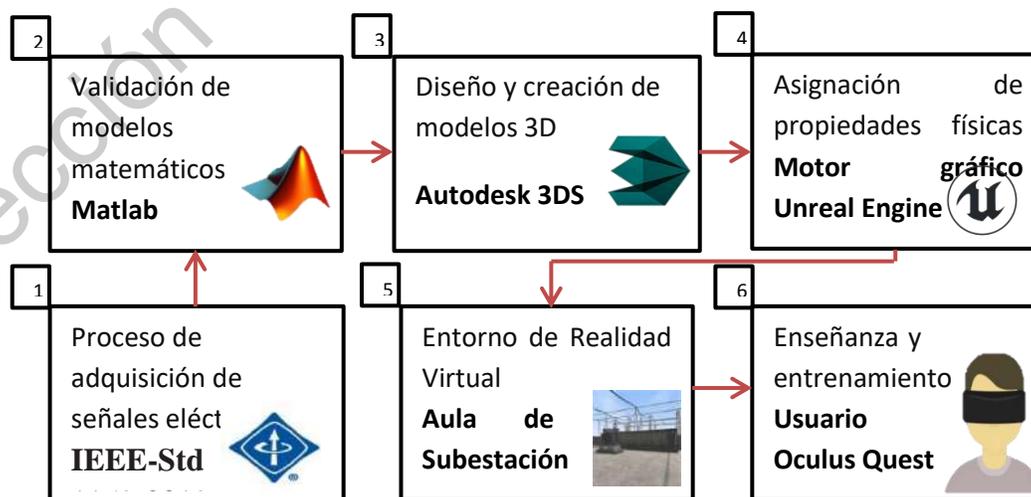


Figura 1.1 Diagrama general del sistema

# CAPÍTULO II

## 2 Fundamentación teórica

Con el objetivo de desarrollar e implementar el monitoreo e identificación de disturbios eléctricos a partir de indicadores de la calidad eléctrica en Unreal Engine 4 (software de VR), se realizó una revisión de los diferentes aspectos teóricos y consideraciones que se deben de tener. Por lo tanto, en este capítulo se presentan aspectos teóricos relacionados con la implementación de la metodología propuesta y que se desarrolla en este trabajo.

### 2.1 Calidad de la energía

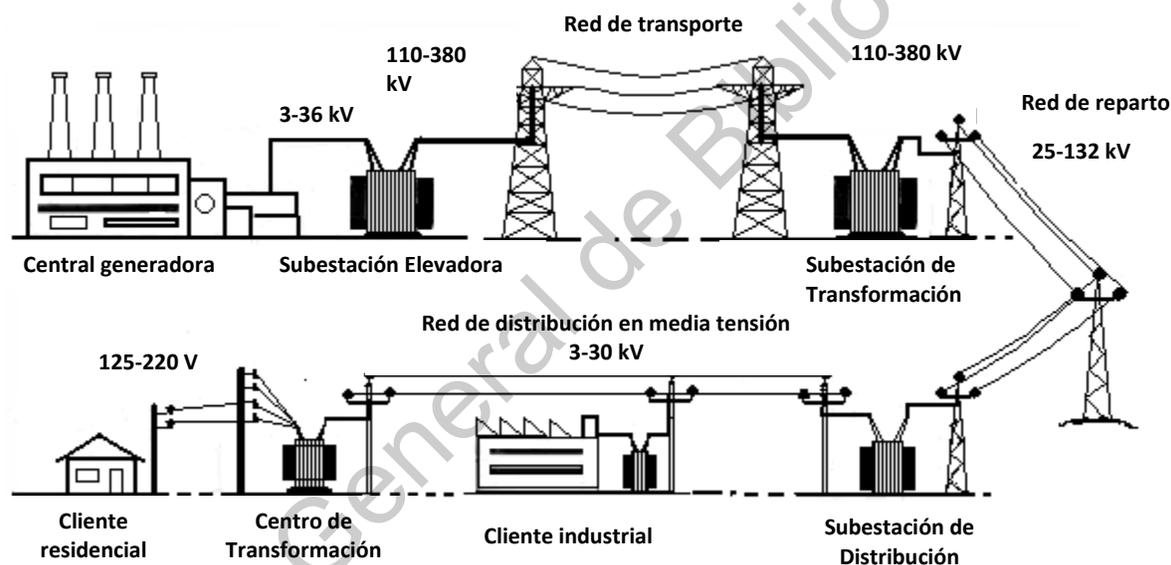
El término “Calidad de la energía” se define como la ausencia de disturbios que provoquen una deformación de la onda senoidal pura de tensión o corriente (Granados *et al*, 2013). Los problemas de la PQ están presentes en cualquier punto de la red eléctrica y pueden ser analizados en cualquier usuario final, por ejemplo, hospitales, industrias manufactureras, residencias, escuelas, centros comerciales, entre otros. El estudio de PQ de este trabajo se centrará en una subestación eléctrica de distribución.

### 2.2 Subestación eléctrica

Una subestación eléctrica es una instalación destinada a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica. La Figura 2.1 muestra la red de un sistema eléctrico convencional y los diferentes tipos de subestaciones eléctricas necesarias para proveer de energía eléctrica a los usuarios finales y de las cuales se habla a continuación.

Debido a que las centrales eléctricas son las encargadas de generar la tensión de generación a niveles relativamente bajos y en ubicaciones lejanas a los centros de consumo, el transporte de energía resulta demasiado costoso. Para que el costo del transporte sea razonable es necesario elevar la tensión a un nivel alto. Dicha operación se efectúa en una instalación que se denomina Subestación Elevadora (SE) situada en las inmediaciones de las centrales

generadoras de energía eléctrica. Posteriormente, las Subestaciones de Transformación (ST) reducen la potencia a valores aptos para su posterior consumo. La Subestación de Distribución (SD) reduce nuevamente la potencia para el consumo en industrias, principalmente. Por último, los Centros de Transformación (CT), que de igual manera es una subestación, modifican la potencia a rangos aptos para consumos residenciales o que requieran de baja potencia. Algunas veces se enlazan sistemas por medio de Subestaciones de Interconexión (SI) o Conmutación. (Botero, 2013). La descripción anterior es reflejada en la Figura 2.1. Es importante mencionar que, en cada una de las subestaciones eléctricas, el elemento principal es el transformador, ya sea que su función sea elevar o disminuir la tensión.

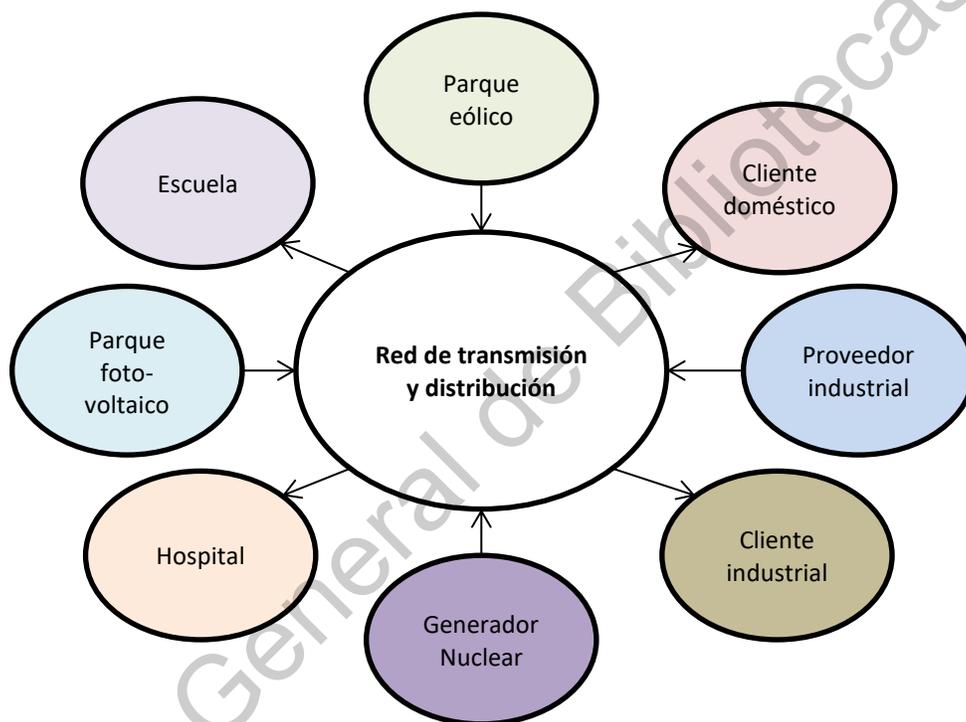


**Figura 2.1** Esquema de la red eléctrica convencional (Álvarez, 2015)

### 2.2.1 PQ en Subestaciones eléctricas

En los antecedentes de este trabajo se mencionaron las causas que generan los problemas de la PQ Eléctrica. Estos problemas afectan a todos los usuarios de la energía, ya que tanto los usuarios como los proveedores de la energía están conectados entre sí a la red de transmisión y distribución. La Figura 2.2 muestra un diagrama en donde diferentes usuarios están involucrados en la misma red eléctrica, ya sea que consuman (hospitales,

escuelas, industrias, residencias) o que aporten (parques eólicos y fotovoltaicos, proveedores industriales, generadores nucleares, entre otros) energía. Por lo tanto, cualquier disturbio eléctrico generado por cualquiera de los proveedores o usuarios, se verá reflejado en la red eléctrica y podría afectar a cualquiera que se encuentre dentro de este conjunto, en menor o mayor medida. La red de distribución y transmisión se une a través de las subestaciones eléctricas, y este lugar es un punto clave para la medición de los disturbios que pudiesen presentarse en la red eléctrica convencional.



**Figura 2.2** Usuarios y proveedores conectados a una red eléctrica convencional (Autoría propia).

### 2.3 Normas referentes a la PQ

Tres de las principales entidades de regulación para el monitoreo de la PQ son:

- a) La norma IEEE Std 1159-2019
- b) El estándar IEC 61000-4-30
- c) La norma europea EN-50160

Estos estándares sobre monitoreo de PQ proveen los mínimos requerimientos para

satisfacer las condiciones necesarias en la estimación de la PQ de modo que en los diferentes analizadores de PQ se obtengan los mismos resultados (Granados-Lieberman *et al.*, 2013).

Este trabajo basa el procedimiento en la norma IEEE Std, 1159-2019 “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*”, la cual provee los pasos para el monitoreo del sistema eléctrico monofásicos y polifásicos de corriente alterna y la guía para un apropiado entendimiento de los resultados obtenidos, además describe los diversos tipos de fenómenos electromagnéticos que se presentan en las redes eléctricas, tales como transitorios, variaciones de corta y larga duración, desequilibrio de tensión y corriente, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de frecuencia (Granados-Lieberman *et al.*, 2013) y definidos en la Tabla I.

El motivo por el cual se hace uso de la norma IEEE Std 1159-2019 es debido a que, en México, y de forma general en el continente americano, hay una afluencia muy grande de parte de Estados Unidos de Norteamérica, que es el país donde se encuentran las organizaciones que emiten estos documentos, tal es el caso de la IEEE. Por otra parte, la expansión y alcance del IEEE a tantos campos relacionados, la hacen simplemente accesible a todo el mundo y, por lo tanto, común entre la comunidad relacionada. En este contexto, a partir del 2018, es la asociación de profesionales técnicos más grande del mundo con más de 423 000 miembros en más de 160 países de todo el mundo. Por ser un esquema mundialmente conocido y aplicado, se usa el estándar IEEE, estándar 1159-2019.

## **2.4 Clasificación de los disturbios eléctricos**

Los tipos de perturbaciones eléctricas que pueden ocurrir en un sistema eléctrico y que se consideran en el estudio de la PQ están basados en la norma IEEE Std. 1159-2019 (IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality). La clasificación de los disturbios eléctricos está basada en siete categorías según sean las características de su espectro armónico, su duración y su amplitud. Estas siete categorías se despliegan en fenómenos transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desbalances de tensión y corriente, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión, y variaciones de frecuencia (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). Esta situación es descrita en la Tabla I.

**Tabla I** Clasificación de disturbios eléctricos (Terminología IEEE, norma 1159-2019)

<b>Categoría</b>	<b>Tipos</b>	<b>Duración</b>
<b>Transitorios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oscilatorio</li> <li>▪ Impulsivo</li> </ul>	Menos de un ciclo
<b>Variaciones de corta duración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Interrupciones</li> <li>▪ Sags</li> <li>▪ Swells</li> <li>▪ Desbalance de voltaje*</li> </ul>	Menos de un minuto
<b>Variaciones de larga duración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Interrupciones sostenidas</li> <li>▪ Subtensiones</li> <li>▪ Sobretensiones.</li> <li>▪ Corriente de sobrecarga</li> </ul>	Mayor a un minuto
<b>Desequilibrio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tensión</li> <li>▪ Corriente</li> </ul>	Estado estacionario
<b>Distorsión de forma de onda</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Armónicos</li> <li>▪ Interarmónicos</li> <li>▪ Ruido</li> <li>▪ Notching</li> <li>▪ Offset DC</li> </ul>	Estado estacionario
<b>Fluctuaciones de tensión</b>	-----	Intermitentes
<b>Variación de frecuencia</b>	-----	Menos de 10 segundos

\*Las variaciones de corta duración instantáneas no añaden al desbalance de voltaje.

## 2.4.1 Transitorios

Un transitorio es un pulso de voltaje de alta energía y corta duración impreso en la forma de onda de corriente alterna (Whitaker, 1999). De acuerdo con Granados-Lieberman *et al.* (2013), los transitorios son variaciones en la tensión y/o en la corriente que tienen como duración máxima decenas de milisegundos. Estos fenómenos se clasifican en dos tipos: impulsivos y oscilatorios.

### 2.4.1.1 Transitorio Impulsivo

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino en la condición de estado estable del voltaje, corriente, o ambos, que es unidireccional en polaridad, ya sea positivo o negativo (Gutiérrez *et al.*, 2013), no oscilatorio y tiene un pico de voltaje de alta magnitud montado en el voltaje sinusoidal (Rodney y Vigna, 2010). Es generado frecuentemente por descargas atmosféricas y la iluminación (IEEE, 2019).

El modelo matemático que describe este disturbio está dado por la Ec. (1), en donde se observa la onda pura de voltaje sumado con el disturbio, ambos dados por  $V(t)$ ,  $f_1$  representa la frecuencia fundamental de la señal de voltaje,  $t$  el tiempo ( $t \geq 0$ ),  $\theta_A$  el ángulo de fase,  $t_I$  es el tiempo de inicio del transitorio impulsivo,  $t_m$  es la magnitud del transitorio,  $\rho$  es el factor de decaimiento del transitorio impulsivo y  $u_1$  es una función escalón que se suma con la onda senoidal de voltaje (Rodney y Vigna, 2010) en un tiempo determinado  $t_n$ , ambos definidos en la Ec. (2).

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [u_1 \cdot (t_m e^{-\rho t_1})] \quad (1)$$

La función escalón  $u(t - t_n)$  se define como lo muestra la Ec. (2) y determina la duración de cualquier disturbio mediante  $t_n$  que es el tiempo en el que el escalón se activa (Rodney y Vigna, 2010).

$$U_n = \begin{cases} 1 : \forall t \text{ si } t - t_n > 0 \\ 0 : \forall t \text{ si } t - t_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

### 2.4.1.2 Transitorio Oscilatorio

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino en la frecuencia de la condición de estado estacionario del voltaje, corriente o ambos, que incluye los valores de polaridad positiva y negativa. Los valores instantáneos cambian su polaridad rápidamente. Estos se producen por diferentes razones, tales como aparatos de conmutación, conmutación de bancos de condensadores, dispositivos de protección contra sobre corriente, entre otros (Molano *et al.*, 2013). De manera general, son producidos por algún tipo de switcheo.

La Ec. (3) muestra la representación matemática que describe al disturbio transitorio oscilatorio en conjunto con la onda senoidal de voltaje (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [u_1 \cdot t_m \cdot \sin(2\pi f_{osc} t_1) \cdot e^{-\rho t_1}] \quad (3)$$

La variable  $t_1$  es el tiempo de inicio del transitorio,  $t_m$  es la magnitud del transitorio,  $f_{osc}$  es la frecuencia del transitorio oscilatorio y  $\rho$  es la razón de asentamiento del transitorio.

Los transitorios oscilatorios pueden clasificarse de acuerdo con la frecuencia del transitorio: alta, media y baja frecuencia. Los transitorios de alta frecuencia son aquellos que tengan una componente de frecuencia primaria mayor a 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos. Los transitorios oscilatorios con una componente de frecuencia primaria entre 5 y 500 kHz con una duración medida en decenas de microsegundos se les llama transitorio oscilatorio de frecuencia media. Los transitorios oscilatorios de frecuencia baja son aquellos en donde la componente de frecuencia primaria del transitorio es menor de 5 kHz, y su duración está en el rango de 0.3 a 50 ms (Gutiérrez *et al.*, 2013).

### 2.4.2 Variaciones de corta duración

Son eventos de la red eléctrica con variaciones en la tensión de duraciones desde medio ciclo hasta un minuto y en donde la magnitud puede estar en un rango de 10% a 120% de su valor nominal. De acuerdo al tipo de variación de la tensión, se tienen tres categorías: Interrupciones, depresiones de voltaje (Sags) y aumentos de voltaje (swells).

### 2.4.2.1 Interrupciones

Las interrupciones se presentan como descensos en la tensión menores a un 10% del valor nominal durante un período que no excede al minuto. Son ocasionados por fallas en la red eléctrica, fallas en los equipos, mal funcionamiento del algún control, apertura de interruptores, entre otros (Molano *et al.*, 2013).

### 2.4.2.2 Depresiones de voltaje SAGS

También conocido como DIP, es un decremento de tensión de corta duración a valores del 90% al 10% del valor nominal de la onda con duración típica de medio ciclo a un minuto. Estos disturbios son asociados a cortocircuitos en la red, a la energización de grandes cargas, el arranque de grandes motores o la conmutación de condensadores (Molano *et al.*, 2013). El modelo matemático para el sag se presenta en la Ec. (4) donde  $s$  es la magnitud del sag en porcentaje,  $u_1$  y  $u_2$  son las funciones escalón que multiplican a la función senoidal. La duración del sag está determinado por las funciones escalón  $u_1 - u_2$ , que implican los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  que son el tiempo inicial y final del sag (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = [1 - s(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_1 t + \theta_A) \quad (4)$$

### 2.4.2.3 Swells

Es el incremento de la magnitud de la tensión entre 110 y 180% del valor nominal de la onda sinusoidal con una duración que está entre 0.5 ciclos a 1 minuto. Sus principales causas son la desconexión de una carga grande, fallas en la red, maniobras, la energización de un banco de capacitores, aumento de tensión de las fases, entre otros (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). La Ec. (5) muestra el modelo matemático que describe el presente disturbio, que si se compara con el sag, la única diferencia es el signo y la amplitud de la onda, pues ahora será un incremento de la tensión (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = [1 + s(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_1 t + \theta_A) \quad (5)$$

#### **2.4.2.4 Desbalance de voltaje**

Disturbio eléctrico que ha sido añadido recientemente en el estándar IEEE 1159-2019 a las variaciones momentáneas y temporales de corta duración, en donde la magnitud típica del voltaje se encuentra entre el 2 y 15% del valor nominal de la onda de tensión. Es importante mencionar que este disturbio eléctrico también aparece como un tipo de fenómeno de estado estacionario, descrito en secciones subsecuentes aunado a su modelo matemático. Tal descripción matemática es exactamente la misma que se usará para este disturbio; lo que diferencia uno de otro es la variable del tiempo.

#### **2.4.3 Variaciones de larga duración**

Es la desviación o variación del valor eficaz (valor RMS) del voltaje con respecto al valor nominal de más de 1 minuto. Las principales causas de las variaciones de voltaje de larga duración son las variaciones de carga, por maniobras de reconexión y las operaciones de conmutación del sistema (Molano *et al.*, 2013). Se dividen en tres tipos que son: interrupción sostenida, sub-voltaje (voltaje bajo) y sobre voltaje. Las variaciones de larga duración implican las Ec. (4) y (5) pero con periodos de tiempo más largos en las funciones de activación, es decir, la diferencia de  $t_1 - t_2$  es más grande.

##### **2.4.3.1 Interrupciones sostenidas**

Este disturbio eléctrico es el más grave en el que el voltaje cae a cero y no regresa a su valor automáticamente. La duración de la interrupción sostenida es de más de un minuto. Las causas pueden ser interrupciones programadas, medios naturales, entre otros (Molano *et al.*, 2013).

### **2.4.3.2 Sub-voltaje (Subtensión)**

Es una condición de bajo voltaje que se produce cuando el voltaje RMS disminuye entre el 80 a 90% de su valor nominal para más de 1 minuto (Molano *et al.*, 2013). Suelen aparecer en la conexión de grandes cargas y se mantienen hasta que el sistema de regulación de tensión lleva la tensión a su nivel de referencia (Granados-Lieberman *et al.*, 2013).

### **2.4.3.3 Sobre-voltaje (Sobretensión)**

Es una condición de alto voltaje que se produce cuando el voltaje RMS aumenta de entre 110 a 120% de su valor nominal para más de 1 minuto (Molano *et al.*, 2013). Suelen presentarse debido a la desconexión de grandes cargas o bien fallas en la regulación de la tensión (Granados-Lieberman *et al.*, 2013).

### **2.4.3.4 Corriente de sobrecarga**

Disturbio eléctrico que ha sido añadido recientemente en el estándar IEEE 1159-2019 a las variaciones de larga duración. Una sobrecorriente ocurre cuando la corriente excede la capacidad de amperaje nominal de ese circuito o del equipo conectado (como un aparato) en ese circuito. Una sobrecorriente puede ser causada por una sobrecarga del circuito o por un cortocircuito, una falla a tierra o una falla de arco. Para simular este disturbio, a la onda de corriente se le agrega una constante en el rango de los miles por más de un minuto, que es la duración típica de la corriente de sobrecarga establecida por la IEEE-1159-2019.

## **2.4.4 Desequilibrio**

Este tipo de disturbio se divide en desequilibrio de tensión y desequilibrio de corriente (en el nuevo estándar IEEE 1159-2019), los cuales a continuación son descritos. Anteriormente solo era nombrado desequilibrio de tensión.

### **2.4.5 Desequilibrio de tensión**

Está definido como la razón de la componente de secuencia negativa con la componente de secuencia positiva. Cuando las tensiones de un sistema trifásico no son idénticas en magnitud y/o las diferencias de fase entre ellos no son exactamente 120 grados, se produce el desequilibrio de tensión. Existen dos maneras de calcular el grado de desequilibrio (Molano *et al*, 2013):

- a) Dividir la desviación máxima del promedio de las tensiones trifásicas por el promedio de los voltajes trifásicos como se observa en la Ec. (6).

$$\text{desequilibrio de voltaje} = \frac{\text{desviación máxima del promedio de voltaje}}{\text{promedio de voltaje}} * 100 \quad (6)$$

- b) Calcular la relación de la componente de secuencia negativo (o componente cero) con la componente de secuencia positiva.

El modelo matemático de este disturbio eléctrico consiste en variar las amplitudes y/o los ángulos de fase de cada una de las fases del sistema trifásico de la onda senoidal de voltaje, mostrada anteriormente.

### **2.4.6 Desequilibrio de corriente**

Cuando las corrientes de un sistema trifásico no son idénticas en magnitud y/o las diferencias de fase entre ellas no son exactamente 120 grados, se produce el desequilibrio de corriente. El modelo matemático de este disturbio eléctrico consiste en variar las amplitudes y/o los ángulos de fase de cada una de las fases del sistema trifásico de la onda senoidal de corriente, mostrada anteriormente.

### **2.4.7 Distorsión de forma de onda**

Se puede definir como la desviación en estado estable de la forma de onda senoidal ideal y que se puede caracterizar por su contenido espectral. Existen cinco tipos principales

de distorsión de forma onda: Componente de DC (DC, *Direct Current* o Corriente Directa), Armónicos, Interarmónicos, Notching y Ruido eléctrico (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). Para analizar estos problemas en la onda sinusoidal, por lo general se utilizan las Series de Fourier (Molano *et al.*, 2013).

#### **2.4.7.1 Componente de DC (DC Offset)**

La presencia de un voltaje de corriente directa en un sistema de corriente alterna es llamada offset de DC. Pueden ser originadas por disturbios magnéticos o por el efecto de rectificación de media onda. La presencia de esta perturbación en redes de corriente alterna puede ser dañina debido a un incremento en la saturación del transformador, atenuación adicional del aislamiento y otros efectos adversos (Gutiérrez *et al.*, 2014). Este disturbio puede ser simulado sumando un voltaje de DC a la onda senoidal en cualquier instante de tiempo.

#### **2.4.7.2 Armónicos**

Los armónicos son tensiones o corrientes senoidales cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico. Los armónicos se combinan con el voltaje o corriente fundamentales y producen la llamada distorsión de forma de onda. Los niveles de la distorsión armónica pueden ser definidos por el espectro armónico con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual (Gutiérrez *et al.*, 2014).

El modelo numérico para los armónicos es modelado en la Ec. (7), donde  $h_n$  es la magnitud del armónico de orden  $n$ ,  $f_n$  es la frecuencia del armónico de orden  $n$ ,  $t_n$  es el tiempo del armónico,  $H$  es el número de armónico respectivo (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [\sum_{h=1}^H h_n \sin(2\pi f_n t_n + \theta_n)], \quad 1 < n \quad (7)$$

Estas distorsiones son causadas por las características de operación no lineales de algunas cargas eléctricas y electrónicas tales como rectificadores, hornos de arco eléctrico, los circuitos de alumbrado, variadores de velocidad, inversores, cargas residenciales con

alimentación de modo conmutado como televisores y computadoras, entre otros (Dugan *et al.*, 2002).

Algunos de los efectos perjudiciales son el mal funcionamiento de los dispositivos de control, pérdidas adicionales en los condensadores, transformadores y máquinas rotativas disminuyendo así su vida útil, ruido adicional de los motores y otros aparatos, interferencia telefónica, amplificaciones de voltaje no deseadas, respuestas erróneas de sistemas de protección, vibraciones mecánicas, resonancia en serie y en paralelo, entre otras (Granados-Lieberman *et al.* 2013, Molano *et al.* 2013).

### **2.4.7.3 Interharmónicos**

Los Interharmónicos son componentes de la tensión o de la corriente, cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. Para medir los Interharmónicos se requiere medir sobre un periodo más largo que un ciclo (Gutiérrez *et al.*, 2013). Los Interharmónicos pueden describirse mediante la Ec. (7), pero ahora la frecuencia  $f_n$  no será un múltiplo entero de la frecuencia fundamental  $f_1$  sino cualquier otro número (Rodney y Vigna, 2010).

### **2.4.7.4 Notching**

El Notching es un disturbio periódico de la tensión causada por la operación normal de convertidores electrónicos cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Se presenta como un fenómeno en estado estable con componentes de alta frecuencia (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). Los notching pueden imponer un estrés extra en los transformadores, generadores y equipos de medición sensibles. Los componentes de frecuencia asociados con el notching pueden ser bastante altos y pueden no ser caracterizados con el equipo normalmente usado para el análisis de armónicos (Gutiérrez *et al.*, 2014). El modelo matemático que representa este disturbio se muestra en la Ec. (8) en conjunto con la onda senoidal del voltaje, en donde  $V_n$  es la función del notching que se describe en la Ec. (9),  $V_{osc}$  es la función del transitorio oscilatorio que se describe en la Ec. (10),  $n_d$  es la profundidad del notching y  $P_m$  es una máscara de signo para definir el sentido del notching (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [n_d \cdot P_m(V_n + V_{osc})] \quad (8)$$

La función de voltaje notching puede ser modelada usando un tren de pulsos como lo muestra la Ec. (9), donde  $\varphi$  es la fase del pulso que representa al notching,  $\tau$  es el ancho de pulso que representa el ancho del notching,  $k$  es el número total de notchings y  $T$  es la duración del tren de pulsos (Rodney y Vigna, 2010).

$$V_n = \sum_{n=1}^k u_n(t_n - \varphi_n) - u_{\tau_n}(t_n - \varphi_n - \tau_n) \quad 0 < t_n < T \quad (9)$$

Después del notching, este es usualmente seguido por un pequeño pero notorio transitorio oscilatorio. Este disturbio puede ser modelado mediante la Ec. (10), donde  $f_{osc}$  es la frecuencia de oscilación y  $\rho$  es la razón de asentamiento del transitorio. Sin embrago, la función del transitorio oscilatorio puede ser removida del modelo estableciendo  $V_{osc}$  a cero (Rodney y Vigna, 2010).

$$V_{osc} = \sin(2\pi f_{osc}(t_n - \varphi_n - \tau_n))e^{-\rho(t_n - \varphi_n - \tau_n)} \quad (10)$$

#### 2.4.7.5 Ruido eléctrico

Se refiere a las señales eléctricas no deseadas con contenido espectral de ancho de banda inferior a 200 kHz superpuesta a la tensión del sistema de alimentación o de corriente.

El ruido eléctrico puede ser consecuencia de conexiones defectuosas en los sistemas de transporte o distribución, hornos de arco y eléctricos, dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de soldadura, variadores de velocidad, entre otros. El ruido eléctrico afecta a los dispositivos electrónicos como los microordenadores y controladores programables (Molano *et al.*, 2013).

De acuerdo a la IEEE 1159-2019, el ruido es una señal eléctrica aleatoria con magnitud menor que el 1% de la magnitud nominal. El ruido puede ser modelado usando el modelo de Ruido Gaussiano Blanco (WGN, por sus siglas en inglés *White Gaussian Noise*). Este tiene una distribución normal Gaussiana con propiedades estadísticas de  $N(0,1)$ , donde el valor de la media es  $\mu = 0$  y el valor de la varianza es  $\sigma^2 = 1$ . El modelo matemático del

ruido se muestra en la Ec. (11), donde  $G$  es el WGN y  $n_m$  es el nivel de ruido (Rodney y Vigna, 2010).

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) + [n_m G(t)] \quad (11)$$

#### 2.4.8 Fluctuaciones de tensión

Son variaciones asimétricas de la envolvente de la tensión, también llamadas flicker, las cuales pueden ser continuas o desviaciones aleatorias. Estas variaciones generalmente no sobrepasan el rango de 90 a 110%. El efecto visual causado por estas fluctuaciones es comúnmente llamado “flicker” (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). El modelo matemático que representa este disturbio se muestra en la Ec. (12), donde una función sinusoidal con magnitud de frecuencia del flicker  $f_m$ , frecuencia del flicker  $f_f$  y ángulo de fase  $\theta_f$  es modulada con la onda sinusoidal del sistema (Rodney y Vigna, 2010).

$$v(t) = [1 + f_m \sin(2\pi f_f t + \theta_f)] \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) \quad (12)$$

#### 2.4.9 Variación de frecuencia

Las variaciones de frecuencia en el sistema eléctrico están relacionadas con la velocidad rotacional de los generadores del sistema eléctrico. La frecuencia es un parámetro que depende del balance entre la producción de energía y su consumo. Cuando se producen desequilibrios repentinos entre el balance de generación y carga se generan cambios en la frecuencia del sistema (Granados-Lieberman *et al.*, 2013). Las variaciones de frecuencia pueden representarse matemáticamente modificando la frecuencia  $f_1$  de la onda sinusoidal de tensión pura de voltaje.

#### 2.4.10 Disturbios eléctricos más comunes

De acuerdo con Almeida *et al.* (2003) y Bollen y Gu (2006), los sags, swells, subtensiones y sobretensiones son algunos de los disturbios eléctricos más comunes en las redes eléctricas, por lo tanto, serán los disturbios eléctricos a considerar en este trabajo.

## 2.5 Indicadores de la PQ

Para determinar el efecto de los disturbios eléctricos en la red eléctrica se emplean indicadores de la PQ. El cálculo de indicadores es el procedimiento que se aplica justo después de la adquisición de las señales físicas con el fin de transformar y procesar la información de señales a variables que puedan ser interpretadas (Saucedo-Dorantes *et al.*, 2017). Los indicadores permiten realizar acciones de condición de monitoreo y diagnóstico, puesto que ahora las señales representan un valor matemático que puede manipularse e interpretarse con el fin de resaltar la información más importante del proceso del cual se está adquiriendo la señal.

Para realizar el cálculo de los Indicadores de la PQ se parte de las señales de voltaje y corriente descritas en la Ec. (13) y (14), respectivamente (Lara-Cardoso y Romero-Troncoso, 2008).

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t + \theta_n) \quad (13)$$

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_n) \quad (14)$$

Donde  $V_0$  e  $I_0$  son las amplitudes del voltaje y corriente,  $f_0$  es la frecuencia fundamental de la línea eléctrica,  $\theta_n$  y  $\varphi_n$  son las fases de los ángulos iniciales para el voltaje y la corriente, respectivamente. Es importante mencionar que las señales  $V(t)$  e  $I(t)$  pueden ya contener en sus descripciones algún tipo de disturbio eléctrico.

### 2.5.1 Valores pico

Los valores pico se obtienen en el dominio del tiempo y son los valores máximos que las señales físicas de voltaje, corriente y potencia aparente alcanzan en un determinado periodo de tiempo. Las Ec. (15), (16) y (17) representan el cálculo de los valores pico de voltaje, corriente y potencia aparente, respectivamente.

$$V_{pico} = \max(V(t)) \quad (15)$$

$$I_{pico} = \max(I(t)) \quad (16)$$

$$S_{pico} = \max[ |V(t) I(t)| ] \quad (17)$$

Estos valores son buenos indicadores para medir el rendimiento de muchos dispositivos electrónicos, donde el nivel de voltaje DC interno está relacionado con el voltaje pico.

### 2.5.1.1 Envolvente

La envolvente de una señal senoidal es la unión de los valores pico o extremos para cada ciclo de la señal, ya sea de tensión o corriente. Es una herramienta visual que permite observar la amplitud de la señal a lo largo de tiempo y con ello detectar disturbios relacionados a la magnitud.

### 2.5.2 Valor eficaz (RMS)

Es el valor cuadrático medio de una magnitud eléctrica, ya sea voltaje o corriente en un periodo de tiempo determinado y están descritos por la Ec. (18) y la Ec. (19), respectivamente (Saucedo-Dorantes *et al.*, 2017).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (V(k))^2} \quad (18)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (I(k))^2} \quad (19)$$

Donde  $n$  representa el número de datos analizados en el periodo de tiempo determinado, el cual está directamente relacionado con la frecuencia adquisición de dichos datos. IEC 61000-4-30 recomienda una longitud de ventana de 10 o 12 ciclos para sistemas con frecuencia de 50 a 60 Hz.

El valor RMS es el método más comúnmente usado para estimar la magnitud del voltaje y con ello cuantificar las variaciones que se pudieran presentar en problemas de la señal sinusoidal relacionados con la magnitud (Bollen y Gu, 2006). Además, la estándar IEC 61000-4-30 establece el uso del RMS para variaciones de magnitud.

### 2.5.3 Factor Cresta

Es la relación entre el valor máximo instantáneo requerido por la carga y su valor RMS de voltaje o corriente. La Ec. (20) muestra el factor cresta para el voltaje y la Ec. (21) para la corriente (Granados-Lieberman *et al.*, 2013).

$$V_{cresta} = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (20)$$

$$I_{cresta} = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (21)$$

En una senoidal perfecta de amplitud 1, el valor RMS es 0.707 y el factor cresta es 1.41. Señales con un factor de cresta mayor o menor a este valor (indicador) indican distorsión de la onda, aunque desafortunadamente es muy raro que se use en estudios de la PQ.

### 2.5.4 Conteo de cruces por cero

Es uno de los métodos más comúnmente usados para estimar la frecuencia de una señal periódica que resulta en un indicador de la PQ. Esta operación se realiza sobre la onda senoidal de tensión y se basa en el conteo de los cruces que la señal hace por cero y relaciona el tiempo en el que lo hace. Finalmente, la frecuencia del voltaje cuantifica las variaciones de frecuencia. En algunas ocasiones puede detectar la distorsión de la onda (Bollen y Gu, 2006).

### 2.5.5 Factor de potencia (FP)

Es un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía, que en otras palabras, es la cantidad de energía que se ha convertido en trabajo. El factor de potencia puede tomar valores de entre 0 y 1. Valores más cercanos al 1 son los ideales, puesto que indican que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa mayor consumo de energía necesaria para producir un trabajo útil. La Ec. (28) representa el cálculo del factor de potencia.

$$F.P. = \cos\phi = \frac{P}{S} \quad (28)$$

Donde  $\phi$  representa el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente o dicho de otra forma, es el ángulo existente entre la potencia activa  $P$  y la potencia aparente  $S$ .

Él  $\phi$  puede obtenerse a partir de la Ec. (29), que se basa en la identificación del tiempo en que las señales de voltaje y corriente cruzan por cero  $[t_2 - t_1]$  para posteriormente convertirse a radianes.

$$\phi = 2\pi f_0 [t_2 - t_1] \quad (29)$$

#### **2.5.5.1 Potencia Activa (P)**

Es la potencia que realmente se consume en el usuario final, medida en kilowatts (kW). La Ec. (30) describe la forma de obtener la potencia activa.

$$P = S \cos\phi \quad (30)$$

#### **2.5.5.2 Potencia Reactiva (Q)**

Es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los usuarios finales. Se mide en Volts-Amperes reactivos (Var) y es definida en la Ec. (31).

$$Q = S \sin\phi \quad (31)$$

Donde  $Q$  es la potencia reactiva.

#### **2.5.5.3 Potencia Aparente (S)**

Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad, denotado por la Ec. (32). Su unidad de medida es el Volt-Ampere (VA).

$$S = V_{rms}I_{rms} = \frac{P}{\cos\phi} \quad (32)$$

También puede obtenerse como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva.

### 2.5.6 Relación voltaje de secuencia negativa y positiva

El método estándar para cuantificar el desbalance de sistemas trifásicos es la relación entre el voltaje de secuencia positiva y negativa. Esto nos permitirá observar que relación guarda una fase con la otra. Además, la relación entre la secuencia cero y la secuencia positiva de voltaje es una segunda opción, pero es muy rara que se use. La secuencia positiva y negativa de voltaje puede ser calculada de los fasores de voltaje en las fases individuales (Bollen y Gu, 2006).

### 2.5.7 Relación de transformación

La Ec. (33) muestra la relación de transformación, que es un indicador que relaciona diversas variables en un transformador, tales como el número de vueltas de la bobina en el primario  $N_1$  y en el secundario  $N_2$ , la tensión en el devanado primario  $E_1$  y secundario  $E_2$ , la corriente en el devanado primario  $I_1$  y secundario  $I_2$ . Este indicador permite conocer de manera general el estado de funcionamiento de un transformador. Puede inferir problemas tales como el corto circuito en los devanados, sobre-cargas, entre otros (Electron, 2015).

$$K_T = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (33)$$

## 2.6 Realidad Virtual (VR)

La VR es una simulación interactiva dinámica de un ambiente tridimensional generada por computadoras, en el que el usuario es capaz tanto de ver como de manipular los contenidos de ese ambiente. Al usuario se le proporciona información sensorial (visión, sonido, entre otros), con el propósito de hacer que el participante sienta que está en determinado lugar. (Escartín, 2015). Todo sistema de VR debe ser una simulación interactiva, debe tener una interacción implícita e inmersión sensorial.

El uso de sistemas de VR supondrá un salto cualitativo muy importante en el aprendizaje de disciplinas o áreas del conocimiento, especialmente en aquellas en las que el acceso es restringido, peligroso o simplemente es difícil visualizar los procesos estudiados, tal es el caso del área eléctrica, como sucede con este proyecto.

Además, ha sido demostrado que la curva de aprendizaje con ayudas virtuales es más rápida y se consigue una mayor y mejor asimilación de contenidos que las herramientas de enseñanza tradicionales, ya que durante el proceso de enseñanza los estudiantes hacen uso de casi todos sus sentidos (Vera *et al*, 2003).

## 2.7 Desarrollo de videojuegos

Dos de los principales softwares para el desarrollo de videojuegos 2D y 3D, así como para aplicaciones de VR y AR son Unity y Unreal Engine 4. Cada uno de estos presenta ventajas y desventajas de acuerdo al objetivo para el cual se trabaje, ya sea aprendizaje personal, desarrollo para estudiantes, desarrollo de proyectos o como empresa profesional. La Tabla II muestra una comparativa entre estos dos softwares y posteriormente se describen dichas características.

**Tabla II** Comparativa de Unity vs Unreal Engine 4

Características	Unity	Unreal Engine 4
<b>Precio</b>	Pago de licencia	Gratis hasta alcanzar \$3 000 al trimestre
<b>Accesibilidad</b>	Acceso limitado a funciones	Acceso ilimitado a funciones
<b>Información</b>	Documentación y comunidad amplia	Documentación y comunidad reducida
<b>Programación</b>	Lenguaje C# / Lenguaje visual	Lenguaje C++ / Blueprints
<b>Plataformas</b>	Soporta más de 25	Soporta 18
<b>Curva de aprendizaje</b>	Baja / Media	Media / Alta
<b>Tienda</b>	AssetStore	MarketPlace

Una de las principales características y por lo cual se ha decidido utilizar UE4 es el precio por el uso del software, el cual es gratis hasta que la venta de la aplicación desarrollada en este software supere los 3 000 dólares trimestrales. Cuando esta situación ocurre, entonces el desarrollador está obligado a otorgar el 5% de las ventas a Epic Games (que es la empresa que desarrolla UE4). Por otro lado, Unity utiliza un sistema de licencias que se paga mensualmente (las licencias varían de precio dependiendo el fin del desarrollador), que van desde los 40 hasta los 150 dólares. El precio a pagar será el mismo si el desarrollador vende cero, uno o cien desarrollos. Respecto a la accesibilidad de funciones, Unity restringe de acuerdo al pago que se efectúa, mientras que UE4 ofrece todo el potencial de sus herramientas desde el primer momento. Unity tiene una documentación y comunidad muy grande, por lo tanto, resulta fácil encontrar información. La documentación de UE4 es bastante buena también, más, sin embargo, la comunidad de desarrolladores es pequeña, lo que podría verse como una desventaja a la hora de presentar una duda a dicha comunidad. El lenguaje de programación para Unity es C# mientras que para UE4 es C++. UE4 ofrece un lenguaje de programación visual llamado Blueprints, enfocado a las personas que nunca han tenido contacto con la programación. Por otra parte, es claro observar que Unity soporta más plataformas que UE4, el primero soporta más de 25, mientras que el segundo 18. La curva de aprendizaje en estos dos softwares muestra que es más difícil aprender a utilizar UE4 que Unity, debido a las estructuras que se utilizan internamente para generar los juegos. Finalmente, ambos softwares tienen tiendas para la adquisición de diferentes objetos (Unreal Engine, 2019 y Unity, 2019).

Debido a que los entornos a desarrollar en este proyecto no están dirigidos hacia la cantidad sino a la calidad del producto final, esto conllevará más tiempo y, por lo tanto, la mejor opción es no pagar una licencia durante el tiempo de desarrollo sino hasta que se venda a un consumidor final. Además, la plataforma UE4 soporta el sistema virtual Oculus Quest, que será el utilizado para este proyecto y del cual se habla más adelante. La curva de aprendizaje no es un impedimento, puesto que los desarrolladores que participan en este proyecto tienen previo conocimiento en el área de programación de los lenguajes que se utilizan (Unreal Engine, 2019 y Unity, 2019).

## 2.7.1 Unreal Engine

Unreal Engine 4 (UE4) es un motor de juego (conjunto de herramientas que se pueden utilizar en conjunto para desarrollar experiencias interactivas), creado por la compañía Epic Games, que permite crear mundos realísticos. Su principal uso es para el desarrollo de videojuegos. Presenta un alto grado de portabilidad. Contiene un conjunto de herramientas integradas que los desarrolladores pueden utilizar para el diseño y construcción de juegos, simulaciones y visualizaciones interactivas (Unreal Engine, 2019).

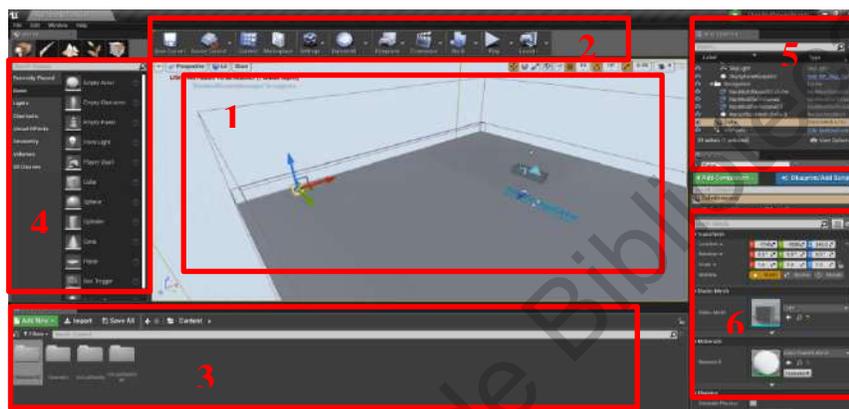
### 2.7.1.1 Entorno de desarrollo

Los elementos centrales de UE4 pueden dividirse en categorías centrales que se describen a continuación y que son esenciales para el desarrollo de cualquier aplicación dentro de este software de VR (Unreal Engine, 2019):

- a) Espacio. Es el medio ambiente en el cual tendrá lugar la VR. Esta descripción implica las estéticas y el diseño del espacio.
- b) Metas. Son aquellas que los usuarios deben hacer para completar cierta tarea dentro del mundo VR; de manera general, representa los objetivos de los usuarios.
- c) Actores. Son los principales componentes de un desarrollo de VR. Son los objetos que pueden interactuar o ser controlados dentro del medio ambiente (objetos, personajes, animales, entre otros).
- d) Mecánicas. Detallan las acciones que un usuario y otros actores pueden realizar durante el desarrollo del VR (Saltar, bucear, disparar, entre otros).
- e) Reglas. Describen como se lleva a cabo el desarrollo del juego y las restricciones en el espacio.

Estas características son programadas a través de Blueprints, que son activos que contienen datos e instrucciones en forma de bloques, pero con un fondo desarrollado en C++. Por otra parte, el entorno de desarrollo y sus principales partes es mostrado en la Figura 2.3, donde el recuadro 1 se le llama *viewport* que se utiliza para darle una representación visual al entorno virtual a desarrollar; ahí podrán observarse los personajes y objetos que los usuarios o jugadores verán durante la ejecución del juego. Además, se pueden observar ciertas

características visuales que no pueden observarse durante el juego, tales como cámaras, activadores, entre otros. El recuadro 2 muestra la barra de herramientas del editor. El recuadro 3 muestra el navegador de contenido, donde el usuario puede acceder a los archivos actuales del proyecto. El recuadro 4 muestra el panel de modos que incluye formas geométricas para el ambiente virtual, tales como cubos o planos. En el recuadro 5 muestra todos los componentes del nivel actual y en el recuadro 6 se muestra el panel de detalles donde se observa cada una de las características privadas de los componentes del nivel actual.



**Figura 2.3** Entorno de desarrollo Unreal Engine 4

### 2.7.1.2 Microsoft Visual Studio

Microsoft Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado para Windows y macOS que permite desarrollar sitios y aplicaciones web. Es compatible con múltiples lenguajes de programación, tales como C# y C++. Su campo de uso es tan amplio y vasto que puede llegarse a utilizar en conjunto con otros softwares, tal es el caso de UE4, en el que ambos se unen para optimizar recursos a la hora de ejecutar ambientes tridimensionales, juegos 2D, entre otros (Microsoft Visual Studio. 2020), aspecto que ya se ha hecho. Por esta razón, será el software utilizado para implementar los modelos matemáticos de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos propuestos en este trabajo.

Aunque Visual Studio presenta diferentes licencias de pago, también otorga una licencia de uso libre, llamada licencia individual, la cual se basa en que cualquier empresa con cinco o menos programadores puede hacer uso de manera gratuita para vender productos

comerciales sin límite de ingresos o para cualquier otro propósito. Cuando la empresa rebasa los cinco programadores, entonces tiene que pagarse alguna de las licencias que más le convenga a la empresa (Microsoft Visual Studio, 2020). Debido a que el proyecto cuenta con menos de cinco programadores, se utiliza la licencia individual.

### **2.7.2 3D MAX**

Es un programa de Software de modelado y renderización 3D para la visualización del diseño, juegos y animación. Permite al usuario la exportación de modelos en diferentes formatos para la adaptación a otros softwares (Autodesk Inc, 2019). Debido a la amplia gama de herramientas que ofrece y que pueden ser utilizadas al desarrollo de ambientes virtuales, este software será en el que se desarrollen los ambientes virtuales.

Para poder hacer uso del software se requiere de una licencia, la cual puede ser de diferentes tipos. Una de las más usadas en las universidades por estudiantes, es la versión de prueba estudiante, la cual permite crear un sinnúmero de modelos tridimensionales, al poder acceder a la mayoría de las herramientas de este software, con fines educativos y no de lucro. Cuando ya se requiere un plan para generar diseños como negocio, entonces existen tres tipos de licencia, la primera es un plan mensual por \$ 2 545 MXN, la segunda es un plan anual por \$ 20 353 MXN y el tercer plan es por tres años con un costo de \$ 54 932 (Consultado el 08/10/2020 en <https://latinoamerica.autodesk.com/products/3ds-max/> y Autodesk 3Ds Max, 2020). Para el desarrollo de este proyecto y los modelos 3D, se utilizará una versión de estudiante. Si el producto final es vendido, entonces todos los modelos utilizados se recrearán bajo una licencia mensual.

### **2.7.3 Oculus VR**

Oculus VR es una compañía estadounidense que desarrolla tecnología de realidad virtual, en tanto a software y hardware. Ha lanzado al mercado diferentes visores de VR, dos de los más sofisticados, innovadores y de última generación son el Oculus Rift y Quest. La principal diferencia entre estos radica en el hecho de que Rift tiene que hacer uso de una computadora para ejecutar los juegos de VR mientras que el Quest realiza todo el procesamiento por sí mismo sin la necesidad de estar conectado a algún ordenador. Debido

a que este proyecto está pensado para generar capacitación al personal eléctrico que se encuentra en diferentes ubicaciones, se elige el visor Oculus Quest, que permitirá ser transportado de manera fácil a cualquier lugar sin la necesidad de traer consigo un ordenador.

### **2.7.3.1 Oculus Quest**

Se le denomina Oculus Quest (OQ) a un casco portable de VR que es colocado en el usuario de manera similar a unas gafas para observar ambientes virtuales. Este casco es un ordenador que procesa información para el usuario, de modo que este último tenga la sensación de estar inmerso en el mundo virtual que se le está mostrando. El usuario puede interactuar con el mundo virtual y con los objetos que contiene por medio de dos controles inalámbricos, que asemejan las manos del usuario. Como se mencionó anteriormente, los visores Oculus Quest permiten el procesamiento en ellos, es decir, no requieren de un ordenador para procesar la información (inalámbricos) a diferencia de los visores Oculus Rift (alámbricos) que requieren estar conectados a otro procesador para su funcionamiento (Oculus Quest, 2020). Esta es una gran ventaja para el proyecto que se realiza, puesto que el Oculus Quest no limita al usuario en cuanto a la navegación dentro del entorno virtual debido al uso de cables, aspecto que el Oculus Rift si lo hace, hay un cierto límite de navegación debido al uso de cables conectados al visor.

Cualquier dispositivo Oculus puede usarse para el desarrollo de aplicaciones sin costo extra una vez que se haya registrado una organización de desarrolladores de Oculus, ya que se ha pagado por el visor como tal. Lo desarrollado será propiedad del desarrollador a menos que se presente a la tienda virtual de Oculus.

# CAPÍTULO III

## 3 Metodología

En este capítulo se describen los procedimientos en cuanto al diseño, construcción y desarrollo de este trabajo que se centra en la creación de dos ambientes virtuales, un aula de capacitación y una subestación eléctrica de potencia, para entrenamiento de usuarios relacionado al área de la PQ, por lo que en las siguientes secciones se describe el proceso de manera detallada. La estructura general del trabajo es mostrada en la Figura 3.1, en donde los elementos que conformarán los ambientes virtuales serán creados usando 3Ds Max. Cada ambiente tendrá componentes de espacio y áreas de entrenamiento propios, los modelos matemáticos de los disturbios e indicadores de la PQ serán implementados en C++, pero antes son verificados usando herramientas conocidas. UE4 será el motor de juego encargado de reunir las propiedades de un ambiente virtual, tales como las propiedades físicas y visuales. Finalmente, lo desarrollado será cargado a la plataforma OQ para la interacción con el usuario.

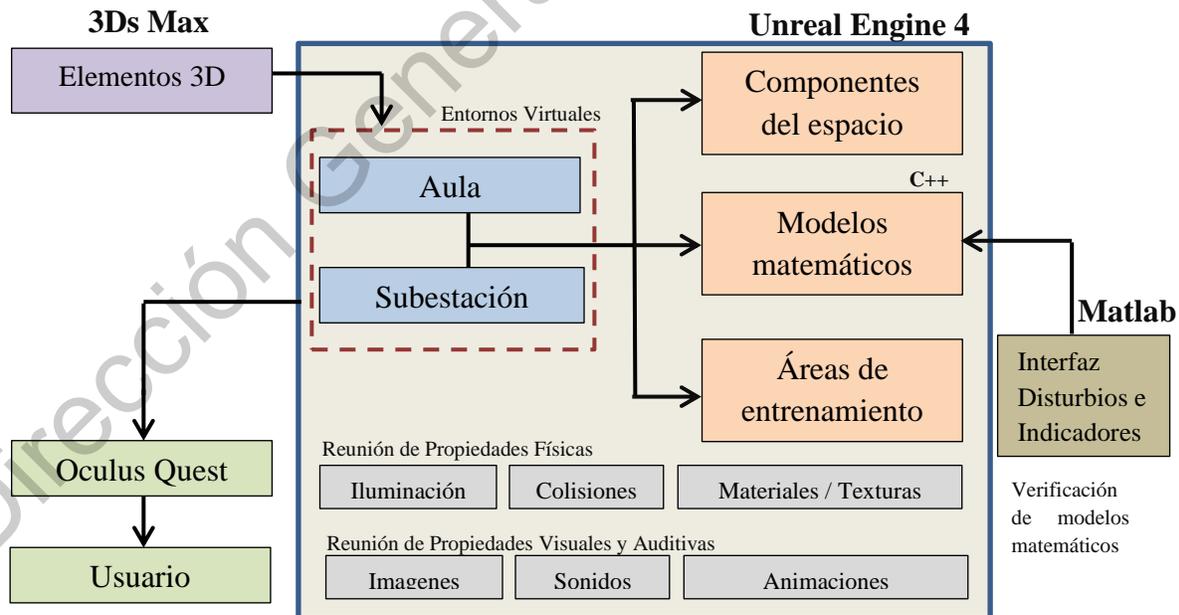


Figura 3.1 Diagrama general del sistema

### 3.1 Interfaz de Disturbios e Indicadores

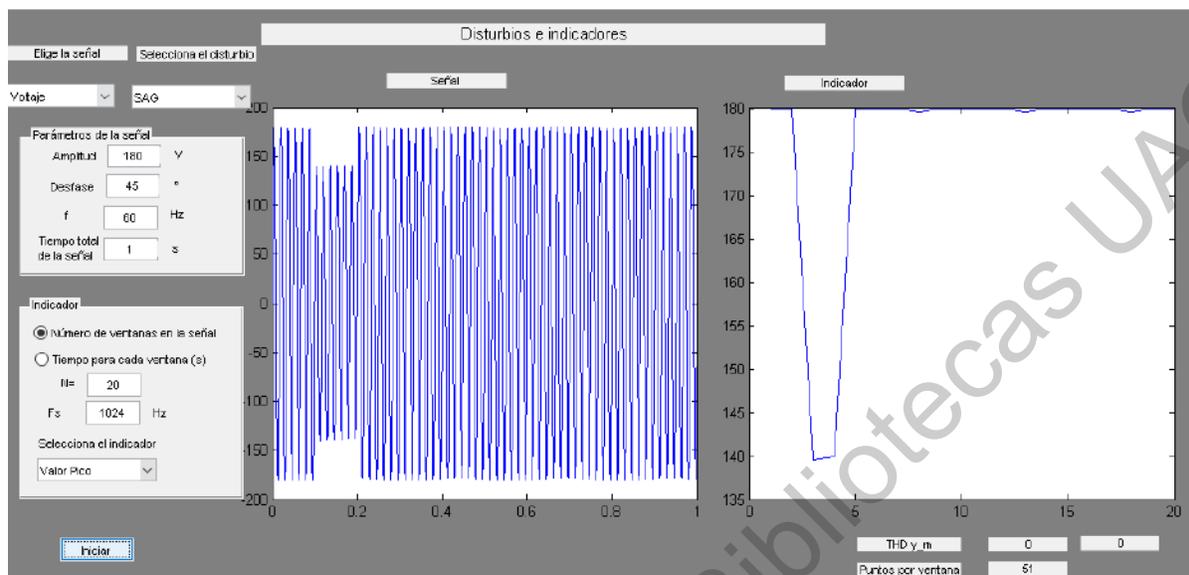
Con el fin de verificar y comprobar cada uno de los modelos matemáticos de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos que se implementarán en el motor de juego UE4 (donde no han sido implementadas), se ha desarrollado una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés *Graphical User Interface*) en el software Matlab que contiene 14 disturbios eléctricos y 6 indicadores estadísticos mostrados en la Tabla II. Cabe mencionar que Matlab ya posee funciones precargadas de algunos indicadores, pero estas no son utilizadas, de modo que cuando se implementen en C++, las funciones sean similares. La Figura 3.2 muestra la GUI desarrollada. Para ejecutarla, el usuario selecciona una señal ya sea de voltaje o corriente y se especifican sus parámetros tales como amplitud, desfase, frecuencia y tiempo total de la señal, luego se elige un disturbio eléctrico y se selecciona un indicador estadístico para monitorear tal disturbio considerando ciertos parámetros como la frecuencia de muestreo y el número de ventanas o el tiempo para cada ventana en la señal.



**Figura 3.2** GUI en Matlab de Disturbios Eléctricos e Indicadores Estadísticos

Cada uno de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos es implementado mediante su modelo matemático descrito por las ecuaciones de la sección anterior y comprobado a través de su aspecto gráfico que estos generan. La Figura 3.3 muestra un

ejemplo de ejecución donde el usuario ha seleccionado la *señal de voltaje* y a la cual le ha inyectado un *sag* para monitorearlo con un *valor pico*.



**Figura 3.3** Ejemplo de ejecución de la GUI en Matlab para verificación de modelos matemáticos.

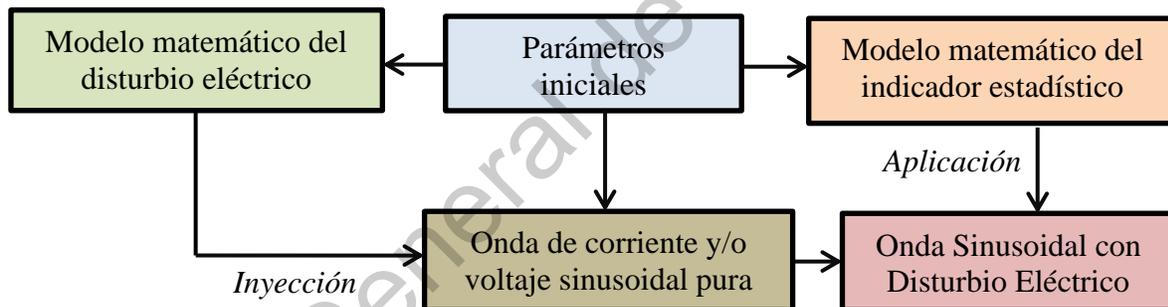
Los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos implementados en Matlab y posteriormente en UE4 se muestran en la Tabla II.

**Tabla III** Disturbios e Indicadores implementados

Disturbios Eléctricos	Indicadores Estadísticos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sag</li> <li>• Swell</li> <li>• Interrupciones cortas</li> <li>• Interrupciones sostenidas</li> <li>• Transitorio oscilatorio</li> <li>• Transitorio impulsivo</li> <li>• Variaciones de frecuencia</li> <li>• Ruido</li> <li>• Notching</li> <li>• Fluctuaciones de tensión</li> <li>• Sobretensión</li> <li>• Subtensión</li> <li>• Offset DC</li> <li>• Desequilibrio de tensión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valor RMS</li> <li>• Valor pico</li> <li>• Envolvente</li> <li>• Relación de transformación</li> <li>• Factor de Potencia</li> <li>• Factor de Cresta</li> </ul>

### 3.1.1 Proceso de generación de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos

El diagrama a bloques de la Figura 3.4 muestra el proceso de creación de cualquier disturbio eléctrico y su monitorización a través de cualquier indicador estadístico para la interfaz de Matlab y UE4, es decir, este proceso es el mismo para ambas interfaces. Al inicio deben definirse parámetros iniciales del disturbio eléctrico (amplitud, frecuencia, desfase, duración, tiempo de asentamiento, entre otros), los cuales dependerán del disturbio eléctrico en cuestión, también se debe definir parámetros iniciales de la onda sinusoidal de corriente o voltaje (amplitud, desfase, frecuencia, entre otros) y parámetros iniciales del indicador estadístico (frecuencia de muestreo, número de ventanas en la señal, entre otros). Posteriormente, el disturbio eléctrico generado es inyectado a la onda sinusoidal pura para su visualización. Finalmente, el indicador estadístico aplicará sus expresiones matemáticas sobre la señal con el disturbio eléctrico inyectado.



**Figura 3.4** Generación de disturbios eléctricos y aplicación de indicadores estadísticos

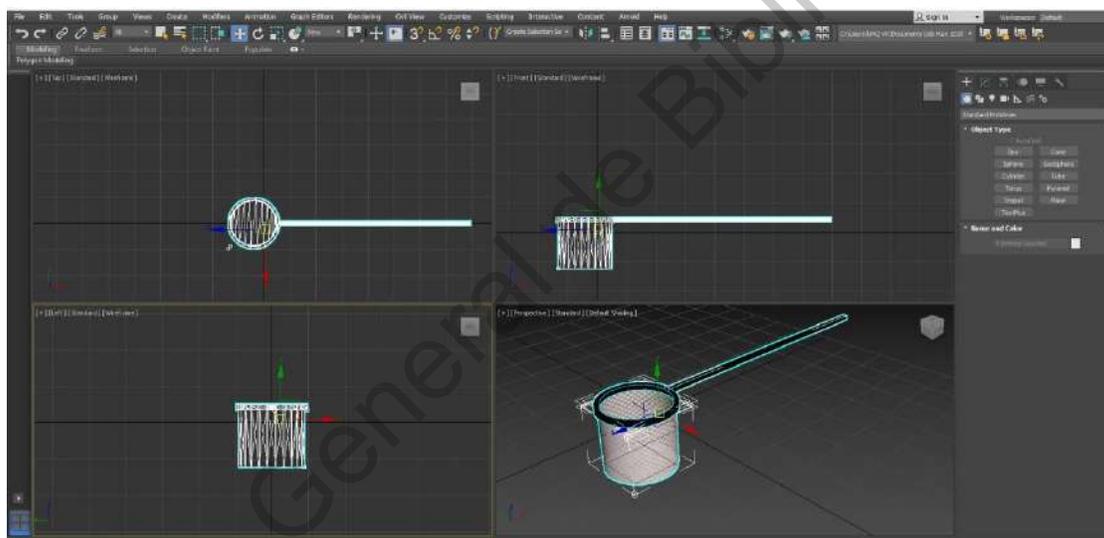
## 3.2 Elementos 3D

Los elementos 3D son cada uno de los objetos que aparecerán de forma visible en el entorno virtual y con los que el usuario podrá interactuar o no, ya sean estáticos o dinámicos, por ejemplo:

- Televisión: Objeto estático que el usuario podrá observar, pero no interactuar puesto que estará fijo.

- b) Multímetro digital: Objeto dinámico que el usuario podrá observar e interactuar al poder desplazarse con este y manipularlo.
- c) Pantalla Touch: Objeto estático que el usuario podrá observar e interactuar, pero no podrá desplazarlo.

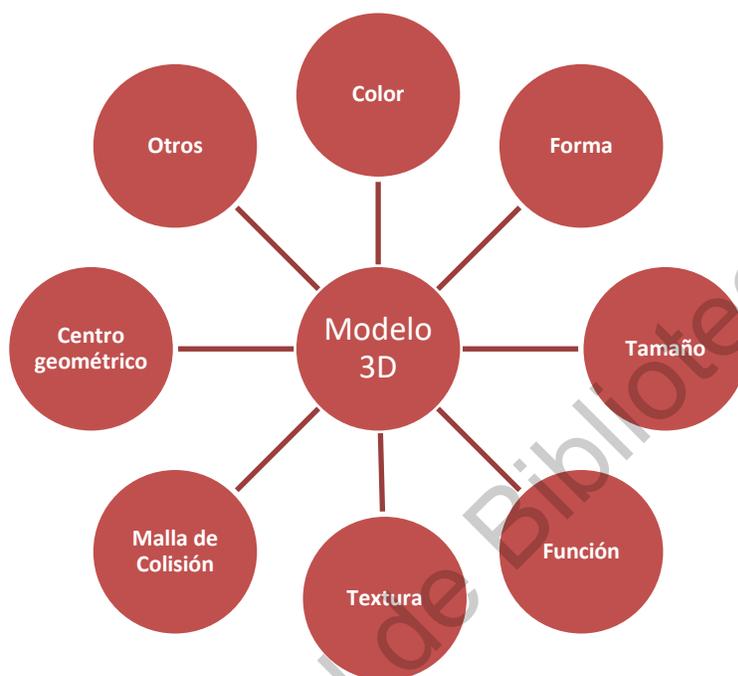
La creación de objetos es llevada a cabo en Autodesk 3Ds Max (Figura 3.5) y algunos otros son modelos de uso libre. Estos son editados bajo el mismo software y exportados en formato *fbx* para su uso posterior en UE4. Los de uso libre se extraen en formato *collada*, que es un formato de intercambio para aplicaciones interactivas 3D, y de igual forma se exportan en formato *fbx*. Por su parte, el formato *fbx* almacena todos los datos necesarios para escenas de animación, ya sea estática o dinámica.



**Figura 3.5** Edición de elementos 3D en 3Ds Max

UE4 posee un editor básico de elementos 3D que permite modificar colores, formas, texturas, entre otras características que conforman a un elemento 3D. Sin embargo, es recomendable ejecutar cambios dentro del primer software de diseño, que para este caso es 3Ds Max, con el fin de disminuir la carga de características definidas en UE4, ya que eso aumentaría el procesamiento del este último.

De este modo, 3Ds Max es el encargado de reunir diferentes propiedades del modelo 3D en cuestión, tal como lo muestra la Figura 3.6. Dichas propiedades son almacenadas en el formato *fbx* y finalmente captadas por UE4 para su uso e interacción con el usuario y el entorno virtual.



**Figura 3.6** Propiedades generadas por Autodesk 3Ds Max en Modelos 3D

Para cada modelo 3D, el procedimiento de asignación de propiedades es el mismo. El color, tamaño, textura y forma son características de visualización del objeto 3D, la función se refiere al objetivo que dicho modelo cumplirá dentro del entorno virtual (por ejemplo, si puede ser sujetado, cual será ese punto), la malla de colisión es la superficie que envuelve al objeto utilizada para detectar colisiones con agentes externos, el centro geométrico es el punto donde el objeto tiene su origen, y por lo tanto, a partir de ahí las transformaciones pueden realizarse, tales como la traslación, rotación y escalado. Existen algunas otras propiedades que son específicas dependiendo la función, por ejemplo, si el modelo tiene articulaciones y como se moverán estas.

Cabe mencionar que UE4 también es capaz de realizar modificaciones a las propiedades del objeto, como las que se observan en la Figura. 3.6, más sin embargo no es

recomendado puesto que UE4 no es un software de edición de propiedades sino de simulación de mecánicas.

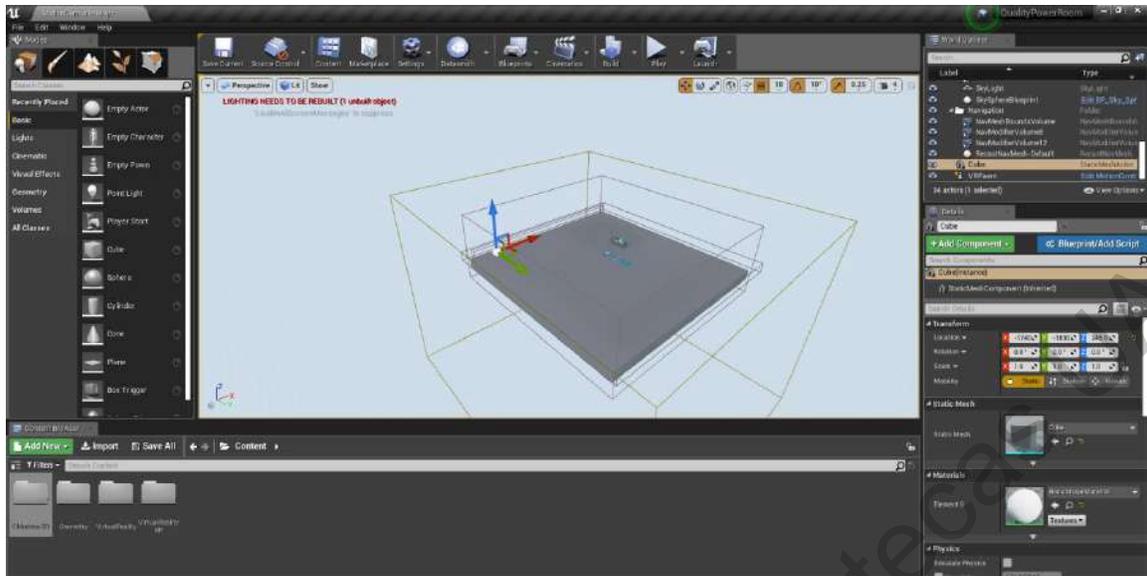
Es importante mencionar que algunos modelos 3D han sido importados desde desarrollos anteriores al que se presenta en este trabajo, los cuales han sido generados por este mismo equipo de trabajo.

### **3.3 Aula Virtual: Diseño y construcción**

Representa el espacio virtual donde el usuario podrá llevar a cabo aspectos de entrenamiento y capacitación relacionados al área de la PQ a través de la interacción con cada uno de los elementos que se encuentran en esta aula virtual (la cual es desarrollada utilizando UE4 con la versión de motor 4.23). Se mostrará porque es importante estudiar esta área, los principales equipos eléctricos y sus partes, interacción con la onda real de voltaje, cuáles son los disturbios eléctricos más comunes en las redes eléctricas, así como su descripción y ecuación matemática. Además, se presentarán los indicadores más comunes para el monitoreo y detección de tales disturbios eléctricos con su respectiva explicación y descripción matemática. Se le capacitará en cuanto a la aplicación de indicadores estadísticos sobre disturbios eléctricos de manera interactiva. Por último, el usuario podrá ser evaluado dentro del mismo ambiente de realidad virtual. El procedimiento para llevar a cabo cada una de estas etapas es descrita a continuación.

#### **3.3.1 Componentes del espacio**

Una vez que se tienen desarrollados los modelos 3D que conformarán el espacio virtual a desarrollar, se abre la plantilla por defecto que UE4 ofrece mostrada en la Figura 3.7 para importarlos. Dicha plantilla contiene configuraciones iniciales para el desarrollo del ambiente virtual. La plataforma que se muestra en el centro de la imagen será la superficie donde el usuario interactúe con los modelos 3D y será donde se agreguen cada uno de los componentes del espacio, tales como actores y widgets, los cuales se describen en las siguientes secciones. Este cuadro recibirá cada una de las acciones que el usuario generará.



**Figura 3.7** Pantalla inicial de construcción del Aula Virtual en UE4

Cada uno de los modelos 3D que se importan a UE4 (también llamados Actores dentro del entorno UE4, los cuales pueden ser estáticos, móviles o dinámicos) posee características únicas de acuerdo a su función y que son configuradas de forma privada. Cada uno de estos puede tener su propia programación y pueden interactuar con el usuario de manera diferente.

Por otra parte, algunos de los principales componentes del espacio que se encuentran en el ambiente virtual son los siguientes:

- a) **Iluminación.** Existen diferentes tipos de iluminación (puntos de luz, luz directa, entre otros) y cada una puede ser configurada dentro del entorno virtual de acuerdo a los requerimientos del usuario, estableciendo características tales como la potencia de iluminación, ángulo interior, ángulo exterior, color, intensidad luminosa. La selección de cada uno de los parámetros puede ser dada por un diseño en específico o simplemente por la estética del espacio e interactividad del usuario como se suele realizar en algunos videojuegos. En este proyecto se realiza por estética del espacio.

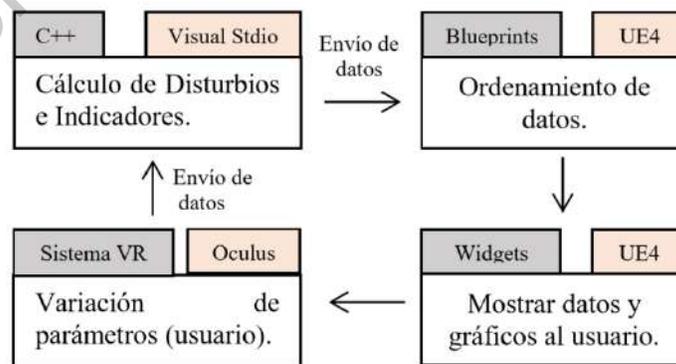
- b) Sonidos.** Son archivos con formato *wmv* importados a UE4 y posteriormente reproducidos en el ambiente virtual mediante un formato especial nombrado *sound cue*. Para reproducir este tipo de archivos se hace uso de un bloque, dentro de la programación Blueprints, llamado *Play Sound at Location* el cual reproduce el archivo en una ubicación con coordenadas  $q(x,y,z)$  especificada por el usuario. Esta reproducción se da siempre y cuando exista un evento que la genere, por ejemplo, la ejecución del juego (mediante el evento *Event Begin Play*) o que el usuario presione un botón de los controles del sistema.
- c) Imágenes.** Son archivos que pueden importarse en formato **jpg** o *png* para su respectiva visualización en cualquiera de los actores del juego. Para el desarrollo de este trabajo, estos archivos son de suma importancia, puesto que dan el aspecto gráfico al aula virtual. Aunque UE4 tiene opciones de desarrollo de herramientas interactivas, no es su fuerte. Por ello, las imágenes son desarrolladas haciendo uso de Canva, programa que si se dedica al desarrollo de contenido visual, y posteriormente usadas en UE4, especialmente en widgets.
- d) Físicas.** Se refiere a la gravedad, a las colisiones de cada objeto y a cada una de las características que tengan que ver con la Física. Estas son configuraciones privados para cada actor en específico. Algunas de las físicas ya son generadas por la plantilla por default que se utiliza en este trabajo, por ejemplo, el desplazamiento del usuario a través del espacio tridimensional.
- e) Controles.** Los controles asemejarán las manos del usuario durante la ejecución del ambiente virtual. Cada uno de los botones generan eventos y por ello su importancia. Para configurar los botones del sistema, se debe dirigir a las configuraciones del proyecto y luego a entradas; ahí se encontrarán las entradas para diferentes controles, se busca para el sistema que se construye (Oculus Quest), se agrega y se le da un nombre. Posteriormente, estos botones pueden ser utilizados dentro de la programación de UE4 para disparar eventos.
- f) Materiales.** La creación de materiales es privada para cada elemento 3D. UE4 posee su editor de materiales y con el cual puede realizarse infinidad de diseños.
- g) Otros.** Otras características del entorno virtual son añadidas para la correcta ejecución del sistema, las cuales se describen en las siguientes secciones.

### 3.3.2 Modelos matemáticos

Cada uno de los modelos matemáticos de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos propuestos es programado en Visual Studio usando C++ bajo un proceso de envío y recepción de datos entre este software y UE4, el cual es mostrado en la Figura 3.8. Los modelos matemáticos tienen variables que pueden modificarse con el tiempo, estas modificaciones son realizadas por el usuario una vez que está dentro del ambiente virtual. Un ejemplo de tal situación es la Ec. (34) que muestra el modelo matemático de la onda de voltaje descrita en el capítulo 2, en donde los parámetros variables son la amplitud  $A$ , la frecuencia  $f_1$  y el desfase  $\theta_A$ .

$$V(t) = A \sin(2\pi f_1 t + \theta_A) \quad (34)$$

Para cada periodo de tiempo establecido, Visual Studio calcula el valor del voltaje por medio de la Ec. (34), este valor es enviado directamente a UE4, donde a través de Blueprints (BP, tipo de programación en UE4) se le da un ordenamiento y se muestran al usuario mediante un tipo de ventana llamada widget, en la cual se ha creado una gráfica, de modo que el usuario pueda observar los datos de forma visual. La comunicación es bidireccional, porque el usuario puede modificar los parámetros variables antes mencionados de la onda sinusoidal desde el entorno virtual representado por UE4 y entonces tales datos son enviados ahora desde UE4 a Visual Studio para su cálculo respectivo. De este modo, el ciclo continúa mientras se cumpla el tiempo total de la señal o a condiciones externas dadas por el usuario (botones, apagado del sistema, entre otros)



**Figura 3.8** Implementación de modelos matemáticos y visualización del usuario

### 3.3.2.1 Cálculo de Disturbios e Indicadores

El cálculo de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos en Visual Studio requiere obligatoriamente dos archivos de extensión *.h* y *.cpp*. En el primero se declaran todas las variables y funciones que el usuario puede modificar, mientras que en el segundo se especifica el trabajo que harán tales funciones. Tomando el ejemplo de la Ec. (34), en el archivo *.h* se requieren variables para la amplitud, la frecuencia y el desfase además de una función que será la encargada de realizar los cálculos, los cuáles son ejecutados en el archivo *.cpp* a través del modelo matemático, a su vez, estos datos son enviados a UE4. En UE4 se reciben en el actor (que es una clase) donde tales datos son utilizados a través de un entorno de programación de BP llamado *Event Graph*, esta situación es mostrada en la Figura 3.9.



Figura 3.9 Cálculo de modelos matemáticos en Visual Studio

### 3.3.2.2 Ordenamiento de datos

Consiste en darle sentido a los datos calculados que ahora se encuentran en UE4. Para ello, por cada punto que se calcula en Visual Studio se debe generar un punto de la forma  $P(X,Y)$  en donde la coordenada en  $x$  representa el tiempo obtenido a partir del reloj maestro dado por el visor OQ y la coordenada en  $y$  la amplitud de la onda senoidal (o de cualquier modelo matemático) calculada en Visual Studio. Finalmente se obtiene una matriz de puntos de tamaño indefinido, puesto que no se sabe cuánto tiempo el usuario estará en contacto con el modelo matemático. El arreglo es ordenado de modo que los puntos actuales se agreguen

al final de este. Estas descripciones son llevadas a cabo mediante el uso de Blueprints, en el área denominada como *Event Graph*.

### 3.3.2.3 Mostrar datos y gráficos al usuario

En UE4 existe una herramienta nombrada *widget* (Figura 3.10), ideal para crear interfaces gráficas en el ambiente virtual, ya que permite al usuario la interacción con botones, etiquetas, texto, entre otras. Tomando ventaja de esta situación, los datos hasta ahora se han almacenado en una matriz de  $n \times 2$  son mostrados al usuario a través de un widget mediante texto y de forma gráfica. Es importante mencionar que no existe función para graficar, esta es desarrollada más adelante.



**Figura 3.10** Herramienta para desarrollo de interfaces gráficas en UE4: Widget

### 3.3.2.4 Variación de parámetros (usuario)

Debido a que la interfaz gráfica permite la interacción con el usuario a través de distintos elementos, es posible pedir parámetros de los modelos matemáticos al usuario (por

ejemplo, la amplitud, la frecuencia y el desfase de la onda senoidal) para que ahora sean enviados desde el widget a Visual Studio y con ello obtener nuevos datos.

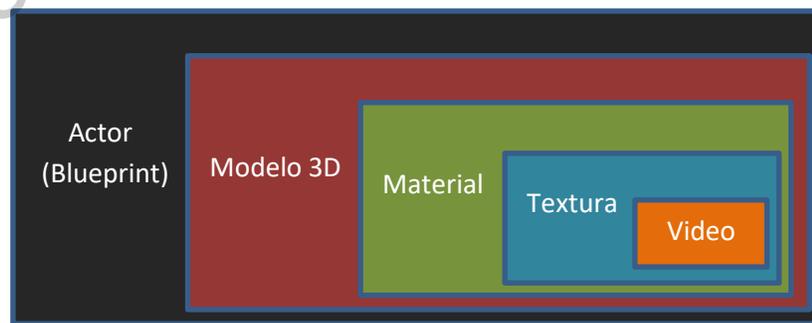
### 3.3.3 Áreas de entrenamiento

Esta sección describe las áreas implementadas dentro del aula virtual para el entrenamiento y capacitación del usuario relacionada al área de la PQ.

#### 3.3.3.1 Importancia de la calidad de la energía

Se implementa un video dentro del ambiente virtual donde se le da conocer al usuario porque es importante estudiar el área de la PQ con el fin de concientizarlo.

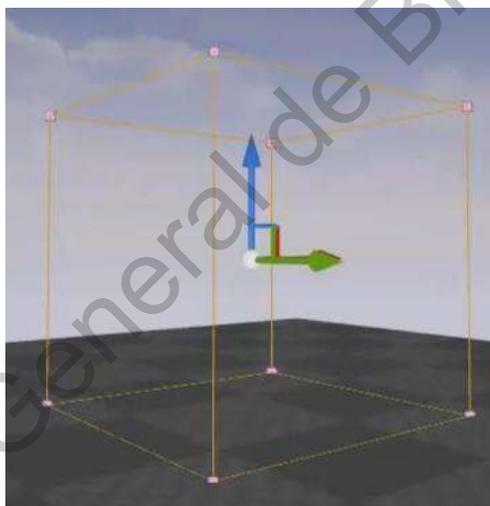
La Figura 3.11 muestra el proceso para añadir un video dentro del ambiente virtual, en donde primero el archivo tiene que estar en formato *wmv*. Dentro del proyecto debe crearse una carpeta llamada *Movies* y guardar en este directorio cualquier video a reproducirse en el ambiente virtual de modo que en el proceso de descarga desde UE4 a OQ, estos archivos sean cargados. Una vez realizado esto, se crea una textura dentro de UE4, esta textura es aplicada a un material que también es creado en UE4. El material es aplicado a cualquier modelo 3D (una televisión, un cubo, un plano), que será sobre el que se reproduzca el video. El modelo 3D puede incorporarse ahora al ambiente virtual para reproducir el video, pero estará estático. Para añadir movimiento al modelo 3D durante la reproducción del video, dicho modelo 3D se convierte a actor, lo cual le da propiedades de movimiento (y muchas más) y por lo tanto, durante la reproducción del video, el modelo 3D se estará moviendo, lo cual generará un aspecto visual llamativo.



**Figura 3.11** Video en el ambiente virtual

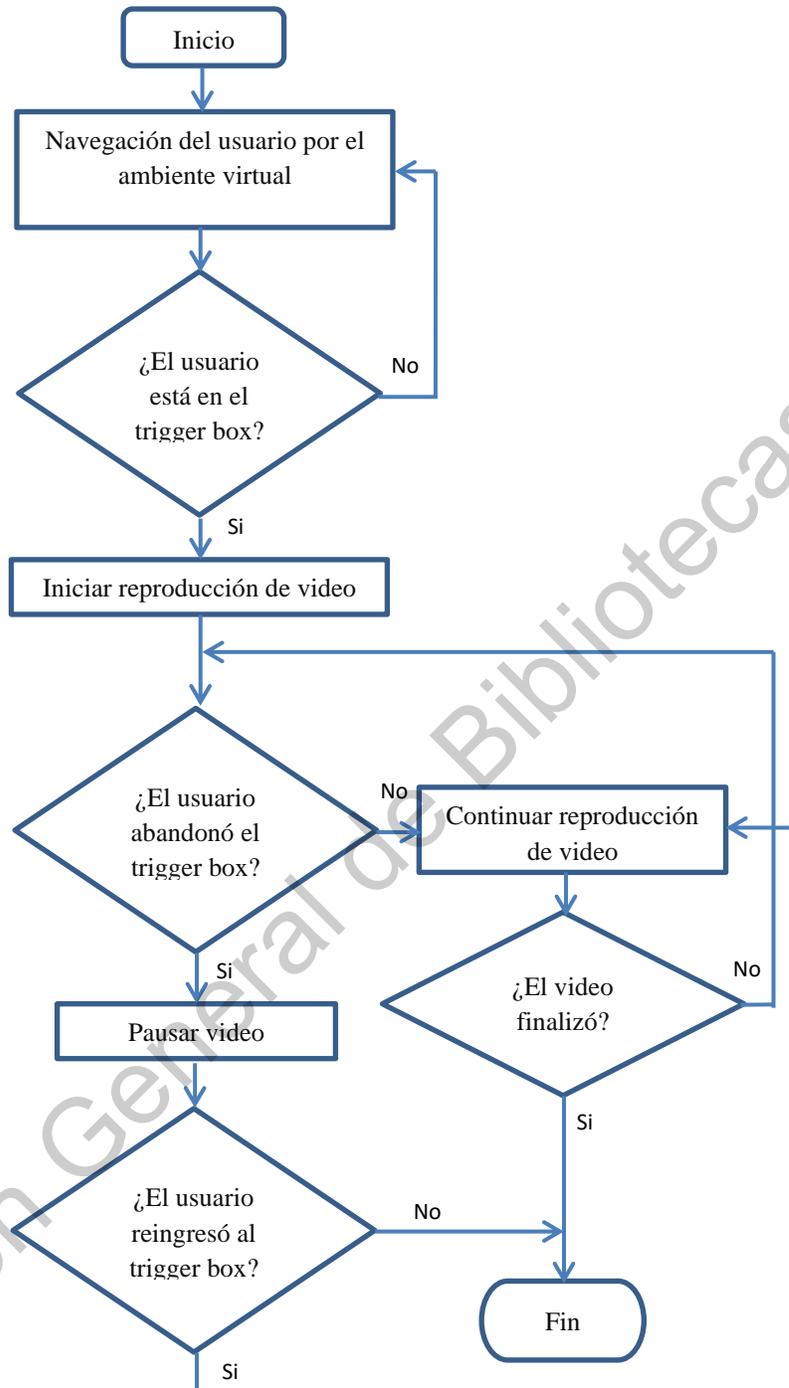
En otras palabras, la reproducción del video requiere el uso de una textura, pero ésta última no puede importarse al ambiente virtual por sí sola, ya que requiere de un modelo 3D para ser observable dentro del espacio, por ello es que se realiza el procedimiento de la Figura 3.11.

El video no se estará reproduciendo todo el tiempo, sino que cuando el usuario esté centrado en cierta posición, ideal para observar el video, este empezará su reproducción. Esta situación se convierte en un evento, es decir, la reproducción del video ocurrirá si y solo si el usuario se encuentra en una posición deseada. Para lograr tal evento se hace uso de una herramienta llamada *trigger box*, la cual es un cubo dimensiones variables colocada dentro del espacio virtual, en este caso, del lugar donde se quiere que el usuario se encuentre, como se muestra en la Fig. 3.13. Cuando el usuario se sobrepone al cubo, este último dispara un evento y con ello es posible empezar a reproducir el video.



**Figura 3.12** Trigger box

La reproducción del video está generada a partir de la secuencia descrita por el diagrama de flujo de la Figura 3.13, donde la reproducción inicia cuando el usuario se superpone al *trigger box*, pero se pausa cuando deja de hacerlo. Si el usuario vuelve a superponerse al *trigger box*, el video continuará su reproducción desde la última interrupción, pero si este finalizó la última vez que el usuario se superpuso al *trigger box*, entonces la reproducción del video iniciará nuevamente.



**Figura 3.13** Reproducción de video dentro del ambiente virtual

### 3.3.3.2 Principal equipo eléctrico

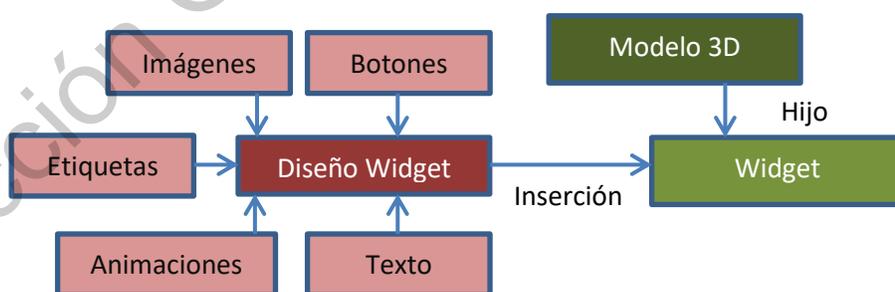
Esta área le permite al usuario conocer e interactuar con los principales equipos de seguridad y de medición en el área de la PQ. La Tabla III muestra los elementos 3D con los que se puede interactuar dentro del aula virtual.

**Tabla IV** Elementos 3D del área de PQ

Guantes de seguridad	Caja de herramientas
Casco de seguridad	Zapatos de seguridad
Medidor de PQ	Pinzas eléctricas
Multímetro digital	Interruptor termomagnético
Desarmador eléctrico	

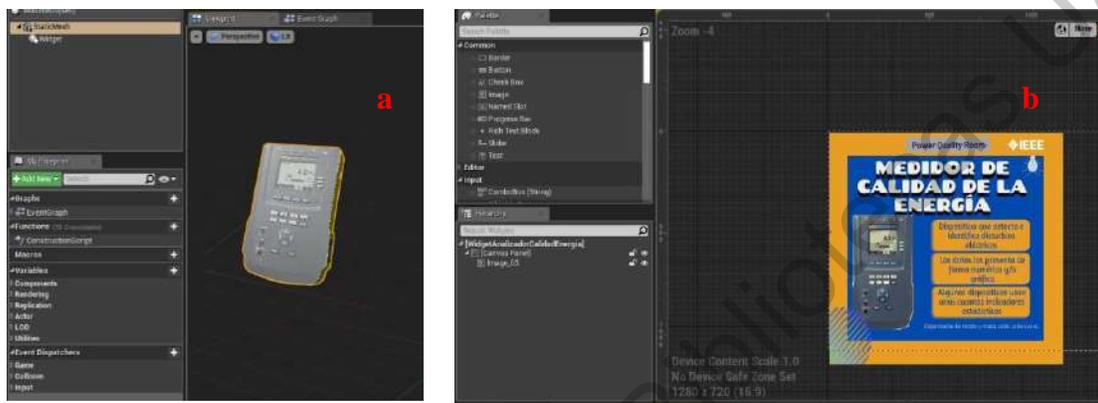
Los controles del sistema OQ permiten la interacción con los elementos 3D que se encuentran dentro del aula virtual, de modo que cuando el usuario sujeta uno de estos, un cartel es observado por el usuario, mostrándole aspectos importantes del elemento en cuestión.

Una vez que el modelo 3D se encuentra en UE4, se agrega un *widget* como hijo de dicho modelo para poder observar aspectos gráficos. Por otra parte, se diseña otro widget de manera separada, pero finalmente, este será agregado al widget del modelo 3D, como lo muestra la Figura 3.14.



**Figura 3.14** Widget en elementos 3D

El widget diseñado es fácilmente agregado al widget hijo del modelo 3D, únicamente seleccionando la clase a la cual pertenecerá, es decir, insertando el widget diseñado al widget hijo. La Figura 3.15a muestra el modelo 3D del medidor de PQ, en el cual se observa el widget hijo (barra lateral izquierda), mientras que en la Figura 3.15b se observa el widget diseñado para tal medidor, el cual será insertado al widget de la Figura 3.15a.



**Figura 3.15** Widget para equipo eléctrico, en a) Modelo 3D que contiene un *widget* hijo y en b) *widget* diseñado para ser agregado al modelo 3D.

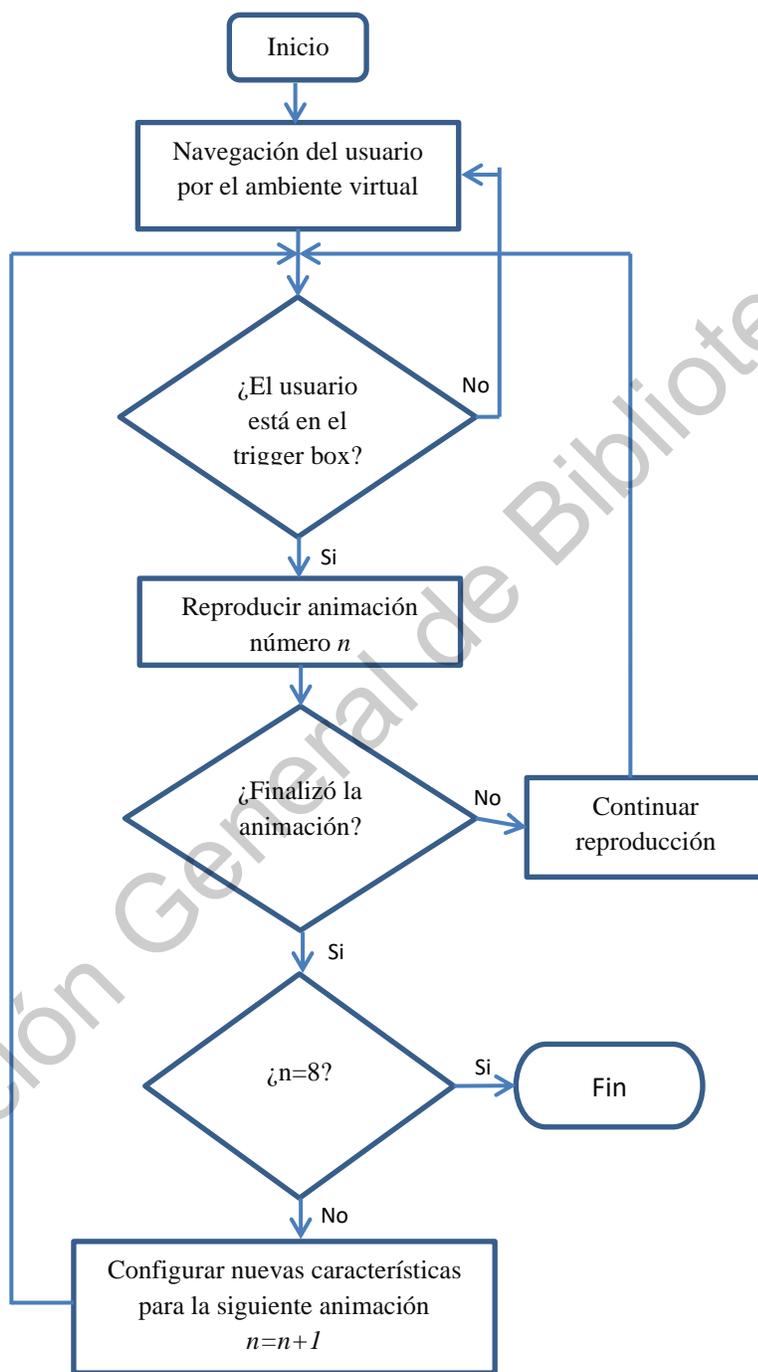
El widget será observado por el usuario si y solo si se ejecuta el evento *levantar objetos*, generado por los controles del sistema OQ. No será visible cuando el usuario no esté en contacto con el objeto. El evento *levantar objetos* ocurre cuando el sistema OQ detecta mallas de modelos 3D cerca de los controles OQ y que el usuario, a través de los botones, indique que quiere agarrar dicho modelo.

Esta metodología es aplicada a cada uno de los modelos propuestos para el aula virtual mostrados en la Tabla IV.

### 3.3.3.3 Partes principales del transformador de potencia

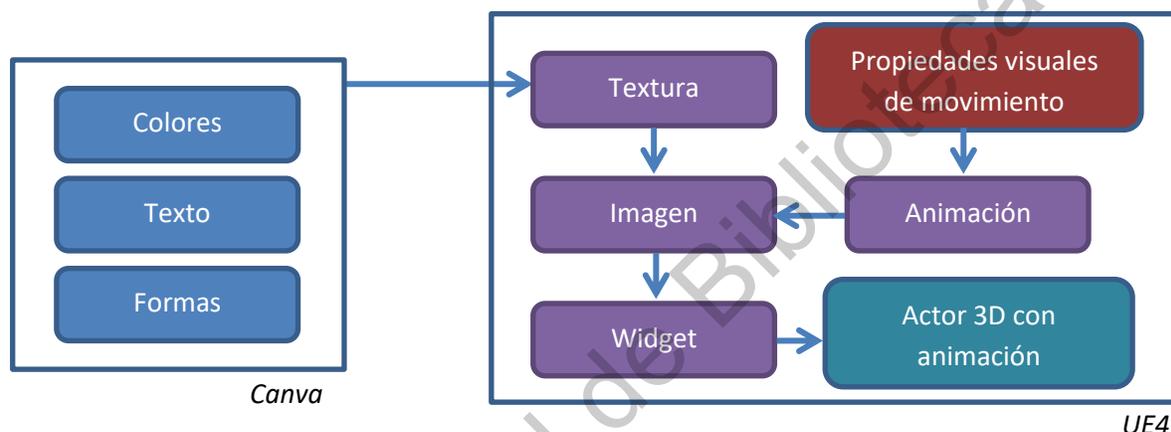
Esta área muestra al usuario un transformador de potencia y sus partes principales a través de animaciones dentro del aula virtual. La Figura 3.16 muestra la metodología seguida para la reproducción de un total de ocho animaciones que contienen diferentes partes del transformador, en donde un trigger box es utilizado para detectar que el usuario está en el

área y entonces reproducir dichas animaciones. Cada que finaliza una animación se actualizan parámetros para la siguiente animación, tales como la ubicación, la escala y la rotación del widget contenedor de la animación, puesto que cada animación aparece sobre una parte del transformador en específico.



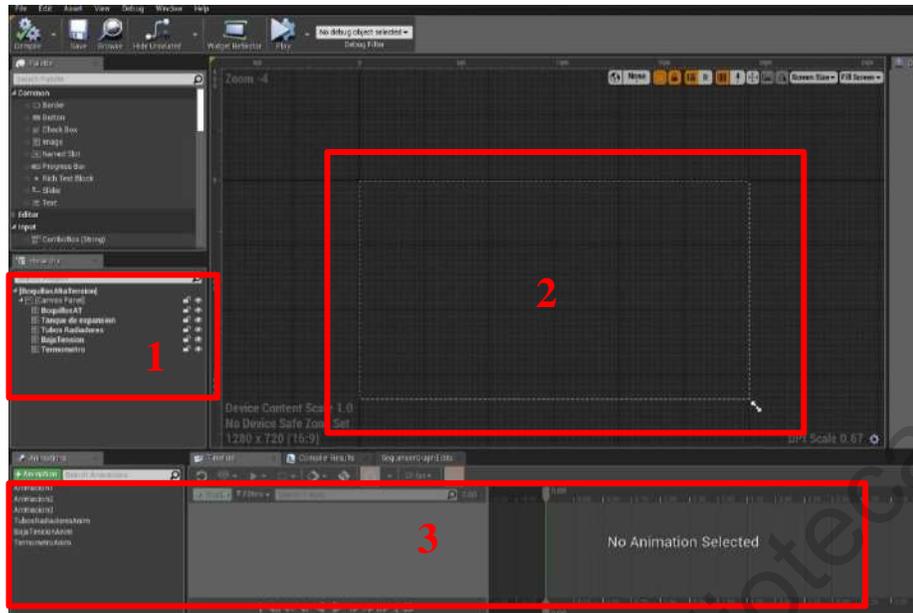
**Figura 3.16** Reproducción de animaciones en el transformador de potencia

El proceso de creación de animaciones es mostrado en la Figura 3.17. El primer paso es diseñar los elementos gráficos que aparecerán dentro de la animación, aspecto que es realizado en el programa *Canva*. Este diseño es importado a UE4 como textura para ser agregado a una imagen, la cual recibirá los efectos de animación tales como traslación y rotación, mismos que son agregados por el editor de animaciones de UE4. La imagen está contenida dentro de un widget y no puede ser mostrada en el entorno virtual, por ello, este widget se agrega a un modelo 3D que le otorga propiedades para entonces ahora si aparecer dentro del entorno virtual.



**Figura 3.17** Proceso de creación de animaciones

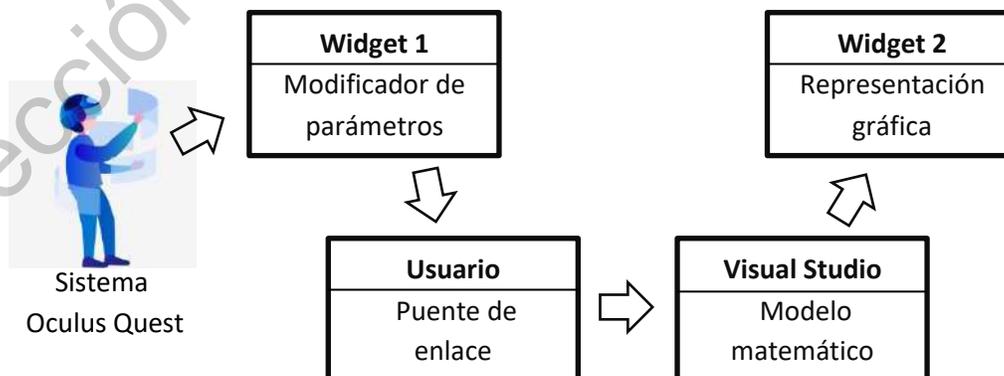
La Figura 3.18 muestra las imágenes que ya han sido cargadas a UE4 (recuadro 1) dentro del entorno del widget (recuadro 2), mientras que el panel inferior muestra el editor de animaciones, el cual se aplicará a imagen por imagen (recuadro 3). Una vez que se selecciona cualquiera de las imágenes, el editor despliega una serie de opciones con las características que se desean modificar, ya sea posición, rotación, escala, transparencia, entre otros. Estas propiedades reciben valores específicos sobre una línea del tiempo que también aparece en este editor, de modo que a cada segundo que pasa le corresponde un número exacto que le da vida a la propiedad en cuestión. Algunas otras configuraciones pueden establecerse en este editor, tales como la velocidad de reproducción, el número de reproducciones antes de finalizar la animación, tiempo total de la animación, entre otros.



**Figura 3.18** Widget y panel de animaciones

### 3.3.3.4 Interacción con la onda real de voltaje

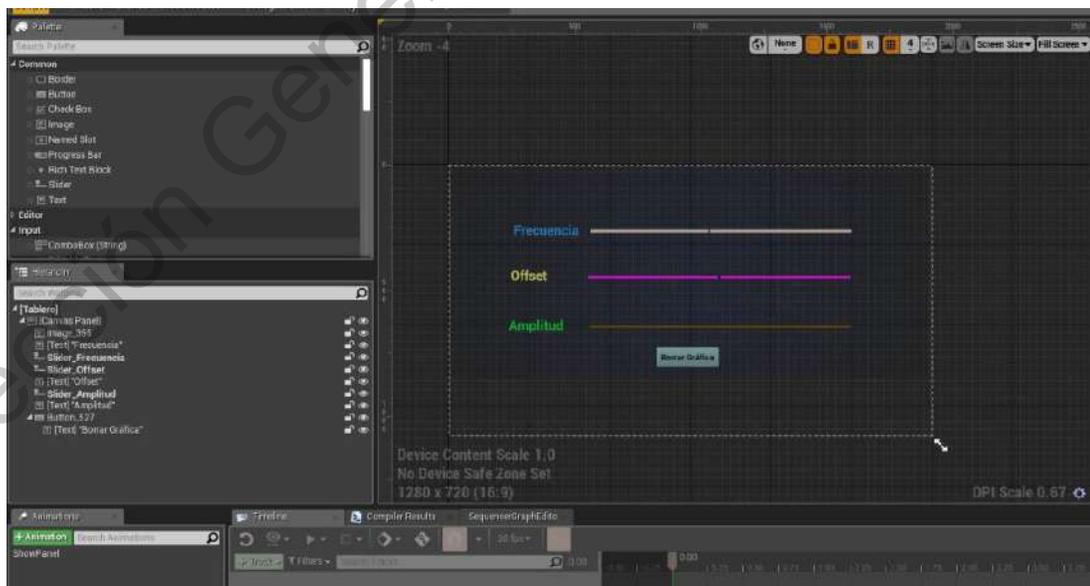
Esta área le permitirá al usuario conocer la onda real de voltaje e interactuar con la misma, al poder modificar parámetros como amplitud, frecuencia y desfase provenientes del modelo matemático de una onda de voltaje descrita en secciones anteriores, en donde dicho modelo matemático es implementado en C++. La Figura 3.19 muestra el esquema general para realizar lo descrito.



**Figura 3.19** Metodología en el área de interacción con la onda

Respecto a la Figura 3.19, el usuario modificará los parámetros (amplitud, frecuencia y desfase) mediante eventos de deslizadores que aparecerán en un widget. Estos valores son almacenados en variables que idealmente deberían ir directamente al programa Visual Studio para su cálculo en C++, sin embargo, esto no es posible, lo que se hace entonces es generar un puente de enlace realizado por el usuario (*Player Pawn*) que tiene como función almacenar el valor de las variables cambiadas por el usuario desde el entorno de realidad virtual y entregarlas al programa de Visual Studio para su cálculo respectivo en C++. Posteriormente, este programa enviará los valores a otro widget que será el encargado de graficar los resultados y mostrar aspectos gráficos.

- a) **Sistema Oculus Quest.** A través de los visores y con el uso de los controles para manos, el usuario puede interactuar con los elementos del widget 1.
- b) **Widget 1.** Diseño con deslizadores que permite modificar un valor en específico y conseguir dicho valor a través del evento “*On value changed*”. La Figura 3.20 muestra el diseño de la interfaz gráfica denominada widget, en la cual serán almacenadas las variables que el usuario cambien en primera instancia.



**Figura 3.20** Diseño de widget para el cambio de parámetros en la onda senoidal

### c) Usuario

El usuario, a través del archivo *Motion Controller Pawn* (el cual es creado cuando se ejecuta la plantilla por default), almacena las variables con los nuevos valores y las envía a la implementación realizada en C++.

### d) Visual Studio

Obtiene los valores del usuario y aplica el procedimiento descrito en la Figura 3.8.

### e) Widget 2

Interfaz gráfica encargada de mostrar la onda sinusoidal de forma gráfica. En UE4 no existe función para graficar funciones tal como lo haría Matlab con la función *plot*, por ello, se procede a crear una interfaz que muestre el gráfico de amplitud contra tiempo para observar la onda senoidal a través de etiquetas y bordes, tal como se muestra en la Figura 3.21.

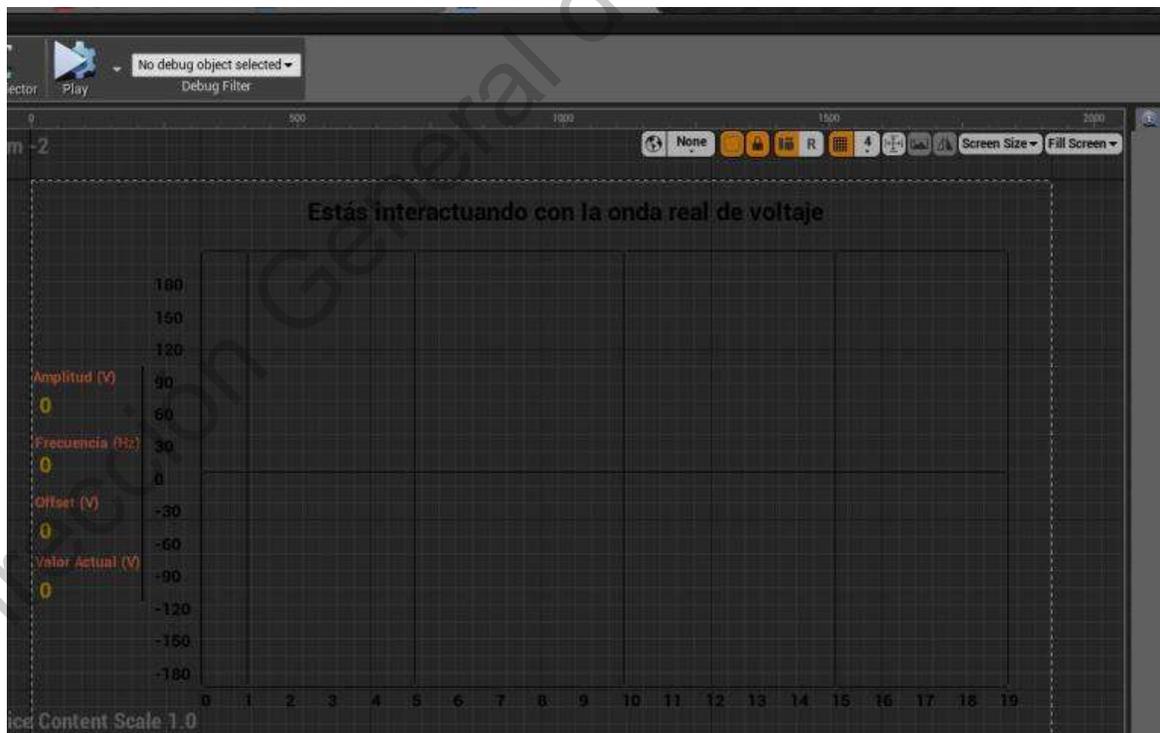
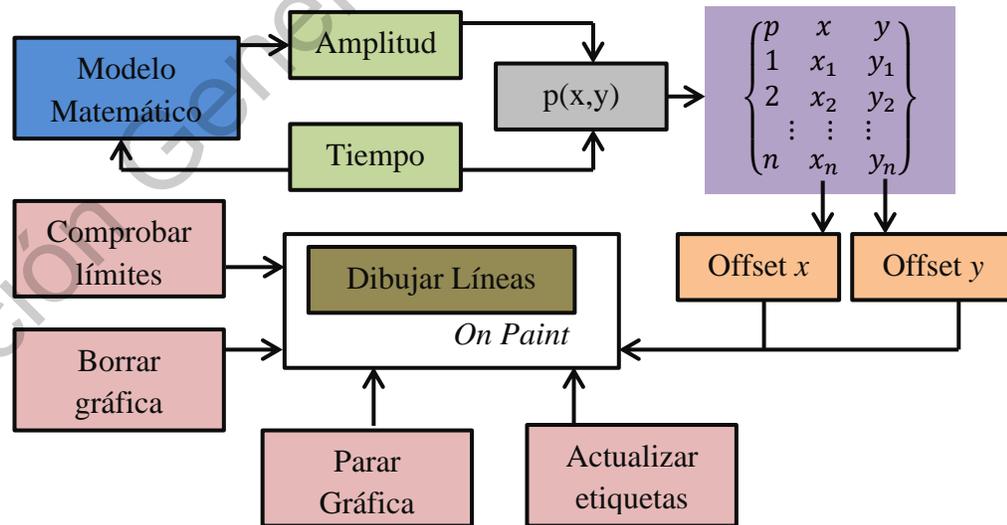


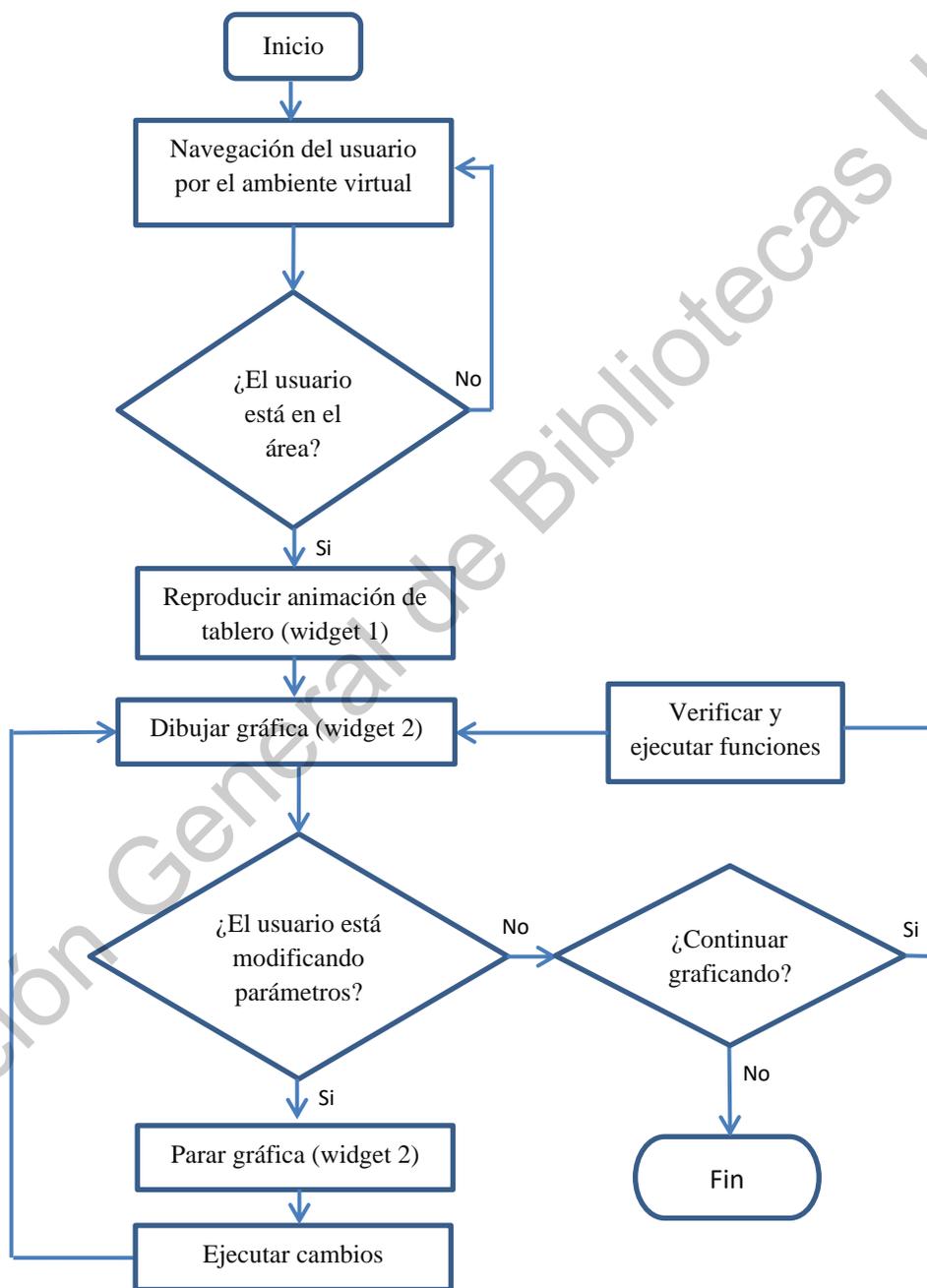
Figura 3.21 Interfaz desarrollada para generar la gráfica senoidal

La Figura 3.8 concluyó su procedimiento hasta obtener una matriz de puntos de  $n \times 2$  de la forma  $P(X,Y)$ . Para generar la gráfica se utiliza un bloque llamado *Draw Lines* que se encuentra dentro de la función *On Paint* (en el widget), la cual, a partir de dos puntos de la forma  $p(x,y)$  genera una línea; si se introducen cada uno de los puntos que se están generando a través del tiempo al bloque *Draw Lines*, se generarán  $n-1$  líneas que asimilarán la forma de lo que se trate de graficar, en este caso, la onda senoidal. En otras palabras, el aspecto gráfico de la onda senoidal que el usuario verá en pantalla, será una composición de líneas unidas entre sí. Luego, el punto  $(0,0)$  de la gráfica está desfasado tanto en  $x$  como en  $y$ , por lo tanto, es necesario agregar un offset de desplazamiento que dependerá de donde se quiera colocar tal punto y de la forma en que se ha diseñado el gráfico. Posteriormente, el origen del widget se encuentra en la esquina superior izquierda, donde el valor positivo para las abscisas está a la derecha mientras que para la ordenada se encuentra hacia abajo, por tal motivo, en la amplitud debe agregarse el signo negativo. Finalmente, durante la operación del algoritmo debe verificarse los límites de la gráfica, tanto para  $x$  como para  $y$ , de modo que dicha gráfica no sobrepase tales límites y de ser el caso, limitarlos. Algunas otras funciones son implementadas para la interacción del usuario, tales como borrar y poner un alto a la gráfica. Esta descripción es mostrada en la Figura 3.22.



**Figura 3.22** Proceso para graficar función senoidal

El procesamiento descrito anteriormente se ejecutará si y solo si el usuario se encuentra en esta área, aspecto que se detecta mediante un trigger box. El diagrama de la Figura 3.23 muestra los aspectos generales para la ejecución de la interacción del usuario con la onda sinusoidal, que como se mencionó anteriormente, se hace uso de dos widgets.



**Figura 3.23** Proceso de ejecución en el área de interacción con la onda

### 3.3.3.5 Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores

Área que le permite al usuario interactuar con una pantalla touch, la cual contiene diferentes menús mostrados en la Figura 3.24 quienes son descritos posteriormente. El árbol de composición del menú (que es creado mediante un widget) se logra a partir de la visibilidad de cada uno de los componentes.

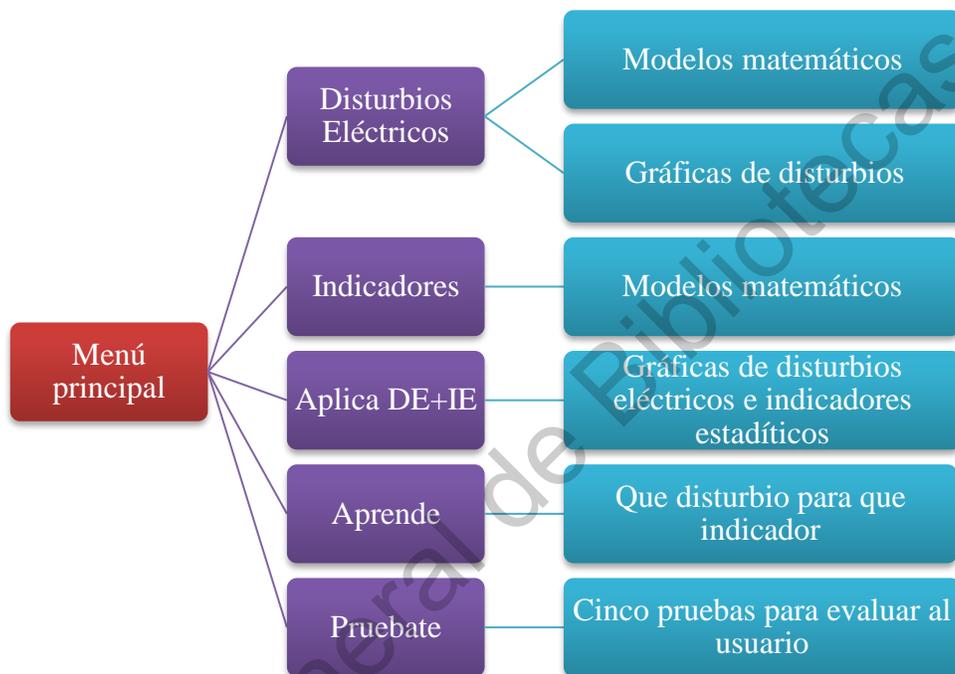
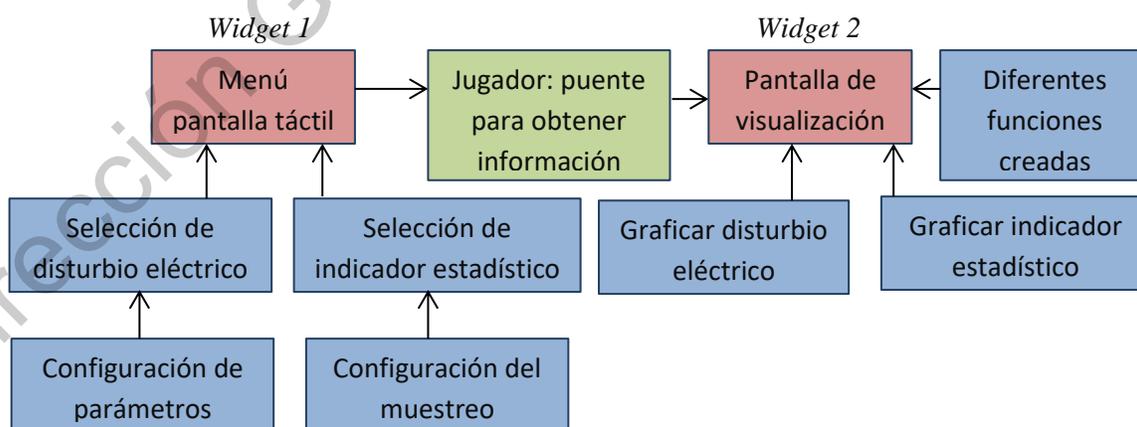


Figura 3.24 Menú de la pantalla touch

a) **Disturbios Eléctricos.** Menú en el que el usuario puede observar cada uno de los disturbios eléctricos: descripción y modelo matemático, tal como se mostró en el capítulo II de este trabajo. Estos son una secuencia de imágenes importada a UE4, que han sido creados en Canva. Además, el usuario tiene la posibilidad de observar el disturbio eléctrico de forma real de acuerdo a la descripción matemática del modelo en cuestión, por ello, el recurso creado para la gráfica de la onda senoidal es utilizado en esta sección del aula virtual (algunos cambios son llevados a cabo, como la ubicación, tamaño, escala, entre otros). Esta sección requiere que todos los modelos matemáticos de los disturbios eléctricos sean implementados en C++.

**b) Indicadores.** Secuencia de imágenes que le permite al usuario observar los indicadores estadísticos propuestos en este trabajo, su descripción y modelo matemático (tal como se mostró en el capítulo II de este trabajo) a través de botones, etiquetas y lógica de programación de visibilidad de componentes.

**c) Aplica DE+IE.** Esta sección le permite al usuario seleccionar un disturbio eléctrico y posteriormente elegir un indicador para monitorear tal disturbio de manera gráfica. La Figura 3.25 muestra la secuencia de la información que se requiere para generar tal situación. Este menú requiere la interacción entre dos widgets, ya que mediante la pantalla táctil (que es un widget) se le dan instrucciones a otro widget que es representado por una pantalla, donde serán mostradas tales gráficas. El envío de la información entre ambos widgets requiere al jugador como puente de enlace, proceso que se mostró en secciones anteriores. En el widget 1 representado por la pantalla táctil, el usuario seleccionará el disturbio eléctrico y configurará parámetros tales como la amplitud, la frecuencia y el desfase, y también seleccionará el indicador estadístico eligiendo algunos parámetros tales como el número de ventanas en la señal y la frecuencia de muestreo. Estas variables son utilizadas en el widget 2 para generar el grafico tanto del disturbio eléctrico como del indicador estadístico. En el widget 2 se crean funciones auxiliares para la graficación, tales como la creación de una gráfica de dos dimensiones, verificación de límites durante la ejecución, actualización de etiquetas, borrado, reubicación de los puntos calculados, entre otros.



**Figura 3.25** Secuencia de información en la sección de aplicación de disturbios e indicadores

La aplicación del indicador estadístico se genera en base al número de puntos por ventana que se requiera (configurado por el usuario a través de pantalla táctil), es decir, una vez que se cumpla el número de puntos por ventana, se calcula el indicador estadístico y para ello se usa la información de la señal (generada por el modelo matemático del disturbio eléctrico) que finalmente dará como resultado un punto  $w(x,y)$ . Este punto se irá agregando a una matriz de puntos que se graficará junto con los puntos subsecuentes para generar el indicador que será mostrado sobre la gráfica del disturbio eléctrico. El punto es graficado justamente donde la ventana de datos de la señal finaliza. Se utiliza la función *draw lines* para generar líneas entre los puntos del indicador estadístico.

**d) Aprende.** Modelos gráficos que le mostrarán al usuario cada uno de los disturbios eléctricos implementados en el ambiente virtual y le enseñarán que indicador estadístico (de los que se han implementado en el ambiente virtual) es el más adecuado para monitorear tal disturbio eléctrico de acuerdo a la literatura. Esto se realiza a través de imágenes, botones y etiquetas.

**e) Pruebas.** El usuario es evaluado de manera virtual a través de cinco pruebas basadas de acuerdo a lo que se le ha mostrado en el aula virtual: reconocimiento de parámetros de modelos matemáticos de disturbios e indicadores, aplicación de indicadores estadísticos a un disturbio dado, reconocimiento de disturbios eléctricos, reconocimiento de parámetros de la onda senoidal y reconocimiento de equipo eléctrico necesario en el área de la PQ. Para la realización de estas pruebas se hace uso de los recursos que a través de este capítulo se han mencionado, tales como widgets, trigger box, botones, etiquetas, entre otros. Cada prueba se realiza en forma de juego y a la vez requiere que el usuario razone las situaciones que se le presentan. Finalmente, la evaluación del usuario para cada prueba es almacenada en el sistema OQ y posteriormente utilizada para generar los resultados de este trabajo.

### 3.3.3.6 Otras áreas

En el aula virtual existen otras áreas que muestran contenidos gráficos e interactivos sobre el área de la PQ y VR, las cuales se desprenden de las áreas descritas anteriormente:

- **Infografías interactivas que contienen aspectos de la PQ.** Letreros diseñados en Canva e importados como actores a UE4 para mostrar al usuario el conocimiento respecto a la PQ. Estos interactúan con widgets y los modelos matemáticos de la PQ.
- **Objetos con movimiento.** Objetos a los cuales cada periodo de tiempo se les agrega un offset de movimiento, ya sea de traslación o rotación, utilizados para dar un aspecto virtual inmersivo. Algunos son utilizados para las pruebas del usuario, por ejemplo, un avión, y otros para dar un aspecto realista al aula virtual, por ejemplo, los ventiladores.
- **Sistemas de partículas.** Es una función de UE4 (y de programas de animación), con la que se puede animar una gran cantidad de objetos. Este tipo de sistemas se utilizan por ejemplo para simular el comportamiento del humo, del fuego o de una explosión. En el ambiente virtual son utilizados para simular las chispas del transformador cuando el usuario interactúa con este o al iniciar el aula virtual.

### 3.4 Subestación de potencia virtual: Diseño y Construcción

Dado que la capacitación en cuanto al área de la PQ de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos se lleva a cabo en el ambiente virtual anterior, este ambiente tendrá el objetivo de mostrar al usuario el proceso de adquisición de señales eléctricas de corriente y de voltaje en una subestación eléctrica de potencia mediante un medidor de calidad de la energía para su monitorización y detección de disturbios eléctricos, dando a conocer cada una de las partes esenciales de la subestación eléctrica.

#### 3.4.1 Componentes del espacio

Los componentes del espacio más importantes para este ambiente virtual abarcan los siguientes puntos:

- Elementos 3D. Algunos de los elementos 3D utilizados para este ambiente virtual son obtenidos a partir de trabajos previos realizados por De Haro (2019). Los elementos restantes son obtenidos de modelos libres.
- Sonidos. Los archivos de audio se obtienen a través de la página web <https://www.zapsplat.com/>, la cual provee música, sonidos y efectos especiales de manera gratuita. Diferentes efectos especiales son utilizados en la subestación eléctrica, por ejemplo, explosiones, botones, música de piano, entre otros.
- Imágenes. Archivos multimedia que le darán información al usuario para generar diversas secuencias o acciones durante el entrenamiento.
- Modelos estáticos. Son mallas estáticas creadas a partir de las herramientas que provee UE4 para dar más realismo a la imagen, por ejemplo, los cables que conectan las torres de alta tensión con el transformador.
- Otros. Existen otros componentes de espacio más particulares que los anteriores, los cuales se describen en las siguientes secciones.

### **3.4.2 Etapas de entrenamiento**

Este ambiente virtual está compuesto de cuatro etapas que tienen como objetivo mostrar al usuario el procedimiento para medir señales eléctricas dentro de la subestación eléctrica:

1. Reconoce la subestación eléctrica:
2. Proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica.
3. Medir señales eléctricas y reconocer disturbios eléctricos.
4. Evaluación del conocimiento adquirido.

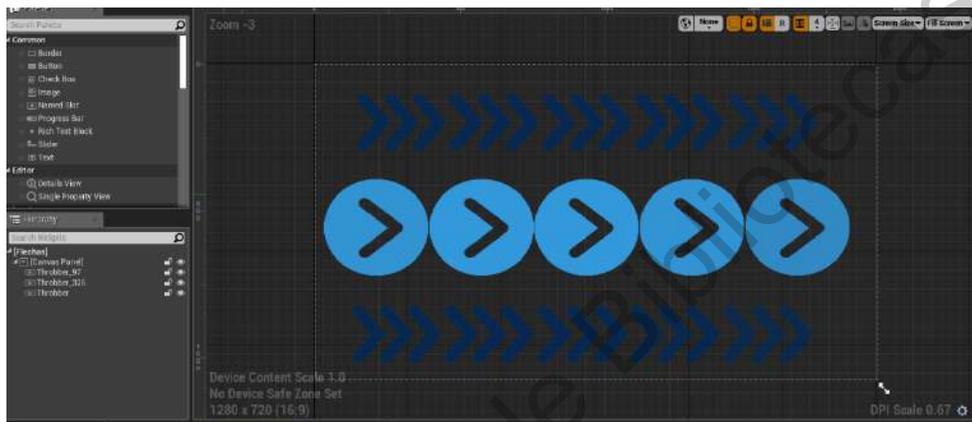
A continuación, se describen los métodos utilizados y componentes de espacio particulares para cada etapa.

#### **3.4.2.1 Reconoce la subestación eléctrica**

Es importante que antes de que el usuario inicie cualquier procedimiento dentro de la subestación, este conozca cada uno de los componentes que integran la subestación eléctrica,

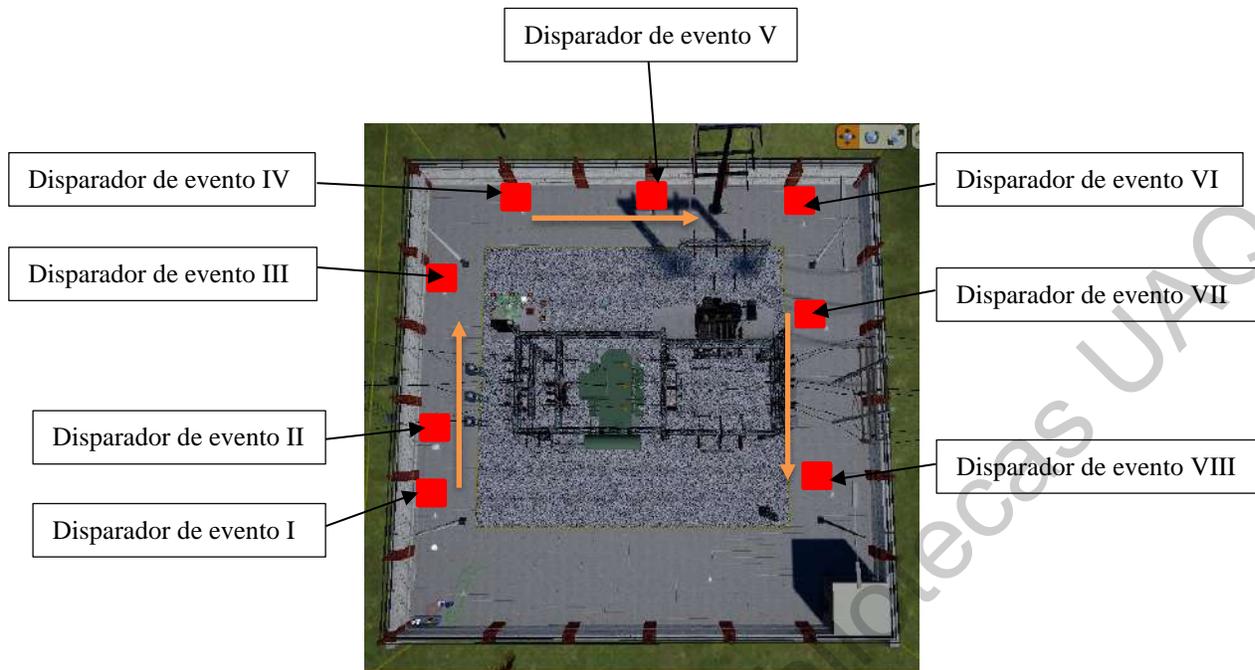
así como su función, uso, aplicación y ubicación dentro de este ambiente virtual, con el fin de reconocer las partes principales.

Por ello, cuando la ejecución de esta etapa comienza, una animación se le muestra al usuario indicando la ruta que debe seguir. Esta animación es creada a partir de imágenes con flechas a las cuales se les otorga propiedades de transparencia conforme el tiempo transcurre en un widget de UE4, tal como se observa en la Fig. 3.26.



**Figura 3.26** Diseño de animación en widget para mostrarle la ruta al usuario.

Con la ayuda de trigger boxes o también llamados cajas disparadoras (los cuales ejecutan eventos cuando son traslapados) ubicados en puntos específicos dentro de la subestación (Fig. 3.27), se generan eventos, los cuales reproducirán sonido, narraciones, crearán materiales llamativos, generarán actores como flechas, entre otros, con el fin de informar al usuario que objeto es el que está observando, para que sirve y cuál es su función dentro de la subestación. En este periodo de reproducción, la animación de las flechas desaparece, indicando alto al recorrido del usuario. Una vez que la reproducción finaliza, la animación de las flechas vuelve a aparecer y el usuario puede continuar su trayecto siguiendo dicha animación hasta encontrarse un nuevo trigger box, el cual ejecutará un nuevo evento y, por lo tanto, reproducirá una nueva secuencia de sonido, imágenes y contenido diverso. En total son ocho eventos los que se ejecutan, tal como lo muestra la vista aérea de la subestación de la Fig. 3.27; el recorrido inicia en la esquina inferior izquierda y finaliza en la esquina inferior derecha, permitiéndole al usuario conocer toda la subestación.



**Figura 3.27** Vista aérea de subestación de potencia y ubicación de trigger box para la etapa uno

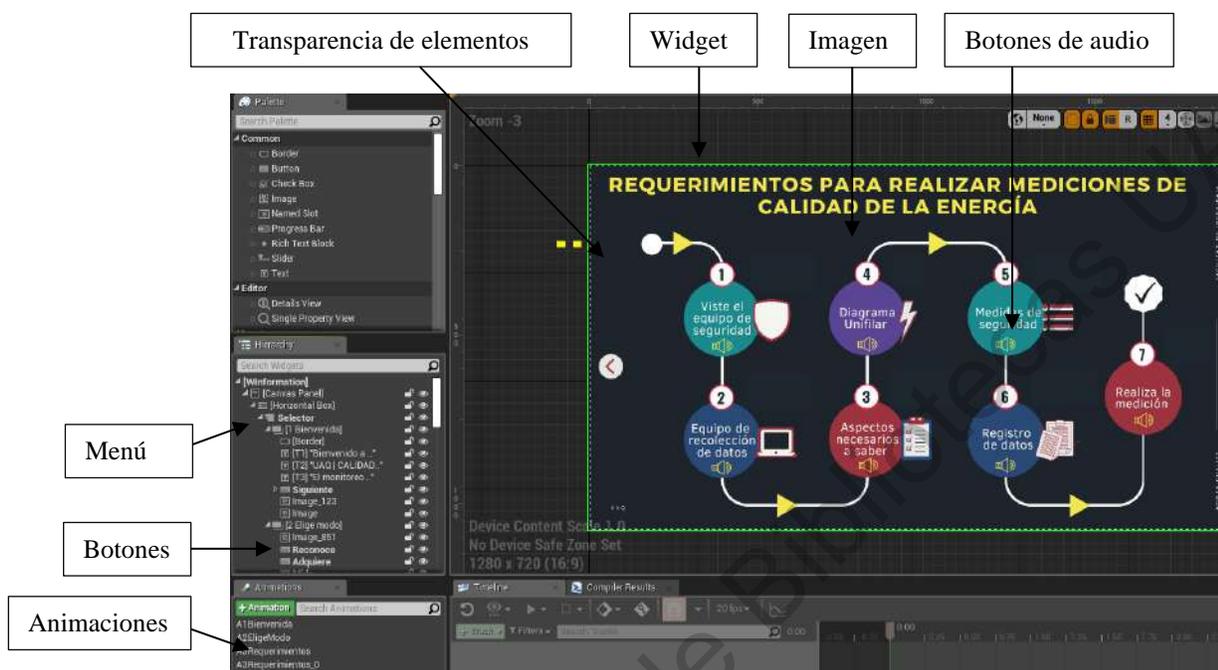
### 3.4.2.2 Proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica

Esta etapa tiene el objetivo que el usuario conozca los requisitos previos y la forma en cómo realizar mediciones de calidad de la energía en la subestación eléctrica. El contenido de dicha etapa está basado en la norma “IEEE 1159-2019” y “guía de mejores prácticas para campañas de medición de la calidad de la energía in situ”, así como también en la experiencia de profesionales ligados al área de la calidad de la energía y área eléctrica.

Esta etapa se genera a través de siete pasos, los cuales se muestran en la Fig. 3.28 y posteriormente se enlistan para su respectiva descripción.

Para mostrarle dichos pasos y el contenido de estos al usuario, se genera un widget, en el cual se inserta una imagen creada en el programa Canva. Esta imagen tiene sobrepuestos algunos componentes, tales como botones y figuras que no pueden ser observados por el usuario (transparencia igual a cero), pero sí que pueden interactuar con este último. De esta manera se genera la interacción entre el usuario y el widget. Además, el widget presenta diferentes aspectos visuales y auditivos, tales como animaciones y sonido de un narrador, el

cual describe la cada situación dentro de los siete pasos. El entorno de desarrollo de la situación descrita anteriormente se muestra en la Fig. 3.28.



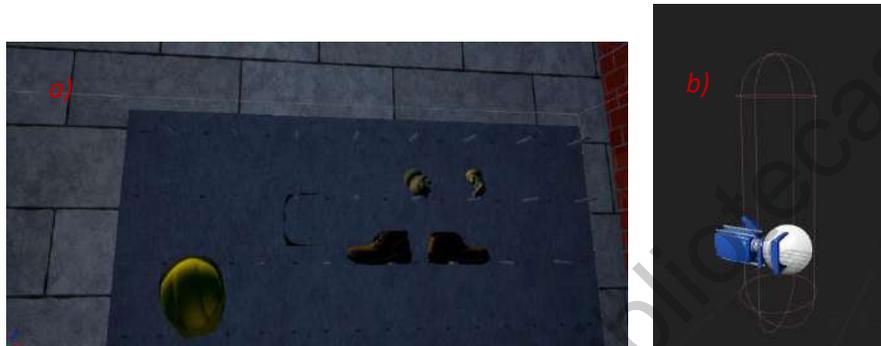
**Figura 3.28** Pasos a realizar por el usuario en el widget

Cada uno de los pasos presenta audio con las instrucciones a seguir para completar el proceso. A continuación, se describe cada uno de los pasos, aspectos importantes de estos y los métodos utilizados.

### 1. *Viste el equipo de seguridad.*

El primer paso consiste en mencionar al usuario la importancia del equipo de seguridad para realizar cualquier prueba dentro de la subestación eléctrica, lo cual se realiza a través de la reproducción de audio por medio de un narrador. El equipo de seguridad se encuentra mostrado en la Fig. 3.29a (modelos 3D importados a UE4) y es un casco, lentes, guantes y zapatos de seguridad. Por ello, el usuario tiene que vestirlo tomando cada uno de los objetos y acercándolo a su cuerpo. Cuando se detecta la colisión entre el objeto y una malla de colisión en forma de capsula poseída por el jugador (Fig. 3.29b), se activa un evento, el cual indicará que está tratando de vestir dicho objeto. Enseguida, se reproduce una serie de

sonidos y se destruye el objeto (o también llamado actor dentro del entorno de juego), de modo que el usuario, a partir de ese momento no pueda observar al objeto que estaba vistiendo, dando la sensación de que se lo ha puesto. Otra ventaja que sucede al destruir el objeto, es la liberación de memoria que ocupa este último en el proyecto, ya que se elimina por completo.



**Figura 3.29** Equipo de seguridad y cápsula de colisión en el usuario

## 2. *Equipo de recolección de datos.*

Este paso consiste en mostrarle al usuario el equipo de recolección de datos y su funcionamiento para posteriores prácticas. El equipo de recolección de datos o medidor de la calidad de la energía es un objeto 3D extraído de un modelo real (Fluke ESA612), el cual es importado a UE4 como una malla dinámica, puesto que estará sometido al movimiento del usuario durante la ejecución del ambiente virtual. Para simular la pantalla y los botones en el medidor, se le agrega un widget, el cual es mostrado en la Fig. 3.30a, en donde se agregan botones para modificar variables en el medidor, se agregan etiquetas sobre la variable que se mide (voltaje, corriente o resistencia), frecuencia de la señal, frecuencia de muestreo, fase que se mide, batería, número de ventana de muestreo, señalamientos de medición y principalmente se muestra el espacio donde se observará el valor de la señal respecto al tiempo y su respectiva graficación, así como también del indicador elegido. El widget completo se hace hijo del medidor de la calidad de la energía, tal como lo muestra la Fig. 3.30b, de este modo, cualquier traslación o rotación que se genere sobre el modelo 3D

también será aplicada sobre el widget. De este modo, el usuario puede interactuar con el medidor y sus diferentes funciones.

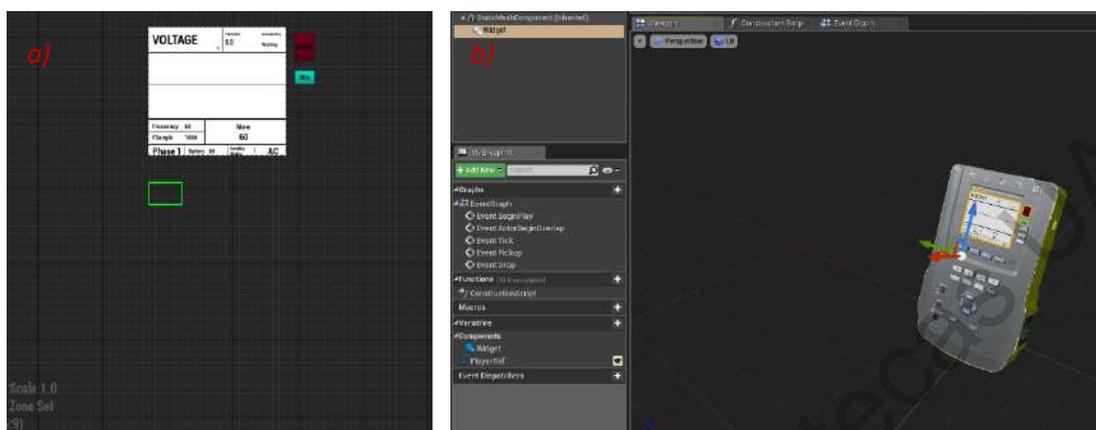


Figura 3.30 Widget y medidor de la calidad de la energía

Es importante mencionar que las funciones que se agregan al medidor de la calidad de la energía en cuanto a los botones y etiquetas no corresponden al modelo ESA612, solo se utilizan para ejemplificar la realización de la práctica.

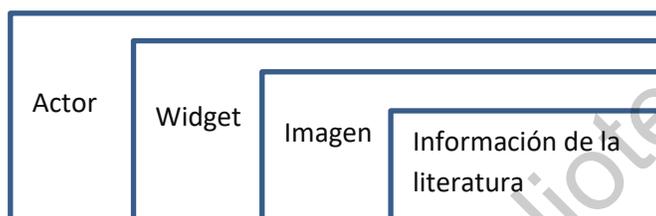
La graficación de la onda senoidal de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos proviene de los modelos matemáticos que describen a cada uno de ellos, proceso que fue descrito en la sección 3.3.

Una vez que el usuario llega al paso número dos, se ejecuta una serie de instrucciones dirigidas al usuario con el fin de que aprenda a utilizar el medidor. Finalizada esta sección, se procede al paso número tres, que a continuación se describe.

### 3. Aspectos necesarios a saber.

Este paso consiste en informarle al usuario, de manera resumida, las consideraciones necesarias antes de realizar mediciones de calidad de la energía de acuerdo a la literatura. Para esto, se creará un bloc de notas el cual podrá ser manipulado por el usuario. El bloc de notas se crea a partir del esquema de la Fig. 3.31, en donde lo primero que se realiza es reunir la información proveniente de la literatura para realizar mediciones de calidad de la energía; con esta información se crea una imagen en el programa Canva, de modo que sea ilustrativa.

Esta información en forma de imagen se añade a un widget dentro del entorno de desarrollo de UE4, y además se agregan botones para su interacción con el usuario, los cuales le permitirán la navegación entre diferentes páginas y escuchar el texto (a través de un narrador) que está plasmado en la imagen. Luego, se crea un cubo como actor, que simulará el modelo tridimensional del bloc de notas; a este cubo se le otorgan propiedades generales para simular las físicas (colisión, gravedad, entre otros). Finalmente, el widget creado se hace hijo del cubo, de modo que ambos archivos permanezcan pegados en todo momento.



**Figura 3.31** Actor bloc de notas

#### 4. *Diagrama unifilar.*

Cuando el paso anterior se ha completado, se continua con el presente paso, el cual consiste en informarle al usuario sobre el diagrama unifilar. Un bloc de notas es utilizado para mostrar al usuario el diagrama unifilar, el cual es creado de manera similar al bloc de notas del paso anterior y de la Fig. 3.31. El diagrama unifilar que se realiza es de la parte de alta tensión de la subestación, el cual corresponde con los elementos que el usuario observará dentro de dicha subestación. El usuario será capaz de tomarlo y trasladarlo a cualquier ubicación dentro de la subestación eléctrica.

#### 5. *Medidas de seguridad.*

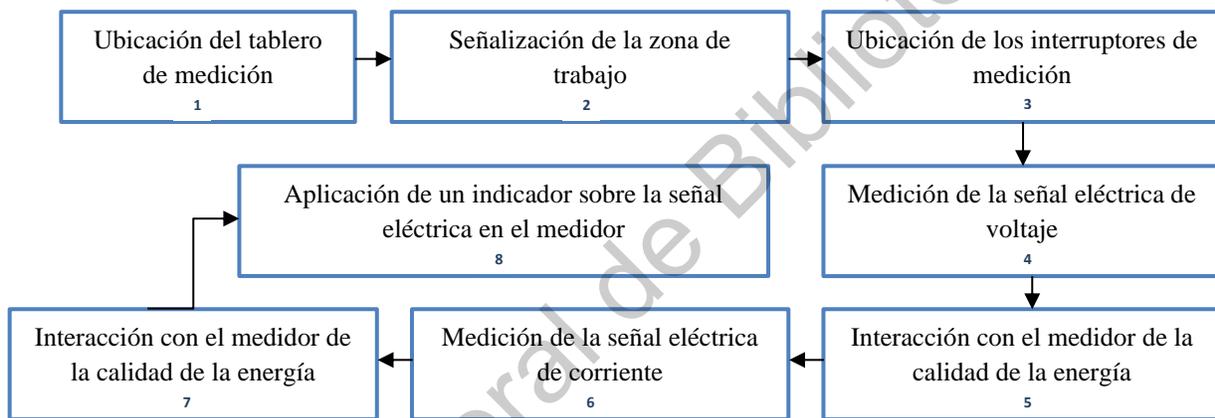
Se refiere a medidas de seguridad que el usuario tiene que tener en cuenta al estar en contacto directo con líneas energizadas. Este paso se logra a través de la reproducción de audio por medio de un narrador, el cual explica detenidamente este paso, y al igual que los pasos anteriores.

## 6. Registro de datos.

Paso añadido al proceso de medición de señales eléctricas con el fin de recalcar la importancia del registro de datos posteriores a la medición. Se genera a partir de la lectura de un texto por parte del narrador del entorno virtual.

## 7. Realiza la medición.

Una vez que el usuario completó los pasos anteriores, se procede a realizar la medición dentro de la subestación, la cual está dada por una secuencia de eventos, mostrada en la Fig. 3.32 y la cual es explicada posteriormente.



**Figura 3.32** Proceso de medición

### 1. Ubicación del tablero de medición

El primer aspecto a mostrar al usuario en este paso, es que este conozca donde es el tablero de medición, situación que se le muestra al usuario por medio de una secuencia de imágenes, que en el entorno de desarrollo de UE4 se le conoce como *Matinee*.

### 2. Señalización de la zona de trabajo

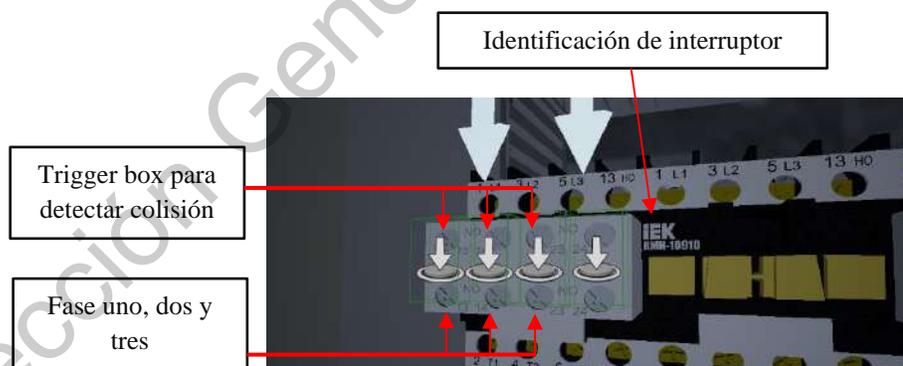
Luego, la zona donde se llevará a cabo la medición es señalizada mediante conos de prevención, los cuales cambian su propiedad de visibilidad a verdadera.

### 3. Ubicación de los interruptores de medición

Posteriormente, a través del diagrama unifilar, el usuario tiene que identificar los interruptores de medición de corriente y de voltaje de cada una de las tres fases para medir las señales con el medidor de la calidad de la energía. Los interruptores están identificados con leyendas y números, tal como lo muestra la Fig. 3.33. Para su fácil identificación, durante la ejecución del ambiente virtual se le muestran al usuario diversas animaciones para indicarle la ubicación de los mismos.

### 4. Medición de la señal eléctrica de voltaje

Para poder conectar el medidor de la calidad de la energía a los pines se utiliza la función *AttachComponentTo*, la cual permite unir dos mallas, que en este caso será el interruptor y la punta del medidor. Para ejecutar la función mencionada anteriormente, se utilizan *trigger box*, como lo muestra la Fig. 3.33, con el fin de detectar la colisión e indicar que el usuario está tratando de conectar una punta. Por este motivo, la punta del medidor también se convierte en un actor, el cual es padre del cable del medidor, con el objetivo de heredar propiedades tales como la posición y rotación. El cable es un *plugin* que se encuentra en UE4 y tiene diferentes propiedades similares a las de un cable en la vida real, tales como resistencia, longitud, gravedad, entre otros.



**Figura 3.33** Interruptor de medición dentro del tablero de control

El medidor de la calidad de la energía tiene dos puntas, una para la referencia positiva y otra para la negativa, las cuales deben de ser conectadas en el lugar correcto, a fin de evitar un corto circuito. La Tabla IV muestra la tabla de verdad aplicada para que el usuario genere

un corto circuito, donde se muestran las tres fases y la referencia. Esta tabla indica que, si se mide alguna variable entre fases, se generará un corto circuito.

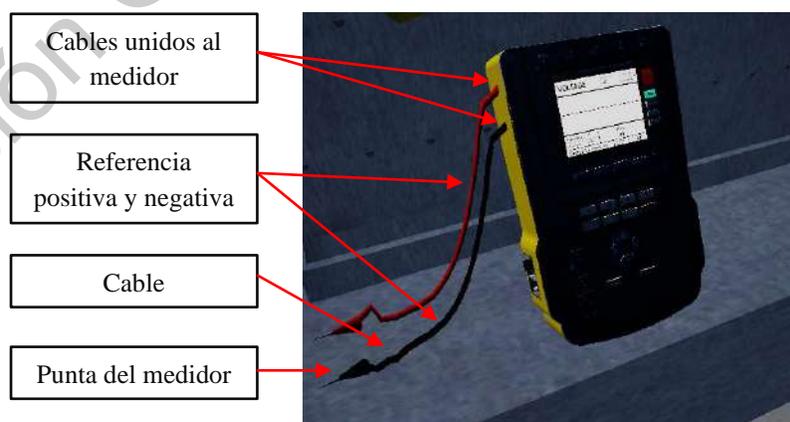
**Tabla V** Tabla de verdad para generar un cortocircuito dentro del tablero de control

Fase Uno	Fase Dos	Fase Tres	Referencia	Corto Circuito
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1

Si el usuario genera las condiciones para un cortocircuito, entonces ocurrirá una explosión, la cual se ejecuta a través de sonidos y un sistema de partículas que simularán chispas, fuego y humo. Posteriormente, un narrador le indicará al usuario su error y le dará las instrucciones para continuar, a través de un texto predefinido.

#### 5. Interacción con el medidor de la calidad de la energía

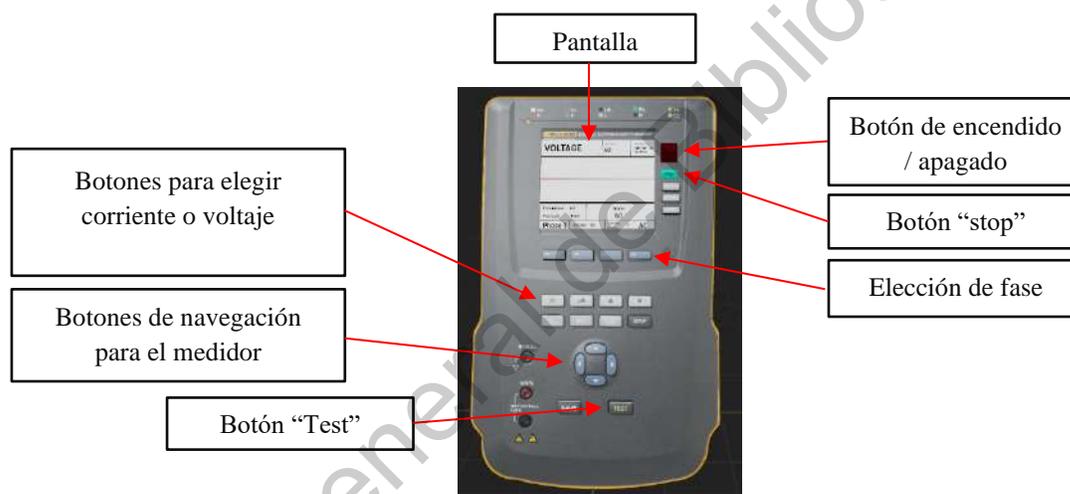
Uno de los lados del cable tiene a la punta que hará contacto con el interruptor, mientras que el otro lado se une al medidor de la calidad de la energía, tal como lo muestra la Fig. 3.34.



**Figura 3.34** Medidor de la calidad de la energía, cables y puntas de medición

Cuando el medidor es agarrado por el usuario, las puntas de medición y los cables desaparecen (su propiedad de visibilidad es establecida a falsa), y volverán a mostrarse una vez que el usuario suelte el medidor (su propiedad de visibilidad es establecida a verdadera), con el fin de generar una mejor experiencia en el usuario y principalmente, eficientar el procesamiento en el visor Oculus Quest.

La Fig. 3.35 muestra los botones que el medidor de la calidad de la energía contiene y con los cuales el usuario podrá interactuar. Los botones y la pantalla son implementados mediante un widget como se explicó anteriormente. Es importante mencionar que los botones y las funciones que se han implementado no corresponden al modelo original, solo se utilizan para realizar la práctica dentro del entorno virtual.



**Figura 3.35** Elementos del medidor de la calidad de la energía

El medidor de la calidad de la energía tendrá botones para medir diferentes variables tales como corriente y voltaje, para elegir fase, encenderlo y apagarlo, de navegación y para iniciar la medición. En la pantalla de este mismo puede observarse información diversa sobre la medición que recae en los modelos matemáticos de la onda sinusoidal, los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos. Los botones que no están nombrados en la Fig. 3.35, no contienen ninguna función programada.

Diferentes condiciones de la realidad se aplican cuando se realiza la medición: el medidor no funcionará si no se encuentra prendido y el medidor no mostrará la onda senoidal

ni valores numéricos si cualquiera de las dos (o ambas) de las puntas no están conectadas. Esto se logra activando y desactivando variables booleanas con la ayuda de los trigger box.

Finalmente, esta etapa se programa de modo que solo se le muestra al usuario una señal sinusoidal perfecta sin ningún disturbio eléctrico.

#### *6. Medición de la señal eléctrica de corriente*

Cuando el usuario ha terminado de realizar mediciones de voltaje, el narrador le vuelve a indicar que realice mediciones, pero ahora de corriente. Esto genera una secuencia de eventos similares a las mediciones de voltaje, pero ahora sobre el interruptor de corriente que de igual manera se encuentra en el tablero de control.

#### *7. Interacción con el medidor de la calidad de la energía*

La interacción del usuario con el medidor de la calidad de la energía se vuelve a dar, pero ahora con la señal de corriente de cualquier fase.

#### *8. Aplicación de un indicador sobre la señal eléctrica en el medidor*

Durante el desarrollo de las pruebas de medición de señales eléctricas, el usuario tiene la posibilidad de aplicar cualquier indicador estadístico de los propuestos en este trabajo a las señales que observará en el medidor. La manera en cómo se realizan estas operaciones fue mencionada en secciones anteriores.

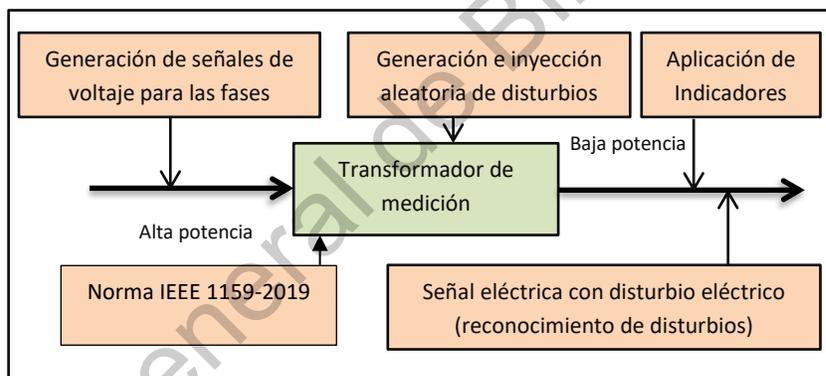
Finalmente, esta etapa es llevada a cabo mediante instrucciones precisas dadas por el narrador del ambiente virtual, además de que se añaden animaciones, cambios de materiales, elementos gráficos, entre otros, se le indica al usuario lo que se realiza.

La etapa finaliza cuando el usuario ha realizado mediciones de corriente y de voltaje.

### **3.4.2.3 Medir señales eléctricas y reconocer disturbios eléctricos**

Una vez que la etapa anterior referida al proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica ha finalizado, se procede a realizar esta la presente etapa, la cual constará en que el usuario mida la señal eléctrica de voltaje en cualquiera de las tres fases,

identifique el disturbio eléctrico en cuestión y lo reporte a una pantalla. La medición de la señal eléctrica de voltaje se llevará a cabo en el mismo lugar donde se ejecutó la etapa anterior. El diagrama de la Fig. 3.36 es llevado a cabo para inyectar los disturbios a la red eléctrica, en donde primero se generará la señal eléctrica de voltaje, a través de su modelo matemático. Dado que el lugar de medición es el tablero de control que se encuentra en la subestación, los disturbios eléctricos (a través de sus modelos matemáticos), serán inyectados a la onda pura de voltaje con el fin de distorsionarla, teniendo en cuenta la literatura existente relacionada a la calidad de la energía (norma IEEE 1159-2019). Finalmente, lo que el usuario observará en el medidor será una señal eléctrica con un disturbio eléctrico inyectado, el cual tendrá que reconocer y posteriormente reportarlo. En este espacio, el usuario también podrá aplicar cualquier indicador estadístico (de los propuestos en este trabajo) para monitorear el disturbio generado.

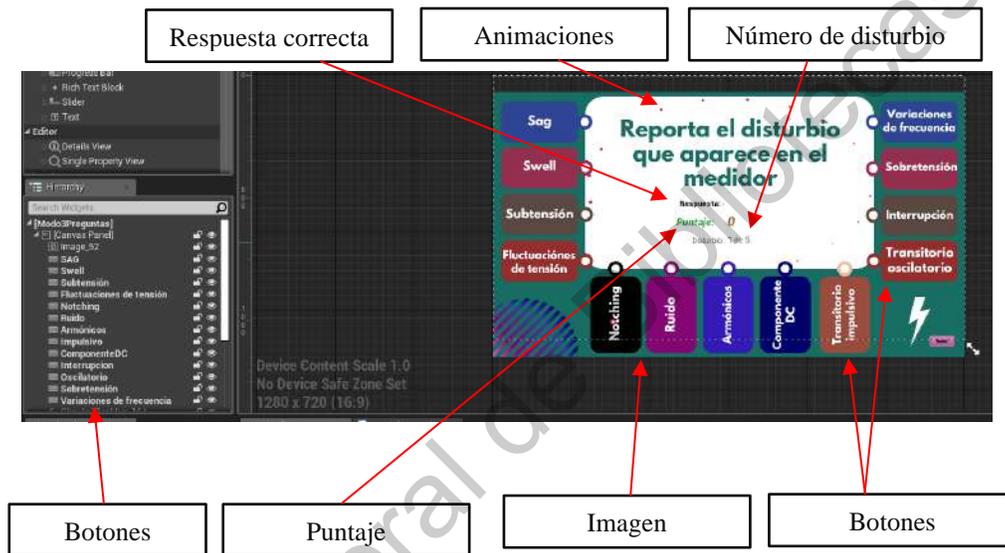


**Figura 3.36** Inyección de disturbios eléctricos en la subestación

La generación e inyección del disturbio eléctrico es aleatoria, es decir, de los disturbios eléctricos propuestos, se elegirá solo uno y este será el que se inyecte a la red eléctrica y que, por lo tanto, el usuario observará en el medidor para su respectivo reconocimiento. El usuario tendrá que realizar cinco pruebas diferentes en las fases, por ello, se generarán cinco números aleatorios que definirán los disturbios eléctricos a inyectar.

Es importante mencionar que el funcionamiento del tablero de control, el medidor de la calidad de la energía y los interruptores, es exactamente el mismo a como se mostró en la sección anterior.

Por otra parte, la pantalla donde el usuario tendrá que reportar el disturbio que observa en el medidor se encuentra mostrada en la Fig. 3.37, la cual es diseñada en un widget, donde el fondo es una imagen creada en Canva, mientras que los elementos que interactuarán con el usuario son botones con transparencia igual a cero. La pantalla contiene el puntaje obtenido por el usuario, el número de disturbio, la respuesta correcta al disturbio en cuestión una vez que el usuario haya reportado dicho disturbio, así como también muestra diferentes animaciones, elementos gráficos y auditivos.



**Figura 3.37** Pantalla de reporte de disturbios eléctricos

La comunicación entre el widget y el disturbio que se ha inyectado a la red eléctrica es de vital importancia, con el fin de evaluar correctamente al usuario, informarle que disturbio se le ha inyectado a la red eléctrica y con ello darle una retroalimentación, de modo que, si ha elegido una respuesta incorrecta, la misma interfaz gráfica le mencione cual es la respuesta correcta. Esto se logra a través de *evento dispatchers* en el entorno de UE4.

#### 3.4.2.4 Evaluación del conocimiento adquirido

Cuando las tres etapas anteriores se han completado, se da paso a la cuarta y última etapa del ambiente virtual, la cual consta de una serie de preguntas que se realizan dentro de la subestación eléctrica con el fin de evaluar al usuario en cuanto al conocimiento que ha

adquirido. Para ello, se realiza una interfaz de usuario que contiene diez preguntas, cada una de las cuales tiene un tiempo limitado de quince segundos para ser respondida. La interfaz es una secuencia de imágenes creadas en Canva e importada a UE4 en conjunto con una serie de botones (transparencia igual a cero) que le permitirán al usuario elegir la opción elegida.

Finalizada la prueba se calcula el promedio obtenido y se le entrega al usuario. La prueba puede repetirse cuantas veces sea requerido por el usuario. La Fig. 3.38a muestra las instrucciones, la Fig. 3.38b, 3.38c y 3.38d muestra diferentes diseños a las preguntas planteadas para la interfaz gráfica en el widget de UE4.



Figura 3.38 Diseño de widget para la evaluación en la etapa cuatro

### 3.5 Norma IEEE 1159-2019

Cada una de las descripciones de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos se realiza tomando en cuenta la norma IEEE 1159-2019, el cual es un documento con breves modificaciones con respecto al anterior (IEEE 1159-1995). Algunas otras características son extraídas de la literatura existente referenciada en la bibliografía de este trabajo.

## 3.6 Oculus Quest

Una gran ventaja del sistema Oculus Quest es la navegación por entornos virtuales de forma inalámbrica entre el visor y los controles. Ese es el principal motivo por el cual dentro de este proyecto se hace uso de este casco de última generación.

A continuación, se describen aspectos importantes sobre la construcción de las manos virtuales y el proyecto.

### 3.6.1 Manos virtuales

Las manos virtuales se representan a través de los controles de modo que cuando el usuario presione cierto botón, este verá que abre la palma de la mano, sujeta un objeto, cierra el puño o apunta con un dedo. Estos efectos son animaciones realizadas sobre un tipo de archivo llamado *Skeleton*. Este archivo, es una malla que contiene diferentes articulaciones que pueden desplazarse o rotar sobre un punto de referencia. Una variable almacena un valor numérico dependiendo del botón presionado (1, 2, 3 o 4); luego, este valor seleccionará que animación reproducir del archivo *Skeleton* con un paso intermedio, puesto que las animaciones dentro de dicho archivo son seleccionadas dentro de un rango de 0 a 1 y, por lo tanto, el valor tiene que ajustarse. En el archivo *skeleton*, si se selecciona el valor 0 se reproducirá la animación de abrir la palma de la mano, si se selecciona el valor 0.25 se reproducirá una animación que tiene entre abierta la palma de la mano, si se selecciona el valor de 0.5 se reproducirá una animación que tiene el dedo índice abierto y los demás dedos cerrados (apuntando) y finalmente, si se selecciona el valor de 1, se reproducirá la animación de cerrar el puño. Por ello, los valores provenientes de la variable con números enteros, debe ajustarse. Un aspecto al que se debe poner atención es que las animaciones deben seguir una secuencia de animación real, es decir, las animaciones subsecuentes deben de seguir una trayectoria que dependa de la otra para que el usuario tenga una proyección real de que está realizando cierta acción con la mano.

### 3.6.2 Construcción del proyecto para Oculus Quest

La construcción del proyecto usando UE4 para el sistema OQ requiere diferentes pasos para su configuración respectiva. Primero se debe crear una cuenta en la página oficial de Oculus Quest y descargar la aplicación móvil de la misma organización. Luego, conectar el visor con la aplicación mediante el código único del visor y activar el modo de desarrollador. Esto permitirá que el visor acepte aplicaciones de origen desconocido, creadas por un desarrollador. El siguiente paso es descargar e instalar las librerías/Drivers de ADB para dispositivos móviles de Android (Oculus Quest), que permitirá comunicar al sistema de cómputo y UE4 con el visor Oculus Quest. Una vez realizada la operación anterior, se procede a instalar CodeWorks para Android, el cual es una herramienta fácil y rápida para configurar las herramientas necesarias para el desarrollo de aplicaciones de Android. Este software configurará automáticamente todas las herramientas necesarias de Android seleccionando la instalación estándar. Para confirmar hasta este punto que la instalación ha sido generada exitosamente, es necesario conectar el sistema Oculus Quest a la computadora y abrir el símbolo del sistema para teclear la instrucción *adb devices*, el cual mostrará una lista de los dispositivos Android conectados al sistema de cómputo; deberá observarse que se ha encontrado al sistema Oculus Quest. Por el lado de UE4, debe activarse el plug-in para Oculus Quest de modo que este sea reconocido. Después, se configura el proyecto para las plataformas Android, estableciendo la versión mínima SDK a 25 y agregando las librerías descargadas en los pasos anteriores a la ruta de acceso de Android SDK, ambos ubicados en la configuración del proyecto. Finalmente, en plataformas soportadas debe activarse la opción de Android para poder cargar el proyecto a los visores. En la opción *Launch* el proyecto en construcción será cargado a los visores.

### 3.7 Características del ordenador

Para realizar desarrollos relacionados al área de los videojuegos, realidad virtual, realidad aumentada, entre otros, se requiere un ordenador con buenas características de procesamiento, puesto que los softwares utilizados para tales fines demandan una gran cantidad de recursos. Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado un ordenador con

procesador I7 de octava generación a 3.20Ghz, una tarjeta de video GTX 1070, memoria RAM de 16 Gb a 3200 MHz, un disco duro de estado sólido de 240 Gb y se ha utilizado el sistema operativo Windows 10 de 64 bits.

### 3.8 Evaluación del sistema mediante usuarios

Con el objetivo de obtener una conclusión científica en cuanto a la recepción del conocimiento relacionado a la Calidad de la Energía en usuarios utilizando el sistema desarrollado en este trabajo, se evaluará a un grupo de 8 usuarios relacionados al área eléctrica (estudiantes de licenciatura, ingenieros y estudiantes de posgrado) como se describe a continuación: Se realizarán cuatro grupos de estudiantes (grupo I, grupo II, grupo III y grupo IV), cada uno conformado por dos estudiantes, quienes tomarán un curso teórico y un curso utilizando el desarrollo de este trabajo mediante Oculus Quest, ambos con duración de 30 minutos. La Tabla VI muestra los temas a enseñar en cada una de las clases (ya sea teóricas o utilizando Oculus Quest), en donde también se abordará el reconocimiento del principal equipo de seguridad, equipo eléctrico y partes de la subestación.

**Tabla VI** Temarios a aplicar durante los cursos

Temario I	Temario II
<p><b>Disturbios:</b> Transitorio impulsivo, Fluctuaciones de tensión, Ruido.</p> <p><b>Indicadores:</b> Valor RMS, Factor de potencia, Factor de cresta.</p>	<p><b>Disturbios:</b> Swell, Subtensión, desequilibrio de tensión, desequilibrio de corriente</p> <p><b>Indicadores:</b> Factor de cresta, relación de transformación, valor RMS.</p>
Temario III	Temario IV
<p><b>Disturbios:</b> Transitorio oscilatorio, Sag, Sobretensión, interrupciones sostenidas.</p> <p><b>Indicadores:</b> Factor de Potencia, Valor Pico, Envolvente.</p>	<p><b>Disturbios:</b> Notching, Offset DC, Variaciones de frecuencia, Interrupciones cortas.</p> <p><b>Indicadores:</b> Valor pico, relación de transformación, envolvente.</p>

El grupo I tomará el curso teórico que corresponde al Temario I, el grupo II lo hará para el Temario II, el grupo III le corresponderá el Temario III y finalmente el grupo IV tomará el Temario IV. Al finalizar, cada grupo será evaluado a través de un examen que constará de

los conocimientos respectivos al grupo y temario, así como el principal equipo de seguridad, equipo eléctrico y partes de la subestación.

Posteriormente, los cuatro grupos de estudiantes tomarán el curso utilizando el sistema virtual Oculus Quest (mediante el desarrollo del presente trabajo), en donde el grupo I tomará el Temario IV, el grupo II lo hará con el Temario III, al grupo III le corresponderá el Temario II y finalmente el grupo IV tomará el Temario I. De esta manera, se abordarán nuevos temas respecto a lo que ya vieron en el curso teórico o con Oculus Quest (dependiendo cual se aplique primero). Al finalizar, los usuarios recibirán un examen para evaluar los conocimientos adquiridos en sus respectivos grupos.

Las evaluaciones estarán estructuradas de la misma manera, pero con diferentes temas. Como ya se mencionó anteriormente, en dichas evaluaciones se incluirán el reconocimiento de la forma gráfica y modelo matemático de la onda sinusoidal de tensión utilizando sus parámetros (amplitud, offset, frecuencia y desfase), reconocimiento de los respectivos modelos matemáticos y forma gráfica de los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, aplicación de cierto indicador para monitorear cierto disturbio eléctrico y reconocimiento del equipo eléctrico, de seguridad y las partes de una subestación eléctrica.

Finalmente, ambas evaluaciones generarán un resultado que permitirá identificar la capacidad y habilidad para reconocer los disturbios eléctricos e indicadores estadísticos mediante la implementación de sus modelos matemáticos, los modelos matemáticos de disturbios e indicadores, así como la identificación de equipo eléctrico, equipo de seguridad y partes de la subestación, a través de los dos cursos. Una variable que se tomará en cuenta en la evaluación, será el tiempo de respuesta para cada pregunta que se aplique en ambas evaluaciones, puesto que será un indicador para el reconocimiento.

# CAPÍTULO IV

## 4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología descrita en la sección anterior en cuanto al aula virtual y la subestación eléctrica. La sección 4.1 muestra las instrucciones de uso para aquellos usuarios que deseen directamente usar el software que contiene a los ambientes virtuales. La sección 4.2 y 4.3 muestra los resultados obtenidos en cuanto al diseño y construcción del aula virtual y la subestación eléctrica, respectivamente. Por su parte, la sección 4.4 muestra la evaluación de habilidades en el usuario utilizando los ambientes virtuales de este trabajo. Finalmente, la sección 4.5 muestra una comparación de costos utilizando el desarrollo de este proyecto contra cursos existentes en el área de calidad de la energía.

### 4.1 Instrucciones de uso

Esta sección está destinada para mostrar al usuario la forma en cómo usar sistema Virtual Oculus Quest y el software desarrollado en este trabajo.

Para encender / apagar el sistema Oculus Quest se presiona sobre el botón de encendido / apagado por 3 segundos. Dicho botón se muestra en la Fig. 4.1*a*. El sistema posee dos controles, los cuales están marcados, uno con la letra **L** para ser colocado en la mano izquierda y otro con la letra **R** para ser colocado en la mano derecha. Como medida de seguridad y para evitar daños en los controles, la correa de sujeción se ajusta sobre la muñeca de cada mano, de modo que, si el usuario suelta el control, este no caiga al suelo, tal como lo muestra la Fig. 4.1*b*. Posteriormente, el usuario debe acomodar su mano de modo que pueda presionar cómodamente todos los botones del control, tanto izquierdo como derecho, como se observa en la Fig. 4.1. Finalmente, el casco se coloca sobre la cabeza del usuario utilizando las bandas ajustables que este contiene en sus lados, de forma que quede cómodo y seguro sobre el usuario. Si el usuario usa lentes, puede permanecer con ellos y utilizar el caso.



**Figura 4.1** Sistema Oculus Quest: casco y controles

Una vez que el sistema ha sido encendido y que el usuario se ha colocado el casco en conjunto con los controles, observará un menú dentro de un ambiente virtual, el cual es mostrado en la Fig. 4.2. Para ejecutar uno de los dos ambientes virtuales, el usuario deberá seguir la siguiente ruta (mostrada en la Fig. 4.2), *Navegación*, luego *Biblioteca*, después *Orígenes desconocidos* y finalmente podrá elegir entre los dos ambientes virtuales de la lista que se observará. El aula de capacitación se llama *QualityPowerRoom* y la subestación eléctrica *ElectricSubstation*. Se recomienda ampliamente iniciar por *QualityPowerRoom*, debido a que en este ambiente virtual se genera la capacitación en cuanto a disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, mientras que en *ElectricSubstation* se enseña sobre el proceso de recolección de señales eléctricas y se hace uso de lo aprendido en el primer ambiente virtual.



**Figura 4.2** Pasos para ejecutar los ambientes virtuales

Una vez que el usuario se encuentra dentro del ambiente virtual del aula de capacitación (que es el que se recomienda ejecutar primero), aparecerá justo enfrente de un tablero que le indicará de forma clara la función de cada uno de los botones en los controles, en donde el usuario puede empezar a presionarlos y ver su aplicación. Dichas funciones aplican para ambos espacios virtuales y se muestra en la Fig. 4.3. Es importante mencionar que solo se presiona un botón a la vez para ejecutar cierta acción.



**Figura 4.3** Controles de usuario

A continuación, se describen aspectos puntuales para el correcto uso de cada ambiente virtual.

#### A) Aula de capacitación.

Debido a que este espacio virtual cuenta con diversas áreas de capacitación, se recomienda realizar la ruta que sigue para la visita del usuario en cada una de dichas áreas: Importancia de la calidad de la energía, Principal equipo eléctrico, Partes principales del transformador de potencia, Interacción con la onda real de voltaje, Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores. Para reconocer de que etapa se trata, estas contienen una alfombra que indica el nombre de la misma. Al llegar al área que le corresponde a dicha área, demarcada por el tapete, esta iniciará automáticamente su ejecución y el usuario podrá iniciar a interactuar con los elementos respectivos. Si el usuario sale del área que le corresponde al tapete, entonces la ejecución de dicha área se detendrá. La etapa *Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores* es la única etapa en

donde el usuario presionará botones y menús para observar información diversa, las demás se ejecutan automáticamente.

Cada una de las áreas mencionadas anteriormente presentan el conocimiento y las instrucciones de uso de forma interactiva mediante animaciones, video, imágenes, texto, audios, letreros, entre otras fuentes visuales y auditivas con el fin de que el usuario no se pierda.

### **B) Subestación eléctrica**

Este ambiente virtual presenta cuatro etapas, las cuales están seriadas, es decir, el usuario no podrá realizar la etapa dos si no ha completado el número uno. Las cuatro etapas están descritas en recuadros de un tablero que se encuentra justo enfrente de la posición inicial del usuario.

Para iniciar la etapa uno, el usuario tendrá que acercarse al tablero y seleccionar la primera etapa (enumeradas de menor a mayor de izquierda a derecha) utilizando el botón de selección en pantallas. Inmediatamente, un narrador (audio) le describirá de manera detallada cada uno de los pasos a seguir para realizar cada uno de los procedimientos dentro de la subestación virtual.

Una vez que el usuario finaliza la etapa uno, el narrador le indicará que tiene que seguir con la etapa número dos y al igual que en el proceso anterior, se le indicará de manera detallada lo que deberá de realizar. La etapa número tres y cuatro son descritas de forma específica por el narrador, animaciones, imágenes, sonidos, entre otros componentes.

Para observar más detalles de forma específica para cada área, se recomienda continuar con las siguientes secciones.

## **4.2 Aula virtual**

La Figura 4.4 muestra el aula virtual y dentro de ella las áreas descritas en la metodología: importancia de la calidad de la energía (1), principal equipo eléctrico (2), partes principales del transformador de potencia (3), interacción con la onda real de voltaje (4), reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores (5) y otras áreas (6). Los

resultados para cada área se describen en esta sección. El aula virtual presenta los elementos descritos en el capítulo III, tales como elementos 3D y actores, iluminación, físicas, elementos de colisión, entre otros.



Figura 4.4 Aula virtual

Como ya se mencionó anteriormente, al inicio de la ejecución del aula virtual, se le muestra al usuario los controles de mando y desplazamiento, de modo que pueda interactuar con los elementos que se encuentran en dicha aula virtual, tal como mostró en la Fig. 4.3. Las siguientes secciones muestran aspectos de la interacción con el usuario en el orden en como este debería recorrer cada etapa.

#### 4.2.1 Importancia de la calidad de la energía

La Figura 4.5 muestra la reproducción del video dentro del entorno virtual. La reproducción cuenta con movimiento, sonido y una secuencia de imágenes que introducen al usuario la importancia de estudiar el área de la calidad de la energía. El video se reproduce automáticamente una vez que el usuario se encuentra en el área demarcada por el tapete de dicha etapa, como lo muestra el número 1 de la Fig. 4.4.



**Figura 4.5** Video dentro del aula virtual

## 4.2.2 Principal equipo eléctrico

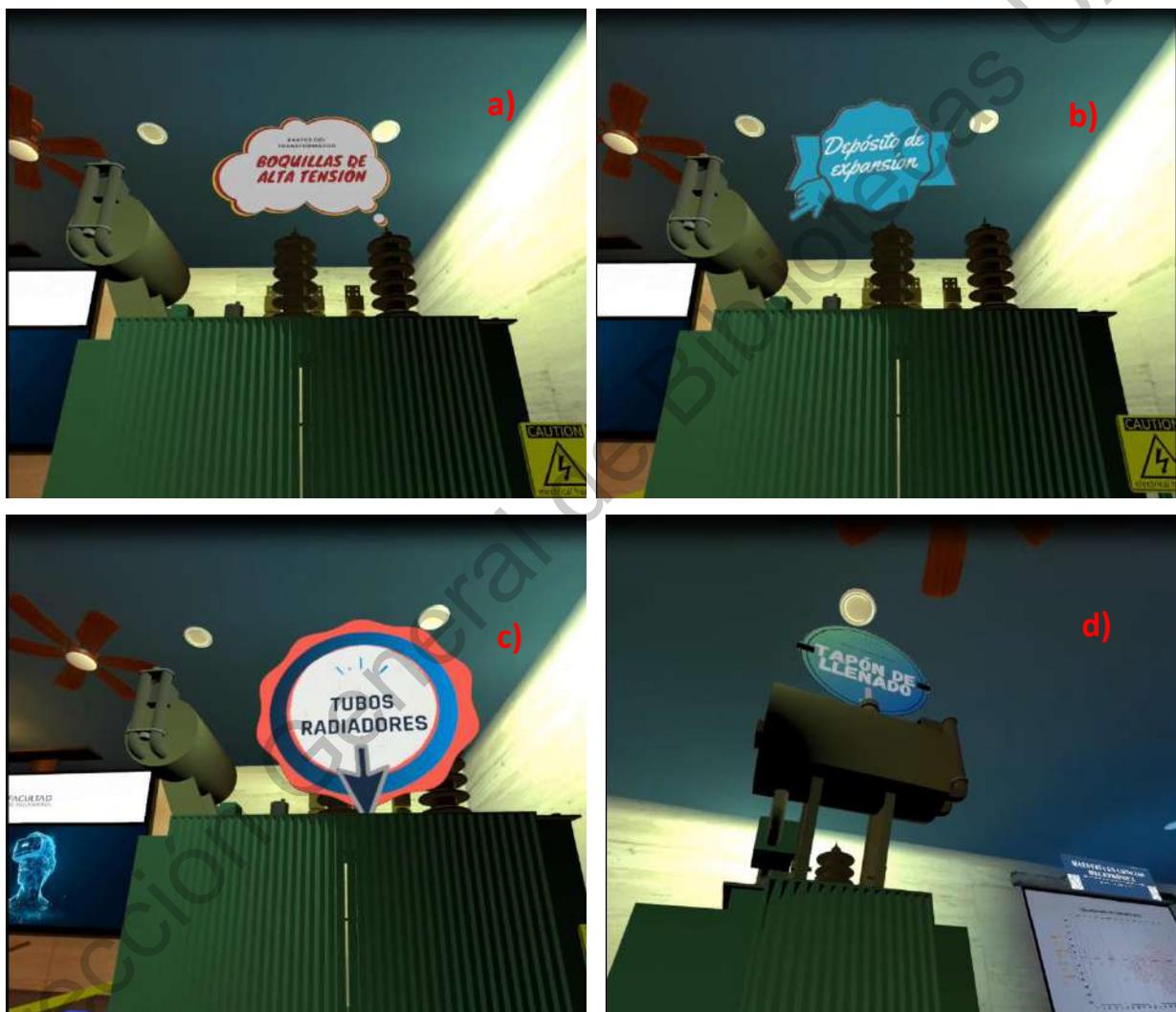
La Figura 4.6 muestra diferentes imágenes del equipo eléctrico y el despliegue de información cuando el usuario entra en contacto con cada uno de los elementos, mostrando su función principal. En otras palabras, el usuario puede sujetar y transportar cada uno de estos modelos 3D, y mientras eso sucede, información importante es desplegada.



**Figura 4.6** Principal Equipo eléctrico: *a)* Algunos modelos 3D con los que el usuario puede interactuar, en *b)* Infografía mostrada al usuario cuando este interactúa con el medidor de la calidad de la energía, en *c)* Usuario tomando un multímetro digital y en *d)* Infografía mostrada al usuario cuando este interactúa con un casco de protección.

### 4.2.3 Partes principales del transformador de potencia

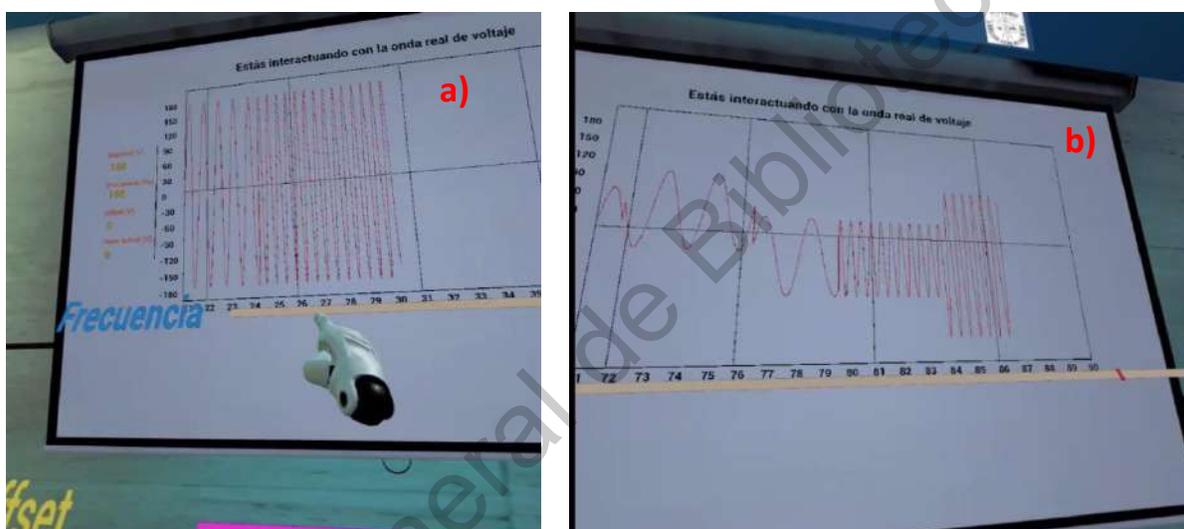
Este apartado muestra al usuario a través de animaciones las partes principales del transformador de potencia, tal como se observa en la Figura 4.7. La ubicación de las animaciones es justo en la parte en cuestión del transformador.



**Figura 4.7** Algunas Partes del transformador: a) Boquillas de alta tensión, b) Depósito de expansión, c) Tubos Radiadores y d) Tapón de llenado.

#### 4.2.4 Interacción con la onda real de voltaje

La Figura 4.8 muestra la interacción del usuario con la onda de voltaje, en donde a través de deslizadores se puede modificar los parámetros de la onda, los cuales se observan en la pantalla frente al usuario. Cada que un cambio es generado por el usuario, este podrá observar su resultado en la pantalla. Además, sonidos y animaciones son reproducidos cuando el usuario interactúa con los deslizadores. Algunas etiquetas se le muestran al usuario informándoles sobre el valor de cada parámetro.



**Figura 4.8** Interacción del usuario con la onda sinusoidal: en *a*) usuario modificando la frecuencia de la onda sinusoidal y en *b*) cambios de amplitud, desfase y frecuencia.

#### 4.2.5 Reconocimiento de modelos matemáticos de disturbios e indicadores

Esta área es representada por medio de una pantalla táctil (Fig. 4.9) en la cual se muestran diferentes menús (descritos en el capítulo III) desde modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, con que indicador se recomienda monitorear cierto disturbio eléctrico, aplicar indicadores estadísticos a señales reales a las cuales se les inyecta disturbios eléctricos y la evaluación del usuario. El usuario puede interactuar con la pantalla táctil y algunas operaciones de esta son llevadas a cabo en la pantalla que se

encuentra frente a la pantalla táctil, tales como la graficación de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos.



**Figura 4.9** Área de entrenamiento mediante la pantalla táctil

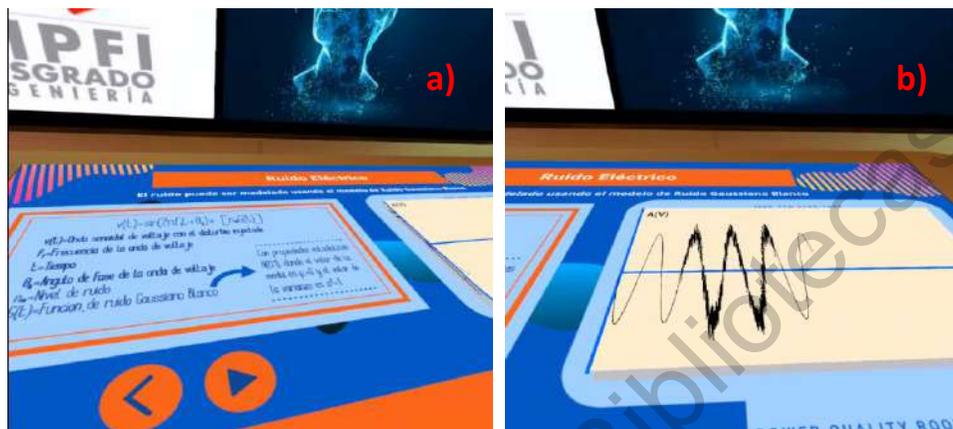
#### a) **Disturbios Eléctricos**

Se le muestra al usuario la clasificación de los disturbios eléctricos de acuerdo con la norma IEEE.1159-2019, tal como lo muestra la Fig. 4.10, y para cada uno de ellos el usuario puede presionar su botón correspondiente y abrir un nuevo menú que le mostrará el disturbio seleccionado de manera específica.



**Figura 4.10** Disturbios eléctricos

La Figura 4.11a muestra que el usuario ha elegido ver el ruido eléctrico, por lo que se abre un nuevo menú que le muestra su definición, modelo matemático y una reproducción del disturbio eléctrico (que se ha implementado en C++) proveniente del modelo matemático. El disturbio se inicia a graficar conforme el tiempo transcurre, como se observa en la Fig. 4.11b.



**Figura 4.11** Pantalla táctil: ruido eléctrico, en a) definición y modelo matemático y en b) representación gráfica del disturbio eléctrico en cuestión

### b) Indicadores

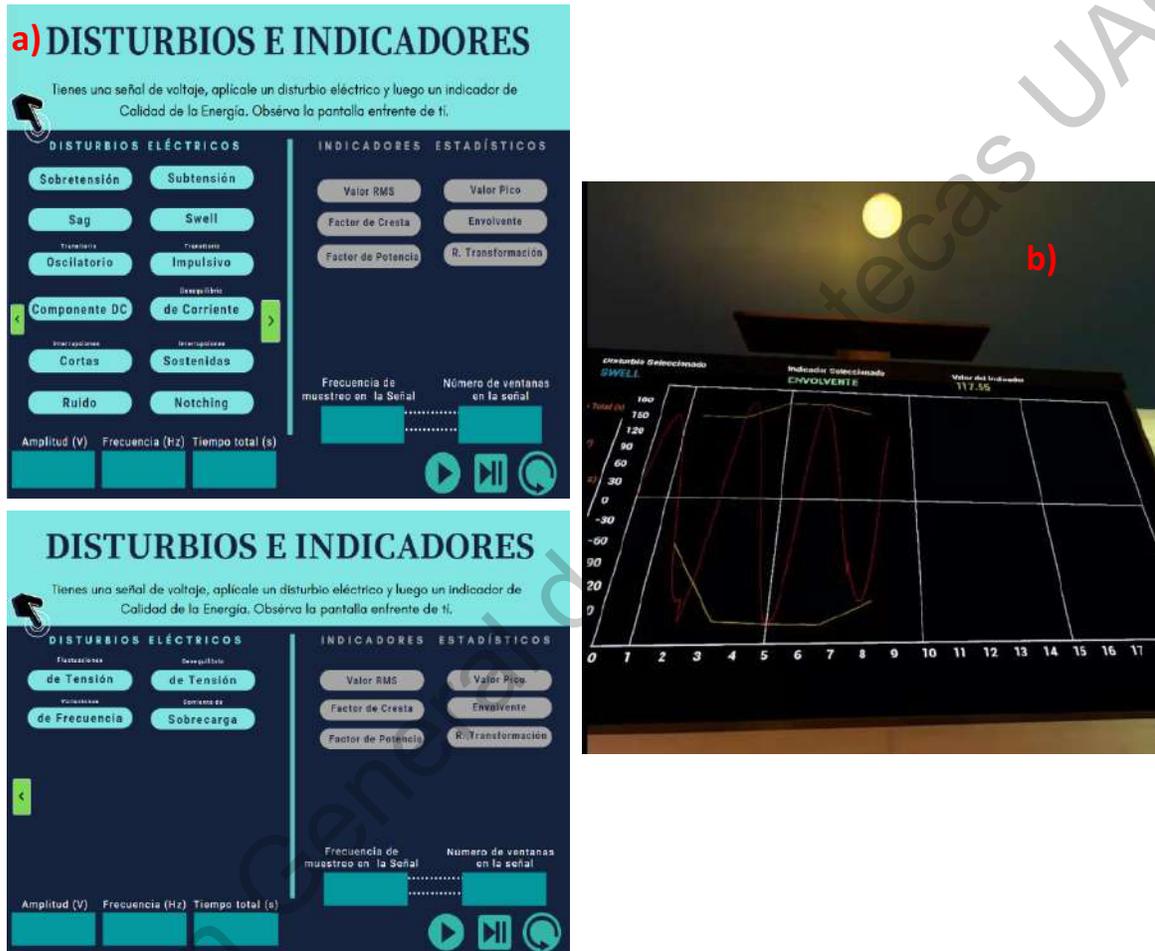
Menú que le permite observar al usuario diferentes indicadores estadísticos (Fig. 4.12a) y al seleccionar uno de ellos, podrá observar su definición y modelo matemático (Fig. 4.12 b). En la Fig. 4.12, el usuario ha seleccionado el valor rms.



**Figura 4.12** Indicadores estadísticos: en a) menú de indicadores y en b) definición y modelo matemático del valor rms

### c) Aplica DE+IE

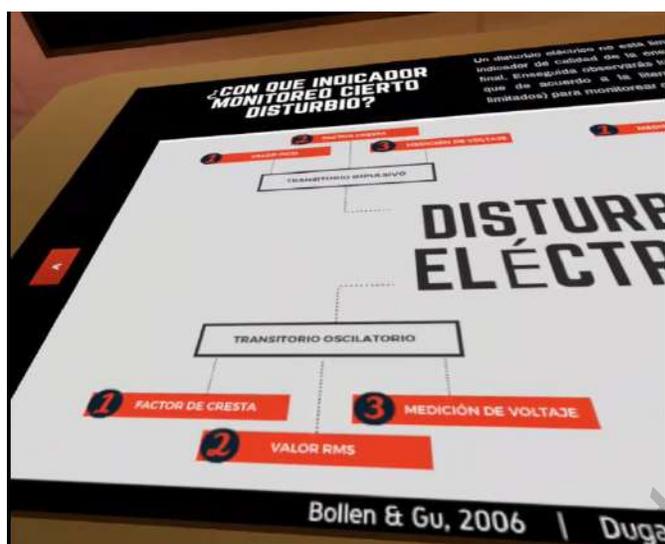
El usuario puede seleccionar un disturbio eléctrico y un indicador estadístico configurando algunos parámetros para observarlo en la pantalla, tal como lo muestra el ejemplo de la Figura 4.13.



**Figura 4.13** Aplicación de disturbios e indicadores, en a) menú de disturbios e indicadores y en b) Aplicación del indicador envolvente a un disturbio swell

### d) Aprende

Menú que le muestra al usuario, a través de un mapa mental, que indicador estadístico es el recomendado por la literatura para monitorear cierto disturbio eléctrico. Un ejemplo de tal situación es mostrado en la Figura 4.14.



**Figura 4.14** Menú aprende

#### e) Pruebas

Menú correspondiente a la evaluación del usuario a través de cinco pruebas (Figura 4.15a); en la primera se le muestran al usuario modelos matemáticos tanto de disturbios eléctricos como de indicadores estadísticos para su respectivo reconocimiento. En la segunda prueba se le pregunta al usuario que indicador usaría para monitorear un disturbio eléctrico dado de una lista mostrada en la pantalla (Figura 4.15b). En la tercera prueba se le muestra al usuario el aspecto gráfico de diferentes disturbios eléctricos para que este seleccione a que disturbio eléctrico corresponde tal gráfica (Figura 4.15c). En la cuarta prueba se le muestra al usuario una onda senoidal, la cual cambia sus parámetros con el tiempo y a la vez se le pregunta que parámetro es el que se está modificando (Figura 4.15d). Finalmente, la quinta prueba le pide al usuario introducir los materiales básicos a una caja para ingresar a una subestación eléctrica (Figura 4.15e), en donde los materiales son el equipo eléctrico con los que el usuario puede interactuar (Figura 4.15f). Cada una de estas pruebas arroja una evaluación, la cual es almacenada para evaluar al usuario y con ello al sistema desarrollado en este trabajo.

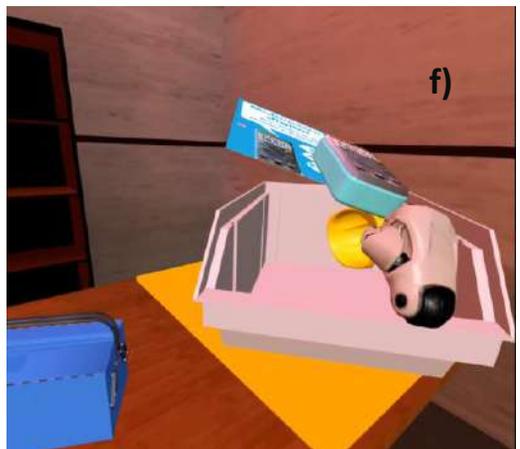
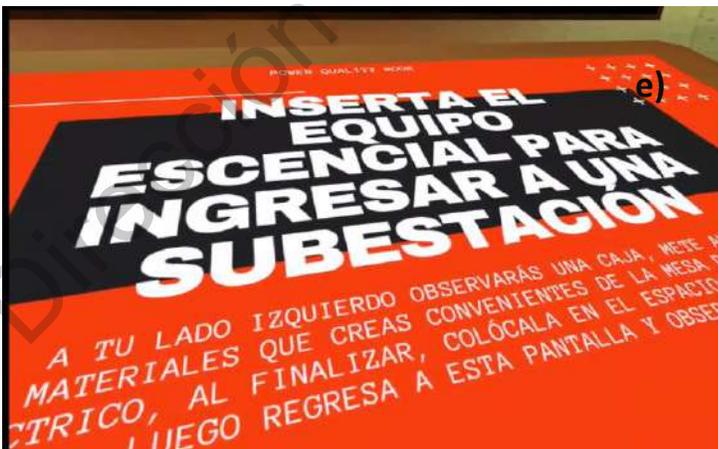
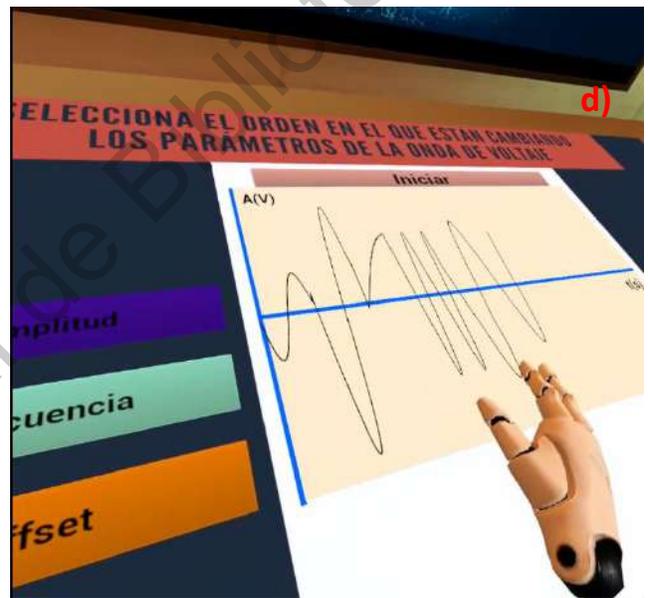
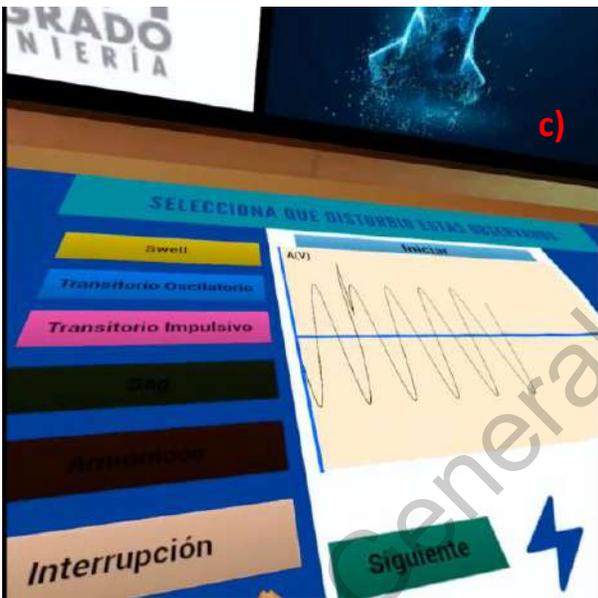
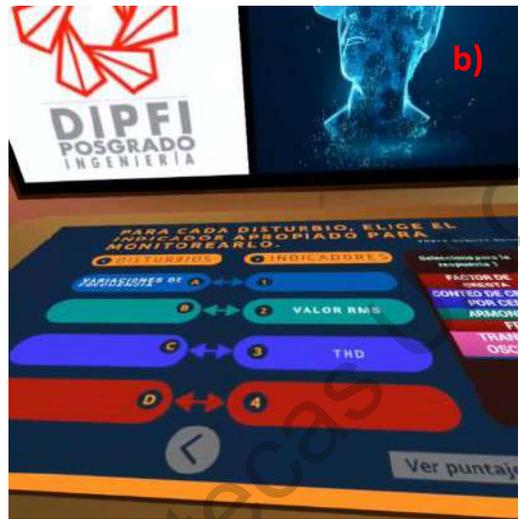
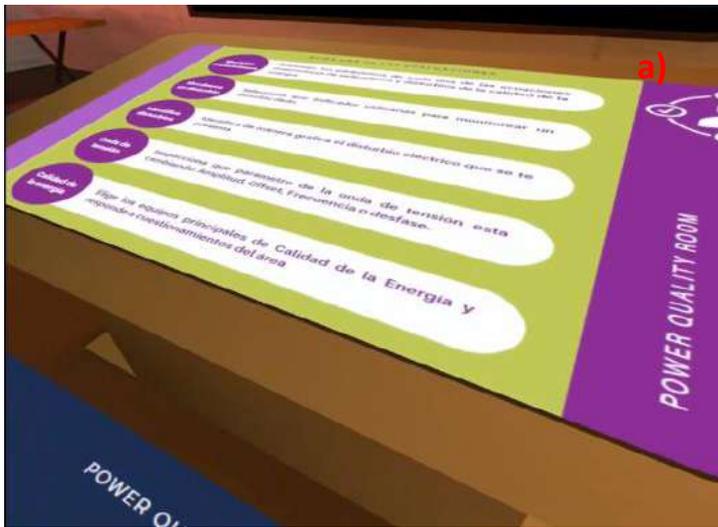


Figura 4.15 Evaluación del usuario en el aula virtual

## 4.2.6 Otras áreas

Durante la ejecución del aula virtual existen otras áreas que le permiten el aprendizaje al usuario, una de ellas son las láminas que muestran distintos disturbios eléctricos (Fig. 4.16a) e indicadores estadísticos (Figura 4.16b), su definición y modelo matemático. Las láminas de los disturbios muestran automáticamente las gráficas de acuerdo a los modelos matemáticos.

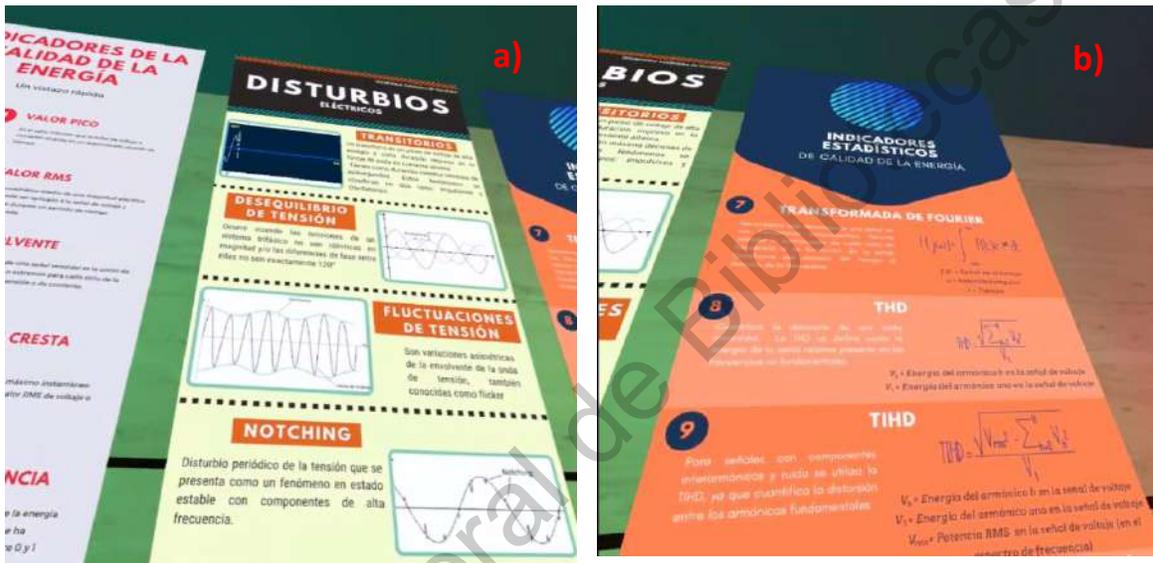


Figura 4.16 Láminas de disturbios e indicadores

El usuario puede interactuar con algunos otros elementos dentro del aula virtual, tales como objetos voladores (estos tienen una función especial dentro de la evaluación, específicamente en la quinta prueba), sistemas de partículas (chispas en el transformador, al inicio del aula virtual, entre otros), sonidos de fondo, iluminación para cada área, animaciones, entre otros.

### 4.3 Subestación eléctrica virtual

La subestación eléctrica de potencia virtual desarrollada se observa en la Fig. 4.17, donde el usuario puede observar elementos reales a una escala 1:1. Dentro de este ambiente virtual, las cuatro etapas descritas en el capítulo anterior son llevadas a cabo.

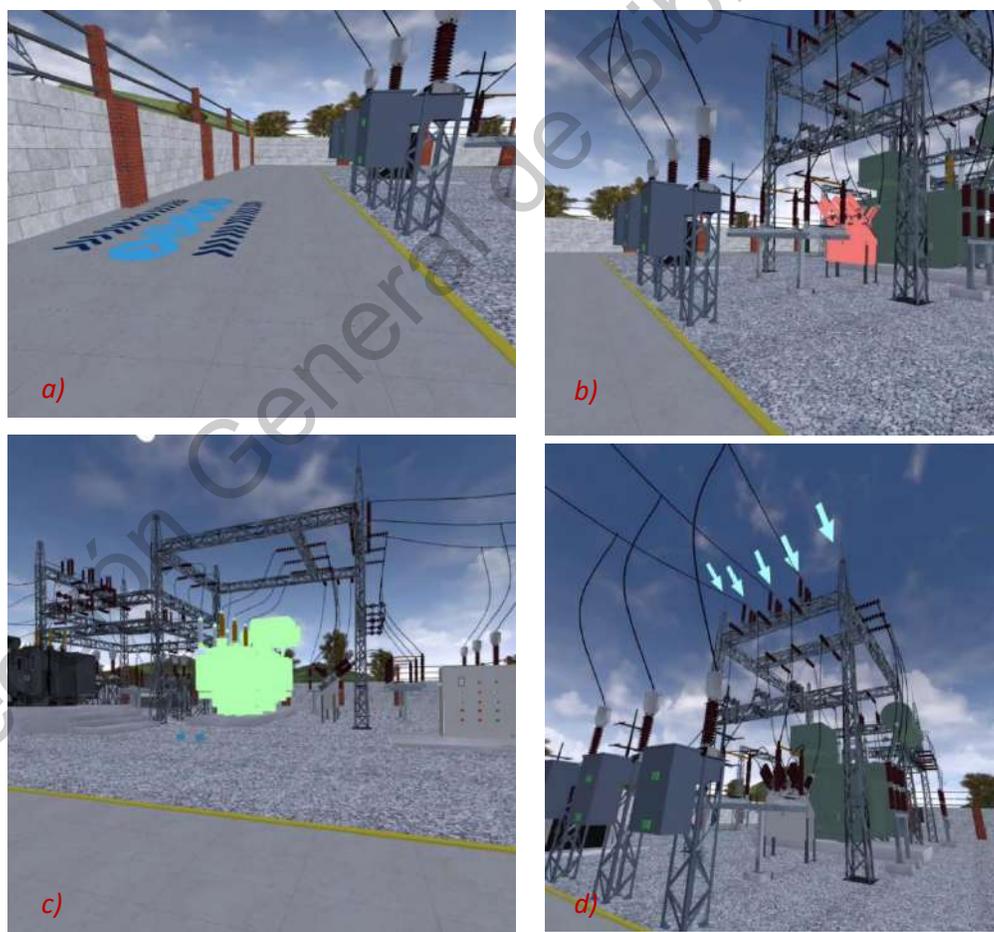


**Figura 4.17** Subestación de potencia virtual

Una vez que el usuario inicia el ambiente virtual de la subestación, diferentes sonidos y narraciones son reproducidos para orientar al usuario sobre las instrucciones de uso.

### 4.3.1 Reconoce la subestación eléctrica

Cuando esta etapa es seleccionada, el usuario debe seguir la animación de flechas mostrada en la Fig. 4.18a, la cual le indicará la ruta a seguir. Durante este trayecto, se le muestra al usuario las partes principales de la subestación, así como aspectos importantes de esta, tales como la tensión de entrada y salida. La reproducción de sonido por parte del narrador está programada de tal manera que cuando se menciona a algún equipo eléctrico, este cambia de color simultáneamente de modo que el usuario sepa de que equipo se está hablando y a su vez aprenda a reconocerlo en la vida real. Las Fig. 4.18b, 4.18c y 4.18d, muestran a un interruptor termomagnético, un transformador de potencia y un apartarrayos, respectivamente, siendo remarcados en el proceso, por medio del cambio de color en su material o por la señalización mediante flechas, para centrar la atención del usuario.



**Figura 4.18** Reconocimiento de la subestación eléctrica

### 4.3.2 Proceso de adquisición de señales en la subestación eléctrica

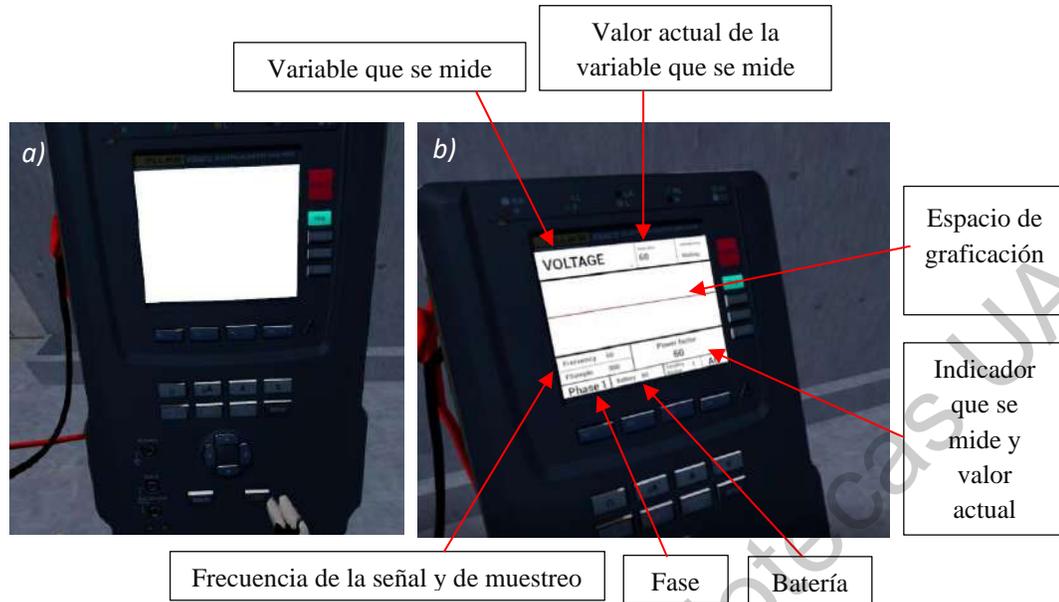
Etapa número dos que describe los pasos y puntos importantes para adquirir señales eléctricas en la subestación eléctrica. A continuación, se muestra una secuencia de imágenes que describen dicho proceso.

La Fig. 4.19a muestra un mapa mental, que da a conocer al usuario siete pasos antes de iniciar la medición de señales eléctricas. El primero de dichos pasos consiste en vestir el equipo de seguridad mostrado en la Fig. 4.19b. Para ello, el usuario tiene que acercarse a cada uno de los objetos, tomarlos y acercarlos a su cuerpo, tal como lo muestra la Fig. 4.19c.



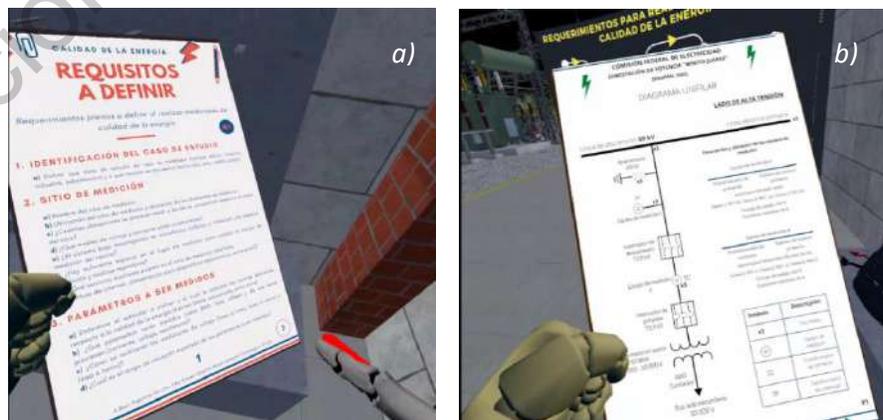
**Figura 4.19** Inicio del ambiente virtual y equipo de seguridad

Una vez que el usuario ha completado la operación, este tendrá que regresar a la pantalla de la Fig. 4.19a y pulsar el botón de audio para el paso número dos. En consecuencia, se le explicará acerca del medidor de la calidad de la energía, en cuanto a su uso, aplicación y funciones relacionadas a los botones que este contiene por medio de un lector de voz. La Fig. 4.20a muestra el medidor de la calidad de la energía (apagado) con cada uno de sus componentes: botones, pantalla, cable y punta (tanto para la referencia positiva como la negativa). Además, el usuario tiene la posibilidad de modificar su posición, interactuar con la pantalla y sus diferentes elementos. La Fig. 4.20b muestra el medidor de la calidad de la energía encendido con sus diferentes variables que se observan en la pantalla; cada una de estas variables es explicada al usuario durante la ejecución de este paso y además como puede modificarlas a través de los botones.



**Figura 4.20** Medidor de calidad de la energía

Quando este paso es completado, el usuario tiene que regresar nuevamente a la pantalla de la Fig. 4.19a para continuar los pasos siguientes, los cuales son requisitos a definir y el diagrama unifilar. Estas dos partes se muestran como un bloc de notas, con los que el usuario puede interactuar, tal como se observa en la Fig. 4.21. Los requisitos a definir son una serie de instrucciones de suma importancia basados en la literatura, los cuales están dictados en forma de texto, tal como lo muestra la Fig. 4.21a, en donde el usuario puede interactuar con botones, tales como reproducción de audio y de avanzar o retroceder página. Por su parte, la Fig. 4.21b muestra el diagrama unifilar de la sección de alta tensión de la subestación y la ubicación de elementos.



**Figura 4.21** Bloc de notas: requisitos a definir y diagrama unifilar

Posteriormente, se continúa reproduciendo los pasos restantes de la pantalla de la Fig. 4.19a, para una vez finalizados, proseguir a realizar la medición, la cual se le muestra al usuario a través de imágenes, audios, animaciones y videos como medio de enseñanza. El usuario deberá interactuar con el diagrama unifilar, el medidor de calidad de la energía, el tablero de control, los interruptores de medición, entre otros elementos, tal como se muestra en las siguientes imágenes de la Fig. 4.22.



**Figura 4.22** Medición de señales eléctricas en tablero de control

La Fig. 4.22a muestra al usuario con el diagrama unifilar y el medidor de la calidad de la energía dirigiéndose al tablero de control. Una vez que llega al tablero de control, la zona es señalizada mediante conos de prevención, tal como lo muestra la Fig. 4.22b. Una vez que se abre el tablero de control, se ubican los interruptores de medición a través del diagrama unifilar, a su vez algunas animaciones se reproducen indicando el lugar donde se encuentran tales equipos eléctricos, tal como se observa en la Fig. 4.22c. La Fig. 4.22d muestra al usuario conectando la referencia negativa al punto indicado, mientras que en la Fig. 4.22e se observa el medidor de la calidad de la energía ya conectado para realizar la medición. La Fig. 4.22f muestra la adquisición de la señal eléctrica de voltaje, donde puede observarse su forma gráfica y diferentes valores numéricos. En esta imagen, el usuario no ha seleccionado ningún indicador, a diferencia de las Figs. 4.22g y Fig. 4.22h, en donde en la primera el usuario seleccionó el indicador estadístico del valor pico, mientras que en la segunda se ha seleccionado la envolvente. En esta sección, el usuario puede interactuar con las ondas de voltaje e indicadores estadísticos, ambos provenientes de sus modelos matemáticos. El siguiente paso consiste en medir las señales eléctricas de corriente, aspecto que es similar a lo explicado anteriormente.

Si el usuario comete un cortocircuito, entonces una explosión ocurrirá, tal como lo muestran las imágenes de la Fig. 4.23. El error que cometió el usuario es mostrado en la Fig. 4.23a, el cual fue unir dos fases por medio del medidor. Las Figs. 4.23b y 4.23c muestran el proceso de la explosión. Una vez terminada, se prosigue con la práctica de manera normal, indicándole al usuario su error con el fin de que no le vuelva a repetir.



**Figura 4.23** Explosión debida a un cortocircuito

Luego de que el usuario ha medido las señales eléctricas de voltaje y corriente en el tablero de control, esta etapa es finalizada y se procede a la siguiente, la cual se describe en la subsecuente sección.

### **4.3.3 Medir señales eléctricas y reconocer disturbios eléctricos**

Como ya se ha explicado en la metodología, esta etapa consiste en medir la señal eléctrica de voltaje en el tablero de control y reportar disturbios eléctricos que aparecerán en cualquiera de las tres fases a una pantalla. La Fig. 4.24a muestra la pantalla que contiene algunos de los posibles disturbios eléctricos. Al observar algún disturbio en el medidor, el usuario tendrá que seleccionar en la pantalla al disturbio que crea que está observando a través de los controles del visor Oculus Quest. La Fig. 4.24b muestra el medidor de la calidad de la energía y a su vez este exhibe un disturbio eléctrico que son las fluctuaciones de tensión, es decir, a la subestación se le ha inyectado este disturbio eléctrico por medio de su modelo matemático. Idealmente, el usuario tendría que presionar sobre la pantalla el nombre de *fluctuaciones de tensión* para indicar que ese es el disturbio eléctrico presente en el lado de alta tensión de la subestación eléctrica. Si se selecciona de manera correcta, el puntaje sumará, de otro modo, no lo hará. Cuando ya seleccionó la respuesta, inmediatamente se le muestra en la misma pantalla cual es la respuesta, independientemente de si el usuario seleccionó correctamente o no, la respuesta. Por su parte, la Fig. 4.24c muestra que a la subestación se le ha inyectado un transitorio impulsivo, el cual puede verificarse a través del medidor de la calidad de la energía. En la Fig. 4.24e se le ha inyectado a la subestación eléctrica un transitorio impulsivo.

Aparecerán cinco disturbios eléctricos y al final de estos se le mostrará al usuario el puntaje obtenido respecto al correcto reporte de los disturbios eléctricos, tal como lo muestra la Fig. 4.24d. La prueba puede aplicarse tantas veces como se quiera, apareciendo siempre disturbios eléctricos diferentes (de los propuestos en este trabajo). Además, durante la identificación de los disturbios, el usuario puede aplicar cualquier indicador estadístico de los propuestos en este trabajo.



Figura 4.24 Reconocimiento de disturbios eléctricos inyectados en la subestación

#### 4.3.4 Evaluación del conocimiento adquirido

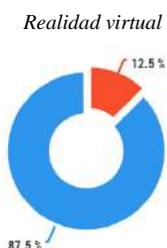
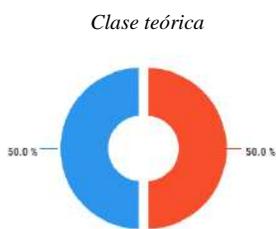
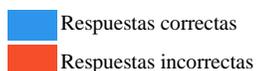
Última etapa que consiste en evaluar al usuario sobre el conocimiento adquirido a través del ambiente virtual por medio de diferentes cuestionamientos. La Fig. 4.25 muestra tal situación.



Figura 4.25 Evaluación del usuario

#### 4.4 Evaluación del sistema mediante usuarios

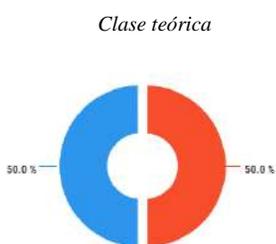
Se evaluaron 8 usuarios relacionados al área eléctrica bajo la dinámica descrita en la sección 3.8 de este trabajo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos tanto para la clase teórica como para la clase utilizando el visor Oculus Quest, en los temas planteados en dicha sección:



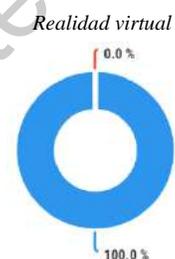
**A)** Reconocimiento de parámetros en la forma gráfica de la onda sinusoidal de tensión



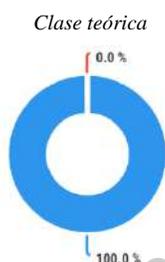
**B)** Reconocimiento de parámetros en el modelo matemático de la onda sinusoidal de tensión



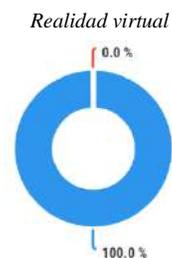
**C)** Reconocimiento del modelo matemático de disturbio eléctrico



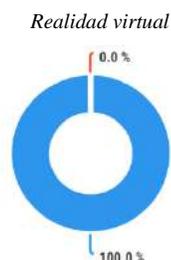
**D)** Reconocimiento de la forma gráfica del disturbio eléctrico mediante su modelo matemático



**E)** Reconocimiento del modelo matemático del indicador estadístico



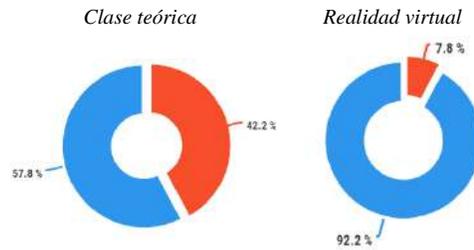
**F)** Reconocimiento de la forma gráfica del indicador estadístico mediante su modelo matemático



**G)** Reconocimiento de la aplicación de un cierto indicador para monitorear un disturbio dado.



**H)** Reconocimiento del equipo de seguridad para ingresar a una subestación



I) Reconocimiento de equipo eléctrico y partes de la subestación eléctrica

**Figura 4.26** Comparación de resultados de las evaluaciones en diferentes temas utilizando una clase virtual y realidad virtual

Cada uno de los gráficos mostrados en la Fig. 4.26 muestran aspectos muy importantes sobre la recepción del conocimiento utilizando realidad virtual sobre clases teóricas y que a continuación se remarcan de acuerdo a la letra del gráfico:

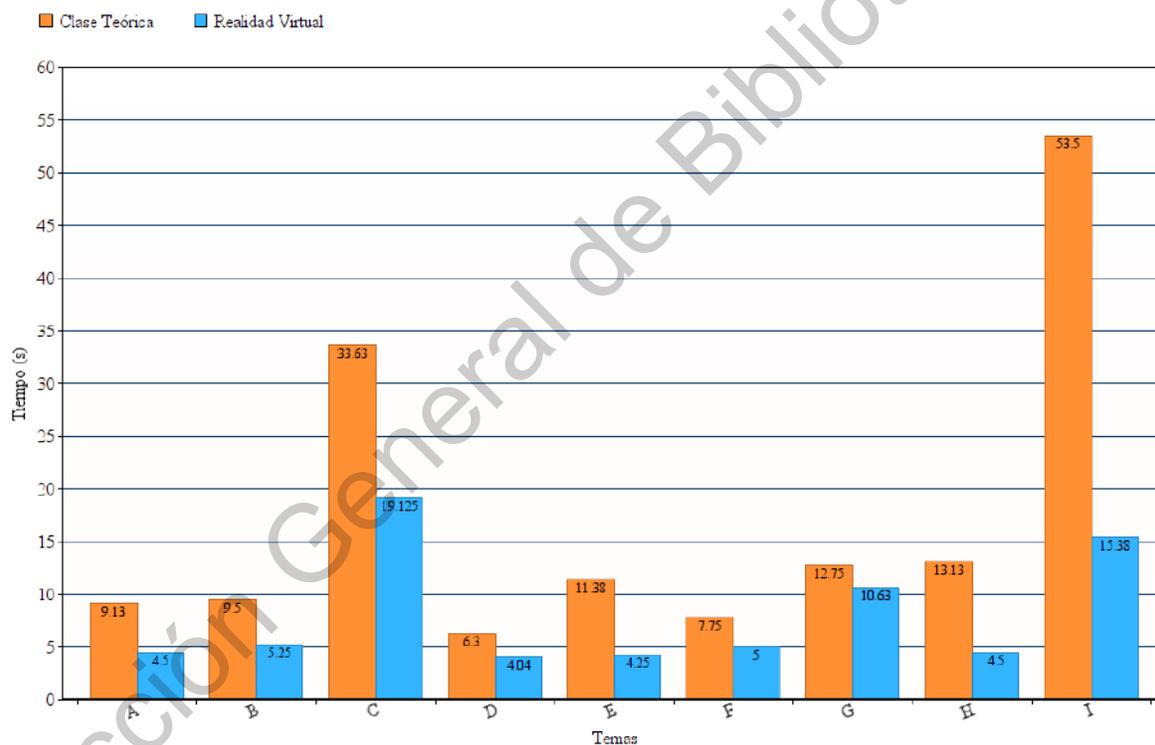
- A) El 50% de los usuarios que tomaron la clase teórica obtuvieron un resultado incorrecto al reconocer parámetros en la forma gráfica de la onda sinusoidal, mientras que una vez que tomaron la clase utilizando realidad virtual, este número incrementó a tener el 87.5% de las respuestas correctas.
- B) El 12.5% de los usuarios que tomaron la clase teórica obtuvieron un resultado incorrecto al reconocer parámetros en el modelo matemático de la onda sinusoidal, mientras que ningún error se generó al responder la evaluación cuando los mismos usuarios utilizaron realidad virtual, es decir, el 100% de las repuestas fue correcta.
- C) La evaluación generada una vez que los usuarios recibieron la clase teórica, muestra que el 50% de los usuarios no logró reconocer el modelo matemático del disturbio eléctrico, mientras que, una vez tomada la clase con realidad virtual, este porcentaje disminuyó a solo el 12.5%.
- D) La evaluación respecto al aprendizaje obtenido en el reconocimiento de la forma gráfica del disturbio eléctrico mediante la implementación de su modelo matemático utilizando realidad virtual fue totalmente exitosa, pues el 100% de los participantes respondieron correctamente, mientras que, a través de la clase teórica, el 12.5% de los participantes obtuvo un error.

- E) En este punto, los participantes lograron obtener el 100% de las respuestas correctas para ambas clases, tanto la teórica como la de realidad virtual. Algunos mencionaron que tales indicadores ya los habían abordado en cursos anteriores y por ello este punto les resultó más fácil.
- F) Aunque en la evaluación de la clase teórica en cuanto al reconocimiento de modelos matemáticos de indicadores estadísticos, los participantes no obtuvieron ningún error, si lo hicieron en el reconocimiento de la forma gráfica del indicador estadístico sobre una onda de tensión, pues el 37.5% de los participantes cometieron errores sobre este punto en la evaluación. Cuando los participantes utilizaron el desarrollo de este trabajo utilizando realidad virtual y fueron evaluados, ningún error fue cometido, es decir, se obtuvo el 100% de las respuestas correctas.
- G) En cuanto al monitoreo de disturbios eléctricos por medio de un indicador estadístico, 12.5% de los participantes, a través de la clase teórica, obtuvieron un error. A su vez, el 100% de los participantes, mediante la clase con realidad virtual, obtuvieron respuestas correctas.
- H) Respecto al reconocimiento de equipo de seguridad para ingresar a una subestación eléctrica, el 87.5% de los participantes tuvo una respuesta correcta mediante la clase teórica. Este porcentaje aumentó al 100% una vez que los usuarios utilizaron la realidad virtual.
- I) El reconocimiento de equipo eléctrico y las partes de una subestación fueron presentadas de forma teórica y con realidad virtual. En la evaluación para la clase teórica se obtuvo un 57.8% de respuestas correctas, mientras que la evaluación de los usuarios mediante realidad virtual, el porcentaje incrementó a un 92.2% de respuestas correctas.

Finalmente, el promedio de respuestas correctas generadas por los usuarios a partir de un curso teórico se encuentra en 74.94% mientras que para un curso utilizando realidad virtual y en específico, el desarrollo de este trabajo, el porcentaje incrementa al 96.36% , por lo que la realidad virtual se presenta como una excelente herramienta para la enseñanza de temas relacionados a la calidad de la energía, teniendo un 21.42% de mejor porcentaje en cuanto a la recepción del conocimiento respecto al curso teórico.

El tiempo de respuesta para cada pregunta hace referencia a la cantidad de tiempo que transcurre desde que se lee la pregunta hasta que se elige una respuesta en consecuencia. Por tanto, es la capacidad de detectar, procesar y dar respuesta a un estímulo, que se basa en la preparación, conocimiento o antecedentes que el usuario tiene. Para este caso, el tiempo de respuesta se refiere al tiempo que un usuario tarda en responder un cuestionamiento cuando este se le presenta, sea correcto o equivocado.

La Fig. 4.27 muestra el tiempo promedio en que los usuarios respondieron a las preguntas de las pruebas teóricas y mediante realidad virtual de acuerdo con los temas presentados en la Fig. 4.26.



**Figura 4.27** Tiempo promedio en responder los cuestionamientos

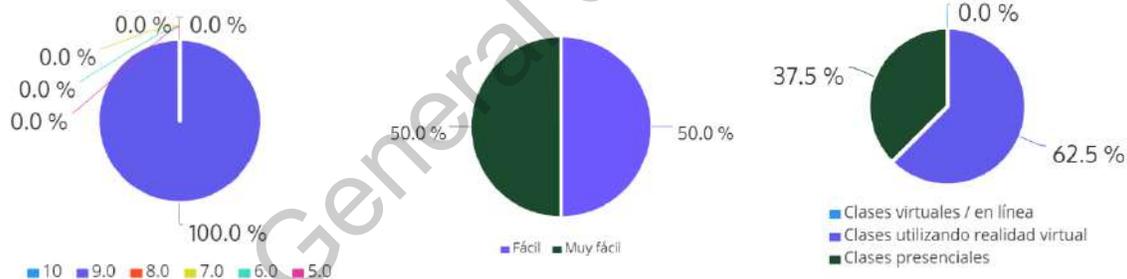
Respecto a la Fig. 4.27, puede observarse que el tiempo promedio en reconocer la respuesta bajo un planteamiento dado, es más rápido cuando el conocimiento se les transmitió utilizando realidad virtual para todos los casos con respecto a aquellos planteamientos en los que el conocimiento se les presentó de forma teórica. En otras palabras, cuando el

conocimiento se transmitió utilizando realidad virtual y se les presentó una evaluación, el tiempo de respuesta fue más rápido disminuyendo desde 1.2 hasta 3.48 veces más rápido respecto a cursos teóricos en el área de la calidad de la energía.

Bajo los resultados obtenidos anteriormente, la realidad virtual presenta una forma práctica y eficiente para transmitir conocimiento relacionado a la calidad de la energía en cuanto a formas gráficas, modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, así como de equipo de seguridad y eléctrico, al incrementar la capacidad de retención y disminuir el tiempo de reconocimiento en los temas planteados, es decir, aplanar la curva de reconocimiento.

#### 4.5 Retroalimentación de los usuarios

Una vez que los usuarios utilizaron el desarrollo de este trabajo, se les presentó un cuestionario de retroalimentación, en donde se abordaron los siguientes puntos:



a) Calificación de los ambientes virtuales desarrollados en Oculus Quest

b) ¿Qué tan fácil fue utilizar el software?

c) ¿Qué tipo de clase preferirías?



d) ¿Recomendarías a la tecnología de realidad virtual como método de aprendizaje?

Figura 4.28 Retroalimentación de usuarios

e) ¿Qué añadirías a los ambientes de realidad virtual que utilizaste para mejorarlos?

Las respuestas de los usuarios se centran en los siguientes temas: *Funcionamiento interno de los elementos, más animaciones, guía de usuario automática, manera más práctica de desplazamiento por los menús, más áreas de aprendizaje, mejor respuesta del sistema, más elementos de interacción.*

f) ¿Qué quitarías a los ambientes de realidad virtual que utilizaste para mejorarlos?

Las respuestas de los usuarios se centran en los siguientes temas: *No quitaría nada, todo está muy bien, utilizar solo los controles necesarios, los elementos están bien y no es necesario remover alguno, se encuentran bien diseñados con las herramientas correctas.*

g) ¿Qué fue lo que más te gusto de la clase utilizando el sistema de realidad virtual?

Las respuestas de los usuarios se centran en los siguientes temas: *todo me pareció muy divertido y sentía mucha curiosidad, poder navegar de forma libre por ambientes en los cuales no había estado antes, la forma gráfica de los disturbios eléctricos, interactuar con objetos virtuales, capacidad de interacción y visualización, es sumamente didáctico e inmersivo, la practicidad de interactuar con los elementos sin los riesgos que pueden existir.*

h) ¿Lo implementarías en un curso?, ¿Cuál?

Las respuestas de los usuarios se centran en los siguientes temas: *Circuitos eléctricos, máquinas eléctricas, sistemas eléctricos de potencia, subestaciones, cualquiera que involucre tareas riesgosas, procedimientos de medición inaccesibles, aquellos que usen equipos costosos.*

## 4.6 Comparación de costos

El costo total de crear el sistema de realidad virtual tanto para un fin universitario (enseñanza en clases y cursos de la universidad) como para un fin empresarial (capacitar el personal eléctrico de una empresa) es mostrado en la Tabla VII. Esta suma de precios se realiza de acuerdo a las licencias de cada uno de los softwares utilizados, las cuales se mencionaron en la fundamentación teórica de este trabajo.

**Tabla VII** Costo total del software de realidad virtual en pesos mexicanos

Concepto	Software Universitario	Software Empresa
Licencia Unreal Engine 4	0	4 000 ( <b>V: 80 000</b> )
Licencia 3Ds Max	0	2 454
Licencia Visual Studio	0	0
Oculus Quest	13 546	13 546
Desarrollo	0	80 000
<b>Precio Total</b>	<b>13 546</b>	<b>100 000</b>

La licencia de UE4 se toma en cuenta considerando que la venta del software final es de 80 000 pesos mexicanos, mientras que el concepto de desarrollo se refiere a los gastos realizados en personal para la elaboración del proyecto, material, equipo y servicios durante el tiempo de desarrollo.

Por su parte, la Tabla VIII muestra la comparación del precio final del sistema para un fin empresarial en cuanto a la capacitación de una y diez personas contra cursos existentes generados por diferentes empresas.

**Tabla VIII** Comparación del software contra cursos existentes en pesos mexicanos

Capacitación	Costo Individual	Costo por 10 personas	Observación
Ambiente virtual	100 000	100 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realidad Virtual</li> </ul>
AVO Training Institute (Estados Unidos)	33 800	338 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>El curso es por medio de videoconferencia.</li> </ul>
DNV GL (Holanda)	375 000	375 000	<ul style="list-style-type: none"> <li>No está programado para abrirse y no se sabe si se hará en el futuro.</li> <li>Tres sesiones de medio día.</li> </ul>
Atlanta JATC (Estados Unidos)	23 500 (considerando 100 horas)	235 000 M.N.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temario que puede abarcar hasta 8 niveles con un mínimo de 446 horas</li> </ul>
Fluke (México)	4 176	41 760	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se encontró fecha próxima a realizarse, el curso dura tres días. Debe trasladarse a la sede.</li> </ul>

La mayoría de las empresas capacitadoras requieren un mínimo de personas para abrir cualquier grupo, por lo que el precio individual de los cursos está sujeto a la cantidad de participantes en el grupo. Los cursos existentes son, en su mayoría, dados en línea. Aquellos que no son así, deberán pagar un costo extra para el traslado, ya sea del participante o del instructor, a lugares como salas de juntas, salones de clases, entre otros. Algunas otras empresas relacionadas al entrenamiento del área eléctrica no presentan temas de capacitación relacionados al área de la calidad de la energía, y otras lo hacen, pero de manera superficial. Todas estas desventajas son reemplazadas por el software de realidad virtual realizado en este trabajo, convirtiendo las debilidades de los cursos existentes, en fortalezas. Finalmente, el software de realidad virtual costaría a una empresa \$100 000 M.N. por una, diez, cien o mil personas cuando se capacite, es decir, la viabilidad del proyecto en cuanto al costo puede calificarse como excelente respecto a los cursos existentes, quienes cobran por el número de individuos.

## 4.6 Comparación de contenidos con otros cursos

Esta sección tiene como objetivo comparar los contenidos del temario que abordan los ambientes de realidad virtual de este trabajo contra tres de los cursos de los cuales se comparó su precio. La Tabla IX muestra los principales temas del área y establece si son o no abordados por el curso en cuestión.

**Tabla IX** Comparación de contenidos

Temario	VR (Este trabajo)	AVO Training Institute	DNV GL	Fluke
Introducción a la PQ	✓	✓	✓	✓
Disturbios eléctricos	✓	✓	✓	✓
Indicadores de la PQ	✓	✓		✓
Modelos matemáticos de disturbios e indicadores	✓			
Opciones de monitoreo	✓		✓	✓
Equipo de seguridad	✓			
Equipo eléctrico	✓		✓	
Partes de la subestación	✓			
Metodología para obtener señales en subestación	✓			
Armónicos, TDD, THD		✓	✓	✓
Ley de Ohm, reactancia-impedancia		✓		
Estándares de la PQ		✓	✓	✓
Diagrama Unifilar	✓			
Conceptos eléctricos			✓	✓
Triángulo de potencias				✓
Representación fasorial				✓

Respecto a los contenidos del temario de la Tabla IX, en todo curso se da la introducción a la calidad de la energía para poner en contexto al usuario, además, se habla de

disturbios eléctricos e indicadores estadísticos de la PQ. Es importante destacar que, aunque en cada curso se abordan disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, cada curso tiene un número de estos diferente, siendo el desarrollo de este trabajo a través de VR el que presenta más disturbios eléctricos y más indicadores estadísticos, al presentar 14 y 6, respectivamente. Los cursos existentes presentan por mucho 10 disturbios eléctricos y 5 indicadores. El trabajo VR coincide en muchos temas con los cursos existentes, mas, sin embargo, no se abordan temas como los armónicos, la THD, la ley de Ohm, reactancia, impedancia, estándares de la PQ, diferentes definiciones de conceptos eléctricos (sistemas monofásicos, trifásicos, corriente, voltaje, entre otros), triángulo de potencias y representación fasorial, por lo que, en futuros trabajos se plantearán para ser añadidos, de modo que la capacitación en el área de la PQ sea lo más completa posible utilizando esta tecnología.

Las áreas que se abordan el desarrollo de VR y que no se hacen en los cursos con los que se comparan, están relacionadas principalmente con los modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos, equipo eléctrico y de seguridad, el proceso para adquirir señales eléctricas dentro de una subestación eléctrica, el diagrama unifilar, y las partes principales de una subestación eléctrica, así como de sus componentes. Una de las razones por las que no se abordan estos temas en los otros cursos con los que se compara este trabajo, puede deberse a que estos cursos se presentan de forma virtual o en lugares tales como aulas de clases, salas de reuniones, entre otros lugares, siendo muy rara la vez la asistencia al lugar real de las pruebas, que en este caso podría ser un laboratorio de pruebas, una subestación o instalación eléctrica.

## 5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

### 5.1 Conclusiones

Se desarrollaron diferentes elementos tridimensionales, que, en conjunto, conformaron el aula de capacitación y la subestación eléctrica de distribución utilizando el software 3Ds Max para la interacción del usuario.

Se generaron dentro del aula virtual seis etapas de entrenamiento relacionadas a la calidad de la energía, equipos eléctricos y de seguridad, así como de modelos matemáticos de disturbios eléctricos e indicadores estadísticos para el reconocimiento en el usuario.

Se desarrolló dentro de la subestación de distribución virtual una etapa de entrenamiento dirigida al usuario en base a norma del proceso que se sigue para adquirir y medir señales eléctricas, así como la obtención de los indicadores estadísticos a partir de dichas señales.

Se realizó y comprobó un generador de 14 disturbios eléctricos que contiene variaciones de corta y larga duración, transitorios, desequilibrio de tensión, fluctuaciones de tensión, variaciones de frecuencia, ruido, notching y componente DC a partir de señales sintéticas y sus modelos matemáticos, los cuales fueron inyectados a la subestación eléctrica virtual para la interacción del usuario.

Se implementó un bloque con 6 indicadores de la calidad de la energía que contiene valor RMS, valor pico, envolvente, factor cresta, factor de potencia y relación de transformación, mediante su modelo matemático en el sistema de realidad virtual para el análisis y monitoreo de disturbios eléctricos y su visualización del usuario.

El uso de herramientas de última generación, como lo es el caso del visor Oculus Quest, para la transmisión del conocimiento en el área de la Calidad de la Energía, incrementa la capacidad y habilidad en los usuarios para reconocer e identificar disturbios eléctricos, indicadores estadísticos, equipo de seguridad y eléctrico, a la vez que los motiva y estimula durante el aprendizaje respecto al método clásico de enseñanza.

## 5.2 Prospectivas

Los ambientes de realidad virtual creados en este trabajo pretenden ampliar su contenido temático de forma que la capacitación en los usuarios sea más completa, tal como se mencionó en la sección anterior.

Para incrementar el realismo en los disturbios eléctricos, los cuales son modelos ideales en este trabajo, se pretende implementar bases de datos reales obtenidas en la práctica de los diferentes disturbios eléctricos, de forma que se le presente al usuario situaciones reales.

Que el sistema sea evaluado por expertos del área eléctrica, de modo que el contenido sea ajustado y adecuado a las necesidades de un curso, con el fin de que, en un futuro, esta tecnología se implementada en cursos dirigidos a la industria.

## 6 REFERENCIAS

Almeida, A., Moreira, L. J. and Delgado, J. 2003. Power Quality Problems and New Solutions.

Álvarez, E. 2015. Subestaciones eléctricas. Escuela Especializada de Ingeniería. El Salvador.

Arendarski, B., Termath, W. and Mecking, P. 2008. Maintenance of Complex Machines in Electric Power Systems Using Virtual Reality Techniques. Proceedings of IEEE International Symposium on Electrical Insulation.

Autodesk Inc. 2019. Autodesk. California, Estados Unidos. *Autodesk / Software de diseño 3D, ingeniería y entretenimiento*. <https://www.autodesk.mx/>.

Autodesk 3Ds Max. 2020. Autodesk. California, Estados Unidos. *Autodesk 3Ds Max / Software de modelado y renderización 3D*. <https://www.autodesk.mx/products/3ds-max/>

<https://www.autodesk.mx/products/3ds-max/>

Bernardo, A. 2017. Virtual reality and simulation in neurosurgical training. From the Annals of Weill Cornell Neurological Surgery

Bollen, M. and Gu, I. 2006. Signal Processing of power quality disturbances. Primera Edición. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Botero, J. 2013. Conceptos básicos de subestaciones eléctricas. Bogotá, Colombia.

Cabral, M., Belloc, O., Montes, A., Zilles, E. and Knorich, M. 2016. VR THOR-Virtual Reality Training with Hotstick on Operations Risk.

Checa, D., Alaguero, M., Arnaiz, M. and Bustillo A. 2016. Briviesca in the 15th c.: A virtual Reality Enviroment for Teaching Purposes.

Chen, S., Pan, Z., Zhang, M., Shen, H. 2013. A case study of user immersion-based systematic design for serious heritage games. Multimedia Tools Applications.

De Haro-Luna, J. A., Morales-Hernández, L. A., Osornio-Ríos, R. A. 2019. Sistema de entrenamiento y capacitación en el área eléctrica de subestaciones por medio de realidad virtual (Tesis de Maestría ). Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro.

Dugan, R. C., McGranahan, M., Santoso, S. and Wayne, H. 2002. Electrical Power Systems Quality. Second Edition. McGraw-Hill.

Dughir, C. 2010. Electrical Power Network Disturbance Detection and Monitoring System.

Electron. 2015. Relación de Transformación. Documento Técnico.

Escartín, E. 2015. La VR, una tecnología educativa a nuestro alcance. Instituto Superior Politécnico “Jose A. Echeverría”, Cuba.

European Metrology Research Program: A Best Practice for On-Site Power Quality Measurement Campaigns Guide, 2017

Galván, I., Pérez, M., Ayala, A., Muñoz, J., Rodríguez, E., Salgado, M. y Sierra, B. 2011. Sistema para la capacitación y entrenamiento para el mantenimiento de líneas de la red de distribución, ALEn3D.

Gomes, C., Ferreira, D., Romero, L., Augusto, C. and Vidal, M. 2010. Improved Disturbance Detection Technique for Power-Quality Analysis.

Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., Osornio-Rios, R. A., Rivera-Guillen, J. R., García-Pérez, A. y Benítez-Rangel, J. P. 2013. Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la Calidad de la Energía. (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro.

Guan, C., Chang, L. and Xu H. 2013. The Simulation of Traction and Braking Performance for High-speed Railway. Virtual Reality System.

Gutiérrez. C., Romero-Troncoso, R. J., Osornio-Rios, R. A., García-Pérez, A., Morales-Velázquez, L. y Granados-Lieberman, D. 2014. Sistema de generación y monitoreo de

disturbios eléctricos. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro.

Hamrol, A., Górski, F., Grajewski, D. and Zawadzki, P. 2013. Virtual 3d atlas of a human body – development of an educational medical software application. *Procedia Computer Science*, ELSEVIER.

Hernández, Y. and Pérez, M. 2016. Virtual reality systems for training improvement in electrical distribution substations.

IEEE. (2019). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.

Microsoft Visual Studio. 2020. Microsoft Visual Studio Licensing. Recuperado de: <https://visualstudio.microsoft.com/wp-content/uploads/2020/03/Visual-Studio-Licensing-Whitepaper-Mar-2020.pdf>

Janik, P. y Lobos, T. 2006. Automated classification of power-quality disturbances using SVM and RBF networks. *Power Delivery*, IEEE Transactions.

Katsionis, G. and Virvou, M. 2008. Personalised e-learning through an educational virtual reality game using Web services. *Multimedia Tools Applications*.

Lara-Cardoso J. and Romero-Troncoso R. J. (2008). Low-Cost Power Harmonics Analyzer of Nonlinear Loads Based on FPGA, in Proc. International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vancouver (Canada).

Leiqing-Ding, Y., Xu, Z., Jiang, Y. and Chen, J. 2017. Design and Realization of Augmented Reality based Operation Training System for Operation and Maintenance Personnel of Intelligent Transformer Substation.

Mandal, S. 2013. Brief Introduction of Virtual Reality Challenges. *International Journal of Scientific & Engineering Research*.

Molano, M. J., Rodríguez, J., Macías, G., Contreras, L. M., Gutiérrez, J. M. y Avedaño, J. L. 2013. Desarrollo e implementación de un analizador de calidad de energía basado en

FPGA para motores trifásicos. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro.

Oculus Quest. 2020. Oculus. California, United States. *Oculus Quest*. <https://www.oculus.com/quest/>.

Oikonomou, C., Santorineos, M., Lioret, A. and Zoi, S. 2017. Experimentation with the human body in virtual reality space Body, bacteria, life-cycle

Quishpe-Armas, J. A., Cedeno-Viveros, L. D., Meléndez-Campos, J., Suárez-Mora, C. A. & Camacho-León, S. 2015. An immersive 3d virtual learning environment for analyzing the atomic structure of mems-relevant materials. *Procedia Computer Science*.

Rodney, H. and Vigna, K. (2010). Numerical model framework of power quality events.

Saucedo-Dorantes, J. J., Romero-Troncoso, R. J., Delgado-Prieto, M., Jaen-Cuellar, A. Y. y de Santiago-Pérez, J. J. 2017. Metodologías para mejorar la confiabilidad del diagnóstico de fallas en cadenas cinemáticas basado en algoritmos inteligentes y fusión de datos (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro.

Standler, R. 2002. Protection of electronic circuits form overvoltages. Pan American and International Copyright Conventions.\*\*\*\*

Tanaka, E., Paludo, J., Bacchetti, R., Gadbem, E., Domingues, L., Cordeiro, C., Giraldi, O.,Alcarde, G., Mnedes, A. and Cascone, M. 2017. Immersive Virtual Training for Substations Electricians.

Unreal Engine. 2019. Unreal Engine. North Carolina, United States. *Unreal Engine 4 Documentation*. <https://docs.unrealengine.com/en-US/index.html>

Vera, G., Ortega, J., A. y Burgos, M. A. 2003. La VR y sus posibilidades didácticas.

Whitaker, J. 1999. *AC Power Systems Handbook*. CRC Press.

Yildirim, Ö., Eristi, B., Eristi, H., Ünal, S., Erol, Y. and Demir, Y. 2016. An Online Electric Power Quality Disturbance Detection System.

Zhang, S., Ying, S., Shao, Y., Gao, W., Liang, Y., Peng, P. and Luo, X. 2018. Design and Application of Electric Power Skill Training Platform Based on Virtual Reality Technology.

European Metrology Research Programme. 2017. A Best Practice for On-Site Power Quality Measurement Campaigns Guide: *User manual*.

## 7 ANEXOS

A continuación, se presentan dos artículos de congreso expuestos en congresos nacionales:

1. “Sistema de Realidad Virtual Para Entrenamiento de la Prueba de Resistencia de Aislamiento en Transformador de Potencia”. (2019). XXI Congreso Mexicano de Robótica. Manzanillo, Colima.
2. “Recognition of Power Quality Disturbances and Indicators Using a Virtual Oculus Quest System”. (2020). XVI International Engineering Congress. Querétaro, Querétaro.

# Sistema de Realidad Virtual para Entrenamiento de la Prueba de Resistencia de Aislamiento en Transformador de Potencia

Jaramillo-Arteaga David<sup>1</sup>, De Haro-Luna Jorge Armando<sup>2</sup>, Osornio-Ríos, Roque Alfredo<sup>3</sup>, Morales-Hernández Luis Alberto<sup>4</sup>

Facultad de Ingeniería, C.A. Mecatrónica

Universidad Autónoma de Querétaro, Campus San Juan del Río

San Juan del Río, Querétaro, México.

djaramillo22@alumnos.uaq.mx<sup>1</sup>, rcedeno28@alumnos.uaq.mx<sup>2</sup>, raor@uaq.mx<sup>3</sup>, luis.morales@uaq.mx<sup>4</sup>

**Resumen**— Los sistemas de realidad virtual han sido utilizados recientemente como sistemas de entrenamiento altamente efectivos debido a que se construye un mundo realístico inmersivo que le permite al usuario adquirir conocimiento y luego aplicarlo. Por otra parte, las pruebas eléctricas a transformadores requieren de alto adiestramiento del personal de pruebas que las realiza, puesto que un fallo en el proceso puede causar daños irreparables tanto para el operador como para las instalaciones. Una de las pruebas más comunes aplicadas a transformadores de potencia es la prueba de resistencia de aislamiento, que habitualmente no es llevada a cabo en entrenamientos por el personal sino hasta que se enfrenta al escenario real. En este contexto, en el presente trabajo se desarrolla un entorno de realidad virtual que permite al usuario aprender y desarrollar la prueba de resistencia de aislamiento en un transformador de potencia como entrenamiento previo a la situación real.

**Palabras clave**— realidad virtual, transformador, entrenamiento, aislamiento.

## I. INTRODUCCIÓN

La Realidad Virtual (RV) es una tecnología que permite al usuario interactuar con un entorno simulado por computadora, de modo que el usuario tiene la sensación de estar inmerso en dicho entorno [1] aumentando así la receptividad y las tasas de aprendizaje [2,3]. En los últimos años, el uso de la RV para propósitos de entrenamiento ha sido una realidad, especialmente en trabajos que conllevan riesgos para el ser humano, equipos costosos y con acceso limitado para pruebas diversas.

Un transformador es el componente más importante de una red eléctrica de transmisión y distribución y de este depende el crecimiento económico del país [4]. El mantenimiento deber realizarse periódicamente mediante pruebas que analicen su funcionamiento. Para capacitar al personal de pruebas, la mayoría de las veces se utiliza el método tradicional de entrenamiento, el cual consiste de cursos teóricos y en el mejor de los casos, la aplicación en campo, que usualmente conlleva riesgos [5]. Una de las pruebas más comunes realizadas a transformadores eléctricos de potencia es la Prueba de Resistencia de Aislamiento (PRA), la cual mide la calidad del aislamiento ubicado dentro del transformador [6].

En este proyecto se desarrolla un entorno de RV que permite al usuario el entrenamiento para realizar la PRA en un transformador de potencia mediante la exploración e interacción con objetos de manera virtual para fines de

entrenamiento. El sistema permitirá entrenar al usuario sin siquiera tener los sistemas reales (transformador, megger, conos delimitadores, guantes, casco, entre otros), al ser un sistema virtual evade riesgos para el personal de pruebas, daños el equipo que se utiliza y puede ser empleado por cualquier persona que desee realizar la prueba antes mencionada.

La sección II muestra la metodología propuesta para generar el sistema, en la sección III se describe el desarrollo del sistema de RV de acuerdo con la metodología para generar los resultados que son mostrados en la sección IV. Finalmente, la sección V muestra las conclusiones del trabajo.

## II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se muestra en la Fig. 1 y es descrita a continuación:

El caso de estudio será la PRA en un transformador de potencia puesto que es de las más comunes e importantes. Una vez elegida la prueba, se realizará el diseño virtual de los elementos necesarios para conformar el ambiente de RV en 3D mediante el software *3D MAX*. Posteriormente, se hará uso del motor gráfico *Unreal Engine 4* (UE4) que permitirá añadir características físicas al entorno virtual. Enseguida serán implementadas las características de interacción del usuario-objetos dentro del sistema virtual. Finalmente, lo desarrollado será probado haciendo uso del sistema *Oculus Rift* (OR) y un equipo de cómputo.

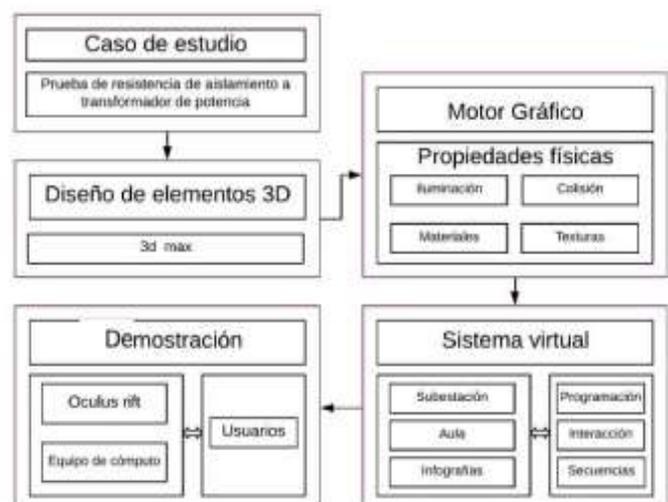


Figura 1. Metodología propuesta.

### III. DESARROLLO DEL SISTEMA

Esta sección describe el desarrollo del sistema de RV de acuerdo con la Fig. 1 para el entrenamiento del usuario con el fin de realizar la PRA.

#### A. Caso de estudio

Para llevar a cabo la PRA, el usuario ejecutará una serie de pasos [7] que se describen enseguida. Se asume que las boquillas de alta tensión están denotadas por  $H$  y las de baja por  $X$ .

1. Se cortocircuitan las boquillas de baja tensión  $X$ .
2. Se cortocircuitan las boquillas de alta tensión  $H$ .
3. Se conecta la terminal roja en las boquillas de alta tensión  $H_1$ .
4. Se conecta la terminal negra en las boquillas de baja tensión  $X_0$ .
5. Se conecta un puente auxiliar de las boquillas de baja ( $X_0$ ) a tierra del transformador.
6. Se inicia la prueba.

Al finalizar el entrenamiento, el usuario será capaz de realizar la prueba, a través de los pasos mencionados anteriormente, en un transformador real.

#### B. Diseño de elementos 3D

Seleccionado el caso de estudio, se procede al diseño y modelado en 3D. La Fig. 2 muestra el diagrama del diseño de elementos 3D, en donde se modelan objetos y elementos básicos para la interacción del usuario dentro del sistema de RV, algunos de ellos son el transformador de potencia, los aisladores, el megger, un casco, algunos conos delimitadores, un par de guantes, la infraestructura, bardas, entre otros. Una vez realizados los modelos en *3D MAX* se exportan para ser utilizados en el motor gráfico UE4.

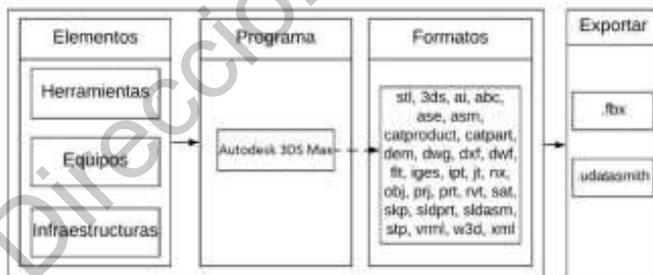


Figura 2. Diseño de elementos 3D.

#### C. Motor Gráfico

Los modelos previamente creados son exportados en formato *.fbx* o *.udatasmith* al motor gráfico UE4, donde se les otorgan propiedades necesarias para la integración e interacción con el ambiente, tales como iluminación,

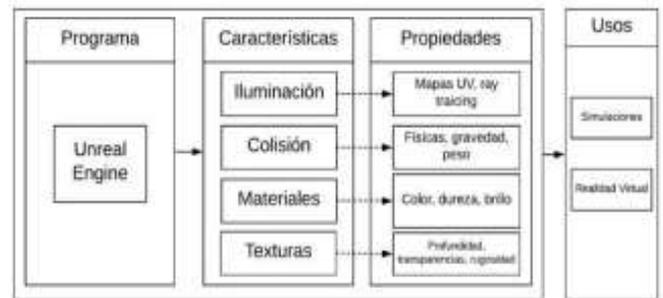


Figura 3. Motor gráfico Unreal Engine. Permite la interacción de los objetos con el entorno mediante la adición de características y propiedades que asimilan la realidad.

colisión, texturas, entre otros. Con estas propiedades y las herramientas del propio motor gráfico, es posible simular el comportamiento deseado del objeto y que se incremente en el usuario el realismo de la escena. La Fig. 3 muestra algunas herramientas que pueden ser aplicadas dentro del motor gráfico UE4.

#### D. Sistema Virtual

Se refiere al enlace de todos los componentes para conformar el sistema de RV, que en este caso será la prueba al transformador. La Fig. 4 muestra el diagrama que seguirá la simulación, la cual está conformada por dos entornos:

- Aula. Primer entorno que se mostrará y en donde se darán instrucciones de uso y para realizar la prueba de resistencia de aislamiento (infografías).
- Subestación. Lugar donde será llevada a cabo la prueba al transformador y que incluye las herramientas necesarias para entrenar la prueba.

Una vez que se inicia el motor gráfico UE4, se importan los modelos 3D que se generaron en *3D MAX* y se comprueban las diferentes características asignadas a cada uno de ellos (iluminación, colisiones, gravedad, entre otros). Luego, estos modelos con sus respectivas características son colocados en el espacio virtual asignado. Posteriormente, se realiza la asignación como actor a cada uno de los modelos 3D, que en otras palabras, se refiere a fijar un rol dentro la realidad virtual para cada objeto (e.g. mesa-colocación de objetos, silla-sentarse, pared-límite del entorno, entre otros) haciendo uso de identificadores llamados *blueprints*. Después se asigna el rol que generará el objeto o modelo 3D con el usuario (e.g. si lo puede agarrar, levantar, tirar, lanzar, entre otros) haciendo uso de los controles del sistema OR, para finalmente crear la secuencia que simule que en realidad algo se está realizando (e.g. se agarra un objeto, se lanza y este cae al suelo por la acción de la gravedad chocando y deteniéndose con el suelo). De esta manera, es posible generar un ambiente de RV que permita el entrenamiento para la ejecución de la prueba de resistencia de aislamiento en el transformador.

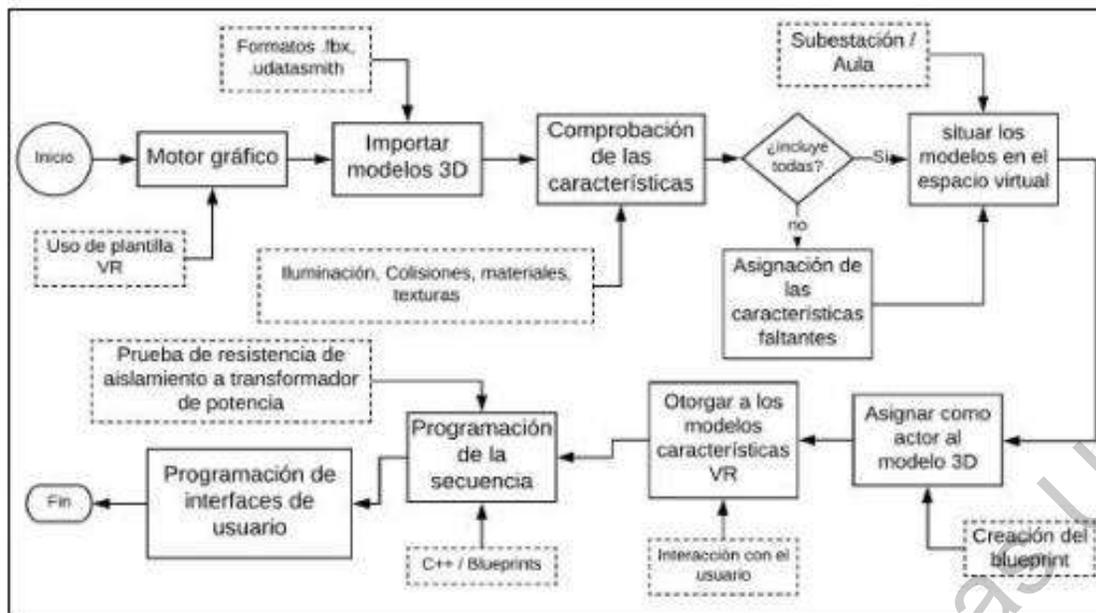


Figura 4. Sistema virtual para la prueba de resistencia de aislamiento.

### E. Demostración

Es la etapa donde el usuario, quién puede ser estudiante, técnico o ingeniero, podrá probar el software haciendo uso del sistema de RV (Sistema OR y computadora) para la exploración, interacción y principalmente el entrenamiento de la PRA en el transformador de potencia.

## IV. RESULTADOS

Esta sección muestra los resultados obtenidos para cada una de las secciones descritas anteriormente.

### A. Diseño de elementos 3D

El diseño de cada uno de los elementos se realizó mediante las herramientas descritas en la sección anterior. La Fig. 5 muestra el diseño de una estructura para transformador que formará parte del entorno virtual durante la PRA del transformador.

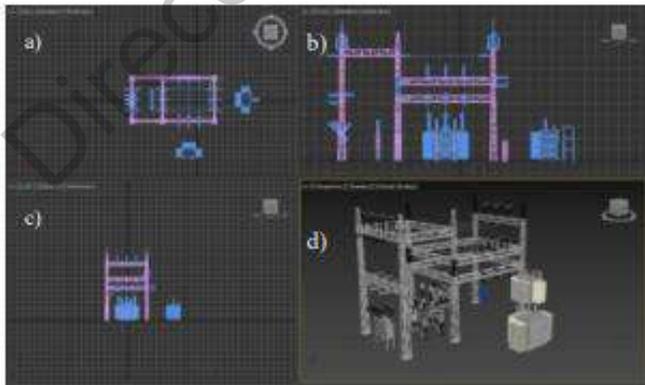


Figura 5. Diseño de estructura para transformador: en a) vista superior, b) vista lateral, c) vista frontal, y d) modelo 3D.

### B. Motor gráfico

Permite observar de manera real el entorno en el que se encuentra el usuario a partir de cada uno de los componentes 3D. La Fig. 6 muestra un entorno virtual desarrollado para el presente proyecto con diversos objetos tales como cascos de seguridad, guantes, desarmadores, entre otros.



Figura 6. Serie de modelos 3D que interactúan con el entorno a través de sus características físicas generadas por el motor gráfico. Se observan diferentes herramientas para diversas pruebas con transformadores, entre ellas las herramientas necesarias para llevar a cabo la PRA.

### C. Sistema Virtual

Los entornos virtuales desarrollados son un aula y la subestación donde se encuentra el transformador, mostrados en las Figs. 7a y 7b, respectivamente. En la primera etapa, el usuario entrará al aula para recibir información e instrucciones de uso, mientras que en la segunda realizará la prueba de resistencia de aislamiento en el transformador que se encuentra en la subestación creada. En ambos escenarios el usuario puede interactuar con los objetos.

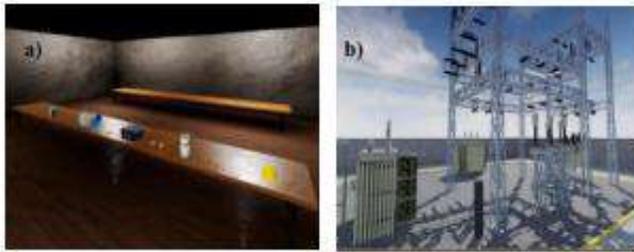


Figura 7. Sistema de RV, en a) aula y b) Subestación eléctrica.

#### D. Demostración

El entorno de RV se muestra a través del sistema OR que está conformado por un visor 3D, dos controles para manos y dos sensores infrarrojos. La Fig. 8 muestra la prueba de un usuario.



Figura 8. Prueba de usuario del sistema de RV

Una vez que el usuario ha recibido las instrucciones de uso en el aula, se procede a realizar la prueba de resistencia de aislamiento en el transformador paso a paso como se describió en la sección III.

La Fig. 9 muestra una de los pasos de la PRA en el entorno de la subestación eléctrica. Pueden observarse algunos puentes conectados entre sí, que de manera general, es el circuito elaborado para que el megger obtenga lecturas de resistencia.

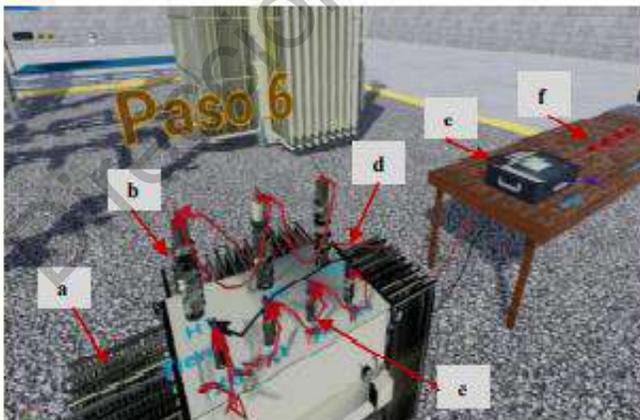


Figura 9. Prueba de resistencia de aislamiento en el transformador: a) Transformador, b) Boquillas de alta tensión, c) Boquillas de baja tensión, d) Puentes y conexiones, e) Megger y f) Instrumentos para realizar la prueba.

El usuario puede desplazarse por el área como se observa en la Fig. 10a a través de un disparador e interactuar con objetos (cables, desarmadores, pinzas, entre otros) mediante los controles del sistema OR, como lo muestra la Fig. 10b.



Figura 10. Sistema de RV, en a) Disparador de desplazamiento y dirección y b) Interacción con un caso de seguridad a través de las manos del usuario, que son simuladas por los controles del sistema OR.

Para que el usuario avance en la prueba y finalice esta, tendrá que completar correctamente cada paso que se le presente, de lo contrario no podrá concluir exitosamente la prueba en el transformador. En la ejecución de cada uno de los pasos de la PRA, el sistema le indicará al usuario a través de un anuncio virtual si fue o no correcto lo que realizó.

#### E. Validación de resultados

El ambiente de RV desarrollado en este trabajo fue usado por seis estudiantes, tanto de licenciatura como de posgrado, que poseen conocimientos de sistemas eléctricos. La metodología empleada para probar el entorno consistió en la repetición de la PRA en tres ocasiones consecutivas por cada usuario, obteniendo en cada una de ellas el tiempo total que el usuario toma en completar exitosamente cada ensayo. De este modo, la Fig. 11 muestra el tiempo total que le tomó a cada usuario ejecutar exitosamente la primera y última prueba. Para todos los usuarios hay una tendencia de mejora, puesto que el tiempo de ejecución final mejoró por lo menos el 60% respecto a la prueba inicial.

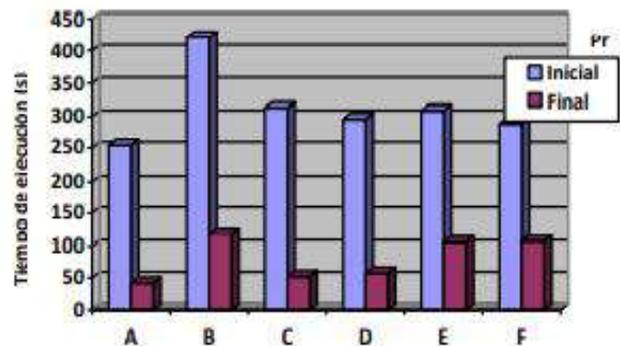


Figura 11. Tiempo de ejecución inicial y final de la PRA para usuario dentro del sistema de RV

Los usuarios disminuyeron la curva de aprendizaje al mejorar el tiempo en que realizaron la primera y última prueba, debido al grado de inmersión en la subestación virtual.

Posteriormente, se realizó una retroalimentación del usuario a través de una serie de preguntas que muestran variables tales como el grado de aprendizaje obtenido una vez realizada la prueba, si el sistema es amigable o no con el usuario (gráficos, físicas, comodidad, seguridad y fácil uso) y que confianza genera el sistema de RV para que el usuario aplique la PRA en un ambiente real. La Fig. 12 muestra el porcentaje de respuesta de los usuarios en una escala del 1 al 5, donde el 1 muestra desacuerdo total y 5 acuerdo total.

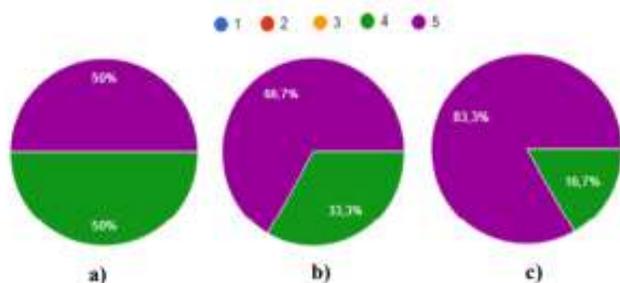


Figura 12. Retroalimentación obtenida a partir de los usuarios: a) ¿El sistema emula y ayuda a aprender lo necesario para aprender la prueba real?, b) ¿El sistema es amigable?, c) Después de realizar la práctica en el simulador, ¿Qué tanta confianza te daría aplicarlo en el ámbito real?.

Respecto a la Fig. 12, el 50% de los usuarios menciona que está totalmente de acuerdo con que el sistema de RV emula y le ayuda a aprender lo necesario para ejecutar la prueba real, el 66.7% está totalmente de acuerdo con que el sistema es amigable y el 83.3% se siente totalmente confiado para aplicar la prueba en un ámbito real una vez realizada la práctica en el simulador. Bajo estos resultados, el entorno virtual desarrollado ayuda a mejorar en el usuario el entendimiento y entrenamiento de la PRA para su aplicación en una situación real así como también mejora las habilidades y destrezas para llevarse a cabo puesto que el tiempo de ejecución de la prueba se reduce conforme el usuario realiza diferentes ensayos.

## V. CONCLUSIÓN

La adquisición del conocimiento interactivo, la seguridad durante el entrenamiento y el acceso a equipos restringidos y costosos son las principales ventajas que se presentan al usar sistemas de RV aplicados al área eléctrica, como en este caso. El entrenamiento virtual hace más interesante, motivador y claro el aprendizaje y por lo tanto mejora la retención del conocimiento antes de enfrentarse a situaciones reales [8]. La combinación del conocimiento teórico y práctico es llevado a cabo en el presente trabajo en los ambientes de RV desarrollados, el aula donde se dónde se presenta la información y la subestación donde se aplica la parte práctica, ambos de forma interactiva. Los resultados mostraron que los usuarios del sistema de RV comprendieron de manera adecuada el procedimiento para realizar la PRA, obtuvieron habilidades y destrezas al reducir el tiempo de ejecución de la PRA cuando realizaban más de una vez el ensayo y sus comentarios finales fueron

siempre positivos dado que les pareció una forma muy innovadora de enseñar aspectos que en clase no pueden notar. Como trabajo futuro, se pretende implementar equipos de medición de variables físicas en el transformador y compararlas con situaciones reales.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Mandal, S. (2013). Brief Introduction of Virtual Reality Challenges. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.4, ISSN 2229-5518.
- [2] Chen, S., Pan, Z., Zhang, M., Shen, H.: A case study of user immersion-based systematic design for serious heritage games. *Multimedia Tools Appl.* 62, 633–658 (2013)
- [3] Katsionis, G., Virvou, M. (2008). Personalised e-learning through an educational virtual reality game using Web services. *Multimedia Tools Appl.* 39, 47-71
- [4] Giridharan, K. (2010). *Electrical Systems Design*. Department of Electrical and Electronics Engineering, Kerala.
- [5] Rodríguez, J. (2019). 8 Common Testing Procedures for Electrical Transformers.
- [6] Hernández, Y. y Pérez, M. (2016). Virtual Reality systems for training improvement in electrical distribution substations.
- [7] Chauvin Amoux Group. (2010). *Insulation Resistance Testing Guide*.
- [8] Pebertli, N. Ribeiro, F. and Alves M. (2015). Consolidating Learning in Power Systems: Virtual Reality Applied to the Study of the Operation of Electric Power Transformers.

# Recognition of Power Quality Disturbances and Indicators Using a Virtual Oculus Quest System

David Jaramillo Arteaga  
Universidad Autónoma de Querétaro  
UAQ  
Querétaro, México  
djaramillo22@alumnos.uaq.mx

Luis Alberto Morales Hernández  
Universidad Autónoma de Querétaro  
UAQ  
Querétaro, México.  
luis.morales@uaq.mx

Roque Alfredo Osornio Ríos  
Universidad Autónoma de Querétaro  
UAQ  
Querétaro, México  
raor@uaq.mx

**Abstract**— This work presents a training system of an interactive classroom based on virtual reality aimed at training electrical personnel related to power quality. Interaction with the real voltage wave, recognition of electrical disturbances and statistical indicators as well as recognition of electrical equipment are the three learning stages of which the virtual classroom is made up. Each of the stages shows the knowledge in a theoretical and practical way through mathematical models, waveforms and third-dimensional models to increase realism in practical situations since most of the virtual reality environments related to the electrical area are only simulations without mathematical background. The virtual classroom shows four electrical disturbances (sags, swells, overvoltages and undervoltages) and five statistical indicators (rms value, peak value, crest factor, power factor and transformation ratio) for user training. The development of this work is carried out using Unreal Engine 4 and the Oculus Quest system, which will allow us to have a cutting-edge innovative training system related to power quality, which is in the process of user testing.

**Keywords**—Virtual Reality; Power Quality; Electrical Disturbances; Electrical Training; Oculus Quest.

## I. INTRODUCTION

In recent years, the problems related to Power Quality (PQ) have increased exponentially due to the enormous increase of electronic equipment, renewable energy sources, the newly created equipment is more susceptible to electrical disturbances compared to the previous ones, among others. These problems generate high production costs in any type of company that uses electrical energy [1]. For this reason, it is necessary that electrical energy providers train electrical personnel in these newly emerging problems related to the PQ area by identifying power quality disturbances, since most electrical personnel have limited knowledge in this area [2]. The training of electrical personnel is usually theoretical and in some cases practical which involves risks for both

personnel and equipment that are high cost and have limited access (special computers, PQ meters and devices, among others). Commercial equipment detects electrical disturbances, just by connecting them to the electrical network such as sags, swells, overvoltages and undervoltages (they are four of the most common electrical disturbances that can be found in electrical networks [1] [3]) and measure PQ indicators such as power, rms value and peak voltage, among others, both of which provide results without the user knowing the mathematical description and the parameters included to measure them, how are they detected, how are they diagnosed and their way of calculating them, since they are already programmed in commercial equipment and with which electrical personnel are trained. These commercial devices deliver results and final diagnoses that lead to actions, but led by the electrical equipment and not by the user due to such ignorance. In this regard, in terms of research, there are trends that make use of Statistical Indicators (STI) to identify electrical disturbances due to its low computational cost and ease of calculation [1]. Furthermore, Virtual Reality (VR), which had been commonly used in leisure and entertainment applications, has taken a new path in research aimed at teaching and training tasks that involve dangerous situations and require high precision, such as is the case of the electrical area. In this context, VR is a powerful tool in teaching, because it increases receptivity and learning rates [4] [5]. In this way and taking the advantages offered by VR, a VR system is sought that allows users to be trained in the PQ area in terms of electrical disturbances and STI theoretically and practically through the implementation of mathematical models to make them known to the user and this in turn has the practice to identify them and apply them in real life without depending on a commercial system that performs the entire procedure and in some cases, the decision to generate actions.

This work was supported by CONACYT scholarship 964168



Because PQ-related problems are growing exponentially year after year, electrical personnel responsible for handling and maintaining electrical systems need to possess the knowledge, skills and abilities that ensure end-users have good PQ through signal monitoring using STI. STI have proven to be efficient for the identification and detection of electrical disturbances, however, there are more than 100 STI that can be applied to a signal to identify an electrical disturbance. Therefore, this work presents only the most relevant and significant indicators in the area of the PQ (to detect sags, swells, overvoltages and undervoltages), which are the rms value, peak value, crest factor, power factor and transformation ratio [1] [6]. On the other hand, various VR works that relate to the electrical area in terms of education and training have been developed. The work carried out in [7] consists of a computer training system dedicated to electrical tests in electrical substations for the Comision Federal de Electricidad (CFE, which is the main electricity supplier in Mexico). By this means, its employees can be trained in different tests without compromising the integrity of the worker. In [8] a VR system was carried out where an interactive 3D visualization of equipment such as transformers and generators for maintenance purposes is explored. Its objective is to train the user to carry out tests on these equipments. Electrical testing is limited. In [9], a VR environment was developed for user training regarding the maintenance of electrical distribution lines with a focus on employee safety using the Oculus Rift (OR) system. In [10], a training system was generated for the operation and maintenance of an intelligent transformer in a substation using VR and Augmented Reality (AR) for the training of electrical personnel. In [11], electrical tests are carried out on transformers as a means of training using a VR system, aimed at people who perform this type of operation in real life. In [12] a virtual electrical substation is presented for the training of electrical personnel who operate the equipment in the substations with the aim of preparing them for complex tasks before facing real practice. They conclude that their software will improve existing training programs for people related to the electrical area. Each one of the previous works are only simulations of three-dimensional spaces using computers or the OR system that do not consider real mathematical models that in turn enrich the knowledge of electrical personnel for the best resolution of problems in real situations and their best theoretical relationship with the practice. Furthermore, there is no work in the literature that merges the VR and the PQ area for the training of electrical personnel.

This work proposes the creation of a VR environment using the latest generation Oculus Quest system for user training in the area of PQ through the recognition and identification of electrical disturbances and STI of PQ through its implementation with mathematical models to be generated in Unreal Engine 4 (UE4) using c++. The user will be able to interact with the voltage and current waveforms and the respective electrical disturbances and STI. The system shows four disturbances (sags, swells, overvoltages and undervoltages) and five indicators (rms value, peak value,

crest factor, power factor and transformation ratio), as a sample of the operation of the proposed VR system. Advantages such as safety will be generated for both the user and the equipment, interaction of real voltage waves without being physically in a substation that includes risks, theoretical training will be generated in the users by showing the mathematical models that describe electrical disturbances and STI and their parameters. The VR system will have the indicators that, according to the literature, are most significant for detecting the electrical disturbances mentioned above. The present work shows in section II the mathematical models of the disturbances and PQ indicators that are implemented in section III, where the proposed methodology to develop the proposed VR environment through the use of UE4 and Oculus Quest is presented. Section IV shows the results obtained and finally Section V shows the conclusions of the work.

## II. POWER QUALITY DISTURBANCES AND INDICATORS

### A. Electrical Disturbances

They are variations of the parameters of the sinusoidal signal of voltage or current and that threaten the operation of the electrical equipment. According to international standards [13], electrical disturbances are classified into seven categories according to the characteristics of their harmonic spectrum, their duration and their amplitude. These seven categories are displayed in transient phenomena, voltage imbalances, waveform distortion, voltage fluctuations, frequency variations, and those that will be presented in this work, short and long duration variations that are described in the Table I and later are described by means of their mathematical models. The electrical disturbances in Table I are related to the amplitude of the voltage sine wave.

TABLE I. SHORT AND LONG DURATION VARIATIONS (IEEE TERMINOLOGY, STANDARD 1159-1995)

Category	Types	Duration
Short-term variations	Sags, Swells	Half cycle to one minute
Long-term variations	Undervoltages, Overvoltages	More than a minute

#### 1) Sag

It is a decrease of the short-term voltage wave to values of 90 to 10% of the nominal value of the wave with a typical duration of half-cycle to one minute. The mathematical model of a sag is determined by (1)

$$v(t) = [1 - s_g(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_o t + \theta_A) \quad (1)$$

where  $v(t)$  represents  $v(t)$  the values of the voltage sine wave with the injected disturbance.  $s_g$  is the unit magnitude of the sag.  $u_1$  and  $u_2$  are step functions determined by (2).  $f_o$ ,  $\theta_A$  and



$t$  ( $t \geq 0$ ) are the frequency, the phase angle and the time of the sine wave, respectively [14].

The step function is a discontinuous function whose value equals 0 for any negative argument and 1 for any positive argument,

$$U_n = \begin{cases} 1 : \forall t \text{ if } t - t_n > 0 \\ 0 : \forall t \text{ if } t - t_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

where  $t_n$  is the time in which the step function changes of state [14].

### 2) Swell

It is the increase in the magnitude of the voltage between 110 and 180% of the nominal value of the sine wave with a duration that is between 0.5 cycles to 1 minute, described by (3)

$$v(t) = [1 + s_w(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_o t + \theta_A) \quad (3)$$

where  $s_w$  is the unit magnitude of the swell [14].

### 3) Undervoltage

It is a low voltage condition that occurs when the rms voltage decreases between 80 to 90% of its nominal value for more than one minute, expressed by (4)

$$v(t) = [1 - s_u(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_o t + \theta_A) \quad (4)$$

where  $s_u$  is the unit magnitude of the undervoltage [14].

### 4) Overvoltage

It is a high voltage condition that occurs when the rms voltage increases from 110 to 120% of its nominal value for more than one minute, denoted by (5)

$$v(t) = [1 + s_b(u_1 - u_2)]\sin(2\pi f_o t + \theta_A) \quad (5)$$

where  $s_b$  is the unit magnitude of the overvoltage [14].

## B. Statical Indicators

To determine the effect of the electrical disturbances on the electrical network, STI applied in the PQ area are used. The calculation of indicators is the procedure that is applied just after the acquisition of physical signals in order to transform and process the signal information into variables that can be interpreted to perform diagnostic condition actions [15], in this case, of electrical disturbances. Although there are a large number of indicators, below are 5 indicators that are used for monitoring purposes in PQ and which are the rms value, peak value, crest factor, power factor and transformation ratio.

### 1) Rms value

It is the mean square value of an electrical quantity, either voltage or current in a given period of time, described by (6)

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [v(k)]^2} \quad (6)$$

where  $n$  represents the number of data analyzed in the determined period of time and  $v(k)$  is the sample of voltage in the signal to be analyzed [15].

### 2) Peak value

They are the maximum values that the physical signals of voltage, current or apparent power reach in a certain period of time [15], expressed by (7)

$$v_{pico} = \max(v(t)) \quad (7)$$

The union of each of the peak values for each cycle of the signal results in its envelope.

### 3) Crest factor

It is the relation between the instantaneous maximum value required by the load and its rms value of voltage or current, denoted by (8)

$$v_{crusta} = \frac{v_{pico}}{v_{rms}} \quad (8)$$

In a perfect sinusoidal of amplitude 1, the ideal crest factor should be equivalent to 1.41 [1].

### 4) Power Factor

It is an indicator on the correct use of energy, which measures the amount of energy that has been converted into work, represented by (9)

$$F.P. = \cos\phi = \frac{P}{S} \quad (9)$$

where  $\phi$  represents the phase angle between voltage and current,  $P$  is the active power and  $S$  is the apparent power [6].

### 5) Transformation ratio

Indicator that allows to know the operating status of a transformer since it relates variables such as the number of turns of the coil in primary  $N_1$  and in secondary  $N_2$ , the voltage in the primary winding  $E_1$  and secondary  $E_2$  and the current in the primary winding  $I_1$  and secondary  $I_2$  [6], expressed by (10)

$$K_T = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (10)$$

Each of the electrical disturbances and STI of PQ shown in this section will be implemented and showed in the VR system for user training through c++ using Visual Studio.



### III. METODOLOGY

The proposed VR system represents a training classroom related to the PQ area, simulating real voltage and current waves, and in turn showing mathematical aspects that are important in practice. Fig. 1 shows the architecture of the VR system and its main components.

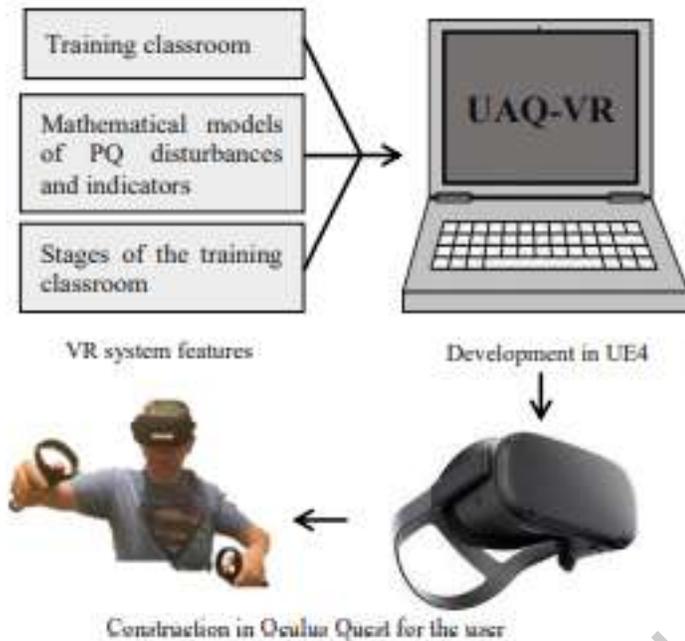


Fig. 1. VR system architecture and its main components

#### A. VR system features

This section describes the VR system proposed in this work and its main characteristics.

##### 1) Training classroom

It represents the virtual space in which the user will carry out the training activities and that requires different components, which are shown in Fig. 2. The training space requires three-dimensional models such as screens, electronic equipment, walls, among others, which are created in Autodesk 3Ds Max and imported into UE4 using the *fbx* extension. Lighting represents a vital aspect for the user's comfort with the environment and must be assigned taking into account the objects found in the virtual environment and the UV maps they generate. Both the textures and the materials will generate a more realistic effect on the image that the user observes, both of which can be applied to any 3D model. The physics of objects refers to the role that said objects will play in the virtual environment (if they move, they will be static, among others) and those of the environment refer to gravity, user movements, weather, among others. Collisions will be the reactions that the user and the objects

have when they overlap each other. Collisions are ideal for programming events, since when the user comes into contact with certain objects or regions within the virtual environment, different pieces of code are executed and do not need to be executed all the time.

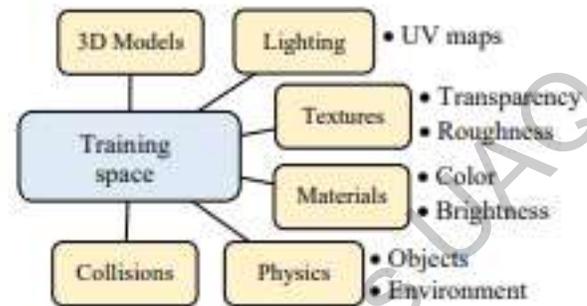


Fig. 2. Components of the training classroom

##### 2) Mathematical models of PQ disturbances and indicators

The mathematical models of the disturbances and indicators described in section II are implemented using c++ through Visual Studio. The values that these equations generate are sent directly to UE4, where finally, by means of Blueprints (BP, programming type in UE4) they are rearranged and displayed to the user through a type of window called widget. Communication is bidirectional, since through the virtual environment (represented by UE4), the user can modify parameters of said models (for example, the amplitude of the sine wave) and then such data is now sent from UE4 to Visual Studio for their respective calculation, this description is shown in Fig. 3.

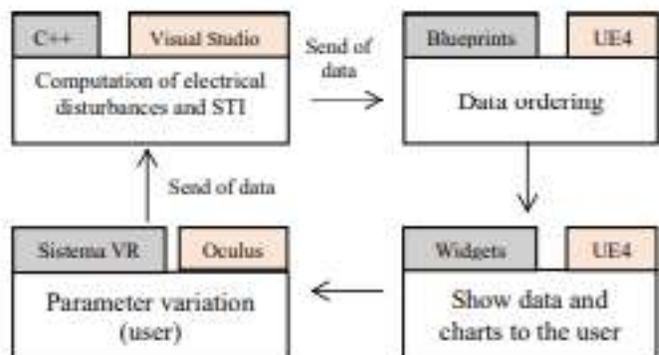


Fig. 3. Computation of PQ disturbances and indicators through the Visual Studio-UE4 interface

##### 3) Stages of the training classroom

Within the training classroom, the user can interact with three different areas (training), which are labeled in Fig. 4, and after that it will be asked for information about them (evaluation).

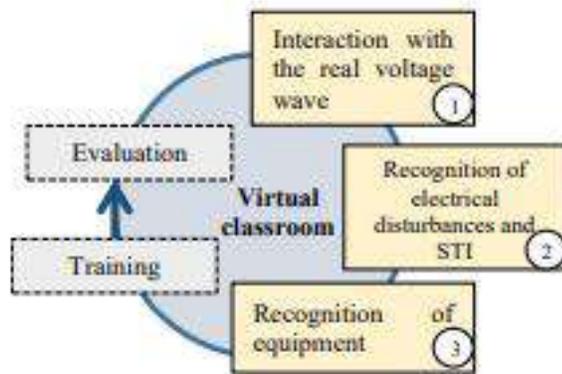


Fig. 4. Stages of the virtual training classroom

- **Interaction with the real voltage wave.** The user will be able to modify parameters such as the amplitude, frequency and offset of a voltage signal, in addition to observing the results graphically in order to familiarize them in the area.
- **Recognition of electrical disturbances and STI.** The virtual environment will teach the user to recognize the proposed electrical disturbances and STI, their parameters and how to identify them. It will be informed which indicator will be the most suitable to recognize a certain electrical disturbance. The user will be able to apply each of the electrical disturbances and STI to a base voltage signal and observe their results, that is, the theoretical part will be shown as well as what would physically occur with the signals.
- **Recognition of equipment.** Stage that will allow the user to observe and interact with the electrical and electronic equipment of PQ, as well as to know its main parts, since many times there is no access to these types of devices that are high cost and in some cases, involve a danger to the user.

#### B. Development in UE4

The development of the virtual environment is carried out using the UE4 engine in its version 4.23, which is in charge of gathering all the features and executing them through its game engine.

#### C. Construction in Oculus Quest for the user

Building the virtual environment for Oculus Quest will allow the user to interact wirelessly using its controllers.

## IV. RESULTS

The results generated from the proposed stages are presented below. Fig. 5 shows the virtual environment developed with the different stages, which are described below.



Fig. 5. Virtual classroom. Within the classroom, different spaces are presented where the user can interact with aspects of PQ: interaction with the voltage wave (1), recognition of electrical disturbances and STI (2) and recognition of equipment (3).

#### A. Training

Refers to the stages where the user is learning.

##### 1) Interaction with the voltage wave

Fig. 6 shows the user interaction with the voltage wave, the user can modify its parameters (through an interactive virtual dashboard) and observe them numerically and graphically through a screen.

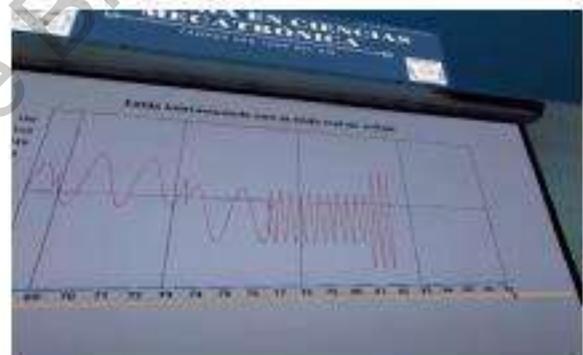


Fig. 6. User interaction with the voltage wave in the virtual classroom using the Oculus Quest viewer and its controls

##### 2) Recognition of electrical disturbances and STI

Within the virtual classroom there are different spaces where the user can learn about electrical disturbances and STI, Fig. 7 shows one of them.

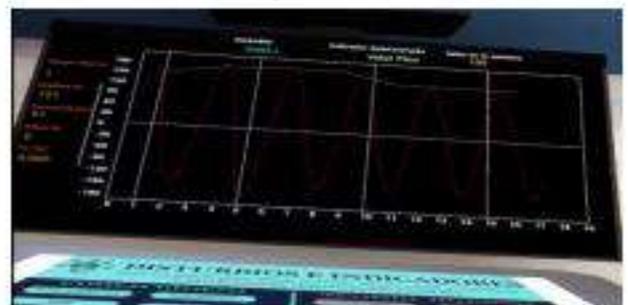


Fig. 7. Generation of electrical disturbances and STI



This space allows the user to choose an electrical disturbance from those presented in this work, to inject it into a pure voltage wave and observe the response both numerically and graphically. The user can select any of the statistical indicators presented in this work and monitor the selected disturbance numerically and graphically. Fig. 7 shows that the user selected the swell and the peak value, aspects that are shown on the screen. An important part of this space is user training through the mathematical models of electrical disturbances and STI and their graphic representation.

### 3) Recognition of equipment

Within the virtual classroom there are different electrical and electronic equipment such as PQ meter, helmet, multimeter, power transformer, among others, where the user can interact with them and observe their main components. Fig. 8 shows user interaction with a digital multimeter.



Fig. 8. Interaction with digital multimeter. When the user holds the components, they are shown their main characteristics and uses.

### B. Evaluation

The user can be evaluated in the virtual classroom in knowledge related to electrical disturbances and STI with questions related to mathematical models, equipment, which STI would apply to detect a certain electrical disturbance, among other topics.

The evaluation of the virtual environment described in this work on end users is in progress due to the covid-19 pandemic.

## V. CONCLUSIONS

The proposed virtual classroom will allow user training in the PQ area, which is still in progress. This system offers the practical component that is important for real life but also with a theoretical component that is undoubtedly vital for the development of professional tasks. Mathematical models of electrical disturbances and STI have been implemented where the user can interact with each one of them and the waveforms they generate, which bring the user closer to a more realistic

environment compared to those that only present simulations. The virtual environment presents knowledge interactively through text, images, video and animations using the Oculus Quest system, which are tools that have been shown to increase rates of learning and reception of knowledge. In future works, it is planned to add a greater number of electrical disturbances and statistical indicators as well as to carry out tests in users related to the area in order to obtain the evaluation and feedback of the system.

## VI. REFERENCES

- [1] B. Math H. J. and G. Irene Y. H., *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Piscataway, NJ: El-Hawary, 2006.
- [2] V. Ignatova, D. Villard, and J. M. Hypolite, "Simple indicators for an effective Power Quality monitoring and analysis," *2015 IEEE 15th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. EEEIC 2015 - Conf. Proc.*, no. June, pp. 1104-1108, 2015, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165321.
- [3] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, "Power quality problems and new solutions," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 25-33, 2003, doi: 10.24084/repqj01.004.
- [4] G. Katsionis and M. Vrontou, "Personalised e-learning through an educational virtual reality game using Web services," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 47-71, 2008, doi: 10.1007/s11042-007-0155-2.
- [5] S. Chen, Z. Pan, M. Zhang, and H. Shen, "A case study of user immersion-based systematic design for serious heritage games," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 62, no. 3, pp. 633-658, 2013, doi: 10.1007/s11042-011-0864-4.
- [6] R. Dugan, M. McGrath, S. Santoso and W. Beatty. *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, USA, 2003.
- [7] I. Galván, M. Pérez, A. Ayala, J. Muñoz, E. Rodríguez, M. Salgado y B. Sierra, «Sistema para la capacitación y entrenamiento para el mantenimiento de líneas de la red de distribución, ALEN3D», *Boletín IIE*, México, 2011.
- [8] B. Arendarski, W. Termath, and P. Mecking, "Maintenance of complex machines in electric power systems using Virtual Reality techniques," *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 483-487, 2008, doi: 10.1109/ELINSI.2008.4570378.
- [9] M. Cabral, O. Belloc, A. Montes, E. Z. Borba, and M. K. Zuffo, "VR THOR — Virtual reality training with hotstick on operations risks," *2016 IEEE Virtual Real.*, pp. 327-327, 2016, doi: 10.1109/vr.2016.7504786.
- [10] Y. Peng, G. Yu, W. Ni, Z. Lv, V. Jiang, and J. Chen, "Design and development of intelligent operation and maintenance training system for substation based on augmented reality," *Proc. - 2017 Chinese Autom. Congr. CAC 2017*, vol. 2017-January, pp. 4765-4769, 2017, doi: 10.1109/CAC.2017.8243621.
- [11] Y. Hernandez and M. P. Ramirez, "Virtual reality systems for training improvement in electrical distribution substations," *Proc. - IEEE 16th Int. Conf. Adv. Learn. Technol. ICALT 2016*, pp. 75-76, 2016, doi: 10.1109/ICALT.2016.141.
- [12] E. H. Tanaka et al., "Immersive virtual training for substation electricians," *Proc. - IEEE Virtual Real.*, pp. 451-452, 2017, doi: 10.1109/VR.2017.7892374.
- [13] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 1995, 2009.
- [14] R. H. G. Tan and V. K. Ramachandramurthy, "Numerical model framework of power quality events," *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 30-47, 2010.
- [15] Saucedo-Dorantes, J. J., Romero-Troncoso, R. J., Delgado-Prieto, M., Jaen-Cuellar, A. Y. y de Santiago-Pérez, J. J. 2017. "Metodologías para mejorar la confiabilidad del diagnóstico de fallas en cadenas cinemáticas basado en algoritmos inteligentes y fusión de datos" (Tesis de Doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro.