

**REALIDAD VIRTUAL EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

**ANDRÉS VILLEGAS HORTAL.**

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería con énfasis en  
Gestión de la Construcción**

**Asesor: ARQ. LUIS FERNANDO BOTERO B.**

**MEDELLÍN**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**2012**

Nota de aceptación

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Medellín, \_\_ \_\_\_\_ de 2012

## Tabla de contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
<b><u>1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</u></b>	<b><u>21</u></b>
<b><u>2. JUSTIFICACIÓN.</u></b>	<b><u>23</u></b>
<b><u>3. OBJETIVOS</u></b>	<b><u>26</u></b>
3.1 OBJETIVO GENERAL	26
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	26
<b><u>4. MARCO DE REFERENCIA</u></b>	<b><u>27</u></b>
<b>4.1 MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
4.1.1 COMPUTER AIDED DESING – CAD.	28
4.1.2 DISEÑOS PARAMÉTRICOS	29
4.1.3 BUILDING INFORMATION MODELING -BIM-	29
4.1.4 REALIDAD VIRTUAL (RV)	38
4.1.5 FUNDAMENTOS DE LA ESTEREOSCOPIA	42
4.1.6 DISPOSITIVOS O INSTRUMENTOS PARA VISUALIZACIÓN ESTEREOSCÓPICA E INTERACCIÓN DE RV.	45
<b>4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>51</b>
<b><u>5. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN. PROCESO DE CONSECUCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA E INSTALACIÓN DE LA MISMA.</u></b>	<b><u>64</u></b>
<b>5.1 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN, CONSECUCIÓN E INSTALACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA Y DE LA GENERACIÓN DE CAPACIDADES PARA TRABAJAR EN AMBIENTES DE RVI.</b>	<b>64</b>
<b>5.2 DESARROLLAR MODELOS BIM EN 3D CON INFORMACIÓN DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN PARA GENERAR AMBIENTES DE REALIDAD VIRTUAL</b>	<b>82</b>
<b>5.3 PROCEDIMIENTO PARA GENERAR AMBIENTES DE RVI A PARTIR DE MODELOS BIM.</b>	<b>115</b>
<b>5.4 VISUALIZACION DE AMBIENTES DE RVI EN LA SALA DE RV.</b>	<b>128</b>
5.4.1 APLICACIÓN DE LA RVI EN PROYECTOS DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.	128

5.4.2	GENERACIÓN DE AMBIENTES DE REALIDAD VIRTUAL APLICADA AL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN PARTIENDO DEL MODELO BIM EN 3D QUE FACILITE LA INTERACCIÓN CON LOS PROFESIONALES DE LA CONSTRUCCIÓN.	129
<b>5.5</b>	<b>DIFUSIÓN DE LOS DESARROLLOS ALCANZADOS.</b>	<b>152</b>
<b>5.6</b>	<b>PRUEBAS DE USUARIO PARA EVALUAR LOS BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA RVI EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN</b>	<b>158</b>
5.6.1	METODOLOGÍA DE TRABAJO	158
5.6.2	CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA ESTUDIADA	163
5.6.3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	164
5.6.4	CONCLUSIONES A LA PRUEBA DE USUARIO	165
<b>6.</b>	<b><u>INCORPORACIÓN DEL NUEVO SERVICIO A LA UNIDAD DE NEGOCIOS.</u></b>	<b>167</b>
<b>6.1</b>	<b>TEMA ESTUDIO PLAN DE NEGOCIOS.</b>	<b>167</b>
<b>6.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA EN ESTUDIO.</b>	<b>168</b>
<b>6.3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD.</b>	<b>169</b>
<b>6.4</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>170</b>
<b>6.5</b>	<b>MERCADO OBJETIVO</b>	<b>170</b>
<b>6.6</b>	<b>MATRIZ DOFA PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS.</b>	<b>173</b>
<b>6.7</b>	<b>METODOLOGÍA O ESQUEMA DE TRABAJO</b>	<b>174</b>
<b>6.8</b>	<b>ESTRUCTURACIÓN JURÍDICA</b>	<b>175</b>
<b>6.9</b>	<b>LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD Y DE EL LABORATORIO DE REALIDAD VIRTUAL INMERSIVA.</b>	<b>176</b>
<b>6.10</b>	<b>CRONOGRAMA DE PROCESOS Y EDT</b>	<b>176</b>
<b>6.11</b>	<b>RECURSOS REQUERIDOS</b>	<b>178</b>
<b>6.12</b>	<b>MATRIZ DE RIESGOS</b>	<b>178</b>
6.12.1	ANÁLISIS CUALITATIVO	179
6.12.2	ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS	180
6.12.3	MEDIDAS PARA MITIGAR LOS RIESGOS	181
<b>6.13</b>	<b>ORGANIGRAMA</b>	<b>183</b>
<b>6.14</b>	<b>MATRIZ DE RESPONSABILIDADES</b>	<b>184</b>
<b>6.15</b>	<b>EVALUACIÓN DEL MERCADO</b>	<b>184</b>
6.15.1	COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA	187
6.15.2	CANTIDAD DE CONSUMIDORES	187
6.15.3	COMPORTAMIENTO DE LA OFERTA	189

6.15.4 BARRERAS DE ENTRADA	189	
6.15.5 ESTRUCTURA DEL MERCADO	190	
<b>6.16 DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS</b>		<b>191</b>
<b>6.17 ESQUEMA PROPUESTO DE TARIFAS</b>		<b>192</b>
<b>6.18 PROYECCIÓN FINANCIERA</b>		<b>193</b>
<b>6.19 PLAN DE DIFUSIÓN</b>		<b>196</b>
6.19.1 ESTRATEGIA DE DISTRIBUCIÓN	196	
6.19.2 ESTRATEGIA DE VENTAS	197	
6.19.3 ESTRATEGIA DE PROMOCIÓN	197	
6.19.4 ESTRATEGIA DE SERVICIO	198	
<b><u>7. CONCLUSIONES</u></b>		<b><u>200</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</u></b>		<b><u>204</u></b>

**Anexos**

**Tomo II, CD Adjunto**

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pagina</b>
Figura 1- Comparación de la eficiencia entre sectores productivos	24
Figura 2. Curva de MacLeamy. Influencia de costos en las etapas constructivas.	32
Figura 3. Modelo 3D proyectado en 2D	39
Figura 4. Espacio realidad virtual inmersiva EAFIT-CIDICO	40
Figura 5. Modelación aumentada	41
Figura 6. Esquema de localización de cámaras para generar visión estereoscópica.	43
Figura 7. Angulo óptico	44
Figura 8. Angulo visual	44
Figura 9. HMD	46
Figura 10. Sistema de proyección trasera	48
Figura 11. Sistema reflectado de proyección	48
Figura 12. CAVE®.	49
Figura 13. Esquema de funcionamiento dispositivos ópticos auxiliares para CAVE®	50
Figura 14. Pitch, yaw y roll	51
Figura 15. Panorama de Edimburgo por Barker, 1787	52
Figura 16. Panorama de Leicester Square – Londres, 1789	52
Figura 17. Estereoscopio desarrollado por Charles Wheatstone.	53
Figura 18. Proyección de imágenes estereoscópicas por Claudet.	54
Figura 19. The link Flight Trainer, 1929	54
Figura 20. Maquina Sensorama	55
Figura 21. Head Mounted Display (HMD) Ivan Sutherland, 1968	56
Figura 22. Guantes sensitivos, DataGlove por VLP Research Inc	57
Figura 23. Cave Automatic Virtual Environment –CAVE- Universidad de Illinois	57

Figura 24. Modelación en 4D realizada por Zampaio & Heriques	59
Figura 25. Imagen modelo de obras de infraestructura	62
Figura 26. Imagen modelo teatro de la Opera. Sidney	63
Figura 27. Pantalla para prueba piloto	67
Figura 28. Proyectores utilizados en prueba piloto	68
Figura 29. Equipos utilizados en prueba piloto.	68
Figura 30. Proyección modelos previos en prueba piloto.	69
Figura 31. Pantalla Stewart Filmscreen 160”x 100”	70
Figura 32. Proyector LG 3D.	71
Figura 33. Cámara Optitrack	72
Figura 34. Marcadores	72
Figura 35. Sistema de posicionamiento instalado	73
Figura 36. Sistema de posicionamiento instalado	73
Figura 37. Proceso de adecuación aula	73
Figura 38. Proceso de adecuación eléctrica aula	74
Figura 39. Adecuación paredes	74
Figura 40. Cortinas enrollables.	74
Figura 41. Secuencia fotográfica instalación pantalla.	76
Figura 42. Posición del proyector en el espacio.	76
Figura 43. Prueba foco del proyector	77
Figura 44. Proyector Instalado en Aula de RVI	77
Figura 45. Estado actual aula 1	78
Figura 46. Estado actual aula 2	78
Figura 47. Calibración del sistema de posicionamiento espacial	79
Figura 48. Modelado Bloque de ingenierías Universidad EAFIT en REVIT ARCHITECTURE <sup>R</sup>	83
Figura 49. Planta de cimentación bloque de ingenierías Universidad EAFIT	84
Figura 50. Planta primer piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	85
Figura 51. Planta mezanine bloque de ingenierías Universidad EAFIT	85

Figura 52. Planta segundo piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	86
Figura 53. Planta tercer piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	86
Figura 54. Planta cuarto piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	87
Figura 55. Planta quinto piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	87
Figura 56. Planta sexto piso bloque de ingenierías Universidad EAFIT	88
Figura 57. Pisos séptimo y octavo bloque de ingenierías Universidad EAFIT	88
Figura 58. Planta arquitectónica sótano edificio de ingenierías Universidad EAFIT	89
Figura 59. Imagen acabado modelo bloque de ingenierías Universidad EAFIT	89
Figura 60. Imagen acabado interno modelo bloque de ingenierías Universidad EAFIT	90
Figura 61. Imagen acabado externo modelo bloque de ingenierías Universidad EAFIT	90
Figura 62. Inicio proceso constructivo edificio Ingenierías. Excavación	91
Figura 63. Proceso constructivo edificio Ingenierías. Excavación y primeras pilas	91
Figura 64. Proceso constructivo edificio Ingenierías. Ejecución de losas	92
Figura 65. Proceso constructivo edificio Ingenierías. Losas y formaletería de columnas	92
Figura 66. Proceso constructivo edificio Ingenierías. Elaboración pisos superiores	93
Figura 67. Proceso constructivo edificio Ingenierías. Edificio culminado.	93
Figura 68. Terreno edificio Entreparques	94
Figura 69. Planta sótano edificio Entreparques	95

Figura 70. Planta acceso edificio Entreparkes	96
Figura 71. Planta tipo edificio Entreparkes	96
Figura 72. Fachada lateral edificio Entreparkes	97
Figura 73. Vista 3D edificio Entreparkes	97
Figura 74. Modelizado 3D edificio Entreparkes	98
Figura 75. Modelación topografía del terreno puente Laguneta	99
Figura 76. Modelación subestructura puente Laguneta	99
Figura 77. Modelación superestructura puente Laguneta	100
Figura 78. Modelación puente Laguneta	100
Figura 79. Modelación puente Laguneta	101
Figura 80. Modelado y simulado de la obra de infraestructura realizada en REVIT. Puente Laguneta.	101
Figura 81. Modelado arquitectónico primer piso prueba # 1.	102
Figura 82. Modelado arquitectónico segundo piso prueba # 1.	103
Figura 83. Modelado arquitectónico planta techo prueba # 1.	103
Figura 84. Modelado arquitectónico fachada lateral prueba # 1.	104
Figura 85. Modelado arquitectónico fachada principal prueba # 1.	104
Figura 86. Modelado arquitectónico cortes prueba # 1.	105
Figura 87. Modelado arquitectónico cortes 2 prueba # 1.	105
Figura 88. Modelado estructural planta cimentación prueba # 1.	106
Figura 89. Modelado estructural losa prueba # 1.	106
Figura 90. Modelado estructural vigas de techo prueba # 1.	107
Figura 91. Modelo en 3D Estar segundo piso prueba # 1.	107
Figura 92. Modelo en 3D baño principal prueba # 1.	108
Figura 93. Modelo en 3D vista general prueba # 1.	108
Figura 94. Renderizado cocina prueba # 1.	109
Figura 95. Renderizado comedor prueba # 1.	109
Figura 96. Renderizado alcoba prueba # 1.	110
Figura 97. Renderizado modelo prueba # 1.	110
Figura 98. Planta arquitectónica primer piso prueba # 2.	111

Figura 99. Planta arquitectónica piso tipo prueba # 2.	111
Figura 100. Planta estructural primer piso prueba # 2.	112
Figura 101. Planta estructural piso tipo prueba # 2.	112
Figura 102. Vista frontal modelo prueba # 2.	113
Figura 103. Vista lateral modelo prueba # 2.	113
Figura 104. Corte generado a partir del modelo de la prueba # 2.	114
Figura 105. Modelo BIM 3D de la prueba piloto # 2.	114
Figura 106. Modelo BIM 3D de la prueba # 2. Vista B	115
Figura 107. Flujograma para proceso de modelación en EON	116
Figura 108. Importación desde 3DS max 2012	118
Figura 109. Imagen Script	119
Figura 110. Configuración 3D	120
Figura 111. Configuración 3D – 1	121
Figura 112. Configuración EON Viewer	122
Figura 113. Configuración estereo EON Viewer.	123
Figura 114. Configuración estereo EON Viewer -1	123
Figura 115. Árbol de simulación EON	125
Figura 116. Árbol de simulación para chequear la conexión del control	126
Figura 117. Esquema ruta de conexiones	126
Figura 118. Detalle instrucciones Xbox 360 en EON	127
Figura 119. Detalle de botones para navegación.	127
Figura 120. Proceso de generación archivo FBX	130
Figura 121. Proceso de importación en 3DS Max	131
Figura 122. Modelo en 3DS Max 2012	131
Figura 123. Modelo en 3DS Max 2011	132
Figura 124. Proceso de conversión a EON	132
Figura 125. Archivo convertido a EON	133
Figura 126. Apertura de modelo en EON	133
Figura 127. Modelo en EON	134
Figura 128. Modelo en EON edificio de ingenierías.	134

Figura 129. Modelo en EON edificio de ingenierías vista lateral	135
Figura 130. Modelo en EON edificio de ingenierías muro verde.	135
Figura 131. Modelo en EON edificio de ingenierías corredor ppal.	136
Figura 132. Modelo en EON edificio de ingenierías Acceso parqueaderos.	136
Figura 133. Modelo en EON edificio de ingenierías, mezanine.	137
Figura 134. Modelo en EON edificio de ingenierías vista hacia mezanine.	137
Figura 135. Modelo en EON edificio de ingenierías, detalle losa.	138
Figura 136. Modelo en EON edificio de ingenierías, detalle escaleras a mezanine.	138
Figura 137. Modelo en EON edificio de ingenierías, vista exterior.	139
Figura 138. Modelo en EON edificio de ingenierías, vista lateral.	139
Figura 139. Modelo en EON edificio de Entreparques	140
Figura 140. Modelo en EON edificio de Entreparques, vista interna	141
Figura 141. Modelo en EON edificio de Entreparques, detalle vigas	141
Figura 142. Modelo en EON edificio de Entreparques, detalle cocina	142
Figura 143. Modelo en EON Puente Laguneta	142
Figura 144. Modelo en EON Puente Laguneta, detalle baranda	143
Figura 145. Modelo en EON Puente Laguneta, detalle estribo 1	143
Figura 146. Modelo en EON Puente Laguneta, detalle estribo 2	144
Figura 147. Modelo en EON Puente Laguneta, vista aérea	144
Figura 148. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, vista frontal	145
Figura 149. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, vista lateral	145
Figura 150. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, Acceso	146
Figura 151. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, Sala	146
Figura 152. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, Comedor	147
Figura 153. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, Cocina	147
Figura 154. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, Alcoba ppal	148
Figura 155. Modelo en EON Casa tipo Modelo 1, detalle baño	148

Figura 156. Modelo en EON edificio modelo 2	149
Figura 157. Modelo en EON edificio modelo 2, detalle cocina	149
Figura 158. Modelo en EON edificio modelo 2, detalle hall	150
Figura 159. Modelo en EON edificio modelo 2, detalle balcón	150
Figura 160. Modelo en EON edificio modelo 2, detalle losa	151
Figura 161. Modelo en EON edificio modelo 2, detalle baño	151
Figura 162. Publicación resultados en periódico Vivir en el Poblado	152
Figura 163. Publicación resultados en periódico sección de economía El Colombiano.	153
Figura 164. Publicación resultados en Teleantioquia	154
Figura 165. Publicación resultados en Telemedellín	155
Figura 166. Publicación resultados por parte de la agencia de noticias de EAFIT	156
Figura 167. Imágenes del exterior e interior del modelo 1 virtual en el programa EON Studio.	159
Figura 168. Imágenes del exterior e interior del modelo 2 virtual en el programa EON Studio.	159
Figura 169. Aspecto prueba método tradicional	162
Figura 170. Aspecto prueba Realidad Virtual	162
Figura 171. Prueba método Realidad Virtual	163
Figura 172. Localización Lab. de Realidad Virtual Inmersiva EAFIT CIDICO.	176
Figura 173. Cronograma propuesto para ejecución de proyectos.	177
Figura 174. Análisis cualitativo riesgos naturales.	179
Figura 175. Análisis cualitativo amenazas tecnológicas.	179
Figura 176. Análisis cualitativo amenazas sociales.	180
Figura 177. Análisis cuantitativo de riesgos.	180
Figura 178. Organigrama propuesto.	183
Figura 179. Área aprobada para construcción en Antioquia	185
Figura 180. Déficit de vivienda en Colombia por departamentos.	186

Figura 181. Crecimiento PIB	186
Figura 182. Área aprobada VIS y no VIS.	188
Figura 183. Estructura del mercado objetivo.	190

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pagina</b>
Tabla 1. Factores influyentes en el uso de BIM	34
Tabla 2. Aspectos consultados a los ejecutores	163
Tabla 3. Respuestas caracterización de la muestra estudiada	164
Tabla 4. Empresas universo. Datos referenciados de CCMA, base de registro mercantil 2009 y 2011	171
Tabla 5. Descripción días de modelación	175
Tabla 6. Mitigación de riesgos.	179
Tabla 7. Matriz responsabilidades.	182
Tabla 8: Proyección financiera RVI	193

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1 Video aplicabilidad metodología 4D.
- Anexo 2 Video de la proyección del modelo en la pantalla de gran formato y prueba de aplicabilidad con industrial.
- Anexo 3 Difusión en medios escritos.
- Anexo 4 Artículo publicado en ELAGEC 2011. ISBN 978-956-14-1216-3.
- Anexo 5 Programa ELAGEC 2011.
- Anexo 6 Análisis estadísticos pruebas de usuario
- Anexo 7 Detalles ejecución pruebas de usuario.
- Anexo 8 Modelación económica servicio.

## GLOSARIO

2D: Termino que define dibujos en dos dimensiones perpendiculares entre si (x,y)

3D: Termino que define dibujos o modelos en tres dimensiones perpendiculares entre si (x,y.z)

4D: Termino que define modelos en tres dimensiones perpendiculares entre si (x,y,z) a los cuales se les involucra mediante software especializado el factor tiempo (t)

ABSTRACCIÓN: Acción intelectual por la cual a partir de una información dada se genera otra más completa que la primera.

CAMPO DE ACCIÓN: Espacio de aplicación de una metodología o una tecnología.

ENCADENAMIENTOS: Serie o conjunto de entidades o empresas que interactúan para aumentar su competitividad y/o productividad.

ENGAÑAR LOS SENTIDOS: Generar en el observador sensaciones reales a partir de situaciones irreales.

FILTRAR LA INFORMACIÓN: Separar la información para mejorar su interpretación.

INTERFERENCIAS ENTRE DISEÑOS: Inconsistencias entre diseños de un mismo proyecto que impiden la correcta construcción de los mismos.

LIBRERÍAS DE CÓDIGO ABIERTO: Software por el cual no se requiere pagar derechos de autor y por lo tanto es de libre utilización.

MODELACIÓN: Representar de la manera mas real un objeto o una idea.

MODELO PARAMÉTRICO: Modelación que involucra información técnica de los elementos o entidades que se representan.

PLANO COLINEAL: Superficies que se encuentran a igual distancia del espectador en la misma dirección de observación.

REDES VITALES: Conjunto de instalaciones por las cuales se transportan recursos indispensables para garantizar la habitabilidad de un espacio.

TIC: Tecnologías de la información y las comunicaciones.

TRABAJO COLABORATIVO: Acción conjunta de varios seres con un fin común.

## RESUMEN

El presente trabajo describe los procedimientos requeridos y los desarrollos realizados para implementar ambientes virtuales inmersivos basados en modelos paramétricos BIM en proyectos de ingeniería en un espacio propicio para proyectar e interactuar con imágenes virtuales estereoscópicas y su aplicación para el sector de la construcción en Colombia. En él se presentan los conceptos relevantes requeridos para la apropiación de la tecnología, algunos casos de aplicación en el ámbito internacional, la definición de las características del sistema implementado por la Alianza Estratégica EAFIT – CIDICO con el objeto de brindarle al sector una herramienta que facilite la toma de decisiones en las etapas de diseño, planeación, ejecución y en general en el ciclo de vida de los proyectos de construcción, aplicando metodologías que permitan realizar trabajo colaborativo entre especialidades de tal manera que con ello se minimicen los posibles conflictos gracias a la mejora de la visualización de los proyectos, incrementando con ello la competitividad del sector. Finalmente se estudia la posibilidad de incluir la prestación de servicios de modelado virtual inmersivo en el portafolio de servicios de la Alianza EAFIT CIDICO.

**Palabras Clave:** BIM, MODELADO 3D-4D, REALIDAD VIRTUAL, ESTEREOCOPIA, CONSTRUCCIÓN, INMERSIVA, COLABORATIVO, CAVE.

## INTRODUCCIÓN

La construcción ha sido, es y será uno de los pilares sobre los cuales se genera el progreso de los países, propicia el desarrollo, dinamiza el empleo y permite mejorar la calidad de vida de los seres que se ven afectados por ella.

Los procesos constructivos si bien han evolucionado con el tiempo, aun son susceptibles de mejorar con el desarrollo y aplicación de nuevos materiales y procedimientos. Uno de los procesos que se puede optimizar con la ayuda de la tecnología es la comprensión de las obras a construir en las etapas previas, de manera que al llegar el instante de edificar se tenga un amplio conocimiento de los procesos que se deben ejecutar y el preciso momento en que se deben desarrollar.

Desde los principios de la construcción moderna, los hombres han pretendido plasmar sobre superficies información tendiente a facilitar los procesos constructivos, se han esforzado por tratar de representar lugares distantes de manera que estén al alcance de los habitantes locales, con lo cual se contribuyó al desarrollo de las artes graficas.

Es así como desde el siglo XIX los pintores se esforzaban en representar imágenes de manera que las personas que las observaban imaginaban que se encontraban presentes en el sitio representado. Actualmente dicha técnica se encuentra bastante desarrollada y la misma es utilizada para ayudar al desarrollo de gran cantidad de ciencias, desde las graficas pasando por la medicina hasta llegar actualmente a la construcción.

El presente trabajo hace un recorrido desde los inicios de la utilización de la simulación de escenas hasta la implementación de ellas en las situaciones reales con el objetivo de simular posibles hechos, de tal forma que permita estudiarlas antes que ellas sucedan y su aplicación a la ingeniería civil.

El desarrollo del tema se inicia planteando la necesidad de implementar mejoras en los procesos constructivos, mejoras que permitan tener un mayor conocimiento de las situaciones futuras de manera que se puedan optimizar los procedimientos y así se incremente la productividad del sector, paso seguido y entrando en materia investigativa se realiza un estudio de los elementos técnicos que influyen en la generación y visualización de imágenes tridimensionales estereoscópicas que puedan ser utilizadas para el beneficio del sector de la construcción objeto fundamental del presente trabajo. En ese capítulo se desarrollan temas tanto de visualización como de manejo de información técnica en modelos realizados en computador iniciando con el estudio de la metodología BIM, la modelación en 3D y 4D hasta la definición de realidad virtual y sus diversos tipos así como el estudio de los instrumentos necesarios para su correcta visualización.

Posteriormente se hace un recorrido cronológico que describe desde los inicios de la realidad virtual hasta la aplicación que ella ha tenido en diversos sectores incluido el constructor. Paso seguido se plantea la manera de implementar los conceptos de la realidad virtual en el sector de la construcción y la posibilidad de utilizar la metodología para implementarla en las empresas del sector en Medellín utilizando la infraestructura disponible para ello de propiedad de la Alianza EAFIT – CIDICO. Asociación creada por la universidad EAFIT y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Industria de la Construcción CIDICO con el objeto de poner al servicio del sector de la construcción productos de investigaciones conjuntas que por su madurez son susceptibles de comercializar.

Se describen igualmente las actividades realizadas para generar capacidades para la prestación de servicios de modelado virtual que faciliten las labores de diseño y construcción obras de infraestructura y vivienda, Para ello se presenta el procedimiento utilizado para generar modelos en 3D y 4D de proyectos de construcción basados en metodologías BIM y la transformación de ellos en modelos de realidad virtual inmersiva que permitan la interacción de los

proyectistas con el modelo a construir. Para validar la metodología y las capacidades desarrolladas se presentan los resultados de la prueba de validación ejecutada con lo cual se pretende soportar la introducción de una metodología que modificará de manera substancial la forma de realizar las labores de coordinación de proyectos antes de iniciar construcción, mejorando con ello los niveles de productividad de las empresas que accedan a los servicios a prestar por la Alianza EAFIT CIDICO propietarios de la infraestructura generada con éxito.

Finalmente se plantea la forma de involucrar los resultados obtenido en el portafolio de servicios que presta la Alianza formada por la universidad EAFIT y el centro de investigación y desarrollo de la industria de la construcción CIDICO.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la industria de la construcción es reconocida como práctica general que los diferentes diseñadores entreguen los planos de los proyectos en dos dimensiones (2D) al equipo de construcción del proyecto. Algunas aplicaciones de modelado en tercera dimensión (3D) son utilizadas pero principalmente con intenciones comerciales, desperdiciando de esta manera las herramientas de visualización que facilitan el entendimiento del proyecto, que permiten la coordinación de planos, la planificación de los trabajos de manera secuencial y en general un adecuada gestión de las labores realizadas comunmente por diferentes especialistas, que generalmente provocan una alta fragmentación en la información del proyecto atentando contra la correcta ejecución del mismo. La utilización de metodologías basadas en 3D permite evitar errores de común ocurrencia, que generan un alto impacto en los costos en la fase de construcción del proyecto. Hoy en día la tecnología BIM (Building information modeling), modelado virtual o construcción virtual, con la cual se representa virtualmente en tres o cuatro dimensiones el proyecto en estudio con modelos que contienen información relevante de costos, materiales, especificaciones y duración del proyecto se presenta como una interesante opción para lograr mejores resultados en la gestión de los proyectos tanto en las etapas iniciales del mismo como en las etapas de construcción e inclusive en la vida útil del proyecto a realizar.

Actualmente el sector de la construcción en Colombia se caracteriza por la poca utilización de tecnologías de información que permitan optimizar los procesos y obtener mejores resultados; adicionalmente el sector se caracteriza por la alta fragmentación de las labores tanto en etapas previas como en la etapa de construcción con lo cual la posibilidad de ocurrencia de los errores es alta, mas aun, con el creciente nivel de especialización que requieren las obras que hoy en día se ejecutan.

Si bien estas herramientas no se encuentran ampliamente difundidas en el medio y su aplicación es reciente, la tecnología continúa avanzando y ofreciendo posibilidades que permiten mejorar la visualización de un proyecto. La realidad virtual, definida como una experiencia en la que una persona es rodeada por un modelo en tres dimensiones generado en una computadora con el que puede interactuar desplazándose a través de él y verlo desde diferentes ángulos, (D. Greenwood et al, 2008) ofrece inmensas posibilidades para mejorar la visualización de proyectos complejos de construcción de infraestructura y edificación con el fin de facilitar los procesos de diseño planificación y control de su ejecución. El estudio que se presenta responderá al interrogante sobre el beneficio de la utilización de ambientes de realidad virtual a partir de modelos virtuales en 3D y 4D en los procesos de diseño, planificación y control de obra y permitirá la incorporación de un nuevo servicio que se vinculará al portafolio de la Alianza EAFIT CIDICO.

La pertinencia del estudio es alta, ya que el actuar sobre procesos de un sector que económicamente puede alcanzar cifras cercanas al 9% como participación en el PIB del país, representa un importante aporte a la economía de las empresas del sector y a la del país, con lo cual los beneficios podrán ser de carácter general.

## 2. JUSTIFICACIÓN.

El sector de la construcción en Colombia genera un alto impacto en la economía del país. Se estima un 9% de contribución al PIB con sus encadenamientos hacia sectores relacionados y ocupación de aproximadamente 6% de la población empleada (Pinto de De Hart, Martha, CAMACOL, 2009). No obstante estas cifras que demuestran el alto impacto en la economía del país, la construcción se caracteriza por un grado de desempeño inferior a otros sectores industriales en variables como la calidad del producto, la seguridad industrial, el impacto ambiental y el cumplimiento de plazos. Proyectos de investigación realizados anteriormente en el sector como Benchcolombia<sup>1</sup> y GICO<sup>2</sup> entre otros demuestran la influencia de la deficiencia en el proceso de planificación y diseño de proyectos en los desempeños del sector, situación generada en la cada vez mayor complejidad de los mismos, disminución de los plazos de ejecución e informalidad del sistema de producción.

Igualmente en Colombia hay una escasa inversión en investigación y desarrollo con valores inferiores al 0.2% del PIB como lo arrojan los indicadores presentados por el Banco Mundial<sup>3</sup> con lo cual se puede deducir, que tanto el sector de la construcción como otros sectores en Colombia presentan en general una escasa apropiación de los desarrollos tecnológicos y TIC normalmente utilizadas con éxito en otras latitudes, desaprovechando una gran oportunidad de mejorar sus desempeños. Los modelos BIM y la realidad virtual pueden aportar al entendimiento de proyectos de construcción, facilitando las fases de diseño planificación y ejecución, mejorando el desempeño final del proyecto al detectar en fases previas a la construcción incoherencias en la secuencia constructiva,

---

<sup>1</sup> Implementación del programa de mejoramiento en gestión y sistema de referenciación (Benchmarking) para el sector de la construcción.

<sup>2</sup> Gestión integrada de construcción.

<sup>3</sup> <http://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>

interferencias entre diseños de diferentes especialistas provocadas generalmente por fallas en las comunicaciones entre intervinientes y mejorando la visualización que permita una correcta y oportuna toma de decisiones repercutiendo en una optima ejecución del proyecto.

Es igualmente interesante plantear que las transformaciones tecnológicas se dan asociadas a diferentes tipos de motivaciones o iniciativas fundamentandosen basicamente en las necesidades de mejoramiento del desempeño en los sectores industriales. Es bien sabido que la construcción, a diferencia de la manufactura presenta grandes oportunidades de mejoramiento de su eficiencia como lo muestra Robert Anderson de la empresa Nemetschek Vectorworks en su estudio basado en datos del NIBS en el año 2009 (Figura 1), mediante la optimización de los recursos requeridos en la ejecución de los proyectos y del sistema de control de pérdidas.

Las nuevas tecnologías de modelación virtual de los proyectos incrementan la calidad de los diseños, facilitan la estimación de costos, disminuyen los errores en el proceso constructivo, y propician la disminución de tiempos de ejecución gracias a la posibilidad de aumentar la comunicación entre especialidades, mejorando la visualización del proyecto.

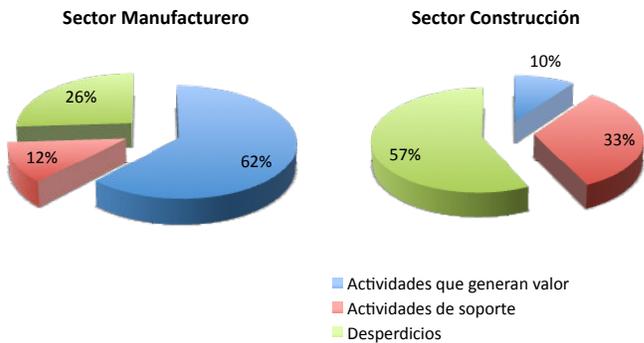


Figura 1- Comparación de la eficiencia entre sectores productivos

Fuente: An introduction to the IPD Workflow for Vectorworks BIM users Robert Anderson, VP Integrated Practice, Nemetschek Vectorworks, 2010

Según estudios realizados, actualmente la implementación de tecnologías BIM (Building Information Modeling) y de la realidad virtual<sup>4</sup> si bien incrementan los costos iniciales del proyecto (Fernández et al, 2006) ya que se requiere una mayor inversión en las etapas de concepción y del diseño, a mediano plazo a partir de la etapa de construcción y durante el ciclo de vida del proyecto los costos asociados a la implementación de la metodología serán menores que los convencionales facilitando con ello la aplicación de la metodología en cuanto al aspecto económico.

Adicionalmente se ha encontrado que el uso de los medios digitales incluida la RV en proyectos complejos, ayudan a entender el proyecto y facilitan su proceso constructivo permitiendo tomar decisiones trascendentales antes de iniciar la fase de ejecución con los concernientes beneficios en tiempo y costo (Fernández et al, 2006).

Al ser un proceso altamente especializado y novedoso para el país, se plantea implementar la metodología generando un nuevo servicio por parte del Centro de Investigación y Desarrollo para la industria de la construcción CIDICO quien conjuntamente con la Universidad EAFIT constituyeron una alianza estratégica que pretende comercializar productos tecnológicos provenientes de investigaciones conjuntas que poseen grandes potenciales comerciales como el presentado en este estudio. La implementación de la tecnología estudiada aumentará la capacidad del Centro de Investigación y de la Alianza EAFIT CIDICO facilitando la prestación de servicios asociados al sector, mejorando la competitividad de las empresas y contribuyendo a la sostenibilidad del centro gracias a la incorporación de este nuevo producto al portafolio de servicios que actualmente comercializa dicha alianza.

---

<sup>4</sup> RV a partir de este momento en este trabajo

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar la infraestructura y la capacidades necesarias para la prestación de servicios al sector de la construcción utilizando ambientes de realidad virtual que faciliten y mejoren los procesos de diseño, planificación y control de la construcción de edificaciones e infraestructura a partir del modelado BIM (Building Information Modeling).

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Desarrollar modelos CAD 4D utilizando tecnologías BIM (Building Information modeling) en proyectos de construcción de infraestructura y edificaciones.
- A partir de modelos BIM, desarrollar ambientes de realidad virtual inmersiva, que permitan mejorar la visualización de proyectos de construcción para facilitar y mejorar su diseño, planificación y control.
- Realizar pruebas de uso y aplicación de ambientes virtuales con usuarios del sector de la construcción, para evaluar su impacto en los procesos de diseño, planificación y control de obra.
- Desarrollar una propuesta de prestación de servicios de modelado virtual y ambientes de realidad virtual para el sector de la construcción de edificaciones e infraestructura.

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **4.1 MARCO TEÓRICO**

Inicialmente se han abordado temas básicos sobre los conceptos que se relacionan directamente con la RV y con la metodología planteada para el desarrollo del presente proyecto. En este punto se investigaron bases de datos científicas y artículos publicados relativos a Computer Aided Design–CAD, diseños paramétricos, building information modeling–BIM, principios estereoscópicos, realidad virtual inmersiva, no inmersiva y aumentada e instrumentos o dispositivos para su visualización como HMD y CAVE entre otros de manera que permitan una mayor comprensión sobre el tema dándole un sustento técnico al mismo.

Para tener una idea clara de lo investigado, se desarrollaran a continuación cada uno de los anteriores aspectos.

#### 4.1.1 Computer Aided Desing – CAD.

El termino Computer Aided Design (CAD) o diseño asistido por computador, define el uso de herramientas basadas en TIC para los procesos de diseño y documentación de proyectos. Normalmente el uso de estas tecnologías se ha concentrado mas que en el diseño asistido por computador a un dibujo asistido por computador, usándose básicamente para el dibujo en 2D<sup>1</sup>, permitiendo a través de una interfaz gráfica manipular entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas y arcos entre otras, y los modeladores en 3D<sup>2</sup> que agregan superficies y sólidos (Duggal, 2000) dando una idea mas real de lo idealizado.

Esta tecnología se empezó a implementar en la industria de la construcción en los años 80 mediante la utilización de programas de computador basados en la vectores gráficos como líneas, arcos, etc. (Greenwood et al, 2008). Sin embargo como se planteó anteriormente, esta tecnología se utilizó para dibujar en un computador lo que antes se realizaba en papel con la ayuda de lápices y no para lo que fue originalmente creada, diseñar.

Ya en la época de los 90 comenzó la verdadera implementación de el termino CAD mediante el desarrollo de aplicaciones basadas en datos paramétricos, en los cuales en vez de generar un archivo simplemente con líneas, se introducían datos que definían las propiedades, ya no de líneas, sino de los elementos constitutivos o entidades del proyecto logrando así implementar la utilización de diseños paramétricos que contenían información del proyecto a construir.

---

<sup>1</sup> Dos dimensiones medidas en una superficie plana (X,Y)

<sup>2</sup> Tres dimensiones medidas en una superficie espacial. (X,Y,Z)

#### **4.1.2 Diseños paramétricos**

Los diseños paramétricos integran la información y las reglas geométricas de todos los objetos del modelo permitiendo realizar modificaciones con repercusión en todos los aspectos constitutivos del mismo sin generar inconsistencias en él. Los objetos constitutivos del diseño paramétrico tienen la capacidad de incorporar atributos relacionados con el tipo de material, propiedades acústicas, costos y muchos otros que pueden ser exportados a otras aplicaciones o modelos (Eastman et al, 2008).

Estos procedimientos ya no implican simplemente el dibujo de entidades constitutivas sino la incorporación de información explicativa en él, permitiendo disponer de información importante al momento con las ventajas que ello representa como por ejemplo la toma de decisiones de manera rápida basadas en los resultados provenientes del modelo.

En los modelos paramétricos la geometría del elemento modelado y sus propiedades guardan una jerarquización por niveles y subniveles definiendo familias de elementos que son plenamente modificables y que interactúan con los demás elementos constitutivos de un proyecto.

#### **4.1.3 Building Information Modeling -BIM-**

El concepto de Building Information Modeling (BIM) planteado por su pionero Charles Eastman en la década del los setenta es la representación en medios digitales de los procesos de construcción con el fin de facilitar el manejo de la información y posibilitar el intercambio de la misma, procesos que no solo se enfocan en las etapas previas a la construcción, sino que pueden ser utilizadas en el desarrollo del ciclo de vida de proyecto y posterior edificación (Botero et al. 2010)

De igual manera Penttilä en el año 2006 plantea que Building Information Modeling (BIM) es un conjunto de políticas, procesos y tecnologías que generan una metodología para administrar los diseños esenciales de una edificación y su información en medio digital a través del ciclo de vida.

BIM permite simular el proyecto de construcción en un ambiente virtual a través del uso de un paquete de software haciendo posible experimentar y hacer ajustes previos a la ejecución (Kymmell, 2008) basándose en el modelado paramétrico que utilizando “ecuaciones numéricas, expresiones declarativas y valores nominales” (Lee, Sacks & Eastman, 2006) definían relaciones entre entidades geométricas.

Las empresas que trabajan la metodología BIM no solamente deben compilar la información de un desarrollo en un archivo digital. Deben aplicar un conjunto de desarrollos coordinados que colaboran en la comprensión de los ciclos de vida de la construcción objeto de análisis. BIM no es la utilización de una única herramienta; es la utilización coordinada de varias de ellas (Smith, Tardif, 2009) ya que desarrollar una sola que esté en capacidad de administrar todos los temas que se requieren en un proyecto la haría bastante complicada de operar y de lograrse su utilización, ella sería limitada desperdiciando gran cantidad de sus bondades (Smith, Tardif, 2009), adicionalmente BIM presenta una nueva manera de apreciar y de conceptuar sobre un proyecto a realizar.

El utilizar esta metodología plantea grandes beneficios para los intervinientes en las obras, beneficios que se pueden dividir según las necesidades de cada actuante de la siguiente manera:

Para los arquitectos facilita la generación, comprensión, comunicación y documentación de los proyectos aumentando la posibilidad de tener oportuna retroalimentación por parte de los demás intervinientes o actores en el proyecto.

Adicionalmente tienen la posibilidad de mejorar la comunicación de sus ideas a los posibles clientes y posteriormente a las dueños posibilitando una mayor viabilización de sus proyectos. Esta metodología les brinda la posibilidad de comprender la forma como afectan agentes externos el desempeño de un proyecto en específico permitiendo actuar sobre ellos de manera oportuna.

De igual manera los diseñadores de los demás componentes técnicos tienen con la aplicación de BIM la posibilidad de minimizar las abstracciones que frecuentemente deben realizar al pasar de diseños en dos dimensiones a construcciones en tres dimensiones, permitiendo compatibilizar y ajustar los diseños antes de empezar la construcción de los mismos, minimizando nuevamente las notas aclaratorias o correcciones que sobre la marcha comúnmente utilizadas hasta el momento.

Por su parte los constructores se benefician gracias a las posibilidades de visualización y comprensión que presenta la metodología, a la posibilidad de compartir información técnica de manera oportuna con los demás intervinientes en el proyecto y entre otros aspectos a la obtención de manera ágil y confiable de información técnica relativa a las características físicas y funcionales del proyecto (Botero et al. 2010) llegando inclusive a ser parte fundamental para un adecuado diseño energéticamente y/o ambientalmente eficiente.

De igual manera la aplicación de la metodología es ampliamente benéfica para los dueños o inversionistas de los proyectos ya que permite una reducción de costos totales del mismo pues al mejorar la calidad del diseño lo cual se logra gracias a las posibilidades generadas por su utilización, permite tener un menor nivel de incertidumbre en la etapa constructiva como lo demuestra el análisis presentado por Patrick MacLeamy en la reunión general de BIM realizada por la

AIA<sup>3</sup> en el año 2005 (Figura 2) en la cual se aprecia claramente que si bien los recursos que se deben invertir para la aplicación de la metodología en las etapas tempranas del proyecto son mayores que los requeridos con los métodos tradicionales, su influencia en las etapas posteriores del proyecto compensan los costos garantizando un ahorro en ellos al terminar la etapa de construcción, gracias al menor nivel de incertidumbre y a una menor necesidad de recambios sobre la marcha de la construcción del proyecto, etapa en la que normalmente realizar cualquier modificación repercute importantemente en sus costos, aumentando notablemente los mismos.



Figura 2- Curva de MacLeamy. Influencias de los costos en las etapas del proyecto BIM vs. tradicional.

Fuente: An introduction to the IPD Workflow for Vectorworks BIM users Robert Anderson, VP Integrated Practice, Nemetschek Vectorworks

Este ahorro en costos en las etapas del ciclo de vida del proyecto resulta como causa de la mejor información en los diseños previos logrado por la confiabilidad y facilidad de comprensión que brinda la metodología BIM, a la posibilidad de prefabricación gracias al amplio conocimiento que se tiene del

<sup>3</sup> AIA define por sus iniciales en inglés de la Asociación Americana de Arquitectos.

proyecto en las etapas tempranas del mismo y a la adaptación y adecuación del cronograma de trabajo que puede ser realizado con al utilización de la metodología planteada.

BIM permite modelar virtualmente cualquier tipo de objeto o entidad facilitando la comprensión del mismo. Es así como una muestra de la manera como se debe utilizar y sobre todo de las bondades de esta metodología y de los resultados que ella proporciona, queda plasmada con los procesos realizados por la firma Boeing para el diseño de su avión 777 en el cual los modelos provenientes del análisis aerodinámico en el túnel de viento fueron adecuados a los modelos que definían los demás aspectos constitutivos de la aeronave logrando con la compatibilización de la información generada y la experiencia del personal a cargo, una reducción importante de las ordenes de recambio en comparación con las obtenidas en modelos anteriores realizados siguiendo otros procedimientos.

La implementación de BIM requiere una estrategia de transformación cultural al interior de las empresas de manera que todos los intervinientes tengan la capacidad de enfrentar y superar sus diferencias en aras de imponer el bien general sobre el particular. Actualmente compartir información técnica en algunos casos se considera un riesgo para el que la suministra (Smith, Tardif, 2009), actuación que debe ser superada si se desea implementar esta metodología.

Adicionalmente hoy en día por la complejidad cada vez mas alta de los proyectos, estos no son documentados adecuadamente lo que atenta contra la comprensión y el perfeccionamiento de los sistemas constructivos (Smith, Tardif, 2009), contra la calidad de las obras entregadas, contra la productividad, así como generando hacia el usuario del sector una imagen inapropiada lo cual desmejora la competitividad que requieren las empresas para permanecer económicamente activas en el sector. La metodología BIM permite lograr una mejor y adecuada documentación de los proyectos que se emprenden con las ventajas que ello

conlleva. Adicionalmente BIM colabora con la comprensión y correcta interpretación tanto de los actores que intervienen en el proyecto como de los adquirientes del mismo.

Entre los beneficios que se alcanzan con la utilización de BIM en el sector de la construcción se pueden destacar los que fueron planteados por el SmartMarket Report realizado por la editorial McGraw Hill Construction en el año 2007. (Ver tabla 1)

Tabla 1. Factores influyentes en el uso de la metodología BIM

Mas tiempo para el diseño propiamente dicho y menos tiempo para ejecución de borradores	68%
Los propietarios de los proyectos lo solicitan	49%
Mejor comunicación con el grupo generador del proyecto	47%
La posibilidad de hacer modificaciones al instante con BIM	45%
Optimización de los costos	43%
Mejoramiento de la interoperabilidad	41%
Optimización de procesos informáticos	39%
Mejora en el control documental	38%
Presupuestos mas precisos	38%
Adecuación de cronogramas constructivos	37%
Capacidades de detección de interferencias y conflictos	33%
Disminución de las reclamaciones a las aseguradoras	31%
Mejora la planificación del proyecto	26%
Verificación del cumplimiento de códigos de construcción	25%
Sitios constructivos mas seguros	19%
Mejor utilización de herramientas de Lean Construction	16%

Fuente: McGraw Hill Construction Research and Analytics, 2007

Se destacan entre ellos la percepción de mejora en los procesos de diseño, mayor claridad en el manejo de la información y la posibilidad obtener los impactos que generan las modificaciones de una manera acelerada repercutiendo directamente en la obtención de resultados óptimos tanto para clientes como para proyectistas. De igual manera también se destacan como factores determinantes para la utilización de esta metodología la disminución de costos, la disminución de los riesgos que se le generan al personal ya que al tener conocimiento de ellos de manera previa a su aparición, se pueden tomar los correctivos del caso mitigando

así su ocurrencia. Se logra igualmente una optimización de costos en el *ciclo de vida*<sup>4</sup> del proyecto gracias entre otros aspectos, a la posibilidad de ajustar los cronogramas de ejecución y al mejoramiento con ello de los procesos constructivos dando como resultado final una mejora radical en la mano de obra requerida para la ejecución del proyecto y por ende de la calidad del mismo.

Otro de los grandes beneficios que tiene la implementación de la tecnología BIM es que gracias a que el modelo es el centro al cual confluyen todos los actores, ellos no necesariamente deben estar en el mismo lugar geográfico, posibilitando la participación de profesionales en diferentes áreas del conocimiento en diferentes partes del mundo para un proyecto específico (Smith, Tardif, 2009) manteniendo todos los participantes permanentemente informados con los últimos desarrollos realizados. Esta metodología por si sola no coordina la realización de los diferentes diseños, pero si ayuda a desempeñar el trabajo del coordinador quien tendrá en sus manos una herramienta hasta el momento inmejorable para ello.

La metodología BIM contribuye de manera especial a optimizar los procesos y disminuir el impacto de las reclamaciones de los usuarios en sus libros fiscales y en la imagen que proyectan hacia ellos.

Un campo de acción interesante para BIM es que la información resultante de los procesos iniciales como los de concepción, diseño y construcción, gracias a la forma metódica de organización que provee, pueden ser utilizados por los administradores finales de los proyectos quienes son los encargados de velar por su adecuado desempeño ya que es posible integrar los modelos existentes y utilizados en las etapas iniciales, con los sistemas de control de la edificación de

---

<sup>4</sup> Indica los tiempos generados desde la preconcepción del proyecto hasta la etapa de demolición y disposición final de residuos.

manera que trabajen coordinadamente y que arrojen resultados en tiempo real facilitando una acción pertinente y oportuna logrando con ello una eficiencia en costos de operación y mantenimiento de ella así como una adecuada planeación de las acciones de mantenimiento a lo largo de la vida útil (Smith, Tardif, 2009).

La metodología BIM permite al usuario disponer de un elevado volumen de información al instante disponiendo desde las tradicionales vistas en dos dimensiones (2D) pasando por las listas y tablas de materiales y cantidades de obra, hasta imágenes en tercera dimensión (3D), cuarta dimensión (4D) e inclusive la quinta dimensión (5D) pudiendo ser esta inclusive georeferenciada. (Botero, Acevedo, 2011).

Conceptualmente, las herramientas BIM están desarrolladas en modelos paramétricos basados en objetos que se representan con familias predefinidas, como muros, columnas, cielos, puertas, ventanas y demás elementos constitutivos de una estructura. Una estructura diseñada bajo la metodología BIM esta conformada por un conjunto de objetos que constituyen un modelo dimensionado y representado gráficamente en tercera dimensión (3D). La metodología para la visualización en 3D data desde principios del siglo XXI cuando Kamat VR y Martínez JC en el año 2001 plantearon la primera versión general de la metodología en la cual se trabajaban separadamente el software para modelar en 3D y el software para realizar las simulaciones, logrando con ello visualizar las operaciones de construcción espacial y cronológicamente. Fue así como surge el termino 4D en el cual los elementos constitutivos del modelo están vinculados a la programación de construcción, proceso que inicialmente era altamente complicado y dispendioso lo cual en sus inicios no habló muy bien de la metodología pero este inconveniente se supero rápidamente logrando vincular los objetos del modelo en 3D con las cantidades de obra enlazando estas a la programación permitiendo que

al seleccionar algún objeto se pudiera inmediatamente tener un valor estimado de cantidades asociadas al mismo.

#### **4.1.4 Realidad Virtual (RV)**

La RV se define como la creación mediante el uso de dispositivos tecnológicos de objetos o situaciones no reales pero que son aceptadas como tal por los observadores (S.C-Y.Lu et al, 1999).

El termino RV en el sector de la construcción es definido por algunos autores como la visualización en tiempo real a través de un modelo de computador de un ambiente construido (D. Greenwood et al, 2008). Hoy en día la RV se utiliza para visualizar y comprender los ambientes requeridos por medio de la animación de las situaciones a desarrollar en las diferentes etapas de evolución de un proyecto con el fin de brindar beneficios económicos y/o administrativos a los intervinientes del mismo, convirtiéndose esta metodología en un elemento más de información y comunicación al interior de las empresas, facilitando la consecución de los objetivos planteados.

La RV puede dividirse en las siguientes clases:

##### **4.1.4.1 RV no Inmersiva.**

La RV no inmersiva es aquella que se logra principalmente a través de la modelación de los proyectos utilizando programas de computador que permiten una visualización tridimensional. Dicha modelación le permite interactuar al observador con el modelo en tiempo real a través de monitores o superficies de proyección (Rosen et al, 2001) pero se abstiene de brindar al observador la sensación de presencia en dicha escena debido a la ausencia del hardware especial (Ramos et al, 2007). Es básicamente la proyección de una escena en tres dimensiones a través de un sistema de visualización apto para proyectar en dos dimensiones. Figura 3.

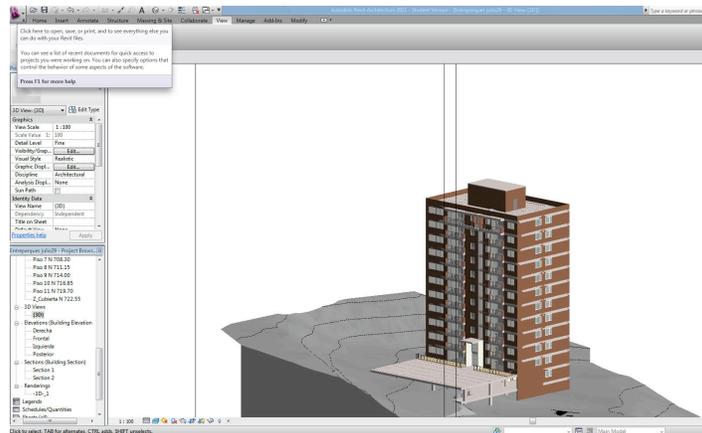


Figura 3. Modelo 3D proyectado en 2D

#### 4.1.4.2 RV Inmersiva

La RV inmersiva es aquella en la que por medio de espacios tridimensionales generados por computador, el usuario puede interactuar en tiempo real con el modelo desarrollado, produciendo en él como usuario, la sensación de estar inmerso en la imagen proyectada con la opción de acceder a espacios normalmente inaccesibles o con gran contenido de riesgo, pudiendo modificar los hechos que allí ocurren tomando decisiones que de otra manera serían complicadas y/o potencialmente inseguras.

Los ambientes inmersivos se caracterizan por generar en el público la sensación de presencia en la escena gracias a la utilización de dispositivos ópticos que permiten observar tridimensionalmente la imagen proyectada y dispositivos lumínicos que permiten determinar de manera precisa la posición del observador dentro del ambiente proyectado en escala real (1:1). Se permite con estos sistemas darle al observador o interactuante libertad y amplitud en sus movimientos (Ramos et al, 2007), inclusive llegando en determinadas situaciones a poder sentir a través del tacto gracias a la utilización de guantes electrónicos o brazos robóticos electromecánicos en el ambiente virtual generado. Es común que

para lograr esta inmersión se incrementa la sensación de presencia con el uso de sonidos envolventes que ambientan la imagen proyectada (S.C-Y. Lu et al, 1999).

Las imágenes proyectadas en los ambientes virtuales son logradas gracias a la superposición de dos de ellas, permitiendo generar el ambiente estereoscópico requerido; dichas imágenes y dicho efecto se obtiene mediante la utilización de programas de computador basados en código abierto o libre o mediante la utilización de programas comerciales (Ramos et al, 2007). Con los primeros se logran desarrollos iniciales a muy bajo costo ya que por su naturaleza se encuentran disponibles en el medio sin necesidad de retribuir económicamente a sus desarrolladores, sin embargo dichas herramientas requieren de gran cantidad de horas de trabajo para su adecuación que sumadas a las limitaciones propias de los programas o librerías libres que pueden llegar a restringir las opciones de visualización, llegan a equiparar o inclusive a sobrepasar el valor de los segundos.

Estos ambientes virtuales inmersivos permiten que la mente humana y las funciones sensoriales trabajen coordinadamente con los ambientes creados a través del computador permitiendo generar sensaciones iguales a las que se presentarían en la vida real. Figura 4.



Figura 4. Espacio realidad virtual inmersiva EAFIT - CIDICO

#### 4.1.4.3 Realidad Aumentada

La realidad aumentada es aquella en la cual el observador no se encuentra en capacidad de diferenciar si el ambiente en el cual se encuentra inmerso es o no real, logrando con ello engañar los sentidos del observador. Lo anterior se logra mediante la superposición de objetos generados por computador con graficas reales de objetos de igual manera como se aprecian en el mundo real (S. C-Y. Lu et al, 1999).

Por lo anterior, la realidad aumentada al requerir modelar menos objetos que en la RV, podría demandar menores requerimientos en cuanto a capacidades de desarrollo gráfico, lo cual genera menores costos para su aplicación haciéndose mas factible de implementar que la RV convencional, sin embargo su limitación fundamental es que requiere de un ambiente real para ambientar la información modelada, ambiente que es inmodificable permitiendo solamente manipular y modificar de forma parcial la imagen virtualizada con las limitaciones que ello conlleva. Sin embargo es útil para ciertos tipos de desarrollos. Figura 5.

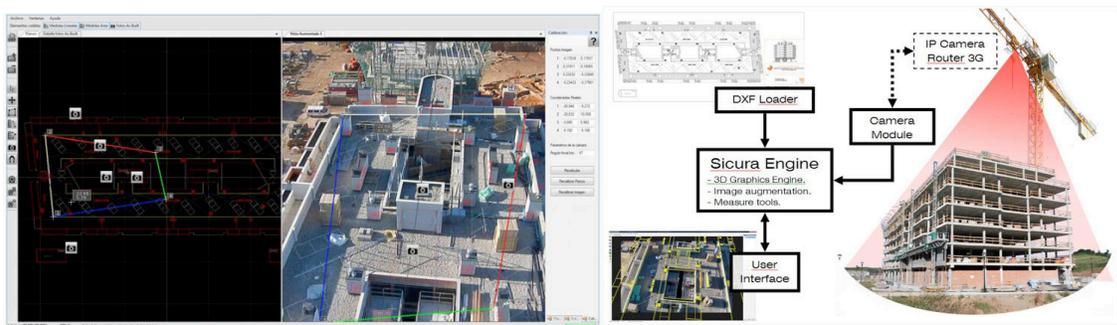


Figura 5. Realidad aumentada

Fuente: IRTIC. Universidad de Valencia, España.

#### 4.1.5 Fundamentos de la Estereoscopía

El termino estereoscopía define, según lo expresó el científico Charles Wheatstone en su obra "*Contributions to the Physiology of Vision*" publicada en 1938, como la sensación de profundidad que se aprecia de un objeto gracias a las pequeñas diferencias entre las imágenes que se proyectan de un mismo objeto a los dos ojos de un observador, generando una sensación de profundidad y por ende la percepción de realismo en el observador.

La visión estereoscópica se logra mediante la proyección de dos imágenes bidimensionales del mismo objeto tomadas con consideraciones especiales como la separación de ambos instrumentos de toma, la distancia focal y el punto de convergencia el cual definirá la distancia a la cual puede ser apreciada la imagen generada con la sensación de profundidad deseada (Figura 6). Una de las imágenes será apreciada por el ojo izquierdo y la otra por el ojo derecho del observador de manera que su cerebro pueda mezclarlas logrando la sensación de profundidad, simulando la visión normal humana. Para que el cerebro humano pueda generar la sensación de profundidad a través de imágenes en dos dimensiones se requiere del uso de dispositivos ópticos que filtren la información que llega al observador, dispositivos como los HMD, gafas polarizadas entre otros, los cuales permiten separar la información proyectada simultáneamente al interior del cerebro facilitando su interpretación (A. Puri et al., 1997).

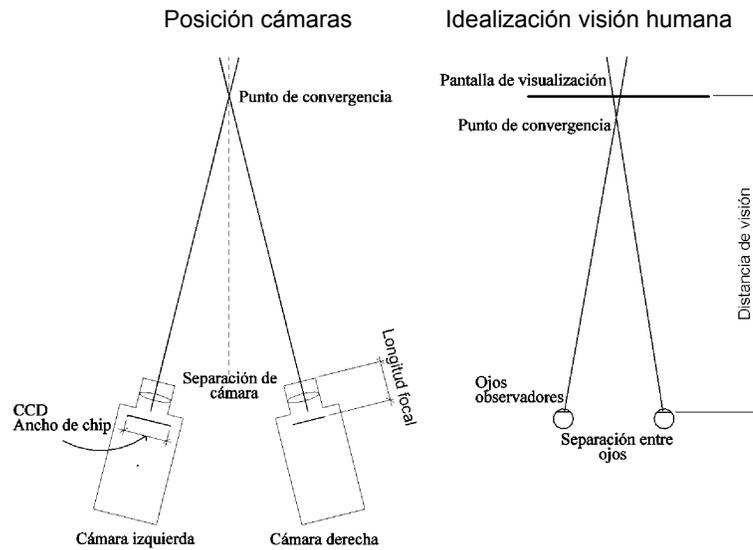


Figura 6. Esquema de localización de cámaras para generar visión estereoscópica Vs visión humana

Fuente: A. Puri et al., 1997.

El principio de estereoscopia aunque obedece a leyes científicas se genera en cada ser de diferente manera ya que parte fundamental del mismo está dado por la capacidad de interpretación que el cerebro humano tenga de la imagen observada. Esta capacidad de abstracción la adquiere el observador con el tiempo, no se nace con ella, mas sí con las capacidades para adquirirla. Sobre el tema es importante mencionar que los niños tienen la posibilidad de apreciar imágenes estereoscópicas desde pequeños, sin embargo estudios médicos plantean que no es recomendable que sean expuestos a ellas antes de los seis o siete años de vida ya que antes de esa edad no se ha completado el desarrollo primario de su cerebro.

El fenómeno de la estereoscopia (figura 7), básicamente plantea que el observador identifica si un objeto esta más cerca de otro gracias a la posibilidad de interpretar el ángulo que describen ambos objetos con los ojos del observador.

A mayor ángulo el objeto estará a menor distancia y a menor ángulo el objeto estará a mayor distancia. De igual manera el tamaño de los objetos puede ser determinado mediante el ángulo de visión que conforman los puntos extremos del objeto con el ojo del observador. Es importante anotar que este fenómeno si bien contribuye a determinar las características del objeto que se observa, no requiere del principio de estereoscopía como tal. Figura 8.

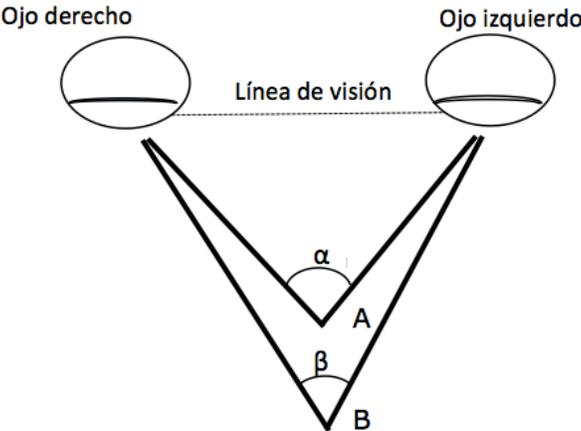


Figura 7. Angulo óptico.

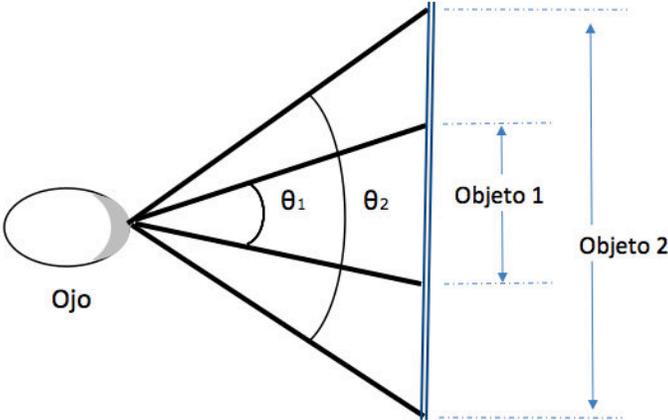


Figura 8. Angulo visual

El principio estereoscópico es en el cual se basan las imágenes proyectadas para generar la RV inmersiva.

#### **4.1.6 Dispositivos o instrumentos para visualización estereoscópica e interacción de RV.**

Los dispositivos o instrumentos para la visualización de la RV pueden ser para generar apreciaciones de carácter individual como los Head Mounted Display (HMD) o para generar imágenes o ambientes que pueden ser apreciados por un número plural de observadores como son los Cave Automatic Virtual Environment (CAVE). Igualmente se destacan como elementos que permiten interactuar con el modelo los guantes y los sistemas de posicionamiento o tracker entre otros.

El sistema de generación o visualización de la tercera dimensión (proyección estereoscópica) puede utilizar dos principios diferentes que permiten al cerebro de los observadores interpretar las imágenes tridimensionalmente. Estos pueden ser principios activos o pasivos; los primeros permiten apreciar al observador las imágenes en 3D gracias a la generación de pulsos<sup>5</sup> automáticos y debidamente calibrados que permiten mezclar adecuadamente las imágenes generadas por el sistema de proyección, sistema que para ser interpretado debe utilizarse instrumentos ópticos como por ejemplo gafas obturadoras que automáticamente intercalen las imágenes generadas por el proyector y le permitan a cada ojo tener una imagen similar pero diferente de cada escena proyectada. Los segundos, principios pasivos permiten observar la tercera dimensión gracias a

---

<sup>5</sup> Obturaciones de los lentes que permiten ver o no la imagen generada permitiendo intercalar las imágenes con el objeto de generar la ilusión óptica de la tercera dimensión

la polarización<sup>6</sup> de la luz generada por el sistema de proyección, son instrumentos ópticos que utilizando el principio de polarización filtran los haces de luz y generan imágenes diferentes que son observadas por cada ojo con lo cual se produce el efecto 3D deseado.

#### 4.1.6.1 HMD

Los cascos virtuales o dispositivos HMD (head mounted display) están constituidos por dos pequeñas pantallas, una para cada ojo por las cuales el observador o interactuante aprecia un espacio virtual en el cual está completamente inmerso, espacio que es desarrollado con la ayuda de un computador. Se dice que el observador se encuentra inmerso gracias a que su campo de visión está completamente manipulado por escenario generado, aislándolo del espacio real que lo rodea (S. C-Y. Lu et al, 1999). Estos dispositivos tienen la función de engañar los sentidos del observador haciéndolo creer que la virtualidad es el escenario real, permitiéndole actuar con naturalidad ente las situaciones que son proyectadas. Figura 9.



Figura 9. HMD

Fuente : Cybermind, Holanda

---

<sup>6</sup> Filtrado de la luz de manera independiente y diferente para cada ojo con lo que se genera el efecto 3D en el cerebro.

#### 4.1.6.2 CAVE®

El denominado CAVE® (*cave automatical virtual environment*) o cueva automática de espacios virtuales desarrollado en la Universidad de Illinois (USA) por la investigadora Cruz-Neira y Sandin en la década de los 90 (Pérez, 2011), es actualmente el más completo entorno en el cual se accede a la RV. Consiste en una instalación física integrada por varias superficies de proyección (dos, tres, cuatro, cinco o seis) en las cuales se proyectan imágenes o videos tridimensionales generalmente desde el exterior del espacio delimitado por dichas superficies con el fin de no generar indeseables sombras producidas por los usuarios sobre la o las superficies de proyección (Juárez et al, 2010) Para generar la imagen sobre las superficies desde el exterior existen dos posibilidades. La primera consistente en proyectar directamente sobre la superficie de proyección como se muestra en la figura 10 o proyectar a una superficie de reflexión o un espejo para que la imagen llegue reflectada a la superficie de proyección (Figura 11), para el primer caso normalmente se requiere un gran espacio entre el proyector y la superficie de proyección con el fin de lograr con el haz de luz generado abarcar la totalidad de la superficie de proyección para lo cual se debe disponer de un gran espacio para la realización del CAVE®. La segunda opción requiere mucho menos espacio ya que la imagen al estar reflectada, el haz de luz recorrerá la misma distancia requerida para proyectar en un determinado espacio en una fracción de la distancia requerida en la opción uno.

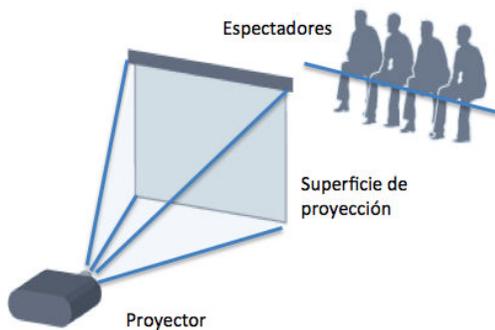


Figura 10. Sistema de proyección trasera  
Fuente: [www.projectors-av.co.uk](http://www.projectors-av.co.uk)

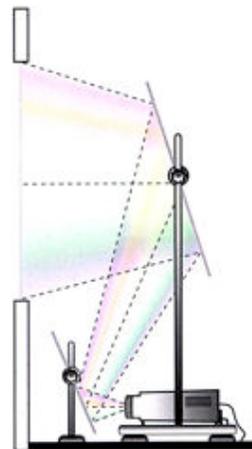


Figura 11. Sistema reflectado de proyección  
Fuente: Screen-Tech®

Los CAVE® generalmente son espacios cerrados que están gobernados por equipos de computación, de óptica, sonido y de georeferenciación que permiten generar en el o en los observadores la sensación de estar dentro de los espacios definidos por las imágenes proyectadas en sus superficies (Juárez et al, 2010) gracias a la capacidad de coordinar las imágenes y de engañar a los sentidos del observador.

Para garantizar la inmersión a través del CAVE®, se deben generar sensaciones estereoscópicas de manera que la información que llegue a cada ojo del observador produzca la sensación de profundidad gracias a la proyección de imágenes diferentes para cada ojo simulando el ángulo de visión normal de las personas y con él ayudando a la interpretación correcta de la imagen en su cerebro. En estos escenarios el observador tiene libertad de movimiento lo que exige que tanto el ángulo de proyección como las imágenes generadas en cada instante varíen dependiendo de la posición del observador. Para captar dicho punto de observación es necesario contar con sistemas de referenciación espacial o tracking los cuales permiten ubicar espacialmente al observador con relación a la o las imágenes proyectadas con el objetivo de modificar la proyección según los

requerimientos, garantizando con ello la permanente sensación de realidad percibida por el usuario. Ver figura 12.

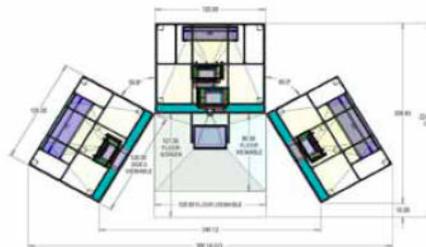
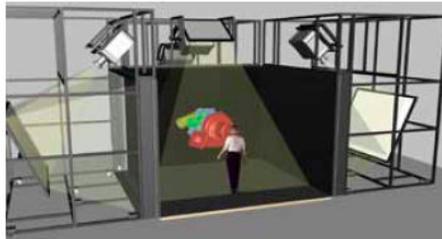


Figura 12. CAVE®.

Fuente: EON reality.

Las superficies de proyección de los CAVE® son generalmente del tipo pantallas flexibles rodeadas por marcos rígidos que le dan la posibilidad de generar una superficie perfectamente plana en algunos casos o curva en otros, superficies que para permitir la proyección de imágenes tridimensionales deben cumplir con ciertos requerimientos de manera que la luz proyectada sobre la misma conserve las propiedades físicas con las que fue generada permitiendo a los dispositivos ópticos que complementan la infraestructura separar adecuadamente la información que debe recibir cada ojo del observador. Actualmente el principal método para separación de la información es el de la polarización de la luz además es el utilizado en el presente trabajo. La forma de trabajo de los dispositivos ópticos complementarios se puede apreciar en la figura 13,



Figura 13. Esquema de funcionamiento dispositivos ópticos auxiliares para CAVE®

Fuente: Panasonic

Una de las características de los CAVE® es que las imágenes proyectadas en cada una de las superficies debe estar perfectamente coordinada con las imágenes proyectadas en las superficies colindantes de manera que la sensación que producida en el observador sea lo mas real posible.

La coordinación de las imágenes y la calibración de las mismas dependen directamente de la geometría del CAVE® y de la posición deseada del observador, definiendo así un área óptima de visualización (Juares et al, 2010), sin decir con esto, que el visualizar por fuera de dicha área impida la correcta visualización del modelo.

De igual manera otros factores que se deben tener en cuenta para la calibración de las superficies son el pitch, el yaw y el roll<sup>7</sup> (ver figura 14) factores importantes para visualizar correctamente las imágenes y para coordinar las proyecciones en los diferentes superficies de proyección. (Juares et al, 2010)

---

<sup>7</sup> Pitch, yaw y roll: angulos de rotacion en los tres ejes del plano, x, y, z respectivamente.

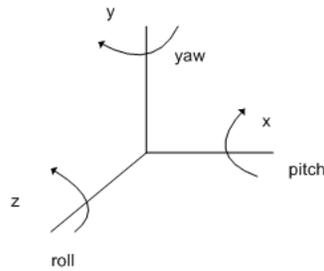


Figura 14. Pitch, yaw y roll

## 4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica realizada pretende determinar los avances con relación a la RV y básicamente los estudios realizados de la aplicación de la RV en el sector de la construcción. En el desarrollo de este punto se ha estudiado como ha sido la implementación de la RV en la industria de la construcción principalmente en países desarrollados. Para ello se han analizado bases de datos indexadas y se han estudiado casos reportados en la literatura científica.

Una descripción básica de lo estudiado se describe a continuación:

La realidad virtual tiene sus inicios a finales del siglo XVIII con la realización por parte de Robert Barker en el año 1787 de la construcción del panorama de Edimburgo, un mural pintado sobre un espacio circular alrededor de una plataforma central en la que se situaban los espectadores y en donde podían observar en todas las direcciones la imagen de un lugar en específico y sentirse como si estuvieran en medio de éste. Baker plasmó al interior de una construcción cilíndrica con una columna en el centro, un mural de once metros de altura y veintiséis metros de diámetro que permitía apreciar la ciudad de Edimburgo en Escocia. (Martí, 2008) generando en el observador la sensación de estar presente en el sitio pintado, pero sin hacer presencia física en dicha ciudad. Figura 15.



Figura 15. Panorama de Edimburgo por Barker, 1787

Fuente: <http://www.precinemahistory.net/edinburgh.htm>

A principios del siglo XIX, los panoramas<sup>8</sup> (Figura 16.) ya contaban con gran reconocimiento y miles de persona acudían a ellos para presenciar por lo general escenas de batalla, lugares exóticos o vistas espectaculares de la naturaleza. Dado el éxito de los panoramas aparecieron diferentes versiones posteriores como lo fueron: Diorama, Cosmorama, Noctorama, Betaniorama, Nausorama, Ciclorama, Paleorama, Caricaturama, entre otros (Comment, 1999).

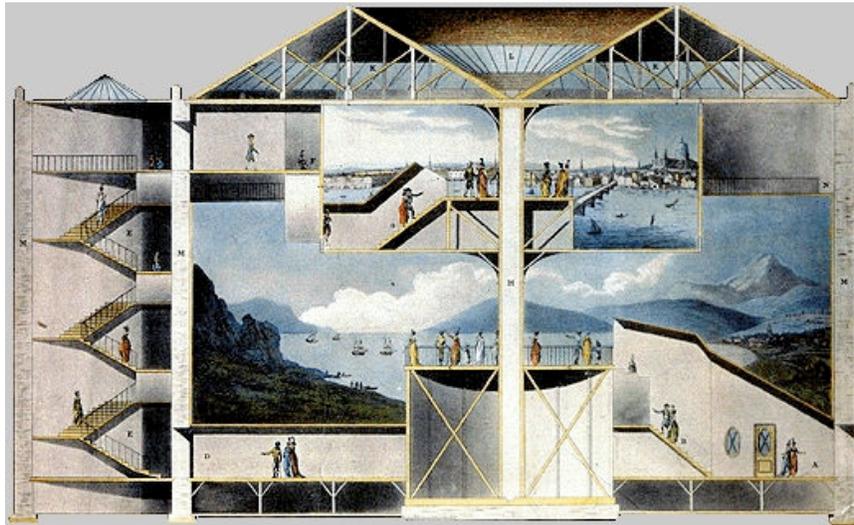


Figura 16. Panorama de Leicester Square – Londres, 1789

[http://www.aryse.org/wp-content/uploads/2011/05/pano\\_baker\\_2.jpg](http://www.aryse.org/wp-content/uploads/2011/05/pano_baker_2.jpg)

---

<sup>8</sup> Según la Real Academia Española de la Lengua el termino Panorama se define como la vista pintada en un gran cilindro hueco, en cuyo centro hay una plataforma circular, aislada, para los espectadores, y cubierta por lo alto a fin de hacer invisible la luz cenital.

Posteriormente a mediados del siglo XIX el científico británico Charles Wheatstone desarrolló un instrumento que permitía apreciar por superposición de dos imágenes del mismo sitio tomadas desde un ángulo diferente una imagen tridimensional dando la sensación de profundidad el cual se denominó Estereoscopio. (Martí, 2008).

La figura 17 presenta el estereoscopio desarrollado por Charles Wheatstone en el año 1838 en el cual unos espejos localizados en los ángulos A y B reflejan imágenes desde C y D hacia los ojos del espectador.

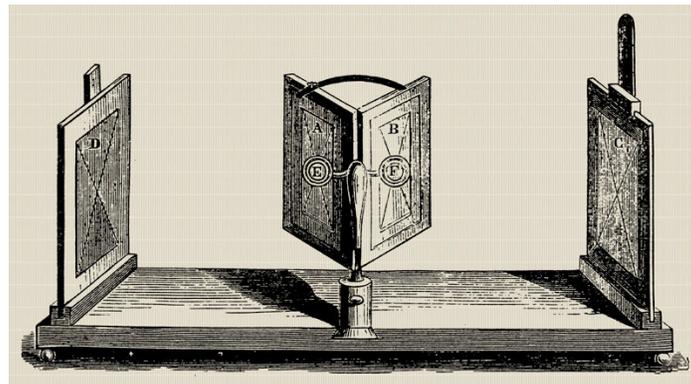


Figura 17. Estereoscopio desarrollado por Charles Wheatstone, 1838

Fuente: [http://it.wikipedia.org/wiki/File:Charles\\_Wheatstone-mirror\\_stereoscope\\_XIXc.jpg](http://it.wikipedia.org/wiki/File:Charles_Wheatstone-mirror_stereoscope_XIXc.jpg)

Posteriormente en 1858 el fotógrafo francés Claudet concibió la idea de proyectar dos imágenes estereoscópicas sobre una superficie interponiéndolas para hacerlas visibles ante varios espectadores, tal como es observado en la figura 18. Si bien esta idea no tuvo mucho éxito en dicho momento a pesar de que las proyecciones pudieron ser observadas por tres o cuatro personas a la vez, permitió avances que se materializarían más adelante por parte de otros inventores para la industria cinematográfica (Chestofbooks, 2011).

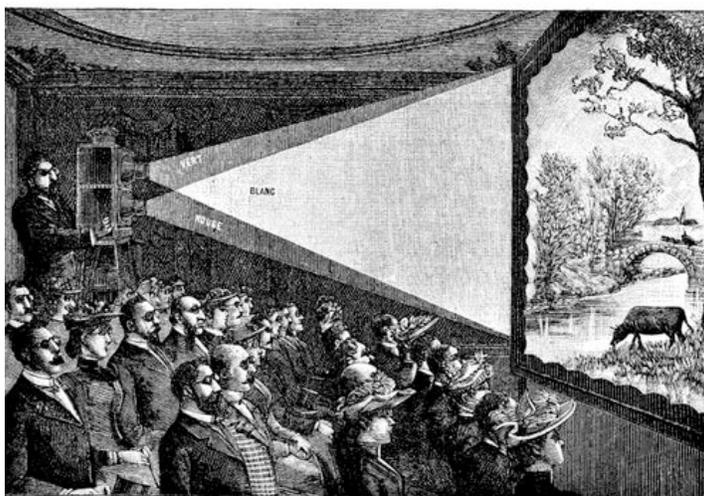


Figura 18. Proyección de imágenes estereoscópicas por Claudet, 1858

Fuente: <http://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/sup6/Stereoscopic-Projections.html>

Posteriormente en el año 1929 se desarrolló en EEUU el primer simulador de vuelo mecánico el cual se implementó a partir de 1934 para adiestrar a los pilotos en el vuelo por instrumentos en la aviación militar de dicho país, permitiendo con él proporcionar condiciones realistas de vuelo sin poner en peligro la vida de los pilotos, preparándolos para situaciones peligrosas sin necesidad de estar en ellas, siendo este el primer instrumento mecánico con capacidad de simular procesos reales denominándose The link Flight Trainer. (ASME, 2000). Figura 19.

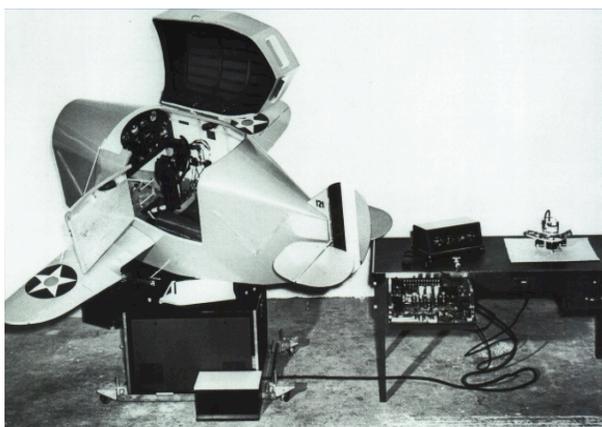


Figura 19. The link Flight Trainer, 1929

Fuente: ASME International. The Link Flight Trainer

A finales de la década de 1950 el científico Morton L. Heilig desarrolla la primera máquina con el objeto de crear espacios virtuales basados en imágenes en tres dimensiones denominada Sensorama Simulator, la cual generaba una ilusión a través de experiencias sensoriales transmitidas al observador gracias a los movimientos producidos por la silla donde este descansa, a la posibilidad de generar y sentir el viento en la cara del mismo generando la sensación de movimiento y a un sonido envolvente con lo cual se logró engañar a los sentidos del observador haciéndolo parte actuante de la imagen proyectada. (Morton, 2011). Figura 20.



Figura 20. Máquina Sensorama

Fuente: [www.mortonheilig.com](http://www.mortonheilig.com)

Ya en la década de 1960 se desarrollaron instrumentos como los Head Mounted Display (HMD) o cascos personales de proyección (CRAIG Alan B. Et al, 2009). De igual manera Kent en su estudio de 2011 plantea que los HMD ofrecían una visión dentro de un mundo virtual mediante el uso tubos de rayos catódicos en un armazón de alambres, en el cual el usuario podía reconocer un ambiente gráfico. Esta invención fue llevada a cabo por Iván Sutherland en el año de 1966 y su prototipo puede apreciarse en la figura 21.



Figura 21. Head Mounted Display (HMD) Ivan Sutherland, 1968

Fuente: Introduction to Virtual Reality, Developing Virtual Reality Application, by Craig et al.

Para finales de la década del setenta y a principios del ochenta, se desarrolló por parte de la empresa Sublogic en EEUU el primer simulador de vuelo basado en sistemas informáticos o TIC para computadores personales marca Mac de la empresa Apple Inc, convirtiéndose así éste en el primer elemento masificador de la RV permitiéndole a los observadores apreciar e interactuar con imágenes virtuales basadas en hechos reales.

Igualmente uno de los primeros sectores en usar la RV por su naturaleza y por su trabajo habitual fue el de los planetarios, los cuales proyectaban las imágenes del cosmos en grandes superficies esféricas simulando la esfera celeste, generando diferentes tipos de proyecciones según el momento deseado para apreciar, permitiendo al observador y/o a los investigadores visualizar a gran escala los hechos estelares ya sucedidos así como apreciar aquellos por suceder.

La precursora de la comercialización de productos para generar la realidad virtual fue la empresa VPL Research Inc, liderada por Jaron Lanier a finales de la década del ochenta. Entre sus productos se destacaron los primeros guantes sensitivos, llamados DataGlove de la empresa VLP, los cuales permitieron gran interacción con los computadores gracias a los sensores en fibra óptica que percibían el movimiento en las articulaciones de los dedos de la persona que los

usa. Entre sus inconvenientes se encontró el alto costo y la falta de diferentes tamaños para su uso (Burdea & Coiffet, 2003). Lo cual dificultó su difusión y comercialización. Figura 22

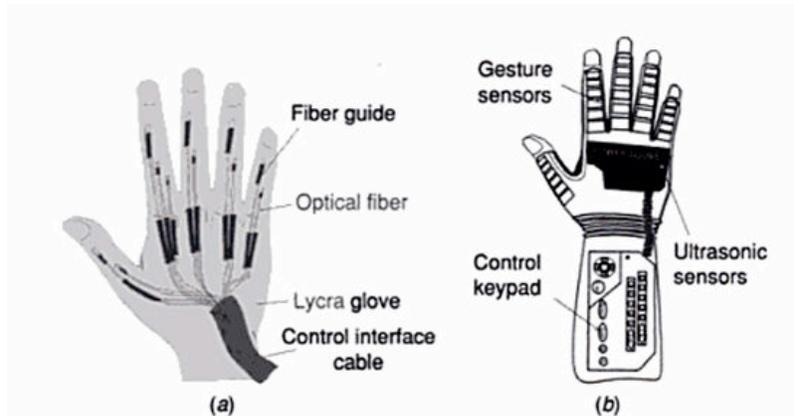


Figura 22. Guantes sensitivos, DataGlove por VLP Research Inc

Fuente: Virtual Reality Technology, by Burdea & Coiffet

A principios de la década del noventa en la universidad de Illinois en Chicago, USA, se desarrolló el primer CAVE<sup>®</sup> (Figura 23) en el cual las imágenes eran proyectadas de manera estereoscópica a través de tres pantallas o superficies de proyección obteniendo una sensación de realidad en el observador. (CRAIG Alan B. Et al, 2009).



Figura 23. Cave Automatic Virtual Environment –CAVE- Universidad de Illinois

Fuente: <http://isl.beckman.illinois.edu/Labs/CAVE/CAVE.html>

En los últimos años quizás el campo en el cual se ha tenido mayor aplicabilidad esta metodología es quizás en la medicina y mas concretamente en cirugías, con lo cual el paciente como principal usuario ha experimentado una mejora substancial en su calidad de vida ya que con la RV se obtienen diagnósticos mas reales, minimizándose las posibles equivocaciones por parte de los médicos y por ende las complicaciones que dichas imprecisiones pueden causar. De igual manera el investigador Pérez Martines en la publicación realizada en la revista *Creatividad y Sociedad* en el 2011 plantea que esta metodología es bastante útil para el tratamiento de las fobias permitiendo enfrentarlas de una manera segura aumentando con ello la posibilidad de superarlas, así mismo la opción que brinda la RV de practicar cirugías sin necesidad de utilizar a un ser humano como objeto real a operar, posibilita el hacer de manera repetitiva procedimientos quirúrgicos convirtiéndose este en un mecanismo idóneo para capacitar a los futuros cirujanos sin poner en riesgo la vida de sus pacientes.

La RV es igualmente utilizada actualmente como mecanismo de adiestramiento de soldados, de astronautas y de pilotos entre otros, permitiendo regular y controlar los estados de ánimo que se generan en condiciones de alta presión mejorando la capacidad de reacción ante situaciones extremas logrando en el personal entrenado la respuesta optima ante una situación determinada. (Pérez, 2011).

Ahora bien, ya conocida la evolución de la RV es necesario estudiar como se ha aplicado la RV en el sector de la construcción a nivel mundial.

Los actores en el sector de la construcción son diversos, se encuentran en la academia y en las empresas del sector productivo tanto publico como privado.

En el sector académico el uso de los ambientes virtuales permite a los

estudiantes comprender los diferentes proyectos constructivos fácilmente y más rápido que con la ayuda de los medios tradicionales. El uso de la RV combinado con la metodología BIM hace practico y agradable para el estudiante la tarea de aprender así como la de investigar.

En estos aspectos, la universidad del Estado de Pensilvania en los Estados Unidos de America ha aplicado la RV como estrategia de formación para sus estudiantes de ingeniería civil mediante la utilización de HMD y de ambientes CAVE<sup>®</sup>, logrando como resultado una mayor agilidad en el proceso de comprensión de las metodologías constructivas utilizando modelos 4D que los procedimientos tradicionales mejorando con ello el entendimiento por parte de los estudiantes de los procesos constructivos y de los detalles relevantes tanto en obras de vivienda como en la infraestructura. (Messner et al., 2003).

De igual manera en la investigación de Sampaio & Henriques en el 2008 en la Universidad Tecnológica de Lisboa en Portugal, se reporta el desarrollo de modelos en los cuales puede ser visualizado el proceso constructivo con la ayuda de tecnologías en RV presentando en ellos la evolución de la construcción en el tiempo (4D), permitiendo enseñar y promocionar las nuevas técnicas y procesos a los estudiantes en dicho campo así como aumentando el nivel de comprensión de los procesos y detalles constructivos logrando en el futuro una mayor calidad en las construcciones a realizar. Figura 24.

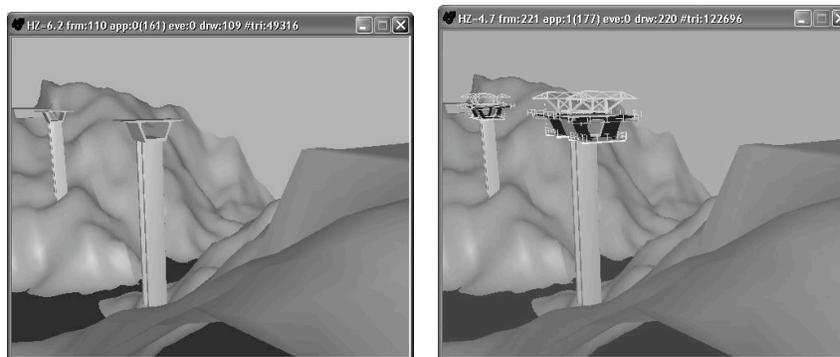


Figura 24. Modelacion en 4D realizada por Zampaio & Henriques.

Fuente: Virtual reality technology applied on the visual simulation of construction activities, 2008

Posteriormente el buen nivel de detalle obtenido mediante la RV permitió evaluar un modelo arquitectónico en particular con la experiencia real obtenida por la construcción de la obra representada por el modelo. En la investigación de Westerdahl et al. en el 2006, 99 empleados de la empresa Ericsson Mobile Data Design, expresaron que la RV fue una ayuda muy útil en el proceso de toma de decisiones en las nuevas instalaciones diseñadas y posteriormente construidas en su compañía. Los resultados del estudio sugieren que la RV ofreció una adecuada representación de la edificación previa a su construcción lo cual facilitó su construcción.

En el estudio de Greenwood et al. en el año 2008, las estrategias para la implementación de la RV así como las barreras fueron analizadas en cuatro diferentes países, todos ellos de gran avance tecnológico como lo son Estados Unidos, Reino Unido, Suecia y China). En el proyecto de investigación, se analizaron las técnicas de visualización realizadas por los diversos departamentos técnicos de la empresa involucrados en el proyecto, allí se evaluó la experiencia y la capacitación del personal profesional. Su objetivo fue generar comparativos entre metodologías que permitieran entender y evaluar los diferentes factores inherentes a la implementación de la RV en las diferentes etapas del proyecto y los beneficios que esta implementación traería en las etapas. Se concluyó que gracias a la disminución de los costos del hardware requerido para la implementación de la RV motivado por la creciente utilización de los mismos, aumenta el potencial de comercialización de la metodología, sin embargo, el estudio plantea que aun para la época, está distante de masificarse su uso.

La adopción de la RV en empresas constructoras del sector público en el Reino Unido fue analizada en la investigación de Fernández et al. en año 2004. Factores como la competitividad dentro de la compañía, las necesidades internas, la coordinación del recurso humano y el apoyo de la administración entre otros,

fueron estudiados para conocer cómo éstos podrían afectar la adopción de las nuevas tecnologías de visualización, planteando como resultado, que si bien es útil la implementación de la realidad virtual de toda la estructura a construir, se debe enfocar esta inicialmente a actores claves que permitan evaluar sus beneficios ya que el tener muchas variables simultáneas dificultaría el análisis e impediría la toma oportuna de decisiones.

Por su parte Xiangyu Wang en el año 2006 presenta cómo la RV permite introducir una nueva perspectiva en la planeación del layout o sistema de organización en planta de la obra de construcción. En su modelación plantea la prevención de errores potenciales y las ineficiencias mejorando la productividad gracias a una visualización completa del lugar de trabajo mediante una interfaz tangible ubicada sobre una superficie real y un grupo de elementos virtuales que pueden ser ubicados dentro de dicha interfaz de manera que se pueda interactuar gracias a la utilización de dispositivos HMD.

En el campo de la infraestructura es igualmente útil la utilización de la RV ya que con ella se puede simular desde el terreno base con el fin de evaluar sobre él diversas propuestas de alineamiento geométrico, analizar la viabilidad de utilización de las estructuras requeridas en la ejecución de la obra e inclusive es adecuado para la planeación y ejecución de redes vitales subterráneas y sus posibles interferencias en un determinado proyecto (Kang et al., 2010).

Generalmente el diseño de las obras de infraestructura comienza con el estudio topográfico sobre el cual se realizan los diseños requeridos y se simulan las modificaciones necesarias pudiéndose apreciar en cada sección los cortes y llenos de tierras demandados para llegar a la posición adecuada del terreno, situación que es bastante engorrosa de realizar con los métodos tradicionales utilizados hasta el momento, facilitándose la toma de decisiones con la implementación de la RV, contribuyendo con ello al diseño eficiente de los

proyectos siendo inclusive una herramienta valiosa para determinar y evaluar impactos ambientales producidos por la obra en estudio (Kang et al., 2010). Figura 25

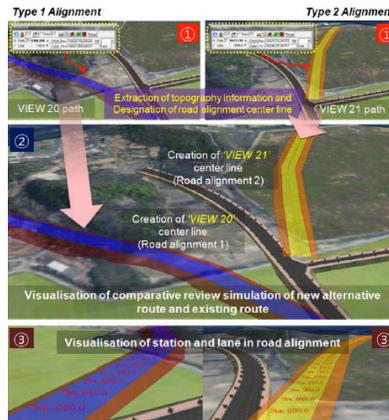


Figura 25. Imagen modelo realizado por Kang et al para toma de decisiones en la infraestructura.

Fuente: Development of methodology and virtual system for optimised simulation of road design data, 2010

En estudios realizados por Whyte en el año 2003 se determinó que el tamaño de los proyectos y/o el número de repeticiones que se tengan del mismo pueden contribuir al desarrollo de la RV, ya que en un proyecto de gran envergadura los costos asociados a la tecnología propuesta pueden ser minimizados gracias al valor total del proyecto a desarrollar. De otro lado cuando la RV se aplica a pequeñas obras pero con un potencial de replicación o modificaciones relativamente significantes, incrementa las ventajas de la utilización (Fernández et al, 2004). Así mismo, se ha encontrado que el uso de la RV en proyectos complejos es de gran ayuda para su entendimiento, facilitando la comprensión del proceso constructivo, permitiendo tomar decisiones trascendentes antes de iniciar la fase constructiva con los concernientes beneficios en tiempo y recursos (Waley & Thabet, 2003).

El desarrollo de interfaces entre los modelos CAD y ambientes de RV permitieron en el caso del Estadio Nacional de Beijing, sede principal de los juegos olímpicos de 2008, que la modelación de la estructura, compleja por su

irregularidad y gran tamaño, fuera más flexible de modo que el proceso de simulación de construcción pudiera ser apreciado en diferentes entornos de RV dependiendo de las necesidades del usuario (Ren et al, 2004). Igualmente la información obtenida de la aplicación de la metodología BIM en combinación con la RV puede ser utilizada para adecuar el funcionamiento de una estructura a lo largo de su ciclo de vida. Para sustentar esta aseveración, Smith and Tardif en el estudio realizado en el año 2009 plantearon como tanto los diseñadores como los dueños y administradores del Teatro de la Opera en Sydney manifestaron que gracias al modelo realizado por la firma ARUP de Sydney después de 50 años de construida la obra comprendieron en realidad su funcionamiento utilizando los resultados provenientes del modelo virtual para reconfigurar aspectos operativos y así mejorar el sonido, la acústica y en general el funcionamiento del famoso teatro. Figura 26.



Figura 26. Imagen modelo teatro de la Opera. Sydney.

Fuente: [www.Youtube.com](http://www.Youtube.com)

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **4.1 MARCO TEÓRICO**

Inicialmente se han abordado temas básicos sobre los conceptos que se relacionan directamente con la RV y con la metodología planteada para el desarrollo del presente proyecto. En este punto se investigaron bases de datos científicas y artículos publicados relativos a Computer Aided Design–CAD, diseños paramétricos, building information modeling–BIM, principios estereoscópicos, realidad virtual inmersiva, no inmersiva y aumentada e instrumentos o dispositivos para su visualización como HMD y CAVE entre otros de manera que permitan una mayor comprensión sobre el tema dándole un sustento técnico al mismo.

Para tener una idea clara de lo investigado, se desarrollaran a continuación cada uno de los anteriores aspectos.

#### 4.1.1 Computer Aided Desing – CAD.

El termino Computer Aided Design (CAD) o diseño asistido por computador, define el uso de herramientas basadas en TIC para los procesos de diseño y documentación de proyectos. Normalmente el uso de estas tecnologías se ha concentrado mas que en el diseño asistido por computador a un dibujo asistido por computador, usándose básicamente para el dibujo en 2D<sup>1</sup>, permitiendo a través de una interfaz gráfica manipular entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas y arcos entre otras, y los modeladores en 3D<sup>2</sup> que agregan superficies y sólidos (Duggal, 2000) dando una idea mas real de lo idealizado.

Esta tecnología se empezó a implementar en la industria de la construcción en los años 80 mediante la utilización de programas de computador basados en la vectores gráficos como líneas, arcos, etc. (Greenwood et al, 2008). Sin embargo como se planteó anteriormente, esta tecnología se utilizó para dibujar en un computador lo que antes se realizaba en papel con la ayuda de lápices y no para lo que fue originalmente creada, diseñar.

Ya en la época de los 90 comenzó la verdadera implementación de el termino CAD mediante el desarrollo de aplicaciones basadas en datos paramétricos, en los cuales en vez de generar un archivo simplemente con líneas, se introducían datos que definían las propiedades, ya no de líneas, sino de los elementos constitutivos o entidades del proyecto logrando así implementar la utilización de diseños paramétricos que contenían información del proyecto a construir.

---

<sup>1</sup> Dos dimensiones medidas en una superficie plana (X,Y)

<sup>2</sup> Tres dimensiones medidas en una superficie espacial. (X,Y,Z)

#### **4.1.2 Diseños paramétricos**

Los diseños paramétricos integran la información y las reglas geométricas de todos los objetos del modelo permitiendo realizar modificaciones con repercusión en todos los aspectos constitutivos del mismo sin generar inconsistencias en él. Los objetos constitutivos del diseño paramétrico tienen la capacidad de incorporar atributos relacionados con el tipo de material, propiedades acústicas, costos y muchos otros que pueden ser exportados a otras aplicaciones o modelos (Eastman et al, 2008).

Estos procedimientos ya no implican simplemente el dibujo de entidades constitutivas sino la incorporación de información explicativa en él, permitiendo disponer de información importante al momento con las ventajas que ello representa como por ejemplo la toma de decisiones de manera rápida basadas en los resultados provenientes del modelo.

En los modelos paramétricos la geometría del elemento modelado y sus propiedades guardan una jerarquización por niveles y subniveles definiendo familias de elementos que son plenamente modificables y que interactúan con los demás elementos constitutivos de un proyecto.

#### **4.1.3 Building Information Modeling -BIM-**

El concepto de Building Information Modeling (BIM) planteado por su pionero Charles Eastman en la década del los setenta es la representación en medios digitales de los procesos de construcción con el fin de facilitar el manejo de la información y posibilitar el intercambio de la misma, procesos que no solo se enfocan en las etapas previas a la construcción, sino que pueden ser utilizadas en el desarrollo del ciclo de vida de proyecto y posterior edificación (Botero et al. 2010)

De igual manera Penttilä en el año 2006 plantea que Building Information Modeling (BIM) es un conjunto de políticas, procesos y tecnologías que generan una metodología para administrar los diseños esenciales de una edificación y su información en medio digital a través del ciclo de vida.

BIM permite simular el proyecto de construcción en un ambiente virtual a través del uso de un paquete de software haciendo posible experimentar y hacer ajustes previos a la ejecución (Kymmell, 2008) basándose en el modelado paramétrico que utilizando “ecuaciones numéricas, expresiones declarativas y valores nominales” (Lee, Sacks & Eastman, 2006) definían relaciones entre entidades geométricas.

Las empresas que trabajan la metodología BIM no solamente deben compilar la información de un desarrollo en un archivo digital. Deben aplicar un conjunto de desarrollos coordinados que colaboran en la comprensión de los ciclos de vida de la construcción objeto de análisis. BIM no es la utilización de una única herramienta; es la utilización coordinada de varias de ellas (Smith, Tardif, 2009) ya que desarrollar una sola que esté en capacidad de administrar todos los temas que se requieren en un proyecto la haría bastante complicada de operar y de lograrse su utilización, ella sería limitada desperdiciando gran cantidad de sus bondades (Smith, Tardif, 2009), adicionalmente BIM presenta una nueva manera de apreciar y de conceptuar sobre un proyecto a realizar.

El utilizar esta metodología plantea grandes beneficios para los intervinientes en las obras, beneficios que se pueden dividir según las necesidades de cada actuante de la siguiente manera:

Para los arquitectos facilita la generación, comprensión, comunicación y documentación de los proyectos aumentando la posibilidad de tener oportuna retroalimentación por parte de los demás intervinientes o actores en el proyecto.

Adicionalmente tienen la posibilidad de mejorar la comunicación de sus ideas a los posibles clientes y posteriormente a las dueños posibilitando una mayor viabilización de sus proyectos. Esta metodología les brinda la posibilidad de comprender la forma como afectan agentes externos el desempeño de un proyecto en específico permitiendo actuar sobre ellos de manera oportuna.

De igual manera los diseñadores de los demás componentes técnicos tienen con la aplicación de BIM la posibilidad de minimizar las abstracciones que frecuentemente deben realizar al pasar de diseños en dos dimensiones a construcciones en tres dimensiones, permitiendo compatibilizar y ajustar los diseños antes de empezar la construcción de los mismos, minimizando nuevamente las notas aclaratorias o correcciones que sobre la marcha comúnmente utilizadas hasta el momento.

Por su parte los constructores se benefician gracias a las posibilidades de visualización y comprensión que presenta la metodología, a la posibilidad de compartir información técnica de manera oportuna con los demás intervinientes en el proyecto y entre otros aspectos a la obtención de manera ágil y confiable de información técnica relativa a las características físicas y funcionales del proyecto (Botero et al. 2010) llegando inclusive a ser parte fundamental para un adecuado diseño energéticamente y/o ambientalmente eficiente.

De igual manera la aplicación de la metodología es ampliamente benéfica para los dueños o inversionistas de los proyectos ya que permite una reducción de costos totales del mismo pues al mejorar la calidad del diseño lo cual se logra gracias a las posibilidades generadas por su utilización, permite tener un menor nivel de incertidumbre en la etapa constructiva como lo demuestra el análisis presentado por Patrick MacLeamy en la reunión general de BIM realizada por la

AIA<sup>3</sup> en el año 2005 (Figura 2) en la cual se aprecia claramente que si bien los recursos que se deben invertir para la aplicación de la metodología en las etapas tempranas del proyecto son mayores que los requeridos con los métodos tradicionales, su influencia en las etapas posteriores del proyecto compensan los costos garantizando un ahorro en ellos al terminar la etapa de construcción, gracias al menor nivel de incertidumbre y a una menor necesidad de recambios sobre la marcha de la construcción del proyecto, etapa en la que normalmente realizar cualquier modificación repercute importantemente en sus costos, aumentando notablemente los mismos.



Figura 2- Curva de MacLeamy. Influencias de los costos en las etapas del proyecto BIM vs. tradicional.

Fuente: An introduction to the IPD Workflow for Vectorworks BIM users Robert Anderson, VP Integrated Practice, Nemetschek Vectorworks

Este ahorro en costos en las etapas del ciclo de vida del proyecto resulta como causa de la mejor información en los diseños previos logrado por la confiabilidad y facilidad de comprensión que brinda la metodología BIM, a la posibilidad de prefabricación gracias al amplio conocimiento que se tiene del

<sup>3</sup> AIA define por sus iniciales en inglés de la Asociación Americana de Arquitectos.

proyecto en las etapas tempranas del mismo y a la adaptación y adecuación del cronograma de trabajo que puede ser realizado con al utilización de la metodología planteada.

BIM permite modelar virtualmente cualquier tipo de objeto o entidad facilitando la comprensión del mismo. Es así como una muestra de la manera como se debe utilizar y sobre todo de las bondades de esta metodología y de los resultados que ella proporciona, queda plasmada con los procesos realizados por la firma Boeing para el diseño de su avión 777 en el cual los modelos provenientes del análisis aerodinámico en el túnel de viento fueron adecuados a los modelos que definían los demás aspectos constitutivos de la aeronave logrando con la compatibilización de la información generada y la experiencia del personal a cargo, una reducción importante de las ordenes de recambio en comparación con las obtenidas en modelos anteriores realizados siguiendo otros procedimientos.

La implementación de BIM requiere una estrategia de transformación cultural al interior de las empresas de manera que todos los intervinientes tengan la capacidad de enfrentar y superar sus diferencias en aras de imponer el bien general sobre el particular. Actualmente compartir información técnica en algunos casos se considera un riesgo para el que la suministra (Smith, Tardif, 2009), actuación que debe ser superada si se desea implementar esta metodología.

Adicionalmente hoy en día por la complejidad cada vez mas alta de los proyectos, estos no son documentados adecuadamente lo que atenta contra la comprensión y el perfeccionamiento de los sistemas constructivos (Smith, Tardif, 2009), contra la calidad de las obras entregadas, contra la productividad, así como generando hacia el usuario del sector una imagen inapropiada lo cual desmejora la competitividad que requieren las empresas para permanecer económicamente activas en el sector. La metodología BIM permite lograr una mejor y adecuada documentación de los proyectos que se emprenden con las ventajas que ello

conlleva. Adicionalmente BIM colabora con la comprensión y correcta interpretación tanto de los actores que intervienen en el proyecto como de los adquirientes del mismo.

Entre los beneficios que se alcanzan con la utilización de BIM en el sector de la construcción se pueden destacar los que fueron planteados por el SmartMarket Report realizado por la editorial McGraw Hill Construction en el año 2007. (Ver tabla 1)

Tabla 1. Factores influyentes en el uso de la metodología BIM

Mas tiempo para el diseño propiamente dicho y menos tiempo para ejecución de borradores	68%
Los propietarios de los proyectos lo solicitan	49%
Mejor comunicación con el grupo generador del proyecto	47%
La posibilidad de hacer modificaciones al instante con BIM	45%
Optimización de los costos	43%
Mejoramiento de la interoperabilidad	41%
Optimización de procesos informáticos	39%
Mejora en el control documental	38%
Presupuestos mas precisos	38%
Adecuación de cronogramas constructivos	37%
Capacidades de detección de interferencias y conflictos	33%
Disminución de las reclamaciones a las aseguradoras	31%
Mejora la planificación del proyecto	26%
Verificación del cumplimiento de códigos de construcción	25%
Sitios constructivos mas seguros	19%
Mejor utilización de herramientas de Lean Construction	16%

Fuente: McGraw Hill Construction Research and Analytics, 2007

Se destacan entre ellos la percepción de mejora en los procesos de diseño, mayor claridad en el manejo de la información y la posibilidad obtener los impactos que generan las modificaciones de una manera acelerada repercutiendo directamente en la obtención de resultados óptimos tanto para clientes como para proyectistas. De igual manera también se destacan como factores determinantes para la utilización de esta metodología la disminución de costos, la disminución de los riesgos que se le generan al personal ya que al tener conocimiento de ellos de manera previa a su aparición, se pueden tomar los correctivos del caso mitigando

así su ocurrencia. Se logra igualmente una optimización de costos en el *ciclo de vida*<sup>4</sup> del proyecto gracias entre otros aspectos, a la posibilidad de ajustar los cronogramas de ejecución y al mejoramiento con ello de los procesos constructivos dando como resultado final una mejora radical en la mano de obra requerida para la ejecución del proyecto y por ende de la calidad del mismo.

Otro de los grandes beneficios que tiene la implementación de la tecnología BIM es que gracias a que el modelo es el centro al cual confluyen todos los actores, ellos no necesariamente deben estar en el mismo lugar geográfico, posibilitando la participación de profesionales en diferentes áreas del conocimiento en diferentes partes del mundo para un proyecto específico (Smith, Tardif, 2009) manteniendo todos los participantes permanentemente informados con los últimos desarrollos realizados. Esta metodología por si sola no coordina la realización de los diferentes diseños, pero si ayuda a desempeñar el trabajo del coordinador quien tendrá en sus manos una herramienta hasta el momento inmejorable para ello.

La metodología BIM contribuye de manera especial a optimizar los procesos y disminuir el impacto de las reclamaciones de los usuarios en sus libros fiscales y en la imagen que proyectan hacia ellos.

Un campo de acción interesante para BIM es que la información resultante de los procesos iniciales como los de concepción, diseño y construcción, gracias a la forma metódica de organización que provee, pueden ser utilizados por los administradores finales de los proyectos quienes son los encargados de velar por su adecuado desempeño ya que es posible integrar los modelos existentes y utilizados en las etapas iniciales, con los sistemas de control de la edificación de

---

<sup>4</sup> Indica los tiempos generados desde la preconcepción del proyecto hasta la etapa de demolición y disposición final de residuos.

manera que trabajen coordinadamente y que arrojen resultados en tiempo real facilitando una acción pertinente y oportuna logrando con ello una eficiencia en costos de operación y mantenimiento de ella así como una adecuada planeación de las acciones de mantenimiento a lo largo de la vida útil (Smith, Tardif, 2009).

La metodología BIM permite al usuario disponer de un elevado volumen de información al instante disponiendo desde las tradicionales vistas en dos dimensiones (2D) pasando por las listas y tablas de materiales y cantidades de obra, hasta imágenes en tercera dimensión (3D), cuarta dimensión (4D) e inclusive la quinta dimensión (5D) pudiendo ser esta inclusive georeferenciada. (Botero, Acevedo, 2011).

Conceptualmente, las herramientas BIM están desarrolladas en modelos paramétricos basados en objetos que se representan con familias predefinidas, como muros, columnas, cielos, puertas, ventanas y demás elementos constitutivos de una estructura. Una estructura diseñada bajo la metodología BIM esta conformada por un conjunto de objetos que constituyen un modelo dimensionado y representado gráficamente en tercera dimensión (3D). La metodología para la visualización en 3D data desde principios del siglo XXI cuando Kamat VR y Martínez JC en el año 2001 plantearon la primera versión general de la metodología en la cual se trabajaban separadamente el software para modelar en 3D y el software para realizar las simulaciones, logrando con ello visualizar las operaciones de construcción espacial y cronológicamente. Fue así como surge el termino 4D en el cual los elementos constitutivos del modelo están vinculados a la programación de construcción, proceso que inicialmente era altamente complicado y dispendioso lo cual en sus inicios no habló muy bien de la metodología pero este inconveniente se supero rápidamente logrando vincular los objetos del modelo en 3D con las cantidades de obra enlazando estas a la programación permitiendo que

al seleccionar algún objeto se pudiera inmediatamente tener un valor estimado de cantidades asociadas al mismo.

#### **4.1.4 Realidad Virtual (RV)**

La RV se define como la creación mediante el uso de dispositivos tecnológicos de objetos o situaciones no reales pero que son aceptadas como tal por los observadores (S.C-Y.Lu et al, 1999).

El termino RV en el sector de la construcción es definido por algunos autores como la visualización en tiempo real a través de un modelo de computador de un ambiente construido (D. Greenwood et al, 2008). Hoy en día la RV se utiliza para visualizar y comprender los ambientes requeridos por medio de la animación de las situaciones a desarrollar en las diferentes etapas de evolución de un proyecto con el fin de brindar beneficios económicos y/o administrativos a los intervinientes del mismo, convirtiéndose esta metodología en un elemento más de información y comunicación al interior de las empresas, facilitando la consecución de los objetivos planteados.

La RV puede dividirse en las siguientes clases:

##### **4.1.4.1 RV no Inmersiva.**

La RV no inmersiva es aquella que se logra principalmente a través de la modelación de los proyectos utilizando programas de computador que permiten una visualización tridimensional. Dicha modelación le permite interactuar al observador con el modelo en tiempo real a través de monitores o superficies de proyección (Rosen et al, 2001) pero se abstiene de brindar al observador la sensación de presencia en dicha escena debido a la ausencia del hardware especial (Ramos et al, 2007). Es básicamente la proyección de una escena en tres dimensiones a través de un sistema de visualización apto para proyectar en dos dimensiones. Figura 3.

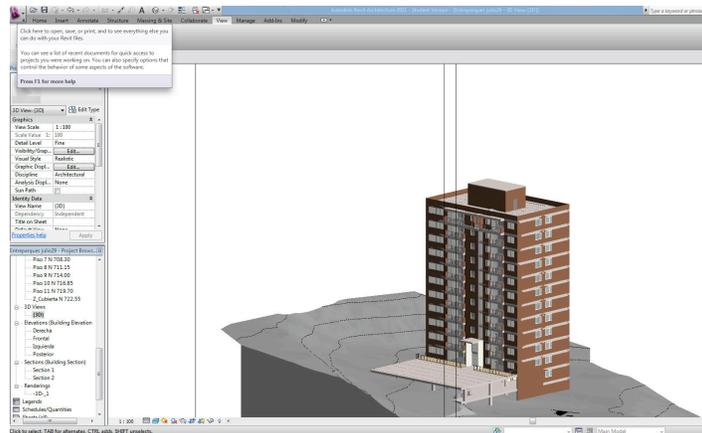


Figura 3. Modelo 3D proyectado en 2D

#### 4.1.4.2 RV Inmersiva

La RV inmersiva es aquella en la que por medio de espacios tridimensionales generados por computador, el usuario puede interactuar en tiempo real con el modelo desarrollado, produciendo en él como usuario, la sensación de estar inmerso en la imagen proyectada con la opción de acceder a espacios normalmente inaccesibles o con gran contenido de riesgo, pudiendo modificar los hechos que allí ocurren tomando decisiones que de otra manera serían complicadas y/o potencialmente inseguras.

Los ambientes inmersivos se caracterizan por generar en el público la sensación de presencia en la escena gracias a la utilización de dispositivos ópticos que permiten observar tridimensionalmente la imagen proyectada y dispositivos lumínicos que permiten determinar de manera precisa la posición del observador dentro del ambiente proyectado en escala real (1:1). Se permite con estos sistemas darle al observador o interactuante libertad y amplitud en sus movimientos (Ramos et al, 2007), inclusive llegando en determinadas situaciones a poder sentir a través del tacto gracias a la utilización de guantes electrónicos o brazos robóticos electromecánicos en el ambiente virtual generado. Es común que

para lograr esta inmersión se incremente la sensación de presencia con el uso de sonidos envolventes que ambientan la imagen proyectada (S.C-Y. Lu et al, 1999).

Las imágenes proyectadas en los ambientes virtuales son logradas gracias a la superposición de dos de ellas, permitiendo generar el ambiente estereoscópico requerido; dichas imágenes y dicho efecto se obtiene mediante la utilización de programas de computador basados en código abierto o libre o mediante la utilización de programas comerciales (Ramos et al, 2007). Con los primeros se logran desarrollos iniciales a muy bajo costo ya que por su naturaleza se encuentran disponibles en el medio sin necesidad de retribuir económicamente a sus desarrolladores, sin embargo dichas herramientas requieren de gran cantidad de horas de trabajo para su adecuación que sumadas a las limitaciones propias de los programas o librerías libres que pueden llegar a restringir las opciones de visualización, llegan a equiparar o inclusive a sobrepasar el valor de los segundos.

Estos ambientes virtuales inmersivos permiten que la mente humana y las funciones sensoriales trabajen coordinadamente con los ambientes creados a través del computador permitiendo generar sensaciones iguales a las que se presentarían en la vida real. Figura 4.

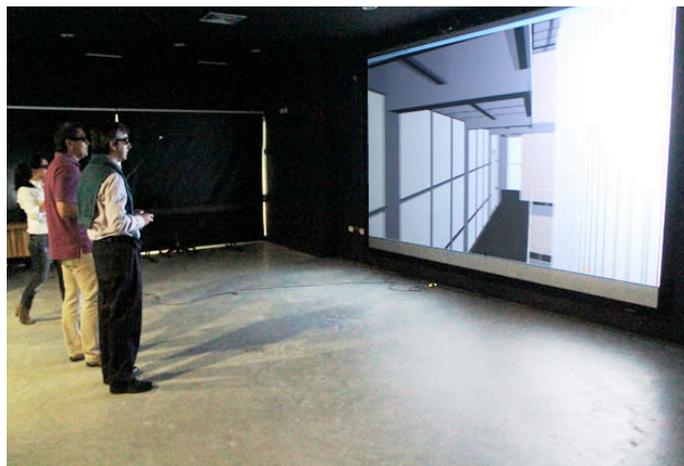


Figura 4. Espacio realidad virtual inmersiva EAFIT - CIDICO

### 4.1.4.3 Realidad Aumentada

La realidad aumentada es aquella en la cual el observador no se encuentra en capacidad de diferenciar si el ambiente en el cual se encuentra inmerso es o no real, logrando con ello engañar los sentidos del observador. Lo anterior se logra mediante la superposición de objetos generados por computador con graficas reales de objetos de igual manera como se aprecian en el mundo real (S. C-Y. Lu et al, 1999).

Por lo anterior, la realidad aumentada al requerir modelar menos objetos que en la RV, podría demandar menores requerimientos en cuanto a capacidades de desarrollo gráfico, lo cual genera menores costos para su aplicación haciéndose mas factible de implementar que la RV convencional, sin embargo su limitación fundamental es que requiere de un ambiente real para ambientar la información modelada, ambiente que es inmodificable permitiendo solamente manipular y modificar de forma parcial la imagen virtualizada con las limitaciones que ello conlleva. Sin embargo es útil para ciertos tipos de desarrollos. Figura 5.

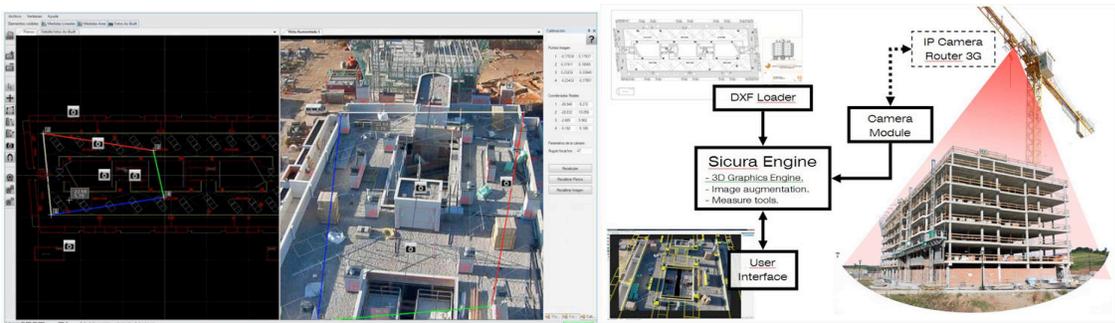


Figura 5. Realidad aumentada

Fuente: IRTIC. Universidad de Valencia, España.

#### 4.1.5 Fundamentos de la Estereoscopia

El termino estereoscopia define, segun lo expresó el cientifico Charles Wheatstone en su obra "*Contributions to the Physiology of Vision*" publicada en 1938, como la sensacion de profundidad que se aprecia de un objeto gracias a las pequenas diferencias entre las imagenes que se proyectan de un mismo objeto a los dos ojos de un observador, generando una sensacion de profundidad y por ende la percepcion de realismo en el observador.

La vision estereoscopica se logra mediante la proyeccion de dos imagenes bidimensionales del mismo objeto tomadas con consideraciones especiales como la separacion de ambos instrumentos de toma, la distancia focal y el punto de convergencia el cual definirá la distancia a la cual puede ser apreciada la imagen generada con la sensacion de profundidad deseada (Figura 6). Una de las imagenes será apreciada por el ojo izquierdo y la otra por el ojo derecho del observador de manera que su cerebro pueda mezclarlas logrando la sensacion de profundidad, simulando la vision normal humana. Para que el cerebro humano pueda generar la sensacion de profundidad a través de imagenes en dos dimensiones se requiere del uso de dispositivos opticos que filtren la informacion que llega al observador, dispositivos como los HMD, gafas polarizadas entre otros, los cuales permiten separar la informacion proyectada simultaneamente al interior del cerebro facilitando su interpretacion (A. Puri et al., 1997).

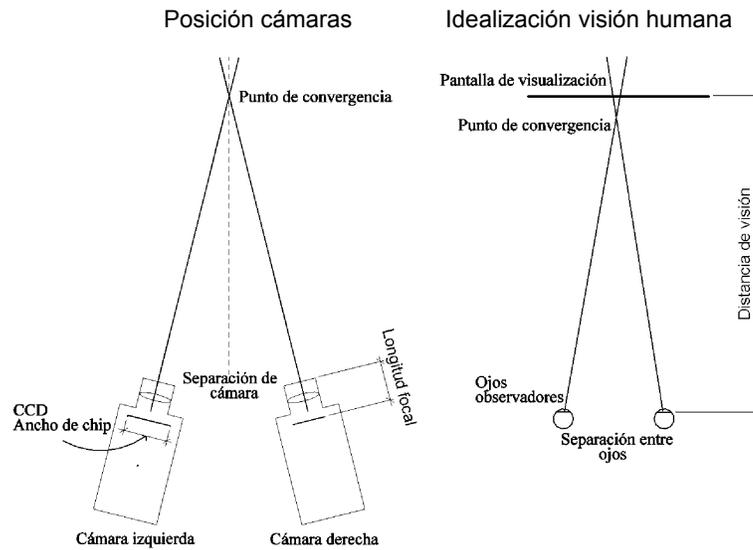


Figura 6. Esquema de localización de cámaras para generar visión estereoscópica Vs visión humana

Fuente: A. Puri et al., 1997.

El principio de estereoscopia aunque obedece a leyes científicas se genera en cada ser de diferente manera ya que parte fundamental del mismo está dado por la capacidad de interpretación que el cerebro humano tenga de la imagen observada. Esta capacidad de abstracción la adquiere el observador con el tiempo, no se nace con ella, mas sí con las capacidades para adquirirla. Sobre el tema es importante mencionar que los niños tienen la posibilidad de apreciar imágenes estereoscópicas desde pequeños, sin embargo estudios médicos plantean que no es recomendable que sean expuestos a ellas antes de los seis o siete años de vida ya que antes de esa edad no se ha completado el desarrollo primario de su cerebro.

El fenómeno de la estereoscopia (figura 7), básicamente plantea que el observador identifica si un objeto esta más cerca de otro gracias a la posibilidad de interpretar el ángulo que describen ambos objetos con los ojos del observador.

A mayor ángulo el objeto estará a menor distancia y a menor ángulo el objeto estará a mayor distancia. De igual manera el tamaño de los objetos puede ser determinado mediante el ángulo de visión que conforman los puntos extremos del objeto con el ojo del observador. Es importante anotar que este fenómeno si bien contribuye a determinar las características del objeto que se observa, no requiere del principio de estereoscopía como tal. Figura 8.

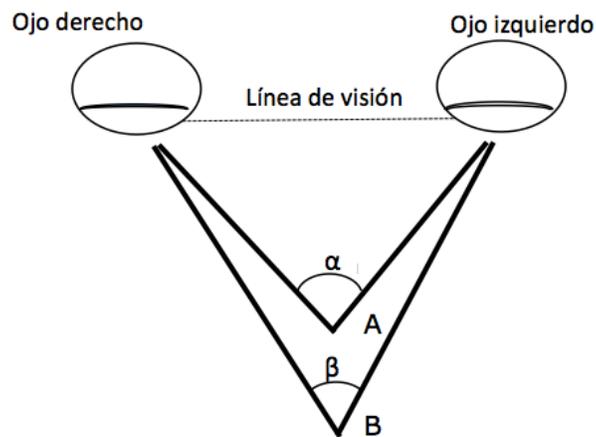


Figura 7. Angulo óptico.

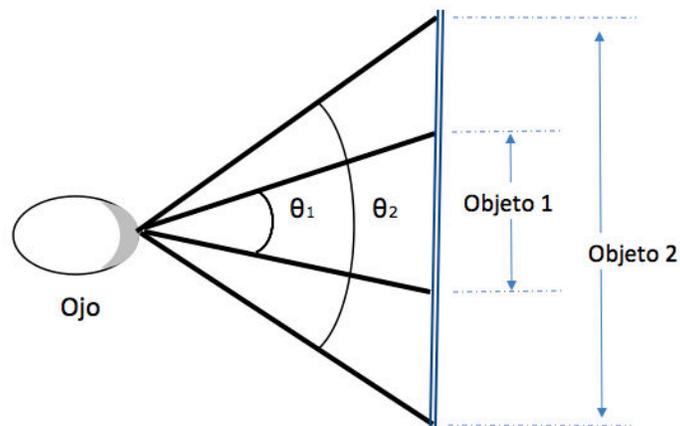


Figura 8. Angulo visual

El principio estereoscópico es en el cual se basan las imágenes proyectadas para generar la RV inmersiva.

#### **4.1.6 Dispositivos o instrumentos para visualización estereoscópica e interacción de RV.**

Los dispositivos o instrumentos para la visualización de la RV pueden ser para generar apreciaciones de carácter individual como los Head Mounted Display (HMD) o para generar imágenes o ambientes que pueden ser apreciados por un número plural de observadores como son los Cave Automatic Virtual Environment (CAVE). Igualmente se destacan como elementos que permiten interactuar con el modelo los guantes y los sistemas de posicionamiento o tracker entre otros.

El sistema de generación o visualización de la tercera dimensión (proyección estereoscópica) puede utilizar dos principios diferentes que permiten al cerebro de los observadores interpretar las imágenes tridimensionalmente. Estos pueden ser principios activos o pasivos; los primeros permiten apreciar al observador las imágenes en 3D gracias a la generación de pulsos<sup>5</sup> automáticos y debidamente calibrados que permiten mezclar adecuadamente las imágenes generadas por el sistema de proyección, sistema que para ser interpretado debe utilizarse instrumentos ópticos como por ejemplo gafas obturadoras que automáticamente intercalen las imágenes generadas por el proyector y le permitan a cada ojo tener una imagen similar pero diferente de cada escena proyectada. Los segundos, principios pasivos permiten observar la tercera dimensión gracias a

---

<sup>5</sup> Obturaciones de los lentes que permiten ver o no la imagen generada permitiendo intercalar las imágenes con el objeto de generar la ilusión óptica de la tercera dimensión

la polarización<sup>6</sup> de la luz generada por el sistema de proyección, son instrumentos ópticos que utilizando el principio de polarización filtran los haces de luz y generan imágenes diferentes que son observadas por cada ojo con lo cual se produce el efecto 3D deseado.

#### 4.1.6.1 HMD

Los cascos virtuales o dispositivos HMD (head mounted display) están constituidos por dos pequeñas pantallas, una para cada ojo por las cuales el observador o interactuante aprecia un espacio virtual en el cual está completamente inmerso, espacio que es desarrollado con la ayuda de un computador. Se dice que el observador se encuentra inmerso gracias a que su campo de visión está completamente manipulado por escenario generado, aislándolo del espacio real que lo rodea (S. C-Y. Lu et al, 1999). Estos dispositivos tienen la función de engañar los sentidos del observador haciéndolo creer que la virtualidad es el escenario real, permitiéndole actuar con naturalidad ente las situaciones que son proyectadas. Figura 9.



Figura 9. HMD

Fuente : Cybermind, Holanda

---

<sup>6</sup> Filtrado de la luz de manera independiente y diferente para cada ojo con lo que se genera el efecto 3D en el cerebro.

#### 4.1.6.2 CAVE®

El denominado CAVE® (*cave automatical virtual environment*) o cueva automática de espacios virtuales desarrollado en la Universidad de Illinois (USA) por la investigadora Cruz-Neira y Sandin en la década de los 90 (Pérez, 2011), es actualmente el más completo entorno en el cual se accede a la RV. Consiste en una instalación física integrada por varias superficies de proyección (dos, tres, cuatro, cinco o seis) en las cuales se proyectan imágenes o videos tridimensionales generalmente desde el exterior del espacio delimitado por dichas superficies con el fin de no generar indeseables sombras producidas por los usuarios sobre la o las superficies de proyección (Juárez et al, 2010) Para generar la imagen sobre las superficies desde el exterior existen dos posibilidades. La primera consistente en proyectar directamente sobre la superficie de proyección como se muestra en la figura 10 o proyectar a una superficie de reflexión o un espejo para que la imagen llegue reflectada a la superficie de proyección (Figura 11), para el primer caso normalmente se requiere un gran espacio entre el proyector y la superficie de proyección con el fin de lograr con el haz de luz generado abarcar la totalidad de la superficie de proyección para lo cual se debe disponer de un gran espacio para la realización del CAVE®. La segunda opción requiere mucho menos espacio ya que la imagen al estar reflectada, el haz de luz recorrerá la misma distancia requerida para proyectar en un determinado espacio en una fracción de la distancia requerida en la opción uno.

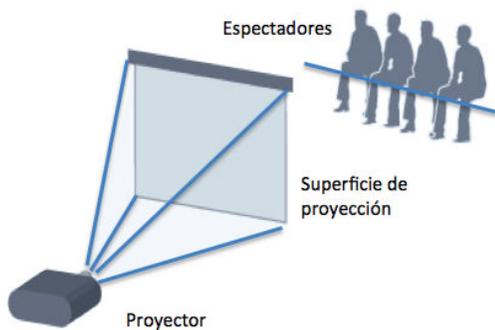


Figura 10. Sistema de proyección trasera  
Fuente: [www.projectors-av.co.uk](http://www.projectors-av.co.uk)

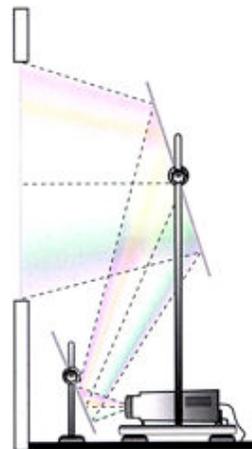


Figura 11. Sistema reflectado de proyección  
Fuente: Screen-Tech®

Los CAVE® generalmente son espacios cerrados que están gobernados por equipos de computación, de óptica, sonido y de georeferenciación que permiten generar en el o en los observadores la sensación de estar dentro de los espacios definidos por las imágenes proyectadas en sus superficies (Juárez et al, 2010) gracias a la capacidad de coordinar las imágenes y de engañar a los sentidos del observador.

Para garantizar la inmersión a través del CAVE®, se deben generar sensaciones estereoscópicas de manera que la información que llegue a cada ojo del observador produzca la sensación de profundidad gracias a la proyección de imágenes diferentes para cada ojo simulando el ángulo de visión normal de las personas y con él ayudando a la interpretación correcta de la imagen en su cerebro. En estos escenarios el observador tiene libertad de movimiento lo que exige que tanto el ángulo de proyección como las imágenes generadas en cada instante varíen dependiendo de la posición del observador. Para captar dicho punto de observación es necesario contar con sistemas de referenciación espacial o tracking los cuales permiten ubicar espacialmente al observador con relación a la o las imágenes proyectadas con el objetivo de modificar la proyección según los

requerimientos, garantizando con ello la permanente sensación de realidad percibida por el usuario. Ver figura 12.

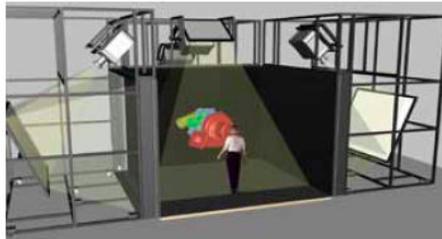


Figura 12. CAVE®.

Fuente: EON reality.

Las superficies de proyección de los CAVE® son generalmente del tipo pantallas flexibles rodeadas por marcos rígidos que le dan la posibilidad de generar una superficie perfectamente plana en algunos casos o curva en otros, superficies que para permitir la proyección de imágenes tridimensionales deben cumplir con ciertos requerimientos de manera que la luz proyectada sobre la misma conserve las propiedades físicas con las que fue generada permitiendo a los dispositivos ópticos que complementan la infraestructura separar adecuadamente la información que debe recibir cada ojo del observador. Actualmente el principal método para separación de la información es el de la polarización de la luz además es el utilizado en el presente trabajo. La forma de trabajo de los dispositivos ópticos complementarios se puede apreciar en la figura 13,



Figura 13. Esquema de funcionamiento dispositivos ópticos auxiliares para CAVE®

Fuente: Panasonic

Una de las características de los CAVE® es que las imágenes proyectadas en cada una de las superficies debe estar perfectamente coordinada con las imágenes proyectadas en las superficies colindantes de manera que la sensación que producida en el observador sea lo mas real posible.

La coordinación de las imágenes y la calibración de las mismas dependen directamente de la geometría del CAVE® y de la posición deseada del observador, definiendo así un área óptima de visualización (Juares et al, 2010), sin decir con esto, que el visualizar por fuera de dicha área impida la correcta visualización del modelo.

De igual manera otros factores que se deben tener en cuenta para la calibración de las superficies son el pitch, el yaw y el roll<sup>7</sup> (ver figura 14) factores importantes para visualizar correctamente las imágenes y para coordinar las proyecciones en los diferentes superficies de proyección. (Juares et al, 2010)

---

<sup>7</sup> Pitch, yaw y roll: angulos de rotacion en los tres ejes del plano, x, y, z respectivamente.

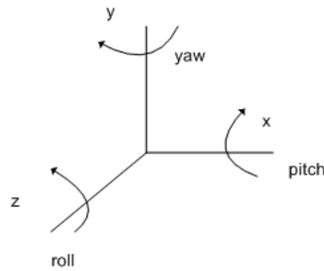


Figura 14. Pitch, yaw y roll

## 4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica realizada pretende determinar los avances con relación a la RV y básicamente los estudios realizados de la aplicación de la RV en el sector de la construcción. En el desarrollo de este punto se ha estudiado como ha sido la implementación de la RV en la industria de la construcción principalmente en países desarrollados. Para ello se han analizado bases de datos indexadas y se han estudiado casos reportados en la literatura científica.

Una descripción básica de lo estudiado se describe a continuación:

La realidad virtual tiene sus inicios a finales del siglo XVIII con la realización por parte de Robert Barker en el año 1787 de la construcción del panorama de Edimburgo, un mural pintado sobre un espacio circular alrededor de una plataforma central en la que se situaban los espectadores y en donde podían observar en todas las direcciones la imagen de un lugar en específico y sentirse como si estuvieran en medio de éste. Baker plasmó al interior de una construcción cilíndrica con una columna en el centro, un mural de once metros de altura y veintiséis metros de diámetro que permitía apreciar la ciudad de Edimburgo en Escocia. (Martí, 2008) generando en el observador la sensación de estar presente en el sitio pintado, pero sin hacer presencia física en dicha ciudad. Figura 15.



Figura 15. Panorama de Edimburgo por Barker, 1787

Fuente: <http://www.precinemahistory.net/edinburgh.htm>

A principios del siglo XIX, los panoramas<sup>8</sup> (Figura 16.) ya contaban con gran reconocimiento y miles de persona acudían a ellos para presenciar por lo general escenas de batalla, lugares exóticos o vistas espectaculares de la naturaleza. Dado el éxito de los panoramas aparecieron diferentes versiones posteriores como lo fueron: Diorama, Cosmorama, Noctorama, Betaniorama, Nausorama, Ciclorama, Paleorama, Caricaturama, entre otros (Comment, 1999).

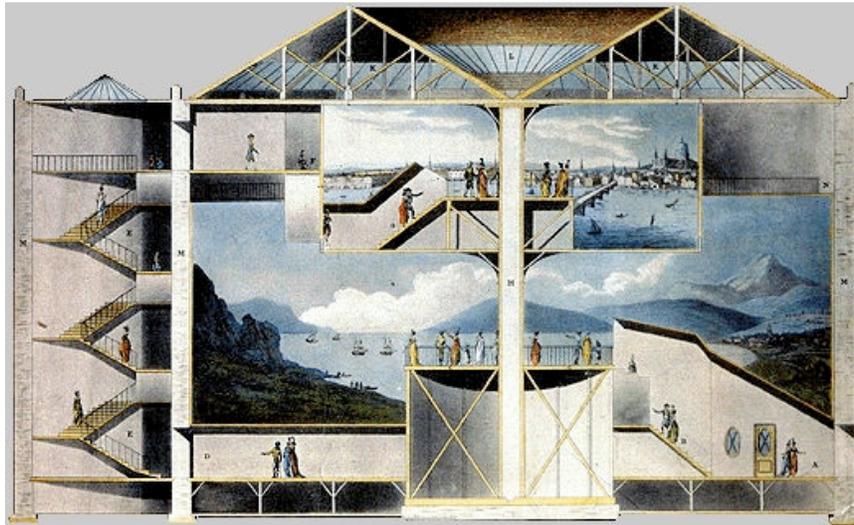


Figura 16. Panorama de Leicester Square – Londres, 1789

[http://www.aryse.org/wp-content/uploads/2011/05/pano\\_baker\\_2.jpg](http://www.aryse.org/wp-content/uploads/2011/05/pano_baker_2.jpg)

---

<sup>8</sup> Según la Real Academia Española de la Lengua el termino Panorama se define como la vista pintada en un gran cilindro hueco, en cuyo centro hay una plataforma circular, aislada, para los espectadores, y cubierta por lo alto a fin de hacer invisible la luz cenital.

Posteriormente a mediados del siglo XIX el científico británico Charles Wheatstone desarrolló un instrumento que permitía apreciar por superposición de dos imágenes del mismo sitio tomadas desde un ángulo diferente una imagen tridimensional dando la sensación de profundidad el cual se denominó Estereoscopio. (Martí, 2008).

La figura 17 presenta el estereoscopio desarrollado por Charles Wheatstone en el año 1838 en el cual unos espejos localizados en los ángulos A y B reflejan imágenes desde C y D hacia los ojos del espectador.

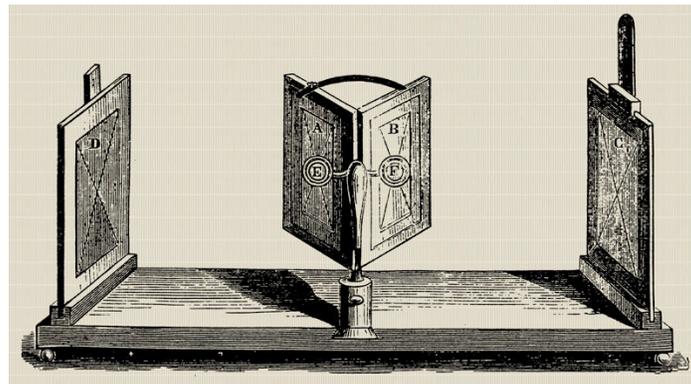


Figura 17. Estereoscopio desarrollado por Charles Wheatstone, 1838

Fuente: [http://it.wikipedia.org/wiki/File:Charles\\_Wheatstone-mirror\\_stereoscope\\_XIXc.jpg](http://it.wikipedia.org/wiki/File:Charles_Wheatstone-mirror_stereoscope_XIXc.jpg)

Posteriormente en 1858 el fotógrafo francés Claudet concibió la idea de proyectar dos imágenes estereoscópicas sobre una superficie interponiéndolas para hacerlas visibles ante varios espectadores, tal como es observado en la figura 18. Si bien esta idea no tuvo mucho éxito en dicho momento a pesar de que las proyecciones pudieron ser observadas por tres o cuatro personas a la vez, permitió avances que se materializarían más adelante por parte de otros inventores para la industria cinematográfica (Chestofbooks, 2011).

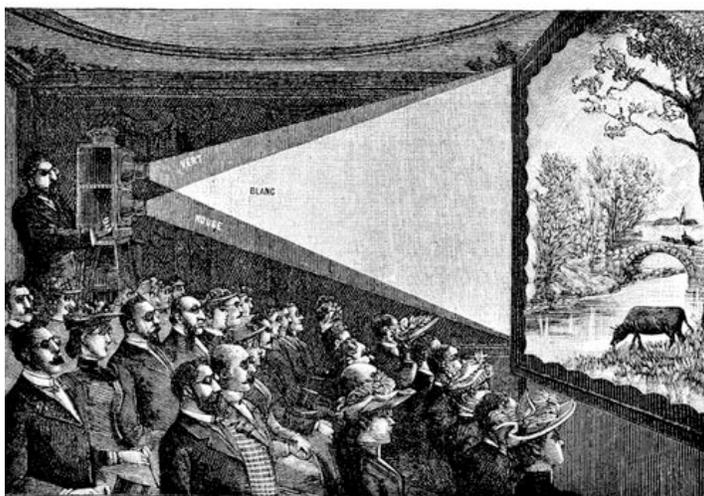


Figura 18. Proyección de imágenes estereoscópicas por Claudet, 1858

Fuente: <http://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/sup6/Stereoscopic-Projections.html>

Posteriormente en el año 1929 se desarrolló en EEUU el primer simulador de vuelo mecánico el cual se implementó a partir de 1934 para adiestrar a los pilotos en el vuelo por instrumentos en la aviación militar de dicho país, permitiendo con él proporcionar condiciones realistas de vuelo sin poner en peligro la vida de los pilotos, preparándolos para situaciones peligrosas sin necesidad de estar en ellas, siendo este el primer instrumento mecánico con capacidad de simular procesos reales denominándose The link Flight Trainer. (ASME, 2000). Figura 19.

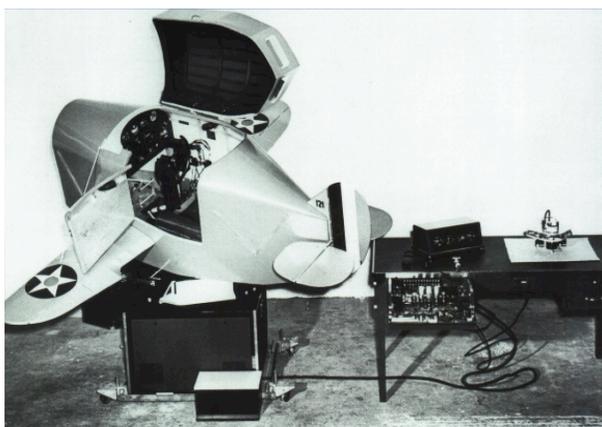


Figura 19. The link Flight Trainer, 1929

Fuente: ASME International. The Link Flight Trainer

A finales de la década de 1950 el científico Morton L. Heilig desarrolla la primera máquina con el objeto de crear espacios virtuales basados en imágenes en tres dimensiones denominada Sensorama Simulator, la cual generaba una ilusión a través de experiencias sensoriales transmitidas al observador gracias a los movimientos producidos por la silla donde este descansa, a la posibilidad de generar y sentir el viento en la cara del mismo generando la sensación de movimiento y a un sonido envolvente con lo cual se logró engañar a los sentidos del observador haciéndolo parte actuante de la imagen proyectada. (Morton, 2011). Figura 20.



Figura 20. Máquina Sensorama

Fuente: [www.mortonheilig.com](http://www.mortonheilig.com)

Ya en la década de 1960 se desarrollaron instrumentos como los Head Mounted Display (HMD) o cascos personales de proyección (CRAIG Alan B. Et al, 2009). De igual manera Kent en su estudio de 2011 plantea que los HMD ofrecían una visión dentro de un mundo virtual mediante el uso tubos de rayos catódicos en un armazón de alambres, en el cual el usuario podía reconocer un ambiente gráfico. Esta invención fue llevada a cabo por Iván Sutherland en el año de 1966 y su prototipo puede apreciarse en la figura 21.



Figura 21. Head Mounted Display (HMD) Ivan Sutherland, 1968

Fuente: Introduction to Virtual Reality, Developing Virtual Reality Application, by Craig et al.

Para finales de la década del setenta y a principios del ochenta, se desarrolló por parte de la empresa Sublogic en EEUU el primer simulador de vuelo basado en sistemas informáticos o TIC para computadores personales marca Mac de la empresa Apple Inc, convirtiéndose así éste en el primer elemento masificador de la RV permitiéndole a los observadores apreciar e interactuar con imágenes virtuales basadas en hechos reales.

Igualmente uno de los primeros sectores en usar la RV por su naturaleza y por su trabajo habitual fue el de los planetarios, los cuales proyectaban las imágenes del cosmos en grandes superficies esféricas simulando la esfera celeste, generando diferentes tipos de proyecciones según el momento deseado para apreciar, permitiendo al observador y/o a los investigadores visualizar a gran escala los hechos estelares ya sucedidos así como apreciar aquellos por suceder.

La precursora de la comercialización de productos para generar la realidad virtual fue la empresa VPL Research Inc, liderada por Jaron Lanier a finales de la década del ochenta. Entre sus productos se destacaron los primeros guantes sensitivos, llamados DataGlove de la empresa VLP, los cuales permitieron gran interacción con los computadores gracias a los sensores en fibra óptica que percibían el movimiento en las articulaciones de los dedos de la persona que los

usa. Entre sus inconvenientes se encontró el alto costo y la falta de diferentes tamaños para su uso (Burdea & Coiffet, 2003). Lo cual dificultó su difusión y comercialización. Figura 22

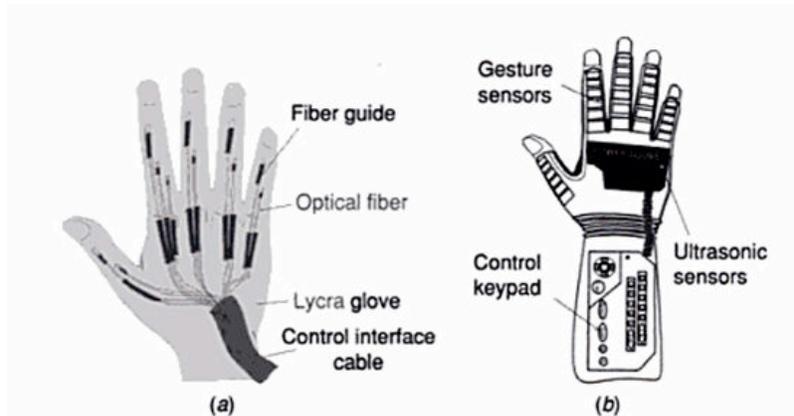


Figura 22. Guantes sensitivos, DataGlove por VLP Research Inc

Fuente: Virtual Reality Technology, by Burdea & Coiffet

A principios de la década del noventa en la universidad de Illinois en Chicago, USA, se desarrolló el primer CAVE<sup>®</sup> (Figura 23) en el cual las imágenes eran proyectadas de manera estereoscópica a través de tres pantallas o superficies de proyección obteniendo una sensación de realidad en el observador. (CRAIG Alan B. Et al, 2009).

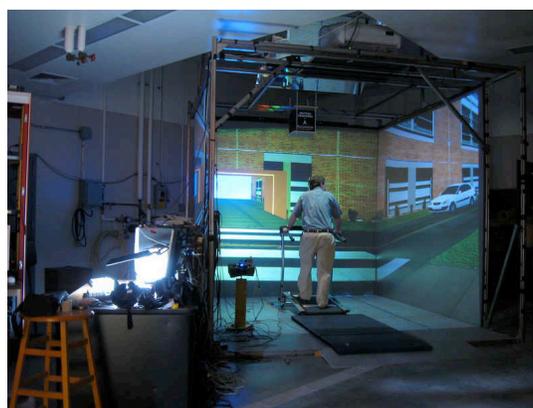


Figura 23. Cave Automatic Virtual Environment –CAVE- Universidad de Illinois

Fuente: <http://isl.beckman.illinois.edu/Labs/CAVE/CAVE.html>

En los últimos años quizás el campo en el cual se ha tenido mayor aplicabilidad esta metodología es quizás en la medicina y mas concretamente en cirugías, con lo cual el paciente como principal usuario ha experimentado una mejora substancial en su calidad de vida ya que con la RV se obtienen diagnósticos mas reales, minimizándose las posibles equivocaciones por parte de los médicos y por ende las complicaciones que dichas imprecisiones pueden causar. De igual manera el investigador Pérez Martines en la publicación realizada en la revista *Creatividad y Sociedad* en el 2011 plantea que esta metodología es bastante útil para el tratamiento de las fobias permitiendo enfrentarlas de una manera segura aumentando con ello la posibilidad de superarlas, así mismo la opción que brinda la RV de practicar cirugías sin necesidad de utilizar a un ser humano como objeto real a operar, posibilita el hacer de manera repetitiva procedimientos quirúrgicos convirtiéndose este en un mecanismo idóneo para capacitar a los futuros cirujanos sin poner en riesgo la vida de sus pacientes.

La RV es igualmente utilizada actualmente como mecanismo de adiestramiento de soldados, de astronautas y de pilotos entre otros, permitiendo regular y controlar los estados de ánimo que se generan en condiciones de alta presión mejorando la capacidad de reacción ante situaciones extremas logrando en el personal entrenado la respuesta optima ante una situación determinada. (Pérez, 2011).

Ahora bien, ya conocida la evolución de la RV es necesario estudiar como se ha aplicado la RV en el sector de la construcción a nivel mundial.

Los actores en el sector de la construcción son diversos, se encuentran en la academia y en las empresas del sector productivo tanto publico como privado.

En el sector académico el uso de los ambientes virtuales permite a los

estudiantes comprender los diferentes proyectos constructivos fácilmente y más rápido que con la ayuda de los medios tradicionales. El uso de la RV combinado con la metodología BIM hace practico y agradable para el estudiante la tarea de aprender así como la de investigar.

En estos aspectos, la universidad del Estado de Pensilvania en los Estados Unidos de America ha aplicado la RV como estrategia de formación para sus estudiantes de ingeniería civil mediante la utilización de HMD y de ambientes CAVE<sup>®</sup>, logrando como resultado una mayor agilidad en el proceso de comprensión de las metodologías constructivas utilizando modelos 4D que los procedimientos tradicionales mejorando con ello el entendimiento por parte de los estudiantes de los procesos constructivos y de los detalles relevantes tanto en obras de vivienda como en la infraestructura. (Messner et al., 2003).

De igual manera en la investigación de Sampaio & Henriques en el 2008 en la Universidad Tecnológica de Lisboa en Portugal, se reporta el desarrollo de modelos en los cuales puede ser visualizado el proceso constructivo con la ayuda de tecnologías en RV presentando en ellos la evolución de la construcción en el tiempo (4D), permitiendo enseñar y promocionar las nuevas técnicas y procesos a los estudiantes en dicho campo así como aumentando el nivel de comprensión de los procesos y detalles constructivos logrando en el futuro una mayor calidad en las construcciones a realizar. Figura 24.

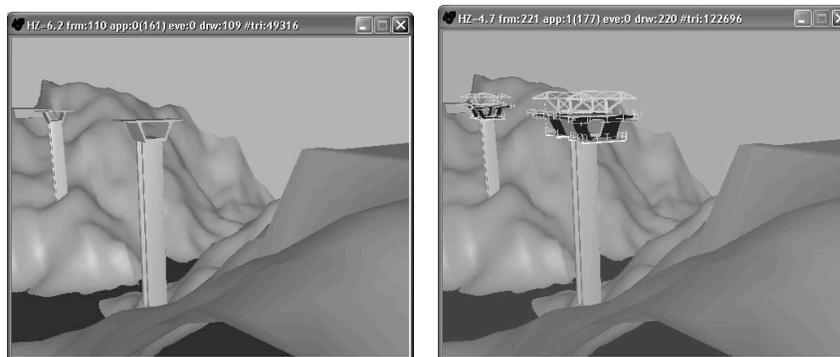


Figura 24. Modelacion en 4D realizada por Zampaio & Henriques.

Fuente: Virtual reality technology applied on the visual simulation of construction activities, 2008

Posteriormente el buen nivel de detalle obtenido mediante la RV permitió evaluar un modelo arquitectónico en particular con la experiencia real obtenida por la construcción de la obra representada por el modelo. En la investigación de Westerdahl et al. en el 2006, 99 empleados de la empresa Ericsson Mobile Data Design, expresaron que la RV fue una ayuda muy útil en el proceso de toma de decisiones en las nuevas instalaciones diseñadas y posteriormente construidas en su compañía. Los resultados del estudio sugieren que la RV ofreció una adecuada representación de la edificación previa a su construcción lo cual facilitó su construcción.

En el estudio de Greenwood et al. en el año 2008, las estrategias para la implementación de la RV así como las barreras fueron analizadas en cuatro diferentes países, todos ellos de gran avance tecnológico como lo son Estados Unidos, Reino Unido, Suecia y China). En el proyecto de investigación, se analizaron las técnicas de visualización realizadas por los diversos departamentos técnicos de la empresa involucrados en el proyecto, allí se evaluó la experiencia y la capacitación del personal profesional. Su objetivo fue generar comparativos entre metodologías que permitieran entender y evaluar los diferentes factores inherentes a la implementación de la RV en las diferentes etapas del proyecto y los beneficios que esta implementación traería en las etapas. Se concluyó que gracias a la disminución de los costos del hardware requerido para la implementación de la RV motivado por la creciente utilización de los mismos, aumenta el potencial de comercialización de la metodología, sin embargo, el estudio plantea que aun para la época, está distante de masificarse su uso.

La adopción de la RV en empresas constructoras del sector público en el Reino Unido fue analizada en la investigación de Fernández et al. en año 2004. Factores como la competitividad dentro de la compañía, las necesidades internas, la coordinación del recurso humano y el apoyo de la administración entre otros,

fueron estudiados para conocer cómo éstos podrían afectar la adopción de las nuevas tecnologías de visualización, planteando como resultado, que si bien es útil la implementación de la realidad virtual de toda la estructura a construir, se debe enfocar esta inicialmente a actores claves que permitan evaluar sus beneficios ya que el tener muchas variables simultáneas dificultaría el análisis e impediría la toma oportuna de decisiones.

Por su parte Xiangyu Wang en el año 2006 presenta cómo la RV permite introducir una nueva perspectiva en la planeación del layout o sistema de organización en planta de la obra de construcción. En su modelación plantea la prevención de errores potenciales y las ineficiencias mejorando la productividad gracias a una visualización completa del lugar de trabajo mediante una interfaz tangible ubicada sobre una superficie real y un grupo de elementos virtuales que pueden ser ubicados dentro de dicha interfaz de manera que se pueda interactuar gracias a la utilización de dispositivos HMD.

En el campo de la infraestructura es igualmente útil la utilización de la RV ya que con ella se puede simular desde el terreno base con el fin de evaluar sobre él diversas propuestas de alineamiento geométrico, analizar la viabilidad de utilización de las estructuras requeridas en la ejecución de la obra e inclusive es adecuado para la planeación y ejecución de redes vitales subterráneas y sus posibles interferencias en un determinado proyecto (Kang et al., 2010).

Generalmente el diseño de las obras de infraestructura comienza con el estudio topográfico sobre el cual se realizan los diseños requeridos y se simulan las modificaciones necesarias pudiéndose apreciar en cada sección los cortes y llenos de tierras demandados para llegar a la posición adecuada del terreno, situación que es bastante engorrosa de realizar con los métodos tradicionales utilizados hasta el momento, facilitándose la toma de decisiones con la implementación de la RV, contribuyendo con ello al diseño eficiente de los

proyectos siendo inclusive una herramienta valiosa para determinar y evaluar impactos ambientales producidos por la obra en estudio (Kang et al., 2010). Figura 25

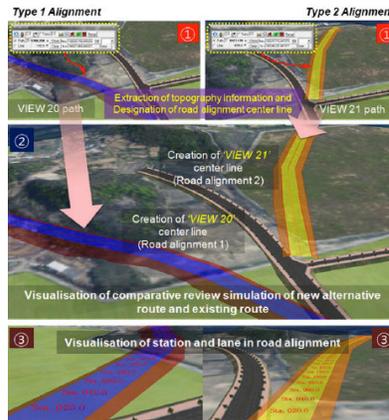


Figura 25. Imagen modelo realizado por Kang et al para toma de decisiones en la infraestructura.

Fuente: Development of methodology and virtual system for optimised simulation of road design data, 2010

En estudios realizados por Whyte en el año 2003 se determinó que el tamaño de los proyectos y/o el número de repeticiones que se tengan del mismo pueden contribuir al desarrollo de la RV, ya que en un proyecto de gran envergadura los costos asociados a la tecnología propuesta pueden ser minimizados gracias al valor total del proyecto a desarrollar. De otro lado cuando la RV se aplica a pequeñas obras pero con un potencial de replicación o modificaciones relativamente significantes, incrementa las ventajas de la utilización (Fernández et al, 2004). Así mismo, se ha encontrado que el uso de la RV en proyectos complejos es de gran ayuda para su entendimiento, facilitando la comprensión del proceso constructivo, permitiendo tomar decisiones trascendentes antes de iniciar la fase constructiva con los concernientes beneficios en tiempo y recursos (Waley & Thabet, 2003).

El desarrollo de interfaces entre los modelos CAD y ambientes de RV permitieron en el caso del Estadio Nacional de Beijing, sede principal de los juegos olímpicos de 2008, que la modelación de la estructura, compleja por su

irregularidad y gran tamaño, fuera más flexible de modo que el proceso de simulación de construcción pudiera ser apreciado en diferentes entornos de RV dependiendo de las necesidades del usuario (Ren et al, 2004). Igualmente la información obtenida de la aplicación de la metodología BIM en combinación con la RV puede ser utilizada para adecuar el funcionamiento de una estructura a lo largo de su ciclo de vida. Para sustentar esta aseveración, Smith and Tardif en el estudio realizado en el año 2009 plantearon como tanto los diseñadores como los dueños y administradores del Teatro de la Ópera en Sydney manifestaron que gracias al modelo realizado por la firma ARUP de Sydney después de 50 años de construida la obra comprendieron en realidad su funcionamiento utilizando los resultados provenientes del modelo virtual para reconfigurar aspectos operativos y así mejorar el sonido, la acústica y en general el funcionamiento del famoso teatro. Figura 26.



Figura 26. Imagen modelo teatro de la Ópera. Sydney.

Fuente: [www.Youtube.com](http://www.Youtube.com)

## **7. CONCLUSIONES.**

La coordinación de planos y optimización de procesos con la ayuda de la modelación 3D y 4D y su visualización en ambientes de realidad virtual inmersiva, se presenta como una poderosa herramienta para minimizar la ocurrencia de errores en la etapa de construcción del proyecto. Si bien esto demanda la inversión de recursos, los beneficios que se obtendrán compensarán con creces a los invertidos, compensación no solo en aspectos económicos sino en aspectos de imagen hacia los clientes ya que al optimizarse los periodos de ejecución se podrán entregar las obras cumpliendo con los cronogramas establecidos.

La metodología presenta las pautas adecuadas para abordar el modelado virtual y la visualización en ambientes de realidad virtual inmersiva en proyectos de construcción logrando una coordinación en los procesos lo que permite un flujo continuo y ordenado de información, potenciada por el trabajo conjunto entre academia y el sector productivo. Para realizar el modelado virtual se requiere de un equipo interdisciplinario conformado por profesionales de diversas ramas asociadas a la construcción y a la implementación de tecnologías de información que al ser utilizadas de manera coordinada garantizan la entrega de un buen producto a los clientes.

Si bien los procesos de coordinación y en general de utilización de la metodología basada en la realidad virtual inmersiva involucran la aplicación y utilización de adelantos tecnológicos, los resultados obtenidos de la prueba plantean que no es indispensable ser experto en el manejo de ellos para lograr los resultados pretendidos, por lo tanto se puede aplicar la metodología en usuarios profesionales de todas las edades, independientemente que ellos manejen a la perfección los aditamentos tecnológicos de que se dispone hoy en día eliminando con ello una posible barrera considerada en los inicios del proyecto.

La visualización que se obtiene con la ayuda de la realidad virtual inmersiva permite la detección de inconsistencias en los diseños constitutivos de un proyecto con mayor facilidad que al trabajar por los métodos tradicionales, lo cual se traducirá en una menor tasa de errores en el proceso de edificación de la obra.

La metodología planteada en el estudio es apta para ser utilizada tanto en edificaciones en altura como para las desarrolladas en extensión (edificaciones e infraestructura) con lo cual los potenciales clientes de los servicios a prestar se cuentan desde las empresas privadas hasta las de carácter público e incluyen inversionistas, proyectistas, consultores, constructores, clientes y usuarios finales de los proyectos.

La aplicación de la metodología de la realidad virtual inmersiva combinada con el modelado paramétrico facilita la interpretación de los proyectos de construcción clarificando los procesos constructivos a realizar en obra gracias a la mejor comprensión de los procesos y a una mejor capacitación del personal que se obtiene gracias al trabajo en el ambiente virtual.

El uso conjunto del modelo paramétrico y la visualización a través de la realidad virtual inmersiva permite una disminución significativa de la incertidumbre de común ocurrencia en los proyectos de construcción gracias a la integración de la información y al nivel de detalle alcanzado, reflejándose en la optimización de recursos, la disminución de reprocesos, la minimización de desperdicios y el aprovechamiento del tiempo por parte de los profesionales para la realización de actividades de planificación y control, mejorando la productividad y con ello la competitividad de las empresas y del sector.

La infraestructura seleccionada e instalada permite el trabajo colaborativo a través de la cooperación, la discusión y el análisis interdisciplinar de los intervinientes en el proyecto. Para su escogencia el espacio, el costo y el

crecimiento proyectado fueron factores importantes de análisis, ellos de no ser bien estudiados, se convierten en grandes limitantes generadores de barreras para la implementación de estas tecnologías ya que podrían eliminar o poner en riesgo la viabilidad del servicio a prestar.

Al ser una de las primeras superficies de virtualización a gran escala con posibilidad de generación de ambientes de realidad virtual inmersiva en el país exclusiva para el sector de la construcción, el proyecto desarrollado por la Alianza EAFIT – CIDICO se convierte en una propuesta innovadora que le permite implementar un nuevo servicio acorde con los últimos adelantos tecnológicos a nivel internacional.

Si bien la metodología planteada y probada brinda grandes ventajas a las entidades que harán uso de ella, aun se deben hacer algunas modificaciones que permitan un mejor desempeño de la misma, aspectos como la sensación de mareo presentada por los usuarios, la facilidad de movimiento en espacios reducidos y la fatiga visual que se presenta en sesiones de trabajo prolongadas deben ser objeto de estudio. Sin embargo no se puede afirmar que la metodología por presentar los aspectos planteados anteriormente no represente una gran utilidad para el sector.

La barrera cultural afecta de manera directa el ingreso de manera masiva de proyectos que involucran tecnologías de punta como las que se plantean en el presente documento. En el medio local y nacional las empresas constructoras generalmente invierten muy poco en innovación de productos o servicios que pueden llegar a mejorar sus utilidades, minimizar los tiempos constructivos y disminuir de manera significativa las reclamaciones posteriores a las entregas de los proyectos, por lo tanto se requiere de intensivos procesos de difusión que contribuyan a generar confianza e interés en los empresarios del sector de la construcción, procesos de difusión que se deben basar en los resultados

obtenidos por empresas del sector inicialmente a nivel internacional y con el tiempo con datos provenientes de las estadísticas que serán arrojadas por las empresas locales y que serán estudiadas y analizadas por una entidad que solamente le interesa el bienestar y la prosperidad de las empresas del sector como lo es CIDICO.

Para aprovechar plenamente los beneficios de la realidad virtual inmersiva es recomendable que el personal a trabajar en ella tenga un proceso de adaptación que le permita acostumbrarse a asimilar las sensaciones que brinda la metodología con lo cual se puedan contrarrestar algunos efectos que pueden presentarse por su utilización en usuarios inexpertos como lo son los mareos causados en el usuario por estar inmerso en un ambiente en el cual hay libertad de movimiento.

Se puede concluir que la metodología estudiada basada en la realidad virtual inmersiva de modelos en 3D y 4D es, y será, sin duda una excelente herramienta disponible para el sector productivo y la academia con el fin de optimizar sus procesos, adecuar sus costos, minimizar las pérdidas y maximizar los rendimientos económicos y laborales.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANDERSON R., An introduction to the IPD Workflow for Vectorworks BIM users, Nemetschek Vectorworks, 2010, pages 1-32

ASME International. The Link Flight Trainer: A Historic Mechanical Engineering Landmark. Roberson Museum and Science Center. 2000. Disponible en el sitio Web: <http://web.mit.edu/digitalapollo/Documents/Chapter2/linktrainer.pdf>

BOTERO L. F., ACEVEDO H., Aplicación de Tecnologías BIM para el modelado virtual de proyectos de construcción. Informe de investigación, Universidad EAFIT. 2011, pp. 114-137.

BURDEA Grigore C., COIFFET Philippe. Virtual Reality Technology. John Willey and Sons. Second edition. New Jersey. 2003

CCMA., ACI, Alcaldía de Medellín. Guía de inversión en el sector construcción., Medellín. 2009

CCMA, Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, base de registro mercantil 2009 y 2011, Medellín.

CENAC, Centro de estudios de la construcción y el desarrollo urbano y regional, Boletín estadístico contexto sectorial Medellín Antioquia, Bogotá D.C. 2012.

CHEST OF BOOKS. Stereoscopic Projections. Scientific-american. (consultado en octubre de 2011). <http://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/sup6/Stereoscopic-Projections.html>

COMMENT Bernard. The Panorama Reaktion Books, Ltd. 1999.

CRAIG Alan B., SHERMAN William R., WILL Jeffrey D., Introduction to Virtual Reality, Developing Virtual Reality Applications, Morgan Kaufmann, Boston, 2009, Pages 1-32, ISBN 978-0-12-374943-7, DOI: 10.1016/B978-0-12-374943-7.00001-X.

DUGGAL Vijay. A General Guide To Computer Aided Design And Drafting: CADD, CAD. pp. ISBN: 0-9629165-9-5. 2000

EASTMAN Chuck, TEICHOLZ Paul, SACKS Rafael y LISTON Katheleen. BIM Handbook: A guide to Sons, Inc. New Jersey. p.p.15-17. ISBN 978-0-470-18528-5. 2008

FERNANDEZ Kiran Jude, RAJA Vinesh, WHITE Andrew, TSINOPOULOS Christos-Dimitris, Adoption of virtual reality within construction processes: a factor analysis approach, Technovation, Volume 26, Issue 1, January 2006, Pages 111-120, ISSN 0166-4972, DOI:10.1016/j.technovation.2004.07.013.

GREENWOOD D., Horne M., THOMPSON E., ALLWOOD C., WERNEMYr C. & WESRDALHL B. Strategic perspective of the use of Virtual Reality within the Building Industries of four countries. Architectural Engineer and design Management. p.p. 85-98. 2008.

JUAREZ Alex, SCHONENBERG Willem, CHRISTOPH Bartneck, Implementing a low-cost CAVE system using the CryEngine2, Entertainment Computing, Volume 1, Issues 3-4, December 2010, Pages 157-164, ISSN 1875-9521, DOI: 10.1016/j.entcom.2010.10.001.

JUSTICE, BERGERUD, GARRISON, CAFIERO, CHURCHES. Interactive 3D Application Development. EON Reality, Inc. and the Kentucky Community and Technical College System. 2009

KANG L. S., MOON H. S., DAWOOD N., KANG M. S., Development of methodology and virtual system for optimised simulation of road design data, Automation in Construction, Volume 19, Issue 8, December 2010, Pages 1000-1015, ISSN 0926-5805, DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.001.

KENT James. The Augmented Reality: Everything you need to know about Augmented reality. Lightning Source. 2011.

LEE, G.; SACKS, R.; EASTMAN, C. M. Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system, Automation in Construction 15 (6). pp. 758-776. 2006

MARTÍ F., Inmersión en la imagen Visual: Espacio, Visión y Presencia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. p.p.113-117. 2008.

MESSNER J., YERRAPATHRUNI M & BARATTA A. Using Virtual Reality to improve Construction Engineering Education. American Education Annual Conference & Exposition. Session 1121. 2003

MORTON H. Inventor in the field of Virtual Reality. (Consultado en noviembre de 2011) <http://www.mortonheilig.com/InventorVR.html>

PENTTILÄ H. Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression, ITCON 11 (Special Issue The Effects of CAD on Building Form and Design Quality), p.p. 395–408. 2006

PÉREZ F.J. Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual, Creatividad, TICs y sociedad de la información. Creatividad y Sociedad, marzo de 2011.

PURI A., KOLLARITS R. V., B. G. Haskell, Basics of stereoscopic video, new compression results with MPEG-2 and a proposal for MPEG-4, Signal Processing: Image Communication, Volume 10, Issues 1-3, MPEG-4, Part 2: Submitted papers, July 1997, Pages 201-234, ISSN 0923-5965.

RAMOS María del C., DELGADO José, CERVANTES Daniel y LERICHE Renato, Creación de ambientes virtuales inmersivos con software libre, DGSCA-UNAM, Volumen 8, numero 6, 2007. p.p. 1-9, ISSN: 1067-6079

REN Aizhu, WEN Yang, CHEN Chi, SHI Jianyong. Modeling of Irregular structures for the Construction Simulation in Virtual Reality Environments Based on Web. Automation in Construction 13 p.p. 639– 649. 2004

ROSEN Joseph M., SIMPSON Marcus K., LUCEY Charles, Virtual Reality and Surgery, In: Wiley W. Souba and Douglas W. Wilmore, Editor(s), Surgical Research, Academic Press, San Diego, 2001, Pages 1383-1392, ISBN 978-0-12-655330-7.

SAMPAIO A.Z., HENRIQUES P.G.. Virtual Reality Technology Applied on the Visual Simulation of Construction Activities. The Open Construction and Building Technology Journal, 2008, 2, 7-14

S.C-Y. Lu, M. Shpitalni, Rajit Gadh, Virtual and Augmented Reality Technologies for Product Realization, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 48, Issue 2, 1999, Pages 471-495, ISSN 0007-8506, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63229-6.

SMITH D.K., TARDIF M., Building Information Modeling, A Strategic Implementation. Guide for Architects, Engineers, Constructors, And Real Estate Asset Managers, John Wiley & Sons, 2009 216 p.

WALEY, A., THABET, Y. A virtual construction environment for preconstruction planning. Automation in Construction 12 (2), p.p. 123–131. 2003

WESTERDAHL Börje, SUNESON Kaj, WERNEMYR Claes, ROUPE' Mattias, JOHANSSON Mikael & ALLWOOD Carl Martin. Users' evaluation of a virtual reality architectural model compared with the experience of the completed building. Automation in Construction 15 p.p. 150–165. 2006.

WHYTE Jennifer. Innovation and users: virtual reality in the construction sector. Construction Management and Economic. 21, p.p. 565–572. 2003

WILLEM KYMMELL. Building Information Modeling: Planning and managing Construction Projects with 4D CAD and simulations. Mc Graw Hill Construction Series. p.p. 26-27. ISBN 978-0-07-149453-3. 2008.

XIANGYU Wang. Using Augmented Reality to Plan Virtual Construction Worksite. International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 4, No. 4 p.p. 502-515. 2007.