

**ESTUDIO DE LA BIÓNICA COMO METODOLOGÍA APLICABLE EN  
INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO Y SU FORMALIZACIÓN A TRAVÉS  
DE UNA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN DEL SEMILLERO  
HECAS-ID DE LA UNIVERSIDAD EAFIT.**

**LINA MARÍA MÉNDEZ G.  
VIVIANA OTÁLVARO G.**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE  
DISEÑO DE PRODUCTO  
MEDELLÍN  
2006**

**ESTUDIO DE LA BIÓNICA COMO METODOLOGÍA APLICABLE EN  
INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO Y SU FORMALIZACIÓN A TRAVÉS  
DE UNA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN DEL SEMILLERO  
HECAS-ID DE LA UNIVERSIDAD EAFIT.**

**LINA MARÍA MÉNDEZ G.  
VIVIANA OTÁLVARO G.**

**ASESOR  
Santiago Correa V.  
Doctor en Ingeniería  
Profesor Departamento de Ingeniería de Diseño**

**COORDINADOR  
José Fernando Martínez C.  
Master en Ingeniería  
Profesor Departamento de Ingeniería de Diseño**

**UNIVERSIDAD EAFITT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE  
DISEÑO DE PRODUCTO  
MEDELLÍN  
2006**

**Nota de aceptación**

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Medellín, Octubre de 2006**

*A nuestros padres, abuelos y santiagos....*

Agradecemos a todos aquellos que con su acompañamiento y apoyo constante hicieron posible este trabajo, nuestras familias y amigos, nuestro jefe de carrera, el personal de laboratorios de la universidad EAFIT y demás personas que siempre estuvieron presentes.

A nuestro asesor, Santiago Correa por creer en nosotras y ser un miembro más de nuestro equipo de trabajo, por su dedicación, entrega y amistad.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
LISTA DE TABLAS	14
LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE ANEXOS	25
RESUMEN	26
INTRODUCCIÓN	27
1. ANTECEDENTES	28
2. JUSTIFICACIÓN	31
3. OBJETIVOS	34
4. MARCO TEÓRICO	37
4.1 FUNDAMENTOS Y TEORÍAS DE LA BIÓNICA.	37
4.1.1 DEFINICIÓN DE BIÓNICA.	37
4.1.2 RESEÑA HISTÓRICA.	41
4.2 LA METODOLOGÍA DE LA BIÓNICA.	43
4.2.1 APLICACIONES DE LA BIÓNICA EN EL DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTOS.	43
4.2.2 RELACIÓN HOMBRE-ARTEFACTO-CONTEXO.	50
4.2.3 FORMA, ESTRUCTURA, MECANISMOS Y CONTEXTO COMO ELEMENTOS DE ANÁLISIS FUNCIONAL.	51
4.2.3.1 FORMA.	52
4.2.3.1.1. FORMA COMO FUNCIÓN.	54
4.2.3.1.1.1 LA CIRCUNFERENCIA.	54
4.2.3.1.1.2 EL HEXÁGONO.	56
4.2.3.1.1.3 LA ESPIRAL.	57
4.2.3.1.1.4 LA HÉLICE.	58
4.2.3.1.1.5 EL ÁNGULO.	59

4.2.3.1.1.6 LAS CURVAS GEOMÉTRICAS: PÁRABOLA, CATENARIA, ONDA.	59
4.2.3.2 ESTRUCTURA.	60
4.2.3.3 MECANISMOS.	62
4.2.3.4 ENTORNO.	64
4.2.4 PLANTEAMIENTO DE LA BIÓNICA COMO METODOLOGÍA APLICABLE A LA INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO.	65
4.2.5 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR.	69
4.2.5.1 INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS NATURALES.	70
4.2.5.2 DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES.	70
4.2.5.3 ABSTRACCIÓN DEL CONCEPTO.	70
4.2.5.4 ESTUDIO TÉCNICO DE VIABILIDAD.	71
4.2.5.5 PRUEBAS FUNCIONALES DEL CONCEPTO.	71
4.2.5.6 ESTUDIO DEL USUARIO.	71
4.2.5.7 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	72
4.2.5.8 DISEÑO CONCEPTUAL.	72
4.2.5.9 DESARROLLO DEL PROTOTIPO.	73
4.2.6 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	74
4.3 INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS NATURALES.	74
4.3.1 SELECCIÓN DE LOS SERES NATURALES A INVESTIGAR.	74
4.3.2 PORTAFOLIO DE SERES NATURALES.	76
4.3.2.1 CULEBRA VOLADORA	76
4.3.2.2 HUEVO	81
4.3.2.3 CACTUS	85
4.3.2.4 CITOESQUELETO.	88
4.3.2.5 PLUMA.	93
4.3.2.6 MÚSCULO.	99
4.3.2.7 ARMADILLO.	103

4.3.2.8 ERIZO DE MAR.	106
4.3.3 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE LOS PRINCIPIOS DE SOLUCIÓN.	110
4.3.3.1 ANÁLISIS CONCEPTUAL CULEBRA VOLADORA.	110
4.3.3.2 ANÁLISIS CONCEPTUAL HUEVO.	110
4.3.3.3 ANÁLISIS CONCEPTUAL CACTUS.	112
4.3.3.4 ANÁLISIS CONCEPTUAL CITOESQUELETO.	113
4.3.3.5 ANÁLISIS CONCEPTUAL PLUMA.	114
4.3.3.6 ANÁLISIS CONCEPTUAL MÚSCULO.	115
4.3.3.7 ANÁLISIS CONCEPTUAL ARMADILLO.	115
4.3.3.8 ANÁLISIS CONCEPTUAL ERIZO DE MAR.	116
4.3.4 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	117
4.4 ABSTRACCIÓN DEL CONCEPTO.	118
4.4.1 SELECCIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO.	118
4.4.2 EVALUACIÓN DE LOS REFERENTES BIOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL PORTAFOLIO CON BASE EN EL CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN GEOMÉTRICA EN ESTRUCTURAS DE SOPORTE.	119
4.4.3 ABSTRACCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL COMO PRINCIPIO DE SOLUCIÓN DEL REFERENTE BIOLÓGICO SELECCIONADO: EL CITOESQUELETO.	120
4.4.3.1 EL CITOESQUELETO.	120
4.4.3.2 ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	132
4.4.3.3 PROPIEDADES DE UNA ESTRUCTURA DE TENSEGRIDAD.	133
4.4.3.3.1 SIMPLICIDAD.	133
4.4.3.3.2 GEOMETRÍA Y EQUILIBRIO DE FUERZAS.	134
4.4.3.3.3 PRETENSIÓN.	135
4.4.3.3.4 ECONOMÍA.	135

4.4.3.3.5 FLEXIBILIDAD.	136
4.4.3.3.6 ESTABILIDAD EN CUALQUIER POSICIÓN.	137
4.4.3.3.7 RÁPIDA TRANSFERENCIA DE CARGAS.	137
4.4.4 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	137
4.5 ESTUDIO TÉCNICO DE VIABILIDAD.	138
4.5.1 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	138
4.5.1.1 ESTUDIO PREVIO DE DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	138
4.5.1.1.1 ESTRUCTURAS GEODÉSICAS.	138
4.5.1.1.2 ESTRUCTURAS PRETENSADAS.	139
4.5.1.1.2.1 SISTEMAS ESFÉRICOS.	139
4.5.1.1.2.2 SISTEMAS EN ESTRELLA.	141
4.5.1.1.2.3 SISTEMAS CILÍNDRICOS.	141
4.5.1.1.2.4 SISTEMAS IRREGULARES.	142
4.5.1.2 ANALISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	142
4.5.1.2.1 CÁLCULOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE TENSEGRIDAD PRISMÁTICA DE TRES BARRAS.	144
4.5.1.2.2 CONSTRUCCIÓN.	146
4.5.2 ESTUDIO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE EXISTENTES.	149
4.5.2.1 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS ESTRUCTURALES.	149
4.5.2.1.1 SISTEMAS DE FORMA ACTIVA.	149
4.5.2.1.1.1 CABLES.	150
4.5.2.1.1.2 ARCOS.	150
4.5.2.1.2 SISTEMAS DE VECTOR ACTIVO.	151
4.5.2.1.2.1 MIEMBROS A TENSIÓN.	151

4.5.2.1.2.2 MIEMBROS A COMPRESIÓN.	151
4.5.2.1.3 SISTEMAS DE MASA ACTIVA.	152
4.5.2.1.3.1 VIGAS.	152
4.5.2.1.4 SISTEMAS DE SUPERFICIE ACTIVA.	153
4.5.2.1.4.1 MEMBRANAS.	153
4.5.2.2 COMENTARIO.	154
4.5.3 DEFINICIÓN DE LAS DOS ESTRUCTURAS DE ESTUDIO.	154
4.5.3.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y MATERIALES.	156
4.5.3.1.1 PARÁMETROS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS.	156
4.5.4 IDENTIFICACIÓN DEL ANALISIS A REALIZAR.	158
4.5.5 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	161
4.5.5.1 ANÁLISIS MODAL.	161
4.5.5.1.1 FRECUENCIA EN FLEXIÓN SEGÚN EL ÁNGULO DE ROTACIÓN. (MODO N1).	161
4.5.5.1.2 FRECUENCIA EN COMPRESIÓN SEGÚN EL ÁNGULO DE ROTACIÓN. (MODO N3).	163
4.5.5.2 ANÁLISIS A FLEXIÓN.	164
4.5.5.2.1 DESPLAZAMIENTO EN X.	164
4.5.5.2.2 RIGIDEZ A FLEXIÓN.	165
4.5.5.3 VARIACIÓN DE LA MASA.	166
4.5.5.3.1 PORCENTAJE DE INCREMENTO DE MASA.	167
4.5.5.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA.	168
4.5.6 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL.	169
4.5.6.1 ANÁLISIS MODAL.	170
4.5.6.2 ANÁLISIS A FLEXIÓN.	171

4.5.6.2.1 DESPLAZAMIENTO EN X.	172
4.5.6.2.2 RIGIDEZ A FLEXIÓN.	173
4.5.6.3 VARIACION DE LA MASA RESPECTO AL ANGULO DE ROTACION.	174
4.5.6.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA.	175
4.5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	176
4.5.7.1 RESULTADOS ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	177
4.5.7.1.1 RESULTADOS ANALISIS MODAL.	177
4.5.7.1.2 RESULTADOS ANÁLISIS A FLEXIÓN.	179
4.5.7.2 RESULTADOS ESTRUCTURA CONVENCIONAL.	180
4.5.7.2.1 RESULTADOS ANALISIS MODAL.	180
4.5.7.2.2 RESULTADOS ANÁLISIS A FLEXIÓN.	180
4.5.7.3 COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE AMBAS ESTRUCTURAS	181
4.5.8 CONCLUSIONES.	182
4.5.9 MODELACIÓN.	183
4.5.9.1 MODELACIÓN ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	184
4.5.9.2 MODELACIÓN ESTRUCTURA CONVENCIONAL.	186
4.5.10 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS.	188
4.5.10.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL.	188
4.5.10.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	191
4.5.11 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	192
4.6 PRUEBAS FUNCIONALES.	194
4.6.1 DISEÑO DE MONTAJES.	195
4.6.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS PARA LAS PRUEBAS.	196
4.6.3 DOCUMENTACIÓN.	197
4.6.3.1 PRUEBAS DE DEFLEXIÓN ESTRUCTURA	199

CONVENCIONAL.	
4.6.3.2 PRUEBA DE DEFLEXIÓN ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL	200
4.6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.	201
4.6.5 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS.	203
4.6.6 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	204
4.7 PROCESO DE DISEÑO DE UN PRODUCTO CON BASE EN EL PRINCIPIO CONSTRUCTIVO DE LAS ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL.	205
4.7.1 ESTUDIO DEL USUARIO.	205
4.7.1.1 PERFIL Y COMPORTAMIENTO DE COMPRA.	206
4.7.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	209
4.7.2.1 ESTADO DEL ARTE.	211
4.7.2.2 REQUERIMIENTOS DEL PRODUCTO.	212
4.7.3 DISEÑO CONCEPTUAL.	214
4.7.3.1 PARTICULARIZACIÓN DEL CONCEPTO.	214
4.7.3.2 ANÁLISIS FUNCIONAL: CAJA NEGRA.	215
4.7.3.3 ARBOL DE FUNCIONES.	215
4.7.3.4 MATRIZ MORFOLOGICA.	216
4.7.3.5 MOOD BOARDS.	217
4.7.3.5.1 MOOOD BOARD USUARIO.	217
4.7.3.5.2 MOOOD BOARD CONTEXTO.	218
4.7.4 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO.	219
4.7.5 MATRIZ DE EVALUACIÓN.	224
4.7.6 DISEÑO DE DETALLE.	225
4.7.6.1 MODELACIÓN.	226
4.7.6.1.1 COMPONENTES.	226
4.7.6.1.2 RENDER.	228

4.7.7 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	230
4.8 PROPUESTA PARA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.	232
4.8.1 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.	244
5. CONCLUSIONES.	245
BIBLIOGRAFÍA.	250
BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS.	255
CITAS DEL PORTAFOLIO DE SERES NATURALES.	263
ANEXOS.	266

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla # 1. Matriz de selección.	120
Tabla # 2 Coordenadas generales del prisma de integridad tensional.	145
Tabla #3. Coordenadas primer prototipo.	146
Tabla # 4 Propiedades mecánicas de los materiales.	157
Tabla # 5 Datos de frecuencia en Modo N1 según ángulo de rotación y factor de pretensión.	162
Tabla #6 Datos de frecuencia en Modo N3 según ángulo de rotación y factor de pretensión.	164
Tabla # 7 Datos de desplazamientos en X según ángulo de rotación y factor de pretensión.	165
Tabla # 8. Datos de rigidez a flexión según ángulo de rotación y factor de pretensión.	166
Tabla # 9 Datos de la variación de masa según ángulo de rotación.	167
Tabla # 10 Datos de incremento de masa según ángulo de rotación y factor de pretensión.	168
Tabla #11 Datos porcentaje de eficiencia según ángulo de rotación en la estructura tipo tensegrity.	169
Tabla #12 Datos de frecuencia de la estructura convencional según ángulo de rotación.	171
Tabla # 13 Datos de Deformación en X según ángulo de rotación en la estructura convencional.	173
Tabla #14 Datos de Rigidez según ángulo de rotación en la estructura convencional.	174
Tabla #15 Datos masa según ángulo de rotación en la	175

estructura convencional.	
Tabla #16 Datos eficiencia según ángulo de rotación en la estructura convencional.	176
Tabla # 17 Variables geométricas para la estructura de integridad tensional.	181
Tabla #18. Variables geométricas para la estructura de integridad tensional.	184
Tabla # 19.Variables de la estructura convencional.	186
Tabla # 20 Datos de desplazamientos en X en estructura convencional.	199
Tabla #21 Datos de desplazamientos en X en estructura de integridad tensional con pretensión inicial.	200
Tabla #22 Datos de desplazamientos en X en estructura de integridad tensional con una segunda pretensión.	201
Tabla # 23 Comparación de resultados en ambas estructuras.	202
Tabla # 24 P.D.S del producto.	213
Tabla # 25 Matriz de evaluación.	224
Cuadro N 1. Estado del arte.	211
Cuadro N 2. Matriz morfológica.	216

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1 Estructura del velcro vista desde un microscopio	45
Figura 2.2 Ganchillos y superficie de adherencia.	45
Figura 2.3 Velcro.	45
Figura 2.4 Flor de Cardo alpino.	45
Figura 2.5 localización de presas del murciélago.	46
Figura 2.6 sistema de localización del Radar.	46
Figura 2.7 Murciélago.	46
Figura 2.8 Automóvil biónico diseñado por Mercedes Benz.	47
Figura 2.9 vista superior del automóvil. Biónica automotriz.	47
Figura 2.10 vista frontal del automóvil. Biónica automotriz.	47
Figura 2.11 Pez en el que se baso el diseño del automóvil Box Fish.	47
Figura 2.12 Hojas de loto.	48
Figura 2.13 Superficie autolimpiante.	48
Figura 2.14 Flor de loto.	48
Figura 2.15 Superficie del loto en el microscopio en conjunto con una molécula de agua.	48
Figura 2.16 Edificio “torso”.	49
Figura 2.17 Ciudad de las Ciencias y las Artes de Valencia.	49
Figura 2.18 Museo de las Ciencias Príncipe Felipe.	49
Figura 2.19 Auditorio de Tenerife. Sta Cruz de Tenerife.	49
Figura 2.20 Elementos formales en la naturaleza.	52
Figura 2.21 Circunferencia en la naturaleza.	54
Figura 2.22 Hexágonos en la naturaleza.	56
Figura 2.23 la espiral en la naturaleza.	57
Figura 2.24 La hélice en la naturaleza.	58
Figura 2.25 El Ángulo en la naturaleza.	59
Figura 2.26 Las curvas geométricas en la naturaleza.	59

Figura 2.27 Estructuras típicas en la naturaleza.	60
Figura 2.28 Mecanismos en la naturaleza.	62
Figura 2.29 Entornos en la naturaleza.	64
Figura 2.30. Referente formal.	66
Figura 2.31 Solución particular de un diseño inspirado en la biónica	66
Figura 2.32. Solución general de un diseño inspirado en la biónica	68
Figura 2.33 Metodología de trabajo.	73
Figura 3.1 Chrysopelea Paradisi.	76
Figura 3.2 Esqueleto de la serpiente.	76
Figura 3.3 Cambio de forma para el vuelo.	76
Figura 3.4 Aplanamiento de costillas.	77
Figura 3.5 Superficie ventral de la serpiente.	77
Figura 3.6 Sistema esquelético de la culebra.	78
Figura 3.7 Diagrama de cuerpo libre.	78
Figura 3.8 Sección transversal de la culebra.	79
Figura 3.9 Diagrama de vértebras y costillas en la culebra.	80
Figura 3.10 Paradisi en ambiente natural.	80
Figura 3.11 Geometría del huevo.	81
Figura 3.12 Cáscara de huevo.	82
Figura 3.13 Polluelo saliendo del cascaron.	82
Figura 3.14 Componentes de un huevo.	82
Figura 3.15 Intercambio de oxigeno a través de los poros.	83
Figura 3.16 Poro de un huevo visto en el microscopio.	83
Figura 3.17 Huevo y nido del huevo en ambiente natural.	84
Figura 3.18 Huevos de avestruz cerca de su nido.	84
Figura 3.19 Huevo dentro de su nido.	84
Figura 3.20 Carnegia Gigantea.	85
Figura 3.21 Costillas externas.	85

Figura 3.22 Dilatación de costillas del cactus.	85
Figura 3.23 Espinas y areolas en los cactus.	86
Figura 3.24 Areola con espinas.	86
Figura 3.25 Esquema de las areolas.	86
Figura 3.26 Paisajes característico del cactus.	87
Figura 3.27 Cactus en su ambiente natural.	87
Figura 3.28 Adaptaciones características, flores, espinas y raíces	87
Figura 3.29 Citoesqueleto de una célula epitelial.	88
Figura 3.30 Componentes generales de una célula.	88
Figura 3.31 Componentes de la célula.	88
Figura 3.32 Microtubulos.	89
Figura 3.33 Filamentos de actina en la célula endotelial de una vaca.	89
Figura 3.34 Monómeros de actina.	89
Figura 3.35 Subunidad Fibrosa.	89
Figura 3.36 Filamentos intermedios	90
Figura 3.37 Estructura conformada por subunidades de túbulina.	90
Figura 3.38 Microtúbulo de célula endotelial de vaca.	90
Figura 3.39 Enlace entre microfilamentos y microtubulos.	90
Figura 3.40 Filamentos intermedios. Citoesqueleto y centro celular.	90
Figura 3.41 Modelos tensegrity.	91
Figura 3.42 Microtúbulos.	91
Figura 3.43 Proceso de regeneración y transporte.	92
Figura 3.44. Célula animal.	92
Figura 3.45. Glóbulos rojos.	92
Figura 3.46 Pingüino emperador.	93
Figura 3.47 Principales tipos de plumas.	93
Figura 3.48 Diferencias formales en las plumas de las aves según su función.	93
Figura 3.49 En los pingüinos específicamente los nodos que forman las bárbulas reciben el nombre de cilios.	94

Figura 3.50 Barbulas y ganchillos.	94
Figura 3.51 Disposición de las plumas dejando hacia afuera el extremo superior del vexilo.	95
Figura 3.52 Forma hidrodinámica.	95
Figura 3.53 Estructura de la pluma.	95
Figura 3.54 Semi pluma pingüino.	96
Figura 3.55 Filamentos de queratina.	96
Figura 3.56 Ala de pingüino.	96
Figura 3.57 Diagrama para estudio de aislamiento térmico.	97
Figura 3.58 Pingüino saliendo del agua aun con la camara sin aire.	97
Figura 3.59 Disposición de las plumas en diferentes situaciones.	97
Figura 3.60 Antartida.	98
Figura 3.61 Pingüinos en su hábitat natural.	98
Figura 3.62 Pingüinos bebe dentro de la bolsa de su madre.	98
Figura 3.63 Sistema muscular humano.	99
Figura 3.64 Músculo estriado visto desde un Microscopio.	99
Figura 3.65 Composición del músculo Estriado.	99
Figura 3.66 Músculo esquelético en extremidades.	100
Figura 3.67 Estructura del músculo.	100
Figura 3.68 Miofibrilla.	101
Figura 3.69 Contracción del músculo estriado.	101
Figura 3.70 Miofilamentos de actina y miosina con ATP.	102
Figura 3.71 Terminales nerviosas en sarcomero.	102
Figura 3.72 Esqueleto humano.	102
Figura 3.73 Sistema nervioso central interactuando con las fibras musculares	102
Figura 3.74 Armadillo con pocas semanas de nacido.	103
Figura 3.75 Dasypus Novemencitus.	103
Figura 3.76 Escamas en el armadillo.	103
Figura 3.77 Armadillo de nueve bandas con pelo entre las lacas de	103

su armadura.	
Figura 3.78 Estructura y componentes de la armadura del armadillo.	104
Figura 3.79 Encapsulamiento de la coraza del armadillo.	104
Figura 3.80 Madriguera.	105
Figura 3.81 Armadillos en ambientes naturales.	105
Figura 3.82 Erizo de mar común.	106
Figura 3.83 Estructura ósea del erizo de mar.	106
Figura 3.84 Geometrización del erizo del esqueleto de un erizo de mar.	106
Figura 3.85 Estructura penta radial.	107
Figura 3.86 Estructura del erizo.	107
Figura 3.87 Esquema de componentes del sistema ambulacral.	107
Figura 3.88 Pedicelarios y espinas.	108
Figura 3.89 Componentes del sistema ambulacral.	108
Figura 3.90 Erizo en su ambiente natural.	109
Figura 3.91 Erizo de mar en comunidad.	109
Figura 3.92 Análisis conceptual culebra voladora.	110
Figura 3.93 Análisis conceptual cáscara.	111
Figura 3.94 Análisis conceptual cactus.	112
Figura 3.95 Análisis conceptual citoesqueleto.	113
Figura 3.96 Análisis conceptual pluma.	114
Figura 3.97 Análisis conceptual miofibrilla.	115
Figura 3.98 Análisis conceptual armadillo.	116
Figura 3.99 Análisis conceptual del sistema ambulacral del erizo de mar.	116
Figura 4.1 Grupo de células de un vaso sanguíneo.	121
Figura 4.2 Fluorescencia citoesqueleto célula eucariótica.	122
Figura 4.3 Microfilamentos de actina en fibroblastos de embrión de ratón.	123
Figura 4.4 Esqueleto de actina.	123
Figura 4.5 Cultivo de astrositos.	124

Figura 4.6 Filamento de queratina al interior de una célula.	124
Figura 4.7 Microtúbulos en microscopio.	125
Figura 4.8 Fibroblastos humanos.	126
Figura 4.9 Esquema del citoesqueleto.	127
Figura 4.10 Las integrinas se encuentran ancladas a la membrana celular.	128
Figura 4.11 La figura describe en dos imágenes el proceso mecanoquímico.	130
Figura 4.12 Las formas que adoptaban las células	131
Figura 4.13 Utilización de módulos.	136
Figura 5.1 Cúpula geodésica.	139
Figura 5.2 Clasificación de sistemas esféricos.	140
Figura 5.3 Domo 10V (niveles) de doble capa.	141
Figura 5.4. Distribución de cargas en una estructura prismática	144
Figura 5.5 Base triangular circunscrita en una circunferencia de radio "r"	145
Figura 5.6 Dimensiones de la base triangular del prisma.	147
Figura 5.7 Componentes a compresión.	147
Figura 5.8 Componentes a tensión.	147
Figura 5.9 Rotación del prisma convencional.	148
Figura 5.10 Estructura sin tensión.	148
Figura 5.11 Estructura con pretensión inicial. Rigidez normal.	148
Figura 5.12 Estructura con pretensión final. Alta rigidez.	148
Figura 5.13 Puente Akashi-Kaikyo en Japón.	150
Figura 5.14 Estructuras con componentes a compresión y tensión.	
152	
Figura 5.15 Vigas en I y en U.	152
Figura 5.16 Carpas (membranas).	153
Figura 5.17 Estructura prismática de integridad tensional.	155
Figura 5.18 Estructura prismática convencional.	156

Figura 5.19 “r” para el triangulo de lado 400mm.	157
Figura 5.20 Geometría de la estructura, empotramiento y dirección de las cargas	159
Figura 5.21 Frecuencia en flexión vs. ángulo de rotación.	162
Figura 5.22 Frecuencia en compresión vs. ángulo de rotación.	163
Figura 5.23 Desplazamiento en X vs. ángulo de rotación.	164
Figura 5.24 Rigidez a flexión vs. ángulo de rotación.	165
Figura 5.25. Variación de masa vs. ángulo de rotación.	166
Figura 5.26. Incremento de masa vs. ángulo de rotación.	167
Figura 5.27 Eficiencia vs. ángulo de rotación.	169
Figura 5.28 Frecuencia en flexión vs. ángulo de rotación.	171
Figura 5.29 Desplazamiento en X vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.	172
Figura 5.30 Rigidez vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.	173
Figura 5.31 Masa vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.	174
Figura 5.32 Porcentaje de eficiencia vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.	175
Figura 5.33 Comportamiento de la estructura en modo N1.	177
Figura 5.34 Comportamiento de la estructura en modo N2.	178
Figura 5.35 Comportamiento de la estructura en modo N3.	178
Figura 5.36 Deformación en x para un ángulo de 150°	179
Figura 5.37 Comportamiento de la estructura convencional.	180
Figura 5.38 Deformación en x para un ángulo de 150°	181
Figura 5.39 Isométrico estructura de integridad tensional.	184
Figura 5.40 Nodos, barras de compresión y cables.	185
Figura 5.41 Detalle inferior de nodos, barras de compresión y cables.	185
Figura 5.42 Vista superior de estructura de integridad tensional	185

Figura 5.43 Vista frontal de estructura de integridad tensional	186
Figura 5.44 Isométricos de estructura convencional.	187
Figura 5.45 Detalle inferior de estructura convencional.	187
Figura 5.46 Vista frontal y lateral de estructura convencional.	188
Figura 5.47 . Perforaciones de los nodos en la fresadora.	189
Figura 5.48. Construcción de estructura convencional.	190
Figura 5.49 Fotografía de Estructura convencional.	190
Figura 5.50 Fotografía de la construcción en estructura de integridad tensional.	192
Figura 6.1 Diagrama del ensayo.	195
Figura 6.2 Fotografía del montaje de las pruebas en la estructura convencional.	196
Figura 6.3 Fotografía del montaje de los instrumentos.	197
Figura 6.4. Pruebas de la estructura convencional.	198
Figura 6.5 Fotografía de la sujeción de la estructura	199
Figura 6.6. Fotografía del aumento de pretensión.	201
Figura 7.1 Aspectos antropométricos del usuario.	206
Figura 7.2 Caja negra del producto.	215
Figura 7.3 Árbol de funciones del producto	215
Figura 7.4 Mood board del usuario.	217
Figura 7.5 Mood board del contexto.	218
Figura 7.6 Alternativa de diseño No 1.	219
Figura 7.7 Alternativa de diseño No 2.	220
Figura 7.8 Alternativa de diseño No 3.	221
Figura 7.9 Alternativa de diseño No 4.	222
Figura 7.10 Alternativa de diseño No 5.	223
Figura 7.11 Detalle de peldaño	225
Figura 7.12 Detalle de sujeción.	225
Figura 7.13 Detalle de sujeción 2.	226
Figura 7.14 Separador.	226

Figura 7.15 Barras de la estructura.	226
Figura 7.16 Peldaños.	227
Figura 7.17 Ángulos de sujeción.	227
Figura 7.18 Separadores.	227
Figura 7.19 Producto en contexto.	228
Figura 7.20 Isométricos del producto.	229
Figura 7.21 Biblioteca en uso.	229
Figura 7.22 Biblioteca en Contexto	230

## LISTA DE ANEXOS

**Pág.**

Anexo A. Anteproyecto

Anexo B. Imágenes de resultados del análisis de  
elementos finitos

Anexo C. Planos de construcción de las estructuras.

Anexo D. Proceso de construcción y pruebas del prototipo.

Anexo E. Planos de construcción del producto.

## RESUMEN

La biónica es reconocida como una herramienta garante para la definición de nuevos conceptos. Esta metodología puede ser abordada desde la investigación, o desde un problema previamente definido, para esto se vale de un análisis de la relación del usuario con el producto, dentro de un contexto específico, con base en el estudio de unos elementos de análisis definidos como: forma, estructura, mecanismo y entorno, en este estudio vinculados con la función de los mismos.

Lo anterior toma forma en la abstracción de un concepto que tiene como base una analogía biológica. La cual en este caso, toma como modelo el citoesqueleto, y confluye en la abstracción de una estructura rígida y autoequilibrada, conocida como estructura de integridad tensional.

Este estudio plantea una comparación de una estructura convencional con una estructura de integridad tensional bajo el criterio de optimización geométrica, demostrando su aplicación en la ingeniería y en el diseño, y formalizándola a través de un proyecto de investigación y el desarrollo de un producto.

**PALABRAS CLAVE:** Biónica, Sistemas naturales, Citoesqueleto, Optimización geométrica, Eficiencia estructural, Integridad tensional, innovación.

## INTRODUCCIÓN

La biónica se remonta a los primeros años y pobladores de este planeta. Desde ese entonces la emulación de las características de otros, ha sido la mejor estrategia para la supervivencia. Su finalidad es la abstracción de un principio de solución contenido en un sistema o ser natural, y depurado en el desarrollo de tecnología.

Esta monografía apunta a demostrar como la metodología de la biónica por medio del pensamiento analógico, redirecciona el pensamiento tradicional y abre un camino que rompe muchos de los paradigmas de diseño existentes, tanto a nivel formal, como funcional acudiendo a la investigación de las estrategias de la naturaleza. En adición a esto busca fortalecer este concepto, fusionándolo con elementos de la Ingeniería que permitan una abstracción y particularización más clara, encaminando su funcionalidad al desarrollo de un producto exitoso.

Para este fin se ha realizado una investigación de seres naturales, documentada en un portafolio, del cual se selecciono un principio de solución con base en el criterio de optimización geométrica, el citoesqueleto. Se ha descrito igualmente el proceso de abstracción de un concepto, las estructuras de integridad tensional. Este concepto es confrontado con uno convencional para estudiar las diferencias en su comportamiento por medio de un análisis exhaustivo en elementos finitos y pruebas finales en prototipos, y se justifica con el diseño de un producto basado en el concepto seleccionado. Para terminar se plantea un proyecto de investigación en biónica, enfocado al desarrollo de sistemas estructurales, dentro del semillero de investigación del departamento de Ingeniería de Diseño de Producto.

## 1. ANTECEDENTES

Dentro de los alcances educativos de la Universidad EAFIT se han postulado los programas de investigación como fundamentos propios y soporte básico del conocimiento intelectual expresados en los propósitos institucionales como el deber de, entre otros, *“Preservar la excelencia en sus procesos de enseñanza-aprendizaje, investigación y proyección social”* y *“conservar el reconocimiento de la comunidad académica nacional e internacional para sus investigaciones y distintos programas de formación”*<sup>1</sup> y en la visión como:

*“La Universidad **EAFIT**, inspirada en los más altos valores espirituales, en el respeto de la dignidad del ser humano y consciente de su responsabilidad social, aspira a ser reconocida nacional e internacionalmente, por sus logros académicos e investigativos y porque:*

*Desarrollará la capacidad intelectual de sus alumnos y profesores en todos los programas académicos, con la investigación como soporte básico.*

*Contribuirá al progreso de la Nación con programas innovativos de investigación y profesionales con formación académica respaldada en los valores fundamentales de la persona y en especial en el respeto a la democracia y a la libre iniciativa privada”*<sup>2</sup>.

Estos principios direccionan las actividades, semilleros y grupos de investigación que se realizan dentro de la universidad (contando ahora con 40 grupos de investigación, 35 de ellos reconocidos por conciencias<sup>3</sup>) y fundamentan las políticas implementadas para el apoyo de esta clase de proyectos enfocados al

---

<sup>1</sup> Propósitos institucionales. Universidad EAFIT. Reglamento universitario.

<sup>2</sup> Visión Universidad EAFIT. Reglamento universitario.

<sup>3</sup> Fundamentos de investigación, Universidad EAFIT. [sitio en Internet]. Disponible en: <http://www.eafit.edu.co/EafitCn/Investigacion/Index>. [Octubre 2005]

mejoramiento continuo del conocimiento de los docentes, estudiantes y por consiguiente de los programas académicos. Dentro de estos fundamentos el programa de Ingeniería de Diseño de Producto ha comenzado a implementar estos lineamientos, proponiendo como punto de partida el semillero de investigación HECAS-ID (Herramientas para el cálculo y simulación en ingeniería de diseño) que complementa la formación académica de los estudiantes y los docentes en diversas áreas de la ingeniería de diseño. Dentro de los proyectos del semillero se destacan el desarrollo de equipos biomédicos para fortalecer el cluster de la salud en Antioquia y el proyecto “Matemáticas y Emociones” que pretende establecer relaciones de vínculo entre la percepción de un producto y su desarrollo de ingeniería.

En un momento en el que la tecnología evoluciona rápidamente en las diferentes disciplinas del saber, en que el diseño se ve implícito en cada uno de los productos y la innovación es una herramienta fundamental para el desarrollo de procesos en todas las áreas de conocimiento, la investigación se convierte en un pilar básico para la búsqueda continua de métodos, fundamentos y principios elementales que soporten dicha evolución. Dicho esto, cabe resaltar que el futuro de la investigación actualmente radica en el desarrollo de convergencias disciplinares. El diseño no escapa a esta tendencia. La ingeniería y la biología han encontrado un punto de convergencia y de él ha surgido una nueva disciplina: la biónica.

La biónica se define como el análisis de sistemas encontrados en la naturaleza para hallar métodos e innovaciones aplicables al diseño estudiando estos sistemas desde cuatro puntos fundamentales: forma, función, contexto y estructuras.

Desde esta exploración varios científicos, ingenieros y diseñadores a lo largo del tiempo han ido formando una estructura con cuerpo y nombre propio desde diferentes clases de ciencias y sectores y aplicada a un sin fin de concepciones

dando siempre al final un resultado innovador que ha implicado aspectos fundamentales en la evolución del diseño y la tecnología.

Desde el año 1500 el hombre ya se había preocupado por explorar y comprender el funcionamiento de los seres vivos, comenzando con Leonardo Da Vinci con su diseño de un aparato volador llamado “ornitóptero” concebido desde el análisis y estudio de las alas del murciélago. En 1984 el ingeniero suizo Georges de Mestral<sup>4</sup> al analizar la planta de la bardana y como las semillas con pequeños cardos se adherían a la ropa, construyó un cierre utilizado hoy en día en miles de productos. Más tarde, el arquitecto español Antoni Gaudi, basándose en formas y estructuras naturales realizó composiciones arquitectónicas extraordinarias admiradas hoy en día por su perfección. Gaudi, analizando la parábola catenaria, por ejemplo, logró construir estructuras rígidas y simples para el sostenimiento de catedrales y edificios monumentales que después de más de 100 años siguen en pie. Actualmente algunas cortinas autolimpiantes de los rascacielos de Nueva York imitan el párpado y el ojo humano. La columna vertebral humana ha sido tan analizada y estudiada, que, con base en ella se ha construido “Torso”<sup>5</sup>, un edificio diseñado por el arquitecto español Santiago Calatrava el cual imitando el movimiento de torsión de la espalda humana se retuerce sobre si mismo dando un giro de 90 grados desde su base hasta la planta más alta.

Esta ciencia ha sido percusora de un gran conocimiento científico, y ha ayudado al desarrollo tecnológico de varios siglos como medio para excavar en la naturaleza mecanismos y estructuras que sirvan de soporte a nuevos desarrollos aplicados a productos de alta ingeniería.

---

<sup>4</sup> Velcro. [Sitio en Internet]. <http://www.asci.org/artikel648.html>. [Marzo. 2006]

<sup>5</sup> Edificio “torso” (Malmö, Suecia). Santiago Calatrava [Sitio en Internet]. [www.calatrava.com](http://www.calatrava.com) [Febrero. 2006]

## 2. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados anteriormente se hace evidente la necesidad de sustentar la base de la ingeniería y el diseño en el fortalecimiento de la investigación científica, profundizando en conocimientos interdisciplinarios que converjan entre sí, y que apoyen la búsqueda de soluciones innovadoras a las necesidades actuales en términos de productos y procesos, ya que nos encontramos en un universo de desarrollos tecnológicos cada vez más complejos los cuales deben ser comprendidos y por lo tanto se requiere una actualización de conocimiento permanente.

“La biónica es una ciencia que examina sistemáticamente las posibles transposiciones de mecanismos naturales y procesos biológicos a la tecnología humana”<sup>6</sup>. Esta definición sustenta la hipótesis de la aplicación de la biónica como metodología de diseño, puesto que toma elementos de sistemas naturales analizando aspectos como forma, función, contexto y estructura con el fin de aplicarlos a desarrollos técnicos y conceptuales para innovar en el diseño de productos, involucrando otras diferentes ciencias como las matemáticas, la física y la biología como herramientas de dichos desarrollos.

Al respecto, la aplicación de la biónica en el desarrollo de productos, puede suponer grandes ventajas, entre las cuales se destacan:

---

<sup>6</sup> Mangado A. Biónica: el arte de copiar a la naturaleza. Webanalog. Disponible en [http://webanalog.blogspot.com/2003\\_08\\_01\\_webanalog\\_archive.html](http://webanalog.blogspot.com/2003_08_01_webanalog_archive.html)

- La biónica con frecuencia propone soluciones no viables con la tecnología disponible, por lo que se hace necesario desarrollar nueva tecnología y de esta manera se genera auténtica innovación.<sup>7</sup>
- Las soluciones que la biónica propone son de carácter general y sistémico, y por lo tanto no se aplican a un problema específico sino a un género de problemas o producen sistemas más que soluciones particulares, siendo por esto muy versátiles y adaptables.<sup>8</sup>
- Las analogías empleadas producen soluciones que la mayoría de las veces no recuerdan de forma evidente al punto de partida natural, ya que son una interpretación de éste.<sup>9</sup>

Dichas hipótesis pretenden sustentar la biónica como fuente de innovación en el desarrollo de nuevas tecnologías y por lo tanto puede convertirse en una herramienta eficiente para el desarrollo de nuevos productos dentro de la ingeniería, puesto que después de su análisis se pueden obtener diferentes soluciones como combinaciones de mecanismos múltiples que sirven de punto de partida para este fin.

Por último, se pretende con este proyecto contribuir al fortalecimiento de la labor investigativa en la Universidad EAFIT, específicamente en semillero de investigación del Departamento de Diseño HECAS-ID. A éste respecto, cabe resaltar que este proyecto de grado tiene como finalidad plantear un proyecto de investigación formal por parte del semillero a la Universidad. Éste, en caso de ser

---

<sup>7</sup> Sierra Rodríguez F., Sañudo LG., Vanegas D.E., Estructuras ligeras: ¿Por qué miramos la naturaleza? Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana; 2006. 13 p.

<sup>8</sup> *Ibíd.*, p. 13

aprobado, puede considerarse como el punto de partida de una línea de investigación en biónica dentro del departamento de Ingeniería de Diseño.

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 13

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL.**

Realizar una monografía sobre la biónica como metodología aplicable en Ingeniería de Diseño de Producto, demostrando su viabilidad a través del diseño y desarrollo de un prototipo funcional que sustituya a una estructura mecánica convencional y formalizada a través de una propuesta de investigación del semillero HECAS-ID a la Universidad EAFIT.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

3.2.1 Investigar los fundamentos y teorías de la biónica, que sirvan como base para el desarrollo del alcance del proyecto mediante la búsqueda de información de fuentes primarias y secundarias.

3.2.2 Investigar los desarrollos existentes y las metodologías utilizadas en el diseño de productos con base en la biónica, con el fin de conocer las características de este proceso mediante la búsqueda de información de fuentes primarias y secundarias.

3.2.3 Realizar una investigación de sistemas naturales que analice los fundamentos básicos de la biónica aplicada al diseño de productos: forma, función, estructura y contexto.

3.2.4 Desarrollar un portafolio con una selección de los sistemas naturales aplicables como principios de solución para el desarrollo de productos, teniendo en cuenta el enfoque de la investigación (soluciones estructurales).

3.2.5 Identificar las diferentes estructuras mecánicas convencionales, en el ámbito de la Ingeniería de Diseño de Productos<sup>10</sup>, susceptibles de sustitución mediante un proceso de diseño sustentado en la biónica y empleando como herramienta metodológica el Portafolio de Sistemas Naturales.

3.2.6 Seleccionar una de las alternativas identificadas para realizar el proceso de sustitución basado en biónica atendiendo al criterio de optimización geométrica, esto es, disminución de masa y aumento de la resistencia mecánica, sin incrementar significativamente los costos de producción.

3.2.7 Sustentar el diseño de la alternativa seleccionada mediante la aplicación de técnicas como modelación geométrica y simulación por elementos finitos, que verifiquen la validez funcional y estructural de la misma.

3.2.8 Construir un prototipo funcional por medio de la aplicación de técnicas de modelos y prototipos.

3.2.9 Demostrar la validez del diseño propuesto mediante pruebas de uso y/o función aplicadas al prototipo.<sup>11</sup>

3.2.10 Desarrollar una propuesta formal de investigación a la Universidad EAFIT por parte del semillero HECAS-ID, sustentada en los resultados obtenidos en la presente investigación.

---

<sup>10</sup> Se entiende como ámbito de la Ingeniería de Diseño de Productos, aquellas soluciones estructurales que sustentan el desarrollo de productos como artefactos técnicos. No se pretende explorar las soluciones estructurales concernientes a la arquitectura o a la ingeniería civil.

<sup>11</sup> Se entiende como pruebas de uso y/o función aquellas pruebas que durante el desarrollo del proyecto se identifiquen como esenciales para validar el diseño propuesto. Estas pruebas no se refieren a las pruebas de usuario típicas que se llevan a cabo en el diseño formal de un producto, ya que el alcance de la presente investigación no es conducente al desarrollo de un producto final.

3.2.11 Documentar la información recolectada en las diferentes etapas del proyecto.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 FUNDAMENTOS Y TEORÍAS DE LA BIÓNICA

#### 4.1.1 DEFINICIÓN DE BIÓNICA.

La naturaleza ha desarrollado desde sus orígenes una infinidad de materiales, procesos, estructuras y estrategias que han demostrado su efectividad desde la prehistoria.<sup>12</sup> Los sobrevivientes de la selección natural pueden demostrar como lograron con diferentes características de adaptación, aprendizaje, autoorganización, autoreparación, etc. continuar poblando este planeta.

Como su nombre claramente lo indica la biónica es una combinación entre BIO, que significa vida y el sufijo NICA de la palabra técnica. La biónica es una ciencia basada en una técnica analógica que toma como objeto de estudio la fisiología, el comportamiento y los procesos biológicos de sistemas y seres naturales, para aplicar los principios de su funcionamiento al desarrollo de soluciones tecnológicas. Este aprendizaje que obtiene el hombre a través de la observación de la naturaleza tiene como mayor reto su uso en la producción de diseños cotidianos, adicionándoles una característica que es inherente a todas las soluciones abstraídas de la biónica, la innovación<sup>13</sup>.

La técnica analógica no es una simple emulación textual de un referente biológico. Se trata de abstraer con base en un pensamiento analógico los principios de funcionamiento, morfológicos y estructurales de estos, por medio de un análisis

---

<sup>12</sup> El futuro esta en la naturaleza. Biónica: Descubrir y aprovechar tecnologías mejoradas durante millones de años. Claasvision 2006. Se encuentra en [www.claas.com/countries/generator/cl-pw/es/fun-shop/claas-vision/artikel/Titelbericht,lang=es\\_ES.pdf](http://www.claas.com/countries/generator/cl-pw/es/fun-shop/claas-vision/artikel/Titelbericht,lang=es_ES.pdf)

<sup>13</sup> *Ibíd.*

que tiene como resultado soluciones conceptuales, las cuales si son la plataforma de diseño de productos.

La forma, los mecanismos, la estructura y el entorno constituyen los elementos de análisis de un sistema natural. Estos elementos están directamente relacionados, y dependiendo de las características adaptativas que deba adoptar para su supervivencia en un contexto dado, sufren modificaciones que especializan los procesos y funciones requeridas respecto a las condiciones del medio.

La naturaleza ha sido diseñada para no tener errores, las formas demuestran eficiencia, las estructuras autoestabilidad y los mecanismos funcionalidad. Ningún elemento falta o esta demás, en otras palabras es equilibrio. Además cada elemento de un sistema cuenta con características propias que afectan directamente su comportamiento dentro de este. Las cualidades de un solo elemento no son las mismas que la del conjunto, no consiste en una suma de partes, ni se puede predecir por el estudio individual de cada una,<sup>14</sup> este comportamiento recibe el nombre de Sinergia y es frecuente encontrarlo en estructuras biológicas.

Dentro de las soluciones mas comunes que se encuentran en la naturaleza están la flexibilidad, el ahorro de energía, lo máximo en lo mínimo, el todo es más que la suma de las partes, el aligeramiento y la forma como elemento funcional y estructural<sup>15</sup>. Por lo tanto es evidente que la aplicación de estas cualidades que ofrece la gran diversidad de sistemas naturales que coexisten en el planeta, permite construir un modelo óptimo, económico y armonioso; orientado a obtener soluciones y productos que faciliten la vida humana. Generalmente este tipo de soluciones no han sido exploradas, por lo tanto no cuentan con una explicación

---

<sup>14</sup> Rodríguez, CM. (2000). Arquitectura Metamórfica. Universidad Nacional de Colombia. 286 p.

<sup>15</sup> Miembros de la Línea de Investigación en Biónica de la UPB. Fundamento Grupo de Investigación en Biónica Universidad Pontificia Bolivariana.

que justifique el modelo encontrado. Cuando esto sucede es el mismo modelo el que se asume como fundamento.

La medicina es una de las ciencias más beneficiadas con los descubrimientos tecnológicos biónicos. En la práctica, la biónica ha profundizado en temas mecánicos como prótesis. La mano biónica, oído biónico, ojo biónico, músculo biónico, etc. son pocos ejemplos de los adelantos que se han logrado aplicando esta metodología en el diseño, logrando una gran similitud funcional a la que no se había llegado con otro tipo de sistemas convencionales. Para este tipo de aplicaciones la técnica que acompaña la biología, se soporta en fundamentos de electrónica, mecatrónica y en la investigación de nuevos materiales.

Analizar un problema desde la biónica puede hacerse de dos formas. La primera es partir de un problema específico, y con base en las características de este, buscar soluciones aproximadas en la naturaleza para su posterior estudio. La segunda opción, es estudiar bases biológicas que ofrezcan soluciones generales las cuales pueden ser depuradas en soluciones particulares para problemas específicos<sup>16</sup>.

Los sistemas biónicos se pueden dividir en dos tipos:<sup>17</sup>

- Sintético – Analógico. Tecnologías desarrolladas con base en adaptaciones de la naturaleza. Ejemplo, el radar inspirado por los principios de ecolocalización del murciélago.

---

<sup>16</sup> El futuro esta en la naturaleza. Op.cit.

<sup>17</sup> Von der Becke. CH. Glosario de Carlos von der Becke: Biónica. Portal de Carlos Horacio von der Becke. Disponible en <http://members.fortunecity.es/rednovohcop/b.html>

- Sintético – Compuesto. Tecnologías que combinan partes técnicas con partes vivas. Ejemplo, neuronas que por cultivo de tejidos crecen en placas electrónicas.

La biónica puede descomponerse en diversas ramas que facilitan el estudio de un sistema natural. El análisis de un solo ser, comprende estudios de mecanismos, estructuras, materiales, sinergia, formas, energía, etc. por esta razón surgen disciplinas que se encargan del estudio específico de estos aspectos:

Biomimética. Imitación de principios funcionales de la naturaleza para la creación de nuevos materiales y estructuras<sup>18</sup>.

Biomecánica. Ciencia y tecnología de los movimientos que pueden ejecutar animales simples y complejos para armonizar con sus condiciones anatómicas<sup>19</sup>.

Bioingeniería. Diseño de modelos y dispositivos que imitan sistemas naturales<sup>20</sup>.

Biotechnología. Toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos<sup>21</sup>.

Biomateriales. Disciplina que estudia las propiedades físicas y químicas de materiales encontrados en la naturaleza, y una posible materialización de estos.

---

<sup>18</sup> *Ibíd.*

<sup>19</sup> *Ibíd.*

<sup>20</sup> *Ibíd.*

<sup>21</sup> Universidad de Salamanca. El Centro BioInfo. Biotechnología. IUFRO. Disponible en [http://iufro-archive.boku.ac.at/iufro/silvavoc/glossary/3\\_0es.html](http://iufro-archive.boku.ac.at/iufro/silvavoc/glossary/3_0es.html)

Tan efectiva y multidisciplinar es la biónica que es utilizada en otros campos diferentes al de diseño, como lo son la política y los negocios. Al igual que en el diseño no se toman analogías directas sino abstracciones para resolver problemas de datos complejos.

#### **4.1.2 RESEÑA HISTORICA**

La Biónica es tan antigua como el hombre, ya que consciente o inconscientemente se ha usado desde la prehistoria hasta nuestros días; descubriendo las formas básicas de la naturaleza los hombres prehistóricos crearon armas filosas para casar, estudiando comportamientos típicos de manadas se ayudaban para capturar mas fácilmente animales peligrosos y observando nidos de animales construían sus cuevas; No se sabe desde cuando exactamente el hombre comenzó a mirar la naturaleza y a aprender de ella, pero incluso en la mitología griega, Dédalo fabrico unas alas de cera para su hijo Icaro utilizando de ejemplo las alas de los pájaros para que éste pudiera salir de la isla de creta.

En el renacimiento surge uno de los personajes mas importantes de la época y en gran medida un precursor de la biónica, Leonardo da Vinci (1452-1519), quien se podría decir, fue el primer artista, filosofo y científico que en el siglo XIII con su magnifica observación e investigación<sup>22</sup> documentaba en sus cuadernos análisis de seres vivos y utilizando estos principios comenzó a diseñar diferentes clases de aparatos como el famoso ornitóptero, maquina voladora similar a un helicóptero que desarrollo con base en el estudio de las aves y sus alas; el legado de Leonardo sirvió de inspiración para diseñar y construir maquinas voladoras

---

<sup>22</sup> Valdosierra, c. Biónica y la reinención de lo natural [Articulo en Internet].  
<http://www.dw-world.de/dw/article/0,,1743258,00.html?maca=spa-mozilla-547-rdf> [febrero. 2006]

basándose en el estudio de las aves con gran éxito, incluso hoy en día la aeronáutica es uno de los campos mas beneficiados con grandes desarrollos y aplicaciones partiendo de diferentes clases de seres vivos.

En el siglo XIX Sir Joseph Paxton<sup>23</sup> también utilizo la biónica para diseñar la cubierta del Crystal Palace en Hyde Park basándose en un nenúfar sudamericano, cuyas delicadas hojas de hasta 2 metros de diámetro podían soportar 90 kg. de peso gracias a un sistema de nervaduras que poseía el reverso de la hoja.

En 1868 en Tejas EEUU, Michael Nelly al observar las plantas con espinas que conservaban al ganado quieto en un mismo lugar patento un alambre especial que actualmente es conocido como alambre de púas.

Uno de los ejemplos más admirables que se puede contemplar hoy en día son las obras del arquitecto español Antoni Gaudi, quien por medio del estudio de formas y estructuras naturales realizó composiciones arquitectónicas extraordinarias admiradas por su perfección. Este arquitecto utilizaba en fachadas, estructuras y ornamentos; curvas, líneas, y contornos de la naturaleza para sus creaciones.

No es sino hasta 1960 cuando el comandante de la U.S Air Force Jack Steele<sup>24</sup> definió el termino biónica como el análisis del funcionamiento real de los sistemas vivos y, una vez descubiertos sus trucos, materializarlos en aparatos; desde este momento la biónica es reconocida como una ciencia que basándose en 2700 millones de años de evolución muestra al hombre lo útil que pueden ser los mecanismos y estructuras naturales para el desarrollo de la tecnología en muchos campos de la ciencia.

---

<sup>23</sup> Von der Becke, Op.cit.

## **4.2 LA METODOLOGÍA DE LA BIÓNICA**

### **4.2.1 APLICACIONES DE LA BIÓNICA EN EL DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTOS.**

Aplicar la metodología de la biónica al diseño y desarrollo de productos, implica romper paradigmas y explorar nuevas soluciones formales y funcionales para los problemas y necesidades del día a día. En un momento en que en el mundo se habla intensamente del diseño, con énfasis en la innovación, la eficiencia, la sostenibilidad, etc. esta metodología aporta todo el conocimiento que la sabia naturaleza ha adquirido en los miles de años de su existencia. Y que mejor manera para evidenciar la aplicabilidad de la metodología, que demostrar a través de diferentes ejemplos de desarrollo de productos como la biónica logra una abstracción funcional de una analogía natural.

- Ejemplo de forma como función.

VELCRO

- Ejemplo de mecanismo.

RADAR.

- Ejemplo de estructura.

BOXFISH

- Ejemplo de propiedades de materiales.

LOTUSAN

---

<sup>24</sup> Urbina Polo, I. Biónica: rescate de sistemas naturales. Artículo publicado en la sección de Arquitectura del Diario

- Ejemplo de Aplicación a la arquitectura.

SANTIAGO CALATRAVA

# VELCRO

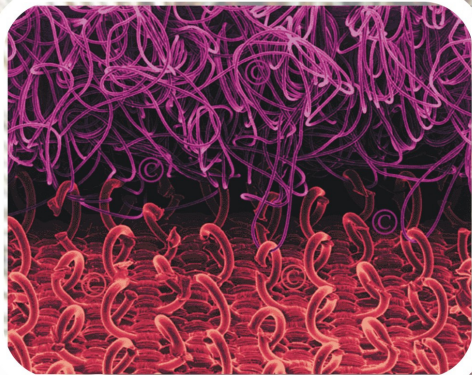


Figura 2.1 Estructura del velcro vista desde un microscopio

Nace de una investigación del ingeniero suizo Georges de Mestral en 1941 al observar en un microscopio las flores del Cardo Alpino que se adherían fuertemente a su pantalón.<sup>1</sup>

Observo que aquella planta poseía una superficie compuesta por diminutos ganchillos que permitían una gran adherencia a la superficie de su pantalón y al pelo de los animales.

Más tarde se convirtió en un sistema de cierre sencillo, resistente y práctico utilizado para miles de aplicaciones en diferentes campos.

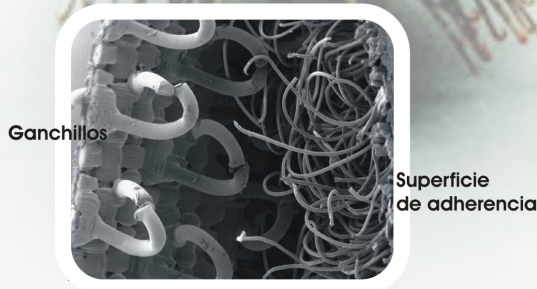


Figura 2.2 Ganchillos y superficie de adherencia

## EJEMPLOS

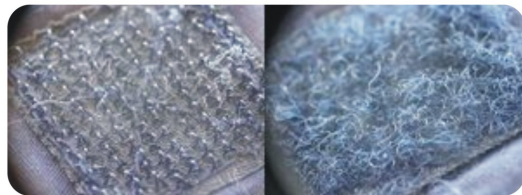


Figura 2.3 Velcro



Figura 2.4 Flor de Cardo alpino

1. Historia del velcro. [Sitio en internet]. [www.velcro.es](http://www.velcro.es). [Febrero 2006]

# RADAR



El radar fue inventado en 1935 y consiste en un dispositivo de localización para determinar la distancia de objetos como barcos o aviones, basado en la medición del tiempo que tarda en volver un impulso de radiofrecuencia, cuando es reflejado en un objeto cercano. En 1938 G. W. Pierce y D. R. Griffin compararon las características del radar de un murciélago con los tipos de radar fabricados por el hombre, y llegó a la conclusión de que el sistema empleado por éstos era superior a todas las técnicas inventadas por el hombre. Estos estudios conjuntamente a los avances en el radar electrónico y el radar, contribuyen al desarrollo de nuevas tecnologías afines a este concepto.

El murciélago por medio de la comparación entre las ondas que emite y que recibe capta los objetos que se encuentran en el ambiente y sus movimientos. Produce 20000 ondas por segundo y realiza una comparación sin errores mediante dos neuronas ubicadas su cerebro, una que capta las ondas del objeto en movimiento y otra que las recibe. Las neuronas están sincronizadas para que las ondas que produce el murciélago sean siempre mas altas que las del objeto en movimiento y sea lo mas eficiente posible.

Figura 2.5 localización de presas del murciélago

## EJEMPLOS

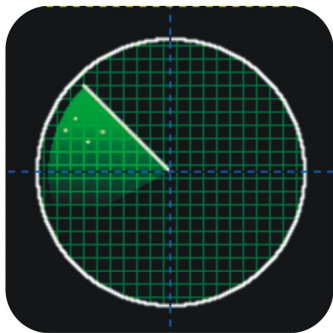


Figura 2.6 sistema de localización del Radar



Figura 2.7 Murciélago

2. GRIFFIN, Donald, Animal Engineering, San Francisco: The Rockefeller University.  
 3. YAHYA, Harun. El diseño en la naturaleza. Harun Yahya internacional. 2006. [Febrero 2006].

## BOX FISH



Figura 2.8 Automóvil biónica diseñado por Mercedes Benz.

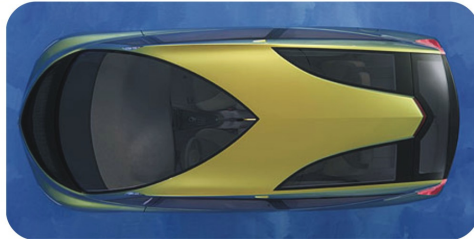


Figura 2.9 vista superior del automovil.



Figura 2.10 vista frontal del automóvil.

Daimler Chrysler ha utilizado el potencial de la biónica en el campo automotriz para el desarrollo de un vehículo utilizando como eje principal para el diseño el box fish.

Analizando la ligereza y resistencia de la estructura ósea del pez y sus propiedades aerodinámicas, y aplicando estas a un automóvil lograron un concepto ligero y de alta resistencia mecánica, además combinan la tecnología diesel y la tecnología AdBlue<sup>4</sup> que agregan al vehículo bajo consumo de gasolina y muy poca emisión de gases comparada con la de otros vehículos.

La estructura del pez consiste en laminas hexagonales que proporcionan mucha resistencia con poco peso trasladando este principio al diseño del automóvil.



Figura 2.11 Pez en el que se baso el diseño del automóvil automotor box fish

EJEMPLOS

4. Biónica automotriz: una nueva ciencia. En: Revista motor Junio 29. 2005. pág.6

5. Box Fish. [www.germancarfans.com](http://www.germancarfans.com) [Febrero 2006]



El efecto loto ha sido estudiado por Wilhelm Barthlott, de la Universidad de Bonn por sus cualidades de autolimpieza ya que las hojas salen completamente limpias, de microorganismos y suciedades como polvo o barro.

La autolimpieza se realiza por medio del agua de lluvia mediante pequeñas partículas de cera incrustadas en la superficie de la hoja haciendo que el agua se lleve las partículas de suciedad y la hoja se limpie a si mismas.

En los años 90 fue patentado el primer producto del efecto lotus, una pintura llamada "lotusan" de la que el agua de lluvia se lleva la suciedad.

Se han hecho otras aplicaciones en recubrimientos autolimpiantes para fachadas como lacas, pinturas para metales, cerámicos, etc.



Figura 2.12 Hojas de loto.

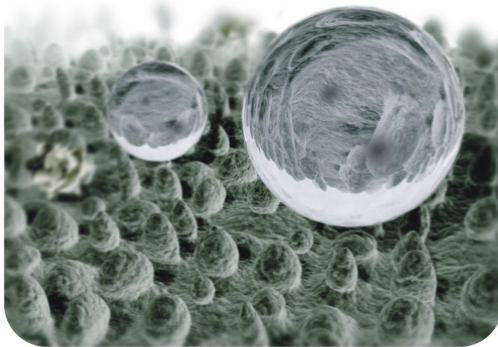


Figura 2.15 Superficie del loto en el microscopio en conjunto con una molécula de agua.



Figura 2.13 Superficie autolimpiante



Figura 2.14 Flor de loto.

EJEMPLOS

6. Bionica [Sitio en Internet. [http://www.magazine-deutschland.de/issue/Bionik\\_3-05\\_SPA\\_S.php](http://www.magazine-deutschland.de/issue/Bionik_3-05_SPA_S.php) [Febrero. 2006]

## SANTIAGO CALATRAVA



Figura 2.16 Edificio "torso"(Malmö, Suecia)



Figura 2.17 Ciudad de las Ciencias y las Artes de Valencia



Figura 2.18 Museo de las Ciencias Príncipe Felipe

Arquitecto, ingeniero y escultor nacido en 1951 en Valencia España.

Realizo un doctorado entre 1979-1981, en Ciencias Técnicas por el Departamento de Arquitectura de la ETH con la Tesis "Acerca de la Plegabilidad de las Estructuras"<sup>7</sup>

Calatrava convierte las estructuras de sus obras en elementos esenciales y en obras de arte, estudiando cuerpos oseos de animales y el esqueleto humano ha creado estructuras de gran magnitud.

"Diferencia la estructura del cerramiento, así las fuerzas se transmiten de forma más natural, substituyendo las estructuras de vigas y pilares, más rígidas, por otras más eficaces inspiradas en la colocación del material y el encauzamiento de las fuerzas hasta el terreno, empleando como principales materiales de construcción el hormigón y el hierro"<sup>8</sup>.



Figura 2.19 Auditorio de Tenerife. Sta Cruz de Tenerife. (España)

EJEMPLOS

7.Santiago Calatrava [Sitio en Internet]. [www.calatrava.com](http://www.calatrava.com) [Febrero. 2006]

8.Santiago Calatrava [Sitio en Internet]. [www.cas.es](http://www.cas.es) [Febrero2006].

#### **4.2.2 RELACION HOMBRE – ARTEFACTO – CONTEXTO**

La tarea del diseño es lograr satisfacer las necesidades y deseos del hombre, identificando requerimientos específicos y características técnicas relacionados con estos, que condicionan la apariencia y funcionalidad del producto. Conocer las características físicas, socioeconómicas y culturales que diferencian a un usuario de otro direccionan aspectos claves del producto como la forma, el tamaño, la apariencia visual, características que garantizan un diseño óptimo y una completa satisfacción del usuario.

Los artefactos se toman como objetos de estudio llevando a cabo un análisis funcional y formal del mismo, son arreglos de acciones orientados a fines, materia y energía transformada, incorporan dentro del entorno un estado del arte propio de cada tipo de producto, identificando en los productos existentes cuales logran satisfacer las necesidades del usuario o como pueden ser optimizados para crear mejoras en estos.

El contexto se define como un espacio en donde se relacionan directamente el usuario y el artefacto, un contexto de uso. El contexto establece características físicas del entorno como iluminación, ruido, intemperie, etc. Que condicionan el diseño del producto, proporcionando requerimientos técnicos que garanticen su óptimo desempeño dentro de este. Se toma información del contexto para definir un problema, formalizar a partir de él una solución, la cual por último es materializada para ser usada dentro del contexto del que es parte.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Diseño responsable En: Universitas científica. Vol. VI. Medellín: Ed. Universidad pontificia Bolivariana. Diciembre 2005  
Pág.

La relación entre estos tres elementos establece una primera etapa de diseño en donde se define el problema a solucionar, se crean especificaciones técnicas y se aborda el problema con una visión más amplia teniendo en cuenta el usuario y su entorno. Estos elementos forman un sistema cerrado e interdependiente, el hombre crea artefactos para su propio uso dentro de un contexto definido y a su vez, el contexto genera unas características específicas de uso. Para que un diseño sea efectivo debe tener en cuenta los elementos que arroja esta relación ya que estos se convierten en requerimientos técnicos del producto.

#### **4.2.3 FORMA, MECANISMOS, ESTRUCTURA Y ENTORNO COMO ELEMENTOS DE ANALISIS FUNCIONAL.**

La naturaleza ha ido evolucionando hasta crear seres con posibilidades asombrosas, adaptados a circunstancias extremas, con mecanismos y procesos biológicos que les permiten realizar acciones para la reproducción, la búsqueda de alimento y la supervivencia. La mayoría de estos organismos poseen un alto grado de eficacia, utilizando el mínimo de energía, son sistemas sencillos y funcionales que proporcionan soluciones de carácter genérico siendo versátiles y adaptables.

Esta clase de mecanismos tiene su razón de ser en características físicas del ambiente en el que sobreviven, como la respiración de los peces o la fisiología del cactus.

Existen cuatro elementos básicos para lograr una abstracción desde la biónica de un ser vivo. Estos elementos están directamente relacionados entre sí y son la forma, los mecanismos, la estructura y el entorno con una característica común: la funcionalidad. Utilizando la metodología analógica de la biónica es posible

observar como estos elementos son también complementarios, por lo cual es posible llegar a un análisis en donde la forma es estructura y además fundamento de mecanismos, están íntimamente ligados y ninguno tiene algún tipo de prelación con los otros.

#### 4.2.3.1 FORMA.



Figura 2.20 Elementos formales en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

*“Los biólogos dicen que toda la morfología esta sujeta a la adaptación lo que supone que a través de las generaciones una especie alterara su forma para acomodarse mejor a su clima, territorio, movimientos, obtención de alimento, enfrentamiento reproducción y todas las circunstancias que integran su medio ambiente y la vida que lleve dentro de este, es decir su funcionamiento”<sup>26</sup>*

La forma de un ser vivo esta en continuo cambio y sujeto a procesos evolutivos dictados por la selección natural y la sobre vivencia, cada elemento morfológico de la naturaleza esta establecido por la función que este desempeña, y siempre tiende a ser optimizada de acuerdo a los principios básicos de la naturaleza en su ser evolutivo: ahorro de energía y equilibrio<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Williams C. Los orígenes de la forma. S.L: Ed. Gustavo Gili.1984

<sup>27</sup> Ley de la naturaleza que enuncia Matila Ghyka en su libro “The geometry of art and life”. Dover Publications, Inc. New York. 1977. P.88. *“That is a general effect is to produce a state of equilibrium, of minimum potential energy, balanced stresses and equipartition of surface energy, all obtained with the greatest economy (or smallest production) of real (resisting) work”.*

De la naturaleza podemos abstraer los siguientes principios que son fundamentales para una correcta visión de la forma en el diseño de productos partiendo de la biónica:

La forma no es simplemente una característica morfológica sino también una característica funcional que contribuye al perfecto funcionamiento del organismo vivo.

No surge al azar si no que encierra diferentes capacidades que ayudan a la supervivencia de los seres vivos optimizando diferentes procesos que estos realizan fundamentados en la evolución y la selección natural.

La forma siempre esta dictada por ahorro de energía, espacio, material y simplicidad, y es el resultado de la mejor adaptación del organismo ante las fuerzas externas que actúan sobre el, es decir, además de involucrar una función determinada, es el mejor resultado posible en diseño, con la mejor utilización de material y la mejor distribución de esfuerzos de acuerdo a las condiciones del entorno específico y su función determinada.

La forma esta directamente relacionada con cada uno de los cuatro elementos para el análisis de un ser natural desde la biónica, en los mecanismos y la estructura esta intrínseca como un método de solución a problemas funcionales, y el entorno influye en ella de manera directa ya que es quien indica restricciones, elementos y fuerzas que condicionaran directamente en la morfología del organismo, mecanismo o estructura. *“La forma es un conjunto de objetos o elementos organizados y reconocibles que componen “un todo estructurado”.*<sup>28</sup>

---

<sup>28</sup> Sánchez Valencia, M. Morfogénesis del objeto de uso. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogota.

#### 4.2.3.1.1 FORMA COMO FUNCIÓN

Además de conceptos de tipo estético como los tratados sobre proporción y los significados de la espiral o el número de Fibonacci que se encuentran en la mayoría de seres naturales haciendo relación a la armonía y la proporción, se han encontrado variedad de formas en la naturaleza que contienen un significado estrictamente funcional, su desarrollo geométrico permite desempeñar una actividad con mayor facilidad, adaptarse al entorno, desplazarse, reproducirse, etc.

Esta clase de geometrías que desempeñan una función determinada se pueden encontrar en partes específicas de los organismos, en clases de movimientos que faciliten funciones especiales o en el todo siendo la forma que mejor se desempeñe en un entorno específico.

A continuación describiremos estas clases de geometrías simples con sus funciones específicas en la naturaleza que pueden ser aplicadas en diferentes áreas en el diseño u optimización de estructuras, componentes, mecanismos, etc.

##### 4.2.3.1.1.1 LA CIRCUNFERENCIA.

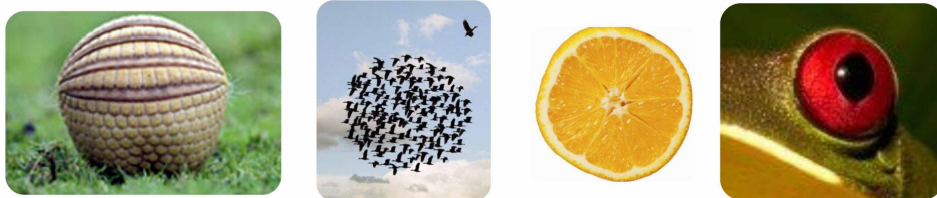


Figura 2.21 Circunferencia en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

*“La naturaleza en una esfera infinita, cuyo centro esta en todas partes y la circunferencia en ninguna”.*

Pascal.

En el mundo inerte la circunferencia emerge por selección fundamental en el que prevalecen los sistemas estables, siendo la circunferencia el “perímetro más corto en el que se encierra una superficie plana y la esfera la menor superficie que encierra un volumen dado”<sup>29</sup>; es decir, un círculo provee la mayor área en el menor perímetro posible, esto se evidencia en un sin número de especies como la hoja victoria que puede recibir la mayor radiación solar posible por medio de su hoja circular, con el mínimo de área para permitir su flotabilidad.

Jorge Wagensberg<sup>30</sup>, en su libro “la rebelión de las formas” enuncia dos razones por las cuales la selección natural ha privilegiado la esfera en diferentes medios o sistemas naturales, la primera explica que es la forma más difícil de morder por unas fauces cuyo diámetro sea comparado con el de la esfera, y la segunda es que la redondez es la mejor protección de todos los que tienen dificultades para huir ante una amenaza, es una posibilidad de movilidad única para aquellos que no la tienen en su organismo, es por esto que el armadillo, por ejemplo, por medio de sus placas móviles se enrolla y evita que lo puedan morder animales pequeños, y le permite movilizarse rápidamente hacia sus madrigueras cuando hay animales más grandes al acecho.

La esfera además disminuye la velocidad del intercambio de energía o material por el mismo principio anteriormente enunciado, en el interior se encuentra mayor volumen con una mínima superficie externa, por lo que se hace más lento el intercambio de sustancias, la pérdida de calor, etc.

De la esfera emergen dos formas geométricas específicas en la naturaleza por medio de las condiciones del entorno y la función a desempeñar: El ovalo que tiene una resistencia a la flexión según una dirección elegida por su geometría y

---

<sup>29</sup> Wagensberg, J. La rebelión de las formas. Barcelona: Tusquets editores. 2004

rueda en la dirección perpendicular a su eje de simetría y El cono que soluciona de manera eficiente la resistencia de esfuerzos según el área que posea, en su base será mas resistente pues posee mayor área.

Funciones específicas de la esfera:

- Simetría en todas las direcciones, lo que las hace mas resistentes a fuerzas de flexión.
- Disminución del intercambio de energía o materia en su superficie.
- Máxima área en el perímetro más corto.
- Movilidad, una superficie esférica tiene un solo punto de contacto con una superficie plana en la que se aplica el peso del volumen, y respecto a esta rueda con facilidad.

#### 4.2.3.1.1.2 EL HEXÁGONO.



Figura 2.22 Hexágonos en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

En algunas estructuras vivas los hexágonos han surgido de círculos sometidos a presión, de manera que podríamos decir que desde aquí, este tipo de geometría es la que llena mejor el espacio.

---

<sup>30</sup> Wagensberg,. Op. cit

El hexágono propicia un ahorro de material con mayores beneficios pues su forma es perfectamente acoplable a otro hexágono y lo que permite es llenar o pavimentar una superficie con un máximo de ahorro de material.

Proporciona una gran resistencia a la flexión y la compresión por la disposición de sus celdas.

#### 4.2.3.1.1.3 LA ESPIRAL.



Figura 2.23 la espiral en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

*“La espiral es la solución de compromiso, la solución para crecer ahorrando espacio”<sup>31</sup>*

Como función básica la espiral guarda una mayor superficie en un mínimo espacio, en palabras de Jorge Wagensberg: “empaqueta”, la mayoría de las colas, lenguas o trompas de los animales como también ramas y tallos de algunas especies vegetales se guardan en forma de espiral, evitando una superficie larga suelta que traería múltiples problemas.

La espiral evidencia también, patrones de crecimiento continuo con una misma proporción, como la espiral logarítmica que posee las proporciones de oro y es conocida como un “perfecto patrón de crecimiento”<sup>32</sup> evidenciado en el diferentes seres naturales como el nautilo, girasoles, semillas de pino, etc.

---

<sup>31</sup> Wagensberg, Op.cit., p206

<sup>32</sup> Kimberly, E. Geometry of design. Princeton Architectural Press. New York. 2001. p.8

#### 4.2.3.1.1.4 LA HÉLICE.



Figura 2.24 La hélice en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

La hélice es un círculo que rompe su finalidad y emerge en un plano perpendicular por una línea vertical que encuentra en el centro del círculo.

La función de la hélice en la naturaleza es, además de una trayectoria que permite mayor movilidad hacia una dirección alterna, permite envolver cierta clase de material con otro diferente, es el caso de algunas plantas o árboles que se unen formando hélices para agarrarse unas con otras y dar mayor resistencia a la tracción o se enrollan sobre si misma para obtener el mismo fin.

La hélice agarra<sup>33</sup> envolviendo una superficie en otra, con esta forma, permite un mejor enganche y mayor resistencia ante cualquier movimiento.

#### 4.2.3.1.1.5 EL ÁNGULO.



Figura 2.25 El ángulo en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

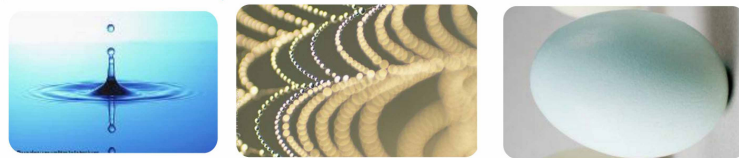
---

<sup>33</sup> Wagensberg, Op.cit., p207

*“La punta de cualquier cosa es un punto donde convergen líneas, superficies y volúmenes. Por lo tanto, cualquier cosa que se distribuya sobre líneas, superficies o volúmenes se concentra a medida que se acerca a la punta”<sup>34</sup>.*

La punta se explica como una concentración de presiones al tener una menor área o superficie, lo que facilita mayor penetración ante una superficie dada, en la naturaleza los usos mas frecuentes son la protección que brinda ante amenazas, sobre todo en el mundo vegetal por la falta de movilidad, como método de defensa, como agarre en las patas, para cortar y desgarrar en los dientes, para concentrar y agarrar mejor en los picos de las aves, etc.

#### **4.2.3.1.1.6 LAS CURVAS GEOMÉTRICAS: PARÁBOLA, CATENARIA, ONDA.**



**Figura 2.26 Las curvas geométricas en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)**

Las curvas tienden a generar movimiento, es el caso de los invertebrados que facilitan su arrastre y desplazamiento por medio de movimientos ondulatorios respecto a un eje transversal o longitudinal, la onda en muchos aspectos de la física y la naturaleza es la forma para transmitir información, luz, sonido, etc., el sonido se propaga por medio de ondas longitudinales; la parábola concentra fuerzas, recibe e irradia lo que llega a ella.

La catenaria es una curva que adopta la forma en que cada uno de sus puntos este en equilibrio mecánico y las fuerzas que actúen sobre este punto se anulen

---

<sup>34</sup> Wagensberg, Op.cit., p220

entre sí<sup>35</sup>, ahorra material en grandes estructuras y soporta un mayor peso con estas propiedades.

#### 4.2.3.2 ESTRUCTURA.



**Figura 2.27 Estructuras típicas en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)**

Una estructura es la disposición y orden de las partes dentro de un todo, soportando su propio peso y las fuerzas externas a las cuales esta sometida. Puede ser forma y esta concebida para ser funcional dentro de las condiciones del medio donde se encuentre.

En la naturaleza las estructuras son expertas en aligerar y optimizar procesos, conjugando dos elementos trascendentales para este fin, la configuración de los elementos de la estructura y la naturaleza del material de construcción.

Las estructuras biológicas presentan un excelente comportamiento cuando son cargadas, utilizando lo mínimo de material y de peso. De esta forma logra relaciones óptimas de tipo rigidez/peso, resistencia/peso y economía.

Todas las formas naturales y humanas que expresan una economía son las que logran trascender. “La forma económica es aquella que consigue el máximo con un mínimo de gasto en esfuerzo y energía, con el menor uso de material y ofreciendo una producción máxima por el trabajo”. La economía supone eficiencia,

---

<sup>35</sup> Wagensberg, Op.cit., p245

las estructuras de tipo biológico son mas eficientes que las convencionales las cuales tienen como base el desarrollo de sistemas simples como las vigas, cerchas, etc. La naturaleza por el contrario se basa en el desarrollo equilibrado de sistemas complejos: los sistemas dinámicos.

Adicionalmente las estructuras biológicas cuentan con propiedades de flexo-resistencia que se evidencian en organismos vegetales los cuales han sufrido modificaciones estructurales a medida que incrementan su altura. Esta propiedad se puede observar fácilmente en los árboles, ya que no se enfrentan en una posición rígida a los vientos que los golpean, sino en una posición flexible la cual permite que estas fuerzas externas ejercidas sobre él no lo fracturen.

Otras estructuras estudiadas por la biónica son las desarrolladas con base en la geometría fractal. Los fractales son estructuras geométricas que combinan irregularidad y estructura. La dimensión fractal de un objeto es la medida de su grado de irregularidad considerada a todas las escalas, su estructura básica se repite con variación a estas. La geometría fractal surgió como la búsqueda de un modelo matemático que explicara las formas de la naturaleza, ya que esta no contiene formas platónicas perfectas como las que todavía usa el hombre para sus creaciones. Dentro de este grupo se encuentran las Bio-Estructuras fractales que desarrollan nuevos planteamientos estructurales y tecnológicos que se basan en la microfragmentación fractal de los sistemas complejos propios de los esfuerzos dinámicos.<sup>36</sup>

Autorganización, Autoensamblaje y Autoestabilización son otros conceptos que las estructuras naturales tienen a su favor en relación con estructuras convencionales fabricadas por el hombre. Los elementos de las estructuras biológicas tienen configuraciones dinámicas estables logradas por la sinergia

---

<sup>36</sup> La torra biónica.[Sitio en Internet] Disponible en: [www.torrebionica.com](http://www.torrebionica.com) [Febrero 2006]

generada entre estos. De esta forma dichos elementos se autoensamblan y se organizan de tal forma que sus esfuerzos se distribuyan de la manera mas optima si alguna carga es aplicada en cualquiera de estos.

#### 4.2.3.3 MECANISMOS.



**Figura 2.28 Mecanismos en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)**

Según la definición, mecanismo es un conjunto de elementos rígidos, móviles unos respecto a los otros, cuyo propósito es la transmisión de movimientos y fuerzas. En los mecanismos biológicos estos elementos no necesariamente deben ser rígidos, los hay dinámicos y con potencial para lograr cosas inimaginables para los hombres, lo cual no es una exageración si se observa con detenimiento como las aves pueden volar o las pulgas pueden saltar una altura equivalente a 100 veces la suya.

La naturaleza es rica en mecanismos, puesto que son necesarios para ejecutar cualquier tipo de actividad, entre ellas las básicas para la supervivencia como comer, dormir, respirar, etc.

Los sistemas hidráulicos y neumáticos tienen aproximaciones en la naturaleza, muchas de este tipo de creaciones en términos de maquinaria no fueron diseñadas bajo principios biónicos, sino netamente mecánicos. Sin embargo al

analizarlos se encuentran similitudes con principios funcionales de sistemas biológicos, demostrando como la naturaleza ya les había encontrado solución.

El entorno condiciona muchos de los mecanismos de un ser natural, ya que este debe desarrollarse en un determinado contexto. Por lo tanto en un medio acuático los animales y plantas sufren modificaciones en su aparato respiratorio con respecto a los animales terrestres. Desarrollan branquias en el caso de los peces para lograr el intercambio gaseoso que les permite obtener su oxígeno.

Dentro de un sistema es posible encontrar múltiples combinaciones de mecanismos para llegar a soluciones de mayor complejidad. De esta forma cabe mencionar el ejemplo más evidente de esta situación, el cuerpo humano.

#### 4.2.3.4 ENTORNO.



Figura 2.29 Entorno en la naturaleza. Fotografía: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

Se entiende como uno de los factores mas influyentes en el desarrollo de todos los seres vivos, dependiendo del entorno se evidencian claramente las soluciones que la naturaleza brinda ante estas condiciones. Según el contexto en el que el ser vivo se desarrolle se crearan factores determinados que dictaminan el comportamiento, los sistemas vitales, el tipo de protección ante posibles depredadores y propiedades especiales que están directamente relacionados con la adaptación.

Se convierte entonces en un factor de causa y efecto, al ser el responsable de las condiciones de adaptación de los animales y plantas y sus mecanismos de sobrevivencia, movilidad, regulación de temperatura, etc.

Es quien determina condiciones aptas para un buen desarrollo de funciones motoras, o quien hace desarrollar determinados mecanismos que permitan la sobrevivencia en estas condiciones.

El entorno es el que hace a las aves desarrollar movimientos migratorios, el que desarrolla su capacidad para responder ante los cambios del clima, el que condiciona factores de temperatura que hacen emerger mecanismos para esta clase de ambientes, no podemos analizar el organismo vivo sin hacer un análisis del entorno, esto involucra diferentes aspectos que estarán ligados a factores de comportamiento y posibles soluciones de problemas pertinentes al estudio de la biónica. Dentro de este análisis podemos incluir condiciones geográficas, temperaturas, ubicación, proceso evolutivo, factores de comportamiento como ciclo de vida, proceso reproductivo, relación con otros organismos de distinta o misma especie, comportamientos alimenticios, de defensa, adaptaciones a posibles cambios del entorno, etc.

#### **4.2.4 PLANTEAMIENTO DE LA BIÓNICA COMO METODOLOGÍA APLICABLE EN INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO.**

En los numerales 4.2.1 a 4.2.3 de este capítulo se identificaron los elementos esenciales de la biónica como metodología de diseño, esto es, la relación hombre artefacto y contexto, y los elementos de análisis funcional desde el punto de vista de los sistemas naturales. Estos elementos, comunes a la mayoría de metodologías de diseño, son sintetizados en esta monografía a través de un

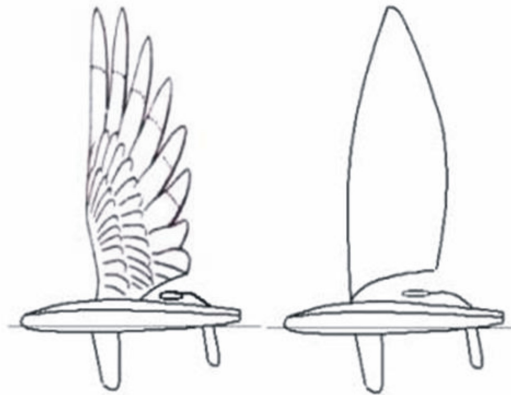
análisis de sistemas naturales (Portafolio de seres naturales), que proporciona al diseñador la información necesaria para abordar el proceso de diseño desde esta perspectiva.

Una vez se concluye la investigación de sistemas naturales, proponemos fusionar esta metodología con los fundamentos de diseño conceptual aprendidos durante el pregrado, incluyendo el estudio del usuario basado en las características del contexto y del estudio del arte de productos similares, como condicionantes de los requerimientos para el diseño de productos.

Con base en lo anterior vemos como la fusión de ambas disciplinas (biónica + diseño conceptual) redundará en una metodología aplicable en ingeniería de diseño ya que se fundamenta en tres elementos claves. La naturaleza como fuente de inspiración, conceptualizada posteriormente por una técnica analógica de la cual se obtengan soluciones innovadoras y superiores a las convencionales. La Ingeniería, aportando sus fundamentos de carácter técnico-funcional con herramientas como el diseño conceptual que depuren la idea inicial y la traduzcan en objeto funcional. Y en tercer lugar, pero siendo un elemento primordial en el diseño, el usuario, quien usa, aprovecha y cuestiona un producto, convirtiéndose en el eje en torno al cual gira todo lo demás.

Como se mencionó en el numeral 4.1.1, la biónica puede abordarse desde dos puntos de vista, uno específico y uno general. El punto de vista específico (figura 2.31) aborda el diseño desde el estudio del usuario, definición del problema, investigación de sistemas naturales, generación del concepto, selección del mismo, diseño conceptual, desarrollo del prototipo y pruebas funcionales. Esta metodología es conducente al diseño de un producto específico y generalmente utiliza los sistemas naturales como referentes formales, tal y como puede

apreciarse en las múltiples soluciones inspiradas en la naturaleza que pueden encontrarse en diversos ámbitos.

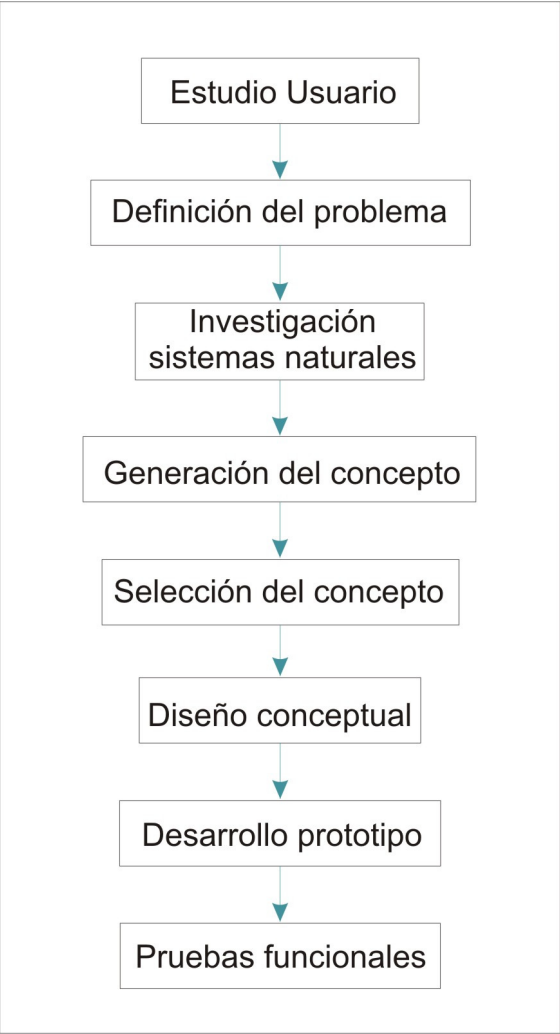


**Figura 2.30 Referente formal. Fuente: <http://www.tfh-berlin.de/~bionik/BionicED.htm>**

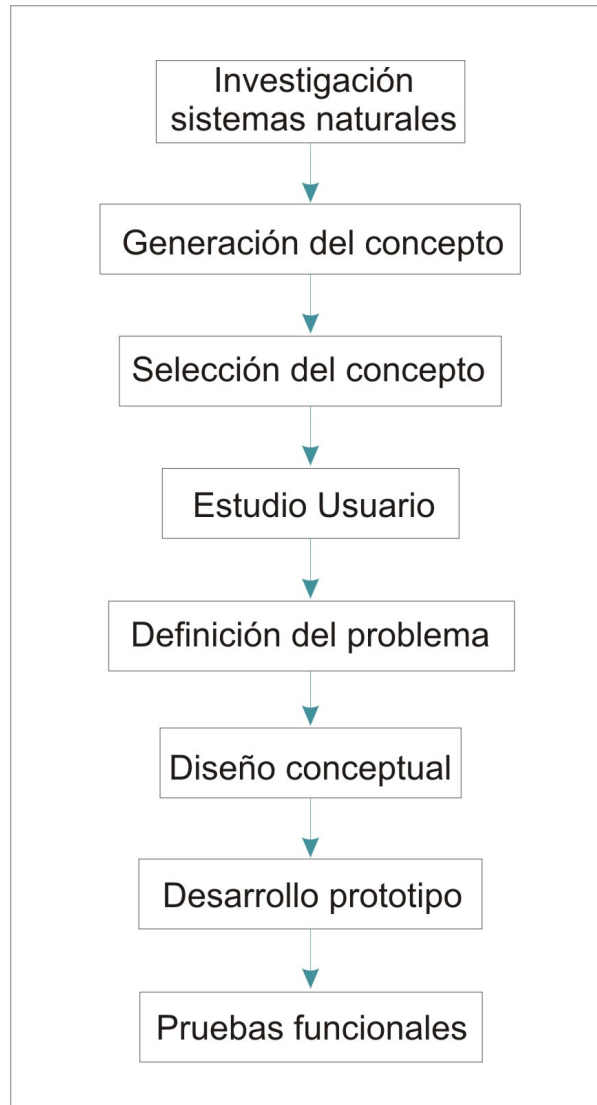
La solución general para el diseño a partir de la biónica, estudia diversos conceptos partiendo de los sistemas naturales, para posteriormente particularizarlos a un usuario determinado (figura 2.32).

Sin embargo, pensamos que la obtención de soluciones generales partiendo de sistemas naturales no es conducente a la obtención de diseños viables desde la ingeniería sin una correcta definición de especificaciones de diseño, sustentados por un análisis técnico detallado. Una vez validados dichos conceptos, pueden particularizarse las soluciones para un usuario específico, empleando las herramientas de diseño conceptual (análisis funcional y formal), la corporificación (diseño para el ensamble y diseño para la manufactura) y las pruebas de usuario.

De esta forma, el diseño sustentado en la biónica como metodología, antepone las soluciones técnicas a las soluciones formales constituyéndose en una herramienta de amplia aplicación en la ingeniería de diseño de productos.



**Figura 2.31 Solución particular de un diseño inspirado en la biónica**  
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 2.32 Solución general de un diseño inspirado en la biónica**

**Fuente: Elaboración propia**

#### **4.2.5 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR.**

Tomando la metodología general del diseño inspirado en biónica, proponemos adicionar elementos propios de la ingeniería de diseño de producto, para dar

validez funcional y no únicamente formal a las alternativas de diseño inspiradas en la naturaleza. Por ello, se plantea la siguiente metodología de trabajo:

#### **4.2.5.1 INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS NATURALES.**

Etapa que comprende una investigación profunda de diferentes sistemas biológicos que cuenten con potencial para encontrar soluciones innovadoras. Esta investigación analiza los seres de una forma general hasta llegar a lo específico, sus especializaciones. Estas especializaciones son condiciones que hacen único a cada sistema y a las cuales se le pueden hacer abstracciones de tipo morfológico, funcional, estructural y contextual; los cuales son los elementos de análisis descritos en el numeral 2.3. (Forma, Mecanismos, Estructuras y Entorno)

La investigación será documentada en un portafolio que llamaremos “Portafolio de Seres Naturales”, que cuenta con el análisis de 8 referentes biológicos.

#### **4.2.5.2 DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES.**

Etapa en la cual se define el criterio que enmarcara la selección del principio de solución. Con base en la investigación realizada se busca especificar que tipo de solución es más eficiente frente a problemáticas de diseño e ingeniería existentes. Por lo tanto al finalizar esta etapa se debe obtener una descripción de la necesidad a solucionar con criterios concisos y medibles.

#### **4.2.5.3 ABSTRACCIÓN DEL CONCEPTO.**

Etapa de análisis del referente biológico seleccionado. De este análisis se debe abstraer un principio de solución bajo el concepto elegido en el numeral 2.4.1.1.

Realizando un análisis en donde se justifique claramente la selección del sistema y su potencial como alternativa de solución.

#### **4.2.5.4 ESTUDIO TÉCNICO DE VIABILIDAD.**

Con la selección del principio de solución, se emprende una etapa de vital importancia dentro de la metodología. Se inicia con ensayos preliminares que den idea de la configuración y comportamiento del prototipo final, prosigue con el análisis virtual de dicho diseño y culmina con la construcción del prototipo funcional. Es importante la realización de pruebas virtuales durante esta etapa, ya que con base en dichos resultados se construirá el prototipo final y se dará por sentada la validez de la nueva propuesta, por lo tanto se realizan los estudios pertinentes para demostrar las bondades de ésta y su superioridad frente a los conceptos existentes.

#### **4.2.5.5 PRUEBAS FUNCIONALES DEL CONCEPTO.**

Etapa en la cual se realizan las pruebas reales con el prototipo construido. Se debe tener en cuenta si es necesaria la elaboración de montajes para medición y verificar las condiciones apropiadas para las pruebas.

#### **4.2.5.6 ESTUDIO DEL USUARIO.**

Con base en los resultados arrojados en las pruebas funcionales del concepto, se realiza el diseño del producto que tenga como principio funcional el concepto estudiado. Según el producto seleccionado, el estudio del usuario comprende la relación Hombre, Artefacto, Contexto descrita en el Numeral 2.2. Se incluye en este espacio un estudio de las necesidades del usuario en términos de su

contexto y los productos existentes con similitud en función. Además de un análisis de aspectos morfológicos, antropométricos, biomecánicos y psicológicos del usuario, dentro del contexto donde interactúa con el producto y del estado del arte.

#### **4.2.5.7 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.**

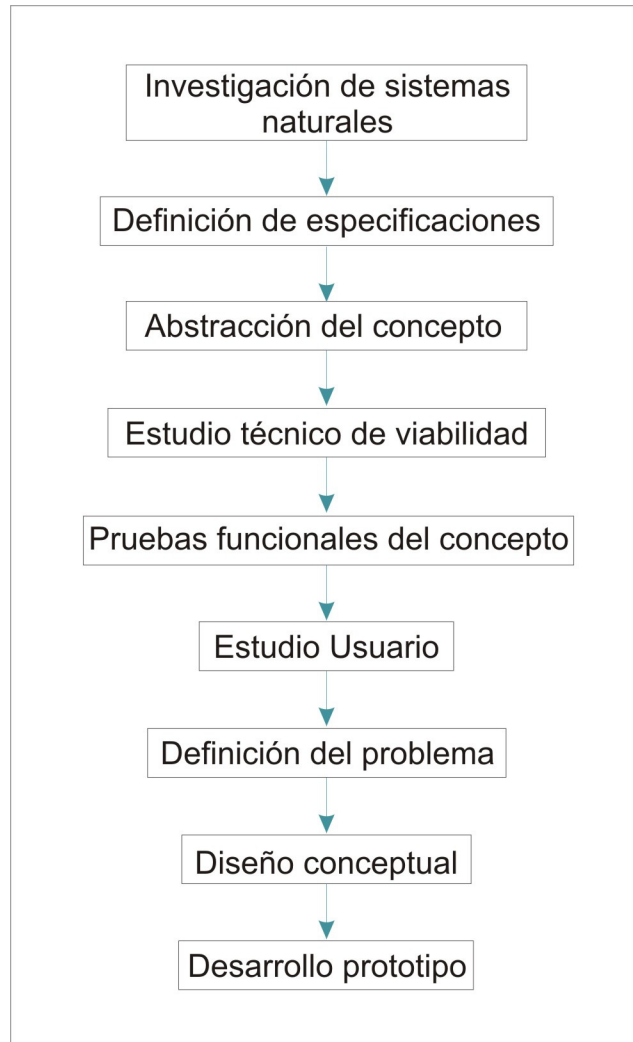
Etapa en la que se establece la necesidad específica a solucionar con base en el concepto seleccionado y los requerimientos del usuario. En este punto se expone específicamente lo que se va a hacer con énfasis en la carencia que ocasiona el problema de diseño. Se debe retomar el estudio del estado del arte con el fin de evidenciar porque la situación estudiada requiere una solución u optimización; y finaliza con una lista de requerimientos técnicos con los cuales debe cumplir el producto.

#### **4.2.5.8 DISEÑO CONCEPTUAL.**

Teniendo en cuenta el principio de solución estudiado y los dos numerales anteriores, en esta etapa se desarrolla el concepto del producto. Para esto se realiza un estudio de los requerimientos y una abstracción de la función principal con el fin de generar alternativas de solución de tipo esquemático. El análisis funcional se realiza por medio de cajas negras y una estructura funcional. Posteriormente se realiza la selección de la alternativa más eficiente.

#### **4.2.5.9 DESARROLLO DEL PROTOTIPO.**

En esta etapa los esquemas arrojados por el estudio de diseño conceptual se materializan en la construcción del prototipo funcional.



**Figura 2.33 Metodología de trabajo**

**Fuente: Imagen del autor**

#### **4.2.6 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Según el Requerimiento 7.1<sup>37</sup> del anteproyecto, se ha verificado el cumplimiento del mismo, dado que para la investigación se tuvo en cuenta la aplicación de sistemas, metodologías y alcances de la biónica tanto para la ingeniería de diseño, como aspectos que incluyen la forma, la estructura, los mecanismos y el entorno orientados desde la función.

### **4.3 INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS NATURALES.**

#### **4.3.1 SELECCIÓN DE LOS SERES NATURALES A INVESTIGAR.**

Los seres naturales que clasifican para esta investigación deben contar con características que evidencien especializaciones a diferentes niveles, ambientes y en condiciones particulares; que demuestren su funcionamiento y comportamiento frente a dichas situaciones. Esta investigación se realizara con base en los elementos de análisis descritos en el numeral 2.3, obteniendo una síntesis de las adaptaciones de dichos seres necesaria para su supervivencia.

A continuación se mencionan los referentes biológicos seleccionados para ser analizados en el Portafolio de seres naturales. Inicialmente se realizó una investigación general de cada sistema, para después elegir un principio de solución que cuente con innovación, simplicidad y eficiencia. Posteriormente se profundizo la investigación en los principios de solución seleccionados y sobre estos se realizó el estudio de los elementos de análisis.

---

<sup>37</sup> Ver anexo A. Requerimientos del proyecto

## **REFERENTE BIOLÓGICO**

- Culebra voladora
- Huevo
- Cactus
- Citoesqueleto
- Pingüino emperador
- Músculos
- Armadillo
- Erizo de mar

## **PRINCIPIO DE SOLUCIÓN**

- Sección transversal.
- Estructura de la cáscara.
- Estructura interna.
- Estructura interna.
- Estructura pluma.
- Enlaces de Actina y Miosina.
- Bandas.
- Sistema ambulacral

## 4.3.2 PORTAFOLIO DE SERES NATURALES

## 4.3.2.1 CULEBRA VOLADORA

## CHRYSOPELEA PARADISI

**REINO:** Animalia  
**PHYLUM:** Chordata  
**CLASE:** Reptilia  
**SUBCLASE:** Serpientes  
**ORDEN :** Squamata  
**FAMILIA:** Colubridae  
**GENERO:** Chrysopelea  
**ESPECIE:** Chrysopelea paradisi



FIGURA 3.1 CHRYSOPELEA PARADISI

## ANÁLISIS

Esta especie de culebra pertenece al genero de las voladoras, y no porque puedan volar, sino porque pueden planear en el aire.

Su hábitat se encuentra en los bosques de Asia, de donde se desplaza de árbol en árbol, dejándose caer de una rama en otra, ya que por sí misma no puede tomar altura. Esta característica la logra con una aplanamiento dorso ventral de su cuerpo que permite que se convierta en una especie de paracaídas gracias a ciertos movimientos de sus costillas.

La chrysopelea paradisi cuenta con diferentes aspectos de análisis. Este portafolio estudia específicamente el cambio de forma de la sección transversal y sus efectos para el deslizamiento en el aire.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

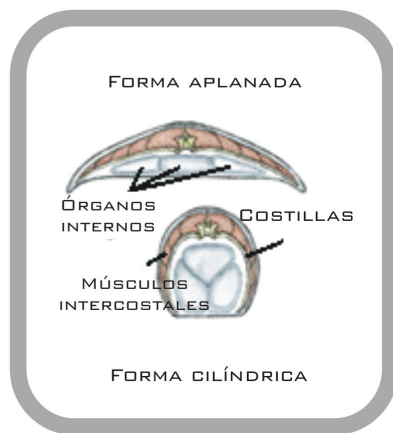


FIGURA 3.3 CAMBIO DE FORMA PARA EL VUELO

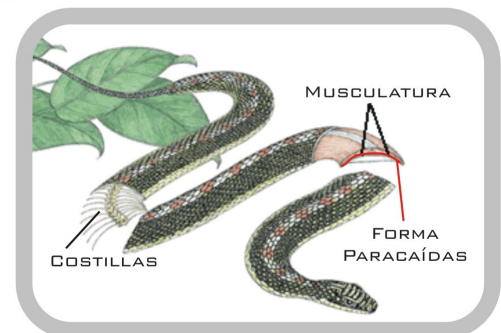


FIGURA 3.2 ESQUELETO DE LA SERPIENTE

## FORMA COMO FUNCIÓN.

La capacidad de modificar su forma es la que le permite a esta culebra planear. Para esto, mientras se encuentra en el aire sufre un aplanamiento cambiando su sección transversal que normalmente es cilíndrica, a una de características aerodinámicas mas favorables que puedan darle una superficie de sustentación suficiente con el fin de dividir el flujo de aire y deslizarse en el.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

## FORMA COMO FUNCIÓN.

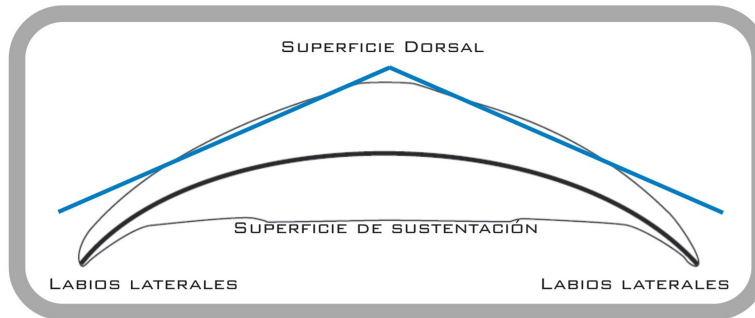


FIGURA 3.4 APLANAMIENTO DE COSTILLAS

En su estado aplanado la chrysopelea paradisi, toma una forma cóncava con dos labios ventrales en los bordes laterales. Su superficie dorsal es triangular.<sup>2</sup>

Según el investigador John Joseph Socha,<sup>3</sup> los labios laterales con los que cuentan estas culebras pueden servir para mejorar su aerodinámica actuando como aletas que se liberan y recogen.

Al analizar la sección transversal de su cuerpo se encuentra que es simétrico verticalmente. Esta simetría no es la mas óptima en términos de aerodinámica, Ya que no es tan eficiente para la separación del flujo de aire (las alas en general son asimétricas), pero se piensa que es una adaptación para que pueda planear viajando por ondas de aire utilizando cambios de dirección en la superficie de sustentación, lo cual se considera una especialización morfológica de esta. Adicionalmente si fuera asimétrica sería mas compleja la modulación continua de la sección transversal para mantener el perfil óptimo ya sea en el aire o en la tierra.



FIGURA 3.5 SUPERFICIE VENTRAL DE LA SERPIENTE



Al ser simétrica puede cambiar su forma fácilmente para adoptar el perfil óptimo, de acuerdo a las circunstancias.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

## ESTRUCTURA.

El constante cambio de orientación en el cuerpo de la serpiente tiene grandes consecuencias para la producción de fuerza y estabilidad en el aire, la fuerza es una función de la geometría de los segmentos individuales, la forma de la sección transversal, el ángulo de ataque y la posición relativa de un segmento respecto al otro.<sup>4</sup>

La estabilidad de la serpiente se puede hallar determinando los vectores de la fuerza aerodinámica y el peso de la serpiente.<sup>5</sup>

El centro de gravedad de la serpiente depende de la distribución de masa que adopte, debido a que debe reorientar sus partes para adoptar la mejor distribución y posición aerodinámica.<sup>6</sup>

Estos cambios afectan directamente la distribución de esfuerzos y el movimiento en vuelo, haciendo que partes del cuerpo actúen como frenos y otras como la superficie aerodinámica más efectiva. Las mismas superficies y las posiciones del cuerpo pueden producir diferentes momentos de rotación que facilitarían su movimiento según las diferencias de magnitud y fuerza que experimente.

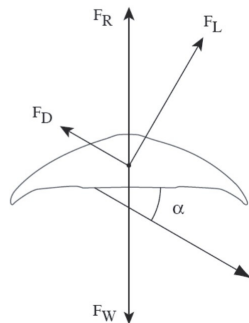


FIGURA 3.7 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE.

Ángulo de ataque: ángulo entre la línea media de concavidad de la superficie de sustentación y la circulación de aire próxima.<sup>8</sup>

PORTAFOLIO  
BIÓNICA

FIGURA 3.6 SISTEMA ESQUELÉTICO DE LA CULEBRA.

Wing loading: es un factor determinado por el peso de la culebra dividido por su área aerodinámica. Indica la carga de vuelo y a medida que este valor sea mayor, menos estable es el vuelo.

## MECANISMOS.



El mecanismo que describiremos permite un **aplanamiento** de la **parte dorsal**. Normalmente las costillas tiene una inclinación hacia atrás con un ángulo de  $55^\circ$  con la vertical, se comportan como una **unidad** con movimientos anteriores y dorsales similar a un movimiento de cuatro barras.

Cada una de las costillas se mueven simultáneamente con las otras por la acción de los **músculos intercostales**, Socha realizó un experimento que comprueba esta teoría, al cortar los músculos, las costillas se movieron con una mayor independencia, una de la otra.

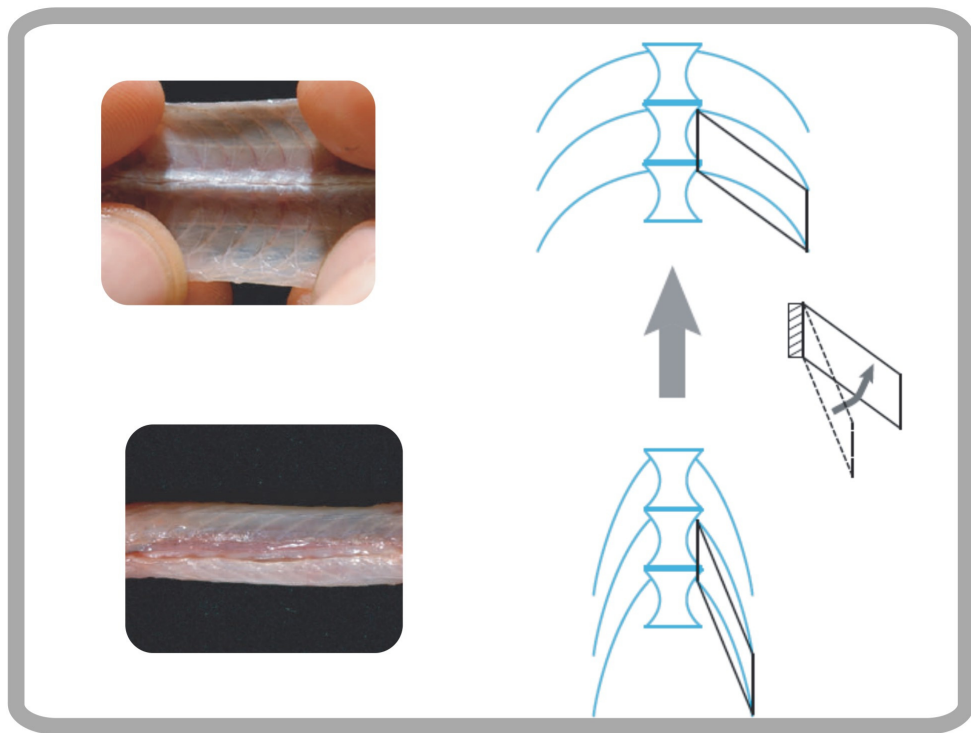


FIGURA 3.8 IZQ: SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CULEBRA, TRANSICIÓN ENTRE EL ESTADO NORMAL Y EL ESTADO APLANADO, DERECHA ABSTRACCIÓN ESQUEMÁTICA DEL MOVIMIENTO.

Este movimiento va acompañado de funciones que realiza el sistema respiratorio con ayuda de las costillas, mientras vuela, la culebra cierra la glotis produciendo una presión negativa en las costillas lo que permite conservar el aplanamiento durante el tiempo que esta en el aire.

**MECANISMOS.**

Cada unidad de movimiento esta compuesta por dos vertebras adyacentes y dos costillas que constituyen las partes del esqueleto y los músculos intercostales.

Las vertebras se comportan como enlaces entre el esqueleto y las costillas y las costillas son las que se encargan de la rotación hacia adentro (ventralmente) y hacia afuera (movimiento dorsal) para permitir el cambio de forma.

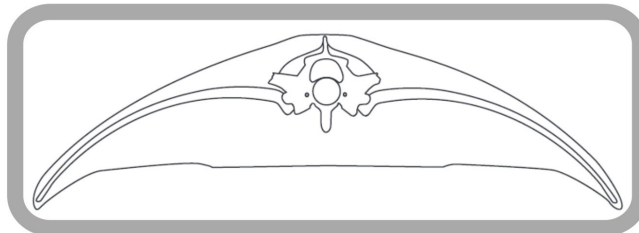


FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE VERTEBRAS Y COSTILLAS EN LA CULEBRA.

**ENTORNO.**

La chrysopelea Paradisi se encuentra en el sur y suroeste de Asia desde la India hasta el sur de China y Filipinas incluyendo a Tailandia, Indonesia, Malasia, Islas Filipinas, Singapur, etc.

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ENTORNO.**

La culebra voladora es característica en ambientes lluviosos con gran cantidad de árboles y arbustos ya que brindan alimento a diferentes animales que les sirven de alimento. 9

**ADAPTACIONES.**

Desarrollaron capacidades especiales por el hábitat arbóreo como trepar en los árboles, desplazarse por los troncos y ramas y alimentarse de ranas, aves y mamíferos que se encuentran en los árboles más que animales de la superficie terrestre.

En la superficie ventral poseen una textura áspera que permite trepar a los árboles con una mayor facilidad pues las escamas brindan mayor agarre con la corteza de los árboles.

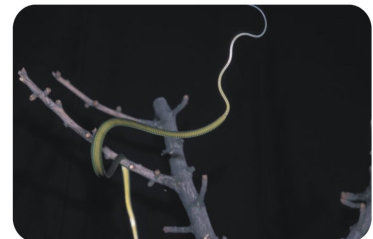


FIGURA 3.10 PARADISI EN AMBIENTE NATURAL

### 4.3.2.2 EL HUEVO



EL HUEVO ANIMAL ES UN CUERPO NORMALMENTE ESFERICO QUE CONTIENE EL GERME DEL INDIVIDUO FECUNDADO Y CIERTAS SUSTANCIAS CON LAS QUE SE ALIMENTA EL EMBRION EN LAS PRIMERAS ETAPAS DE DESARROLLO.<sup>10</sup>

#### ANÁLISIS

El huevo es una especie de **empaquete** perfecto para los embriones de la especie animal, contiene el feto en desarrollo, la **yema** que posee proteínas, grasa, vitaminas y minerales y la **clara** que **almacena** líquidos y proteínas necesarias para la alimentación del animal.<sup>2</sup>

Posee varias capas que protegen su interior, siendo **rígidas** y **flexibles** para el intercambio de oxígeno y sustancias necesarias para la sobrevivencia del embrión. Analizaremos aquí esta función especial, la **cascara** como medio de protección e **intercambio** de sustancias por su **superficie porosa**.

#### ELEMENTOS DE ANÁLISIS

##### FORMA COMO FUNCIÓN.

El huevo posee una forma **redondeada**, siempre mas larga que ancha, aunque hay huevos esféricos dependiendo de la especie animal que se este estudiando, esta forma les permite **conservar** mejor la temperatura interna y **almacenar** el mayor volumen posible de sustancias en el menor área.

una "punta" del huevo siempre es mas redondeada que la otra, siendo esto una ventaja ya que toma **posiciones relativas** al rodar, permitiendo ciertas limitaciones frente al movimiento.<sup>11</sup>

Algunos poseen colores y texturas especiales como protección ante factores externos.

La forma del huevo posee características especiales en su geometría, siendo influenciada por la proporción de oro y el número pi. De estos estudios han resultado **parábolas** que proporcionan mayor **rígidez**, han sido aplicadas en su mayoría en la arquitectura.

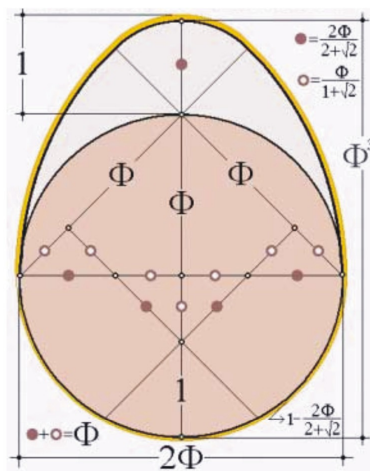


FIGURA 3.11 GEOMETRÍA DEL HUEVO

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### ESTRUCTURA.

El cascaron posee de un 12% a un 15% del peso total del huevo, esta compuesto en un 94% de carbonato de calcio como principal componente estructural.<sup>13</sup>

Es la primera barrera de protección contra microorganismos externos con una capa orgánica externa llamada cutícula que impide la entrada de bacterias y sustancias líquidas al interior como también garantiza que los poros no se obstruyan; la cascara también sirve para la contención de los componentes internos, conservar el calor resistiendo los golpes, es una estructura porosa por donde ocurre el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono.

Las chalazas son pequeños hilos que sirven para contener la yema en el centro del cascaron.

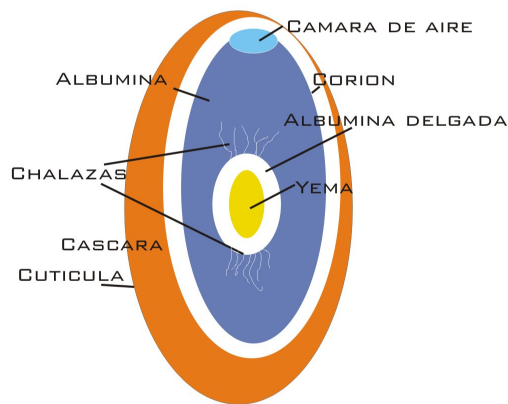


FIGURA 3.14 COMPONENTES DE UN HUEVO

Posee dos membranas que en su conjunto se denominan Corion, forman una cámara de aire; a medida que pasa el tiempo la cámara se agranda para que el polluelo tenga el espacio suficiente para salir por allí, esta cámara se localiza en la punta mas ancha del huevo.<sup>14</sup>



FIGURA 3.12 CASCARA DE HUEVO

La cascara del huevo a pesar de ser muy delgada es lo suficientemente fuerte para proteger al embrión durante su crecimiento, frágil y quebradiza para permitir que el animal pueda salir.

La estructura porosa otorga flexibilidad y brinda una mayor resistencia al impacto.



FIGURA 3.13 POLLUELO SALIENDO DEL CASCARON



## MECANISMOS.



La superficie de la cascara del huevo posee en promedio 15000 poros, por estos realiza el intercambio de oxígeno, dióxido de carbono y agua necesario para vivir, estos poros también permiten que la superficie sea esponjosa, dándole mas flexibilidad y amortiguación a los golpes.

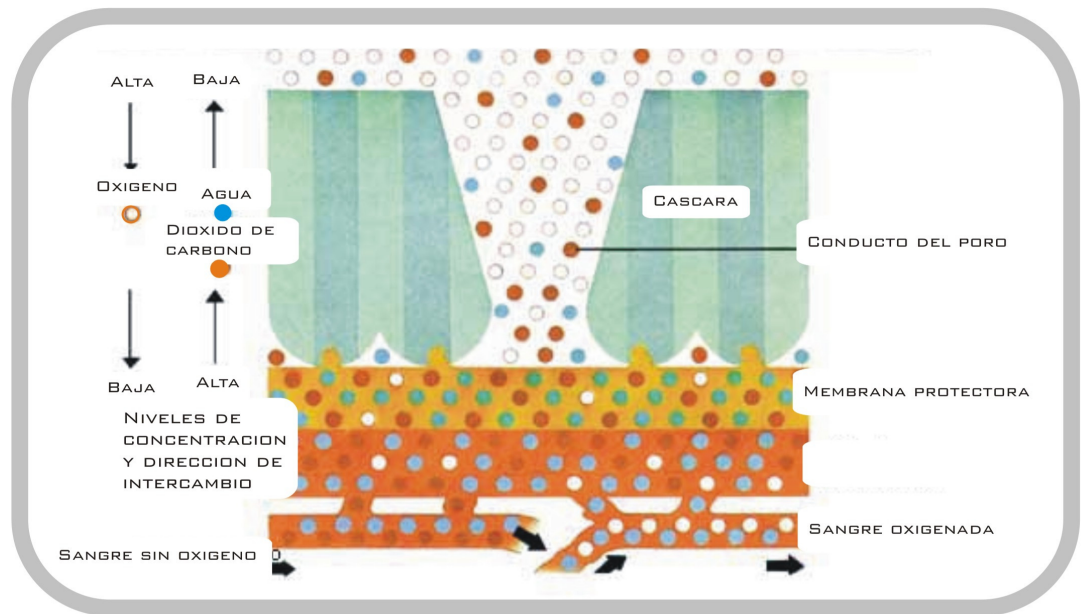


FIGURA 3.15 INTERCAMBIO DE OXIGENO A TRAVÉS DE LOS POROS

El intercambio de oxígeno se realiza por los conductos del poro, pasa a través de la membrana protectora hasta la sangre sin oxígeno y allí se realiza el intercambio, sale dióxido de carbono y entra oxígeno a la sangre; durante el período de vida del embrión dentro del huevo, pierde un 16% de agua, esta pérdida ayuda a recuperar espacio para que el polluelo emerja del huevo.<sup>15</sup>

Algunos huevos poseen adaptaciones especializadas como capas externas cristalizadas que lo protegen de agresiones del entorno.

A pasar del tiempo la punta mas redondeada, donde se ubica la camara de aire acumula mayor cantidad de oxígeno, dando a lugar un espacio pertinente en donde el polluelo se pueda mover y salir del cascaron.



FIGURA 3.16 PORO DE UN HUEVO VISTO EN LE MICROSCOPIO.

## ENTORNO



FIGURA 3.17 HUEVO Y NIDO DEL HUEVO EN AMBIENTE NATURAL.

El entorno del huevo depende directamente del entorno de la especie animal que provenga, de este depende también el tamaño, la forma y algunas características especiales del mismo.

En caso de las aves la mayoría los incuban en nidos compuestos por paja y pequeñas ramas que encuentran en el ambiente, esto los protege de depredadores y los mantiene amortiguados, otras especies los ocultan en la arena o debajo de la tierra, aunque en la mayoría de casos siempre están cerca los padres para brindarles el calor suficiente y la protección necesaria para la sobrevivencia.



FIGURA 3.19 HUEVO DENTRO DE SU NIDO



FIGURA 3.18 HUEVOS DE AVESTRUZ CERCA DE SU MADRE

## ADAPTACIONES

Según el entorno específico algunos huevos son de mayor tamaño, color, y forma, mas redondeados, en forma de pera u ovalado, estas formas permiten limitaciones importantes en movimiento según las necesidades que el tipo de terreno otorgue.

Otros han desarrollado capas externas que protegen al huevo de rallones, o superficies extremas del terreno como capas extras de calcita, o capas cristalizadas que impiden aun mas la entrada de microorganismos.<sup>16</sup>

### 4.3.2.3 CACTUS

#### CARNEGIEA GIGANTEA

- REINO: Plantae
- CLASE: Magnoliopsida
- ORDEN: Caryophyllales
- FAMILIA: Cactaceae
- GENERO: Carnegiea
- DIVISIÓN: Magnoliophyta
- NOMBRE CIENTIFICO: Carnegiea gigantea



FIGURA 3.20 CARNEGIEA GIGANTEA

#### ANÁLISIS

Los cactus son plantas adaptadas a vivir en condiciones extremadamente secas de hasta 45° C, por medio de mecanismos que permiten el mayor aprovechamiento del agua en cuanto a recolección y conservación.

La morfología de su tallo y sus raíces permite adaptarse para recolectar la mayor cantidad de agua y evitar al máximo la pérdida de este líquido, sus hojas se transformaron en espinas favoreciendo esta necesidad.

#### FORMA COMO FUNCIÓN.

La forma de los tallos están ligadas a la acumulación de agua permitiendo la mayor absorción con la menor pérdida, posee simetría radial en su tallo con algunas protuberancias



FIGURA 3.21 COSTILLAS EXTERNAS

Estas formas también permiten que el agua de lluvia caiga directamente a las raíces de la misma planta<sup>17</sup>

La forma esférica del tallo permite almacenar la mayor cantidad de agua con una superficie exterior mínima para una menor evaporación

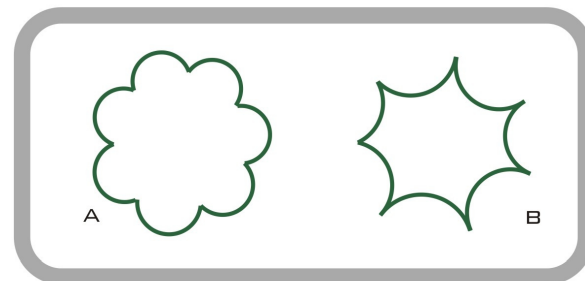


FIGURA 3.22 DILATACIÓN DE COSTILLAS DEL CACTUS. A. EXPANSIÓN DE LAS COSTILLAS A MAYOR CANTIDAD DE LIQUIDO B. GEOMETRIA ADOPTADA EN ÉPOCAS DE SEQUIA.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### ESTRUCTURA.



Las **costillas** permiten una mayor superficie con una menor exposición al sol, además tiene la capacidad de **expandirse** para absorber la mayor cantidad de agua.

Al perder agua durante la época de sequía el tallo se **repliega** reduciendo la superficie expuesta al sol, cuando absorbe agua se hincha sin **resquebrajarse** por medio de su estructura tipo fuelle.

El tallo posee una capa exterior gruesa llamada **epidermis** con estomas pequeños para la absorción y el proceso de fotosíntesis, internamente posee una sustancia gomosa llamada **mucílago** que regula la cantidad de líquido dentro de la planta.<sup>18</sup>



### MECANISMOS

Las **espinas** son una transformación de las hojas del cactus para reducir la superficie de **transpiración**, proporcionar **sombra** reflejando los rayos del sol y brindando protección contra los depredadores. Las espinas también actúan como **puntos de condensación** del rocío para que las gotas caigan directamente sobre sus tallos.

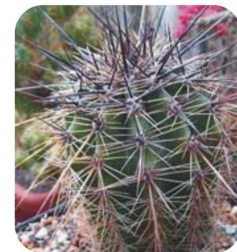


FIGURA 3.23 ESPINAS Y AREOLAS EN LOS CACTUS

Se agrupan en la **areola**, están presentes a lo largo de todo el tallo constituyendo un **sistema de defensa** ante los depredadores, son de color pardo, en cada areola pueden

encontrarse 12 espinas radiales y de 3 a 6 centrales siendo estas más gruesas y largas de unos 7 cm de longitud.<sup>19</sup>



FIGURA 3.24 AREOLA CON ESPINAS

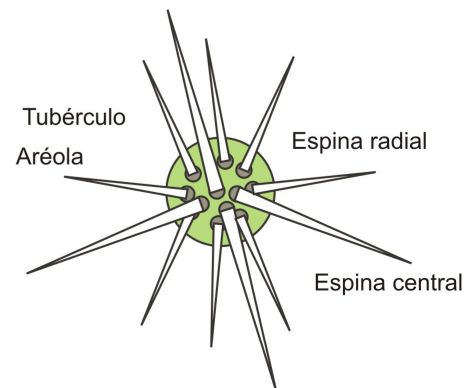


FIGURA 3.25 ESQUEMA DE LAS AREOLAS

**ENTORNO.****CARACTERÍSTICAS.**

El cactus es típico de zonas áridas y secas, con altas temperaturas, se da en el hemisferio occidental, desde Canadá hasta el extremo de América del Sur

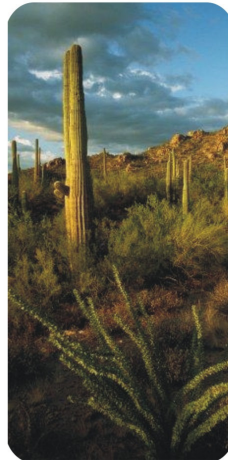
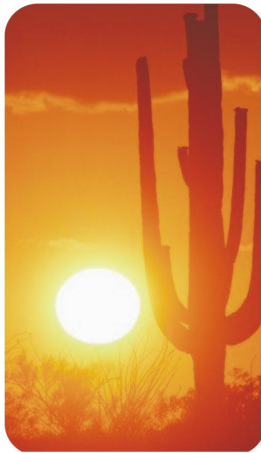


FIGURA 3.26 PAISAJES CARACTERÍSTICO DEL CACTUS

**ADAPTACIONES.**<sup>20</sup>

**SUCULENCIA:** es la capacidad de sus tallos de absorber agua dentro de sí mismo.

**ESPINESCENCIA FOLIAR:** es la transformación de las hojas en espinas para reducir la superficie de evaporación .

**PUBESCENCIA:** es la aparición de pelos para irradiar los rayos solares o protegerse de las bajas temperaturas nocturnas.

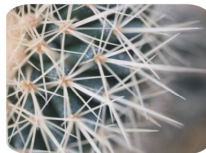
**ADAPTACIONES RADICULARES:** las raíces se han transformado en redes cortas pero muy largas para alcanzar a absorber la mayor cantidad de agua que se encuentra en la superficie.

**METABOLISMO ÁCIDO (C. A. M):** es un tipo de fotosíntesis que realizan en la noche con el intercambio de gases abriendo los estomas y evitando la evaporación y en la mañana con la presencia de la luz solar transforman la clorofila terminando el proceso y obteniendo así la energía necesaria para la sobrevivencia de la planta



FIGURA 3.27 CACTUS EN SU AMBIENTE NATURAL

FIGURA 3.28 ADAPTACIONES CARACTERÍSTICAS, FLORES, ESPINAS Y RAICES



### 4.3.2.4 EL CITOESQUELETO

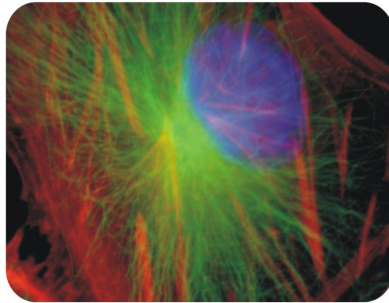


FIGURA 3.29 CITOESQUELETO DE UNA CÉLULA EPITELIAL.

#### ANÁLISIS

El citoesqueleto es un cuerpo transparente formado por tres elementos proteicos diferentes, los microtúbulos, los microfilamentos y los filamentos intermedios. Coexisten en forma entrelazada por medio de interacciones macromoleculares dinámicas, constituyendo un retículo ubicado en el citoplasma, que tiene como función anclar las organelas, mantener la forma celular y permitir movimientos.<sup>21</sup> La estructura final cuenta con dos características primordiales, la flexibilidad y la resistencia.

#### AUTOENSAMBLAJE.

Fenómeno en cuya virtud los componentes se unen entre sí para formar estructuras de mayor complejidad y estabilidad, en que aparecen nuevas propiedades imposibles de predecir a partir de las características de las partes individuales.<sup>22</sup>

#### COMPONENTES.

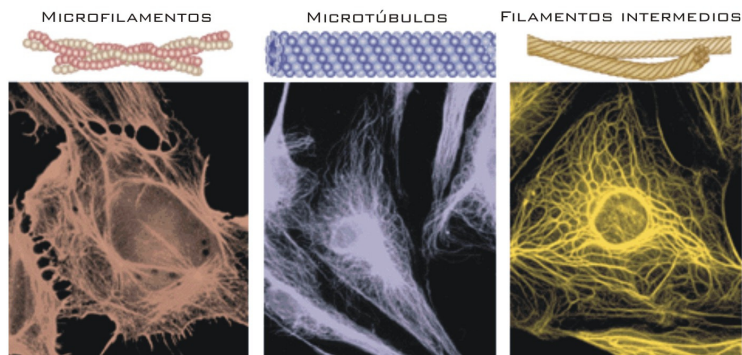


FIGURA 3.31 COMPONENTES DE LA CELULA



ESQUEMA COMPONENTES DE LA CÉLULA.

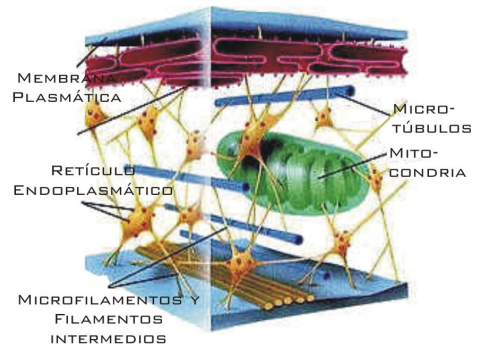


FIGURA 3.30 COMPONENTES GENERALES DE UNA CÉLULA

El citoesqueleto de la célula tiene como principales funciones dar la Forma celular, motilidad celular, Transporte y posición de orgánulos, División celular y uniones intercelulares.

ESTOS TRES COMPONENTES FORMAN UNA RED RETICULADA QUE SE EXTIENDE DESDE LA SUPERFICIE CELULAR HASTA EL NÚCLEO. DE ESTA FORMA LA ESTRUCTURA TIENE LA PROPIEDAD DE AUTOESTABILIZAR

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### FORMA COMO FUNCIÓN.



El citoesqueleto permite el análisis de tres componentes, los microtúbulos, los microfilamentos y los filamentos intermedios.

#### MICROTÚBULOS

Son cilindros huecos y no ramificados. Al ser elementos rígidos, son los encargados de mantener la forma de la célula y por lo tanto de posicionar los orgánulos bajo la disposición necesaria. Al ser huecos permiten el transporte de sustancias.

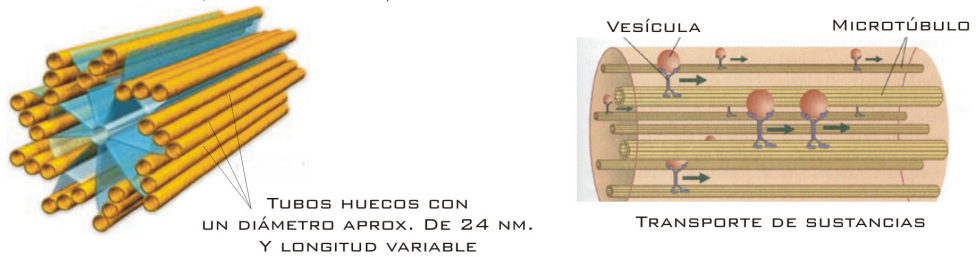


FIGURA 3.32 MICROTUBULOS

#### MICROFILAMENTOS DE ACTINA

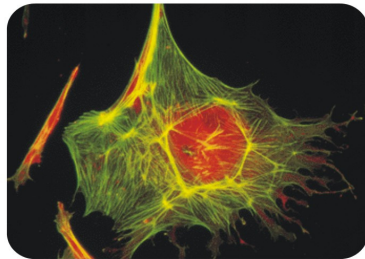


FIGURA 3.33 FILAMENTOS DE ACTINA EN LA CÉLULA ENDOTELIAL DE UNA VACA

Son extensiones de monómeros de actina. Al polinizarse forman redes de hilos de actina sirviendo de soporte para los microtúbulos. Su diámetro es de aprox. 1/3 del de los microtúbulos y su longitud también es variable, jugando un papel importante en los procesos de división y motilidad celular. 23

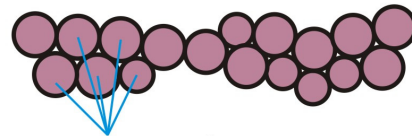


FIGURA 3.34 MONÓMEROS DE ACTINA

#### FILAMENTOS INTERMEDIOS

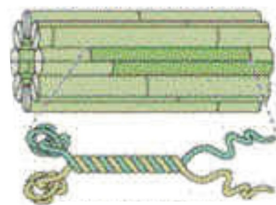


FIGURA 3.35 SUBUNIDAD FIBROSA

Están formados por subunidades fibrosas y al igual que los microfilamentos forman redes que soportan microtúbulos. Su diámetro aprox. es de 10 nm.

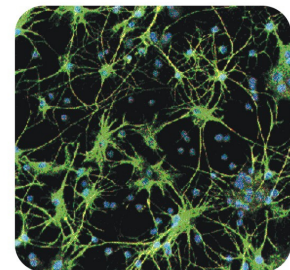


FIGURA 3.36 VERDE: FILAMENTOS INTERMEDIOS

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### ESTRUCTURA.

#### MICROTÚBULOS

Estructuralmente los microtúbulos forman el *armazón* o esqueleto interno de la célula. Cada microtúbulo está formado por dos tipos de moléculas proteicas casi esféricas que se disponen por parejas y se unen en el extremo creciente del microtúbulo aumentando su longitud en función de sus necesidades.<sup>24</sup>

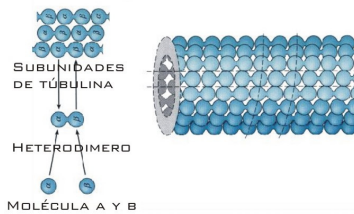


FIGURA 3.37. ESTRUCTURA CONFORMADA POR SUBUNIDADES DE TÚBULINA.

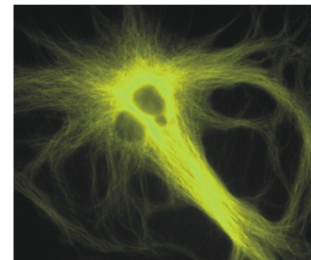


FIGURA 3.38 MICROTÚBULO DE CÉLULA ENDOTELIAL DE VACA

#### MICROFILAMENTOS DE ACTINA.

Son los componentes *flexibles* de la estructura y por lo tanto los que le permiten la *adaptabilidad* que la caracteriza. Da propiedades de *contractibilidad* al citoesqueleto.

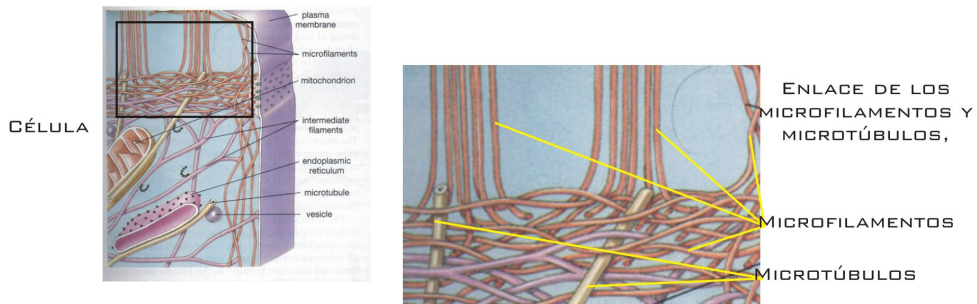


FIGURA 3.39 ENLACE ENTRE MICROFILAMENTOS Y MICROTUBULOS

#### FILAMENTOS INTERMEDIOS.

Están compuestos por proteínas fibrosas fuertes, estables y poco solubles. Son resistentes a la tracción por lo tanto tienen como función mantener la fuerza de tensión celular y ser soporte mecánico. Los filamentos están constituidos por 8 tetrámeros de fibras proteicas.<sup>25</sup>

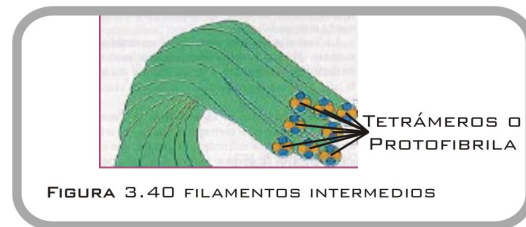


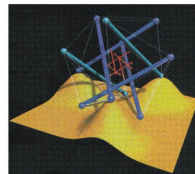
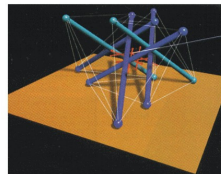
FIGURA 3.40 FILAMENTOS INTERMEDIOS

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### ESTRUCTURA.

#### CITOESQUELETO Y ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL

Este retículo formado por los tres filamentos proteicos ya mencionados, está constituido bajo un modelo conocido con el nombre de *integridad tensional* donde "el sistema se estabiliza mecánicamente a sí mismo en razón del modo en que las fuerzas de compresión y tensión se distribuyen y equilibran dentro de la estructura". Con base en un estudio realizado en Harvard se ha comprobado que "las estructuras del citoesqueleto pueden ser modificadas alterando el equilibrio de las fuerzas transmitidas a través de la superficie celular".<sup>26</sup>



MODELO REALIZADO EN HARVARD DONDE SE EVIDENCIA LOS ELEMENTOS A TENSIÓN ININTERRUMPIDA Y COMPRESIÓN LOCAL; Y LAS PROPIEDADES DE FLEXIBILIDAD CON LAS QUE CUENTA SIN PERDER RESISTENCIA.

LOS ELEMENTOS QUE SE ENCUENTRAN A COMPRESIÓN SON LOS MICROTÚBULOS POR SU RIGIDEZ, MIENTRAS QUE LOS ELEMENTOS A TRACCIÓN EQUIVALEN A LOS MICROFILAMENTOS POR SU FLEXIBILIDAD Y LOS FILAMENTOS INTERMEDIOS POR SU RESISTENCIA.

FIGURA 3.41 MODELOS TENSEGRITY

### MECANISMOS.

#### MICROTÚBULOS.

Cuentan con las siguientes propiedades<sup>27</sup>:

- Capacidad de ensamblarse y desensamblarse. Esta capacidad tiene como fin permitir que la célula pueda crecer o decrecer de acuerdo a sus necesidades. El proceso de ensamble o disociación se logra con cambios de temperatura, con alta temperatura logra el ensamble (Monómeros de tubulina) y de esta forma causa un alargamiento en el microtúbulo; o por el contrario con bajas temperaturas tienen características de disociación causando decrecimiento.

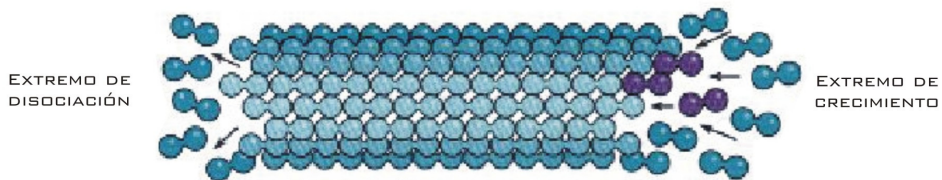


FIGURA 3.42 MICROTUBULOS

- Movilidad. La polimerización y despolimerización de microtúbulos, al igual que la acción de proteínas motoras logran el movimiento. De esta forma logran que a través de estos, otras sustancias puedan desplazarse como vesículas, lisosomas, etc.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### MECANISMOS.

#### MICROTÚBULOS.

#### MOVILIDAD.

EXTREMO DE  
DISOCIACIÓN

EXTREMO DE  
CRECIMIENTO

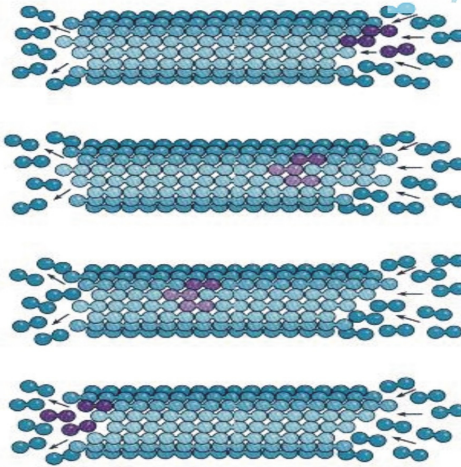


FIGURA 3.43 PROCESO DE REGENERACION Y TRANSPORTE

### ENTORNO.

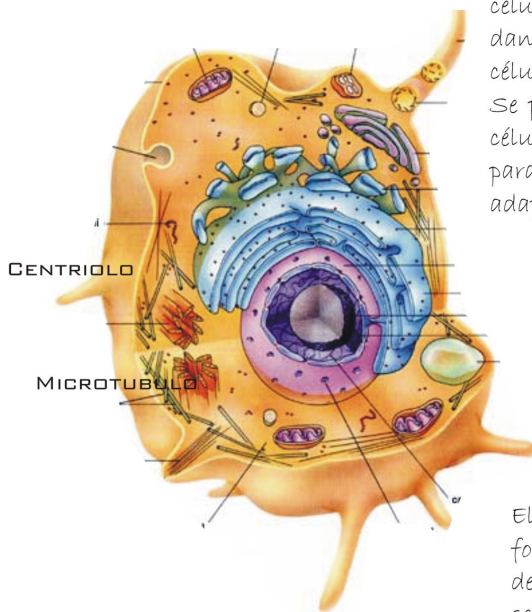


FIGURA 3.44. CELULA ANIMAL

El citoesqueleto se encuentra en diferentes tipos de células como los eritrocitos, las células animales, dando rigidez y flexibilidad según la clase de célula y las funciones que desempeñe.

Se puede encontrar en células humanas como en células animales, siempre dando la forma necesaria para la sobrevivencia de la célula según sus adaptaciones y necesidades propias.

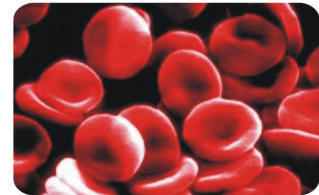


FIGURA 3.45. GLOBULOS ROJOS

El entorno de los vasos sanguíneos condiciona la forma de los glóbulos rojos, mientras ellos por medio del citoesqueleto se adaptan su forma de manera que sea la más eficiente para realizar el recorrido por estos conductos.

### 4.3.2.5 PINGÜINO EMPERADOR

APTENODYTES FORSTERI

**REINO:** Animalia  
**PHYLUM:** Chordata  
**CLASE:** Aves  
**SUBCLASE:** Neornithes  
**ORDEN:** Sphenisciformes  
**FAMILIA:** Spheniscidae  
**GENERO:** Aptenodytes



FIGURA 3.46 PINGÜINO EMPERADOR

Para su vida acuática y lograr aislamiento de las bajas temperaturas, los pingüinos tienen plumas especializadas. Su cuerpo está cubierto casi en su totalidad de plumas cortas las cuales forman un estrato de aire.

#### ANÁLISIS

El pingüino Emperador ha desarrollado diversas modificaciones anatómicas para poderse adaptar a su entorno de condiciones climáticas extremas, la Antártida. Una de ellas son sus plumas las cuales forman una estructura rígida por fuera, pero suave y abrigadora por dentro permitiendo un excelente aislamiento térmico. Adicionalmente siendo ligeras cuentan con la rigidez necesaria para mantenerse firmes.

#### PLUMAS.

La pluma es una estructura epidérmica formada en su mayor parte por queratina, una materia proteica que proporciona mayor duración y resistencia a los efectos del medio.

La cualidad más importante de la pluma es que consigue un perfecto aislamiento, manteniendo una gran flexibilidad y un mínimo peso. Su estructura puede ser modificada según las condiciones del entorno y las necesidades del ave. 28

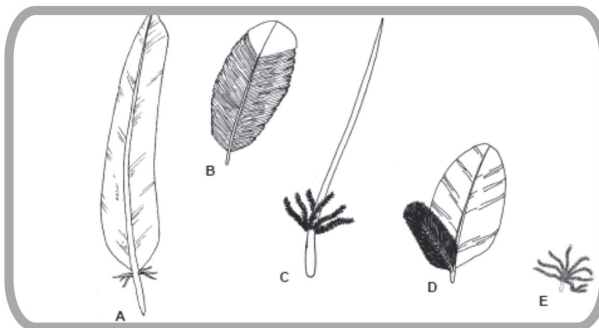


FIGURA 3.47 PRINCIPALES TIPOS DE PLUMAS: A. PLUMA REMERA; B. PLUMA DE CONTOURNO DEL CUERPO; C. SIERRA; D. SEMIPLUMA; E. PLUMÓN. (DIBUJO BASADO EN GINN & MELVILLE, 1983A.)

Además de ser aislantes, las plumas cuentan con características aerodinámicas que permiten que las aves se desenvuelvan mejor en el aire o en el agua y las protegen de los rayos ultravioleta del sol.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS



Dependiendo del lugar donde se encuentren las plumas tienen determinadas características formales que afectan directamente su función. Pueden variar en términos de tamaño, simetría, distribución y cantidad de barbas, y colores.

### FORMA COMO FUNCIÓN.

Al analizar profundamente una pluma encontramos una gran variedad de formas que a su vez cumplen diversas funciones. Una de las principales características funcionales de la pluma es la de lograr aislamiento, debido a que ayuda al ave a conservar una temperatura corporal constante.

El aislamiento térmico se da gracias a los pequeños cuerpos que forman la estructura de la pluma. Estos cuerpos llamados barbúlas son de dos clases y al unirse se convierten en un eficiente mecanismo de enganche.<sup>29</sup>



FIGURA 3.49 EN LOS PINGÜINOS ESPECÍFICAMENTE LOS NODOS QUE FORMAN LAS BÁRBULAS RECIBEN EL NOMBRE DE CILIOS.

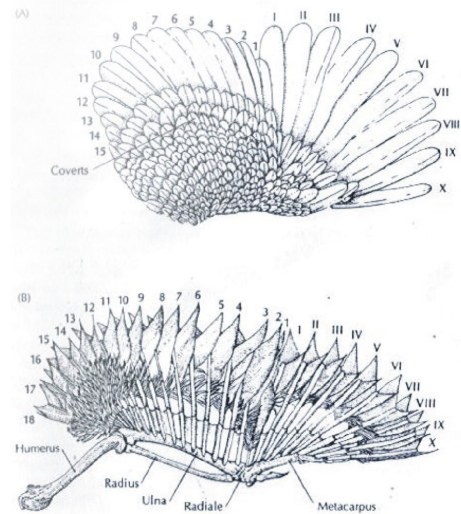


FIGURA 3.48 DIFERENCIAS FORMALES EN LAS PLUMAS DE LAS AVES SEGÚN SU FUNCIÓN.



**BÁRBULA LISA.** tienen forma de canal, con unas pequeñas protuberancias donde encajan los ganchillos de la barba contigua. Salen en dirección a la base de la pluma.<sup>30</sup>



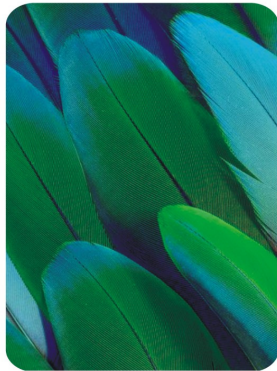
**GANCHILLOS.** son planos, con unos pequeños ganchos (barbicelos) que miran hacia abajo. Salen en dirección a la punta de la pluma.



Los ganchillos casan fácilmente en las protuberancias de las barbúlas lisas, permitiendo una unión gradual que el ave puede modificar fácilmente con su pico o con músculos relacionados.

FIGURA 3.50 BÁRBULAS Y GANCHILLOS

**FORMA COMO FUNCIÓN.**



**FIGURA 3.51**  
DISPOSICIÓN DE LAS  
PLUMAS DEJANDO

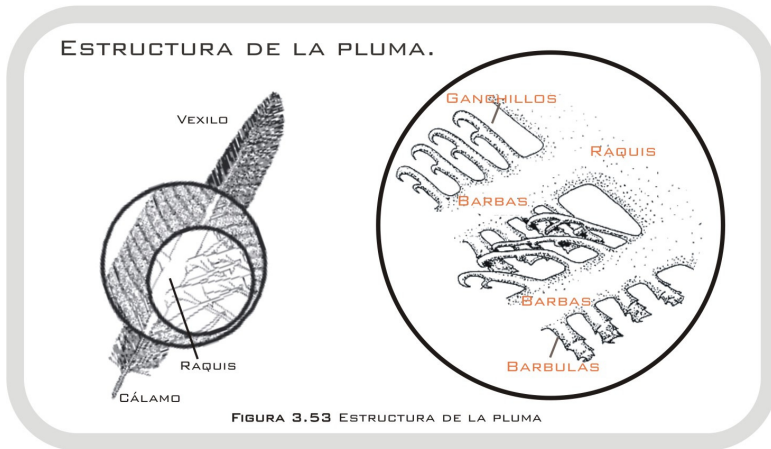
Otra forma que se puede analizar desde la función es la de la pluma completa. Las plumas tienen forma de lanza la cual les confiere cualidades hidrodinámicas. La configuración de las plumas de un ave deja libre la parte superior de la pluma o penacho permitiendo que el aire circule con menor resistencia ya que todas las plumas están orientadas en una misma dirección (generalmente hacia atrás), mientras que la inferior es la que forma la cámara de aire.<sup>31</sup>



**FIGURA 3.52** FORMA HIDRODINÁMICA

**ESTRUCTURA.**

En su totalidad la pluma es una estructura compleja la cual tiene miles de bárbulas como las descritas en el análisis anterior.



Una pluma está compuesta de dos cuerpos principales, el raquis y el vexilo. El raquis es el eje de la pluma, se trata de un cañón tubular hueco. La parte inferior del raquis recibe el nombre de cálamo y es por donde inicialmente son alimentadas las plumas para su crecimiento. De este eje se desprenden con una simetría de reflexión, ramificaciones llamadas barbas de las cuales a su vez salen las diferentes barbúlas. A esta estructura conformada por todas las ramificaciones se le da el nombre de vexilo.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

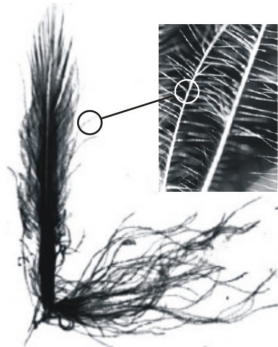


FIGURA 3.54 SEMI PLUMA PINGÜINO

Esta complicada red de bárbulas entrelazadas, forman un tejido muy ligero con la capacidad de soportar una carga pesada por unidad de área.<sup>32</sup> Al combinar estas propiedades de rigidez que le da la estructura a la pluma y las características del material que las conforma, la queratina, obtenemos como resultado una óptima relación rigidez/peso, una mayor duración y protección de los efectos de su entorno.

### MATERIALES.

La queratina es una sustancia inerte de filamentos microscópicos insolubles encajados en una matriz amorfa de proteína. Este material biológico es resistente a los hongos y los microbios.

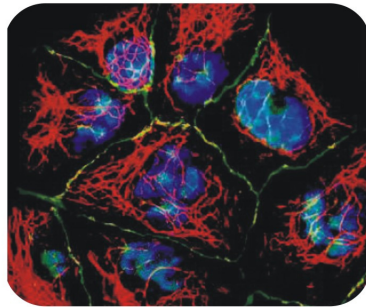


FIGURA 3.55 FILAMENTOS DE QUERATINA

El conjunto de plumas de un ave denominado plumaje, es la macro estructura de este elemento y multiplica el efecto de una sola pluma, logrando una resistencia global<sup>34</sup> para el ave reduciendo al máximo su peso, principio que les permite a las aves volar.

La queratina es el material del que están construídas las plumas. La queratina aviar es diferente a la que se encuentra en los mamíferos, ya que tiene una configuración diferente que no es en hélice-alfa, sino en lamina-beta, lo cual confiere otras propiedades adicionales en su comportamiento a tensión y a compresión.<sup>33</sup>

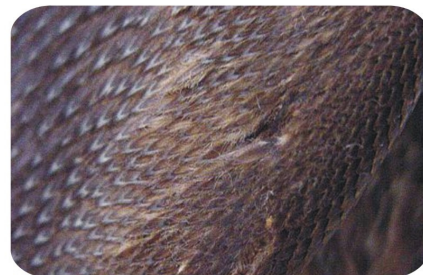
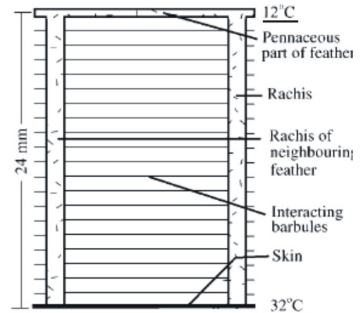


FIGURA 3.56 ALA DE PINGUINO

**MECANISMOS.**

El mecanismo de enganche entre las bárbulas descrito en el análisis de forma es el principio funcional del aislamiento térmico en las aves. Inicialmente son las barbulas que por medio de sus formas se enganchan entre ellas conformando entre todas una estructura, posteriormente esta estructura puede tener modificaciones según las condiciones del entorno y las necesidades del animal. Estas modificaciones se logran por la interacción de diferentes sistemas, las estructuras y los músculos; y permiten que pueda adaptarse a diferentes características ambientes como lo son el frío, el no tan frío y el agua.



**FIGURA 3.57** DIAGRAMA PARA ESTUDIO DE AISLAMIENTO TÉRMICO

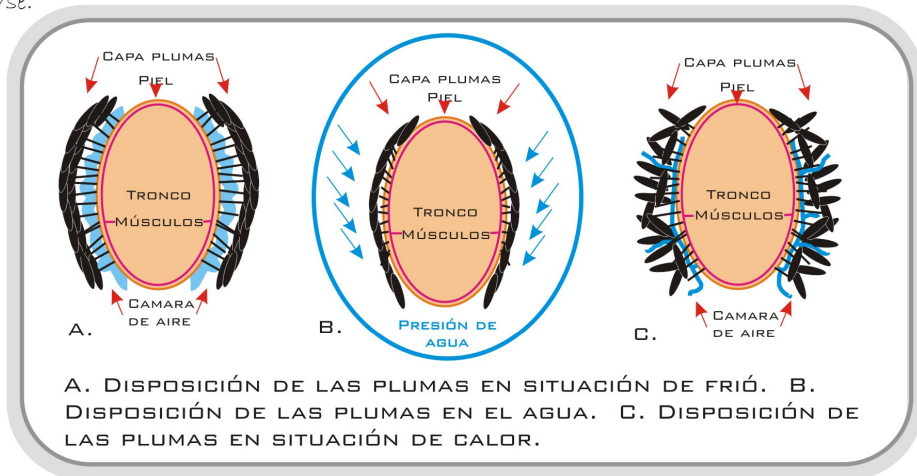
**FUNCIONAMIENTO.**

Cuando los pingüinos se encuentran en la superficie, conservan una cámara de aire entre las plumas y la piel que elimina la pérdida de calor por convección y la reduce por radiación y conducción al mínimo.<sup>35</sup>

Al sumergirse en el agua se requiere una capa fina, lisa e impermeable que no contenga aire puesto que lo haría flotar. Los músculos unidos a la pluma la aseguran creando una barrera hermética y el raquis sufre un aplastamiento dorso ventral que le permite doblarse para poder tomar la forma del cuerpo del pingüino que con el aumento de presión del agua logra extraer todo el aire de su interior. En el momento que el pingüino sale del agua la cámara inmediatamente vuelve a crearse.



**FIGURA 3.58** PINGÜINO SALIENDO DEL AGUA AUN CON LA CAMARA SIN AIRE. FORMA HIDRODINÁMICA.



**A. DISPOSICIÓN DE LAS PLUMAS EN SITUACIÓN DE FRÍO. B. DISPOSICIÓN DE LAS PLUMAS EN EL AGUA. C. DISPOSICIÓN DE LAS PLUMAS EN SITUACIÓN DE CALOR.**

**FIGURA 3.59** DISPOSICIÓN DE LAS PLUMAS EN DIFERENTES SITUACIONES

## ENTORNO.

### CARACTERÍSTICAS.

El pingüino Emperador es un animal característico de la Antártida, la tierra más fría, más seca y más ventosa del planeta.

### CLIMA.

Sobre casi toda la superficie del continente impera el clima polar donde la temperatura promedio del mes más cálido no supera los 0° Centígrados. La temperatura promedio es de -17° Centígrados.<sup>36</sup> Adicionalmente es un clima muy extremo debido principalmente a la radiación indirecta del Sol. De esta manera, el clima se define por la presencia de bajas temperaturas permanentes, escasas precipitaciones pluviométricas y fuertes e intensos vientos.

La Antártida posee dos regiones climáticas: la costa y el interior. La costa muestra unas condiciones climáticas ligeramente más suaves y atenuadas ya que las latitudes más bajas proveen rayos solares más directos en verano, y también periodos más cortos de oscuridad en invierno; todo ello favorece que dicho sector costero albergue a los conocidos oasis antárticos. En cambio, en el interior, dichas condiciones climáticas se refuerzan y son mucho más drásticas, como consecuencia de que los rayos del Sol son recibidos de forma indirecta.

### ADAPTACIONES.

Frente a las condiciones climáticas del entorno, los pingüinos sufrieron diversas modificaciones, la mayoría de estas relacionadas con las propiedades térmicas que le permitirían sobrevivir en un frío extremo.

En primer lugar la comida no está en el aire, está en el agua. Por esta razón sus alas actualmente son aletas y se dice que literalmente vuela en el agua, para lograr esto cuenta con una gruesa capa de grasa que complementa con la impermeabilidad y el aerodinamismo que permiten la disposición de las plumas.

En segundo lugar está el aislamiento térmico que regula su temperatura corporal. De esta forma el pingüino puede conservar calor en su cuerpo o puede refrescarse. Adicionalmente sus plumas son abrigadoras por dentro, a tal punto que cuentan con un pliegue de piel en donde guardan el huevo y cuando nace el pichón, allí lo resguarda de los fuertes vientos.



FIGURA 3.60 ANTARTIDA



FIGURA 3.61 PINGUINOS EN SU HABITAT NATURAL.

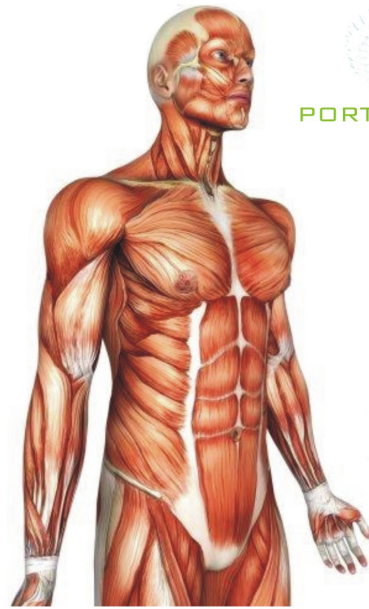


FIGURA 3.62 PINGUINOS BEBE DENTRO DE LA BOLSA DE SU MADRE

## SISTEMA MUSCULAR

### MÚSCULO ESTRIADO

El músculo es un órgano fundamental en el sistema locomotor de los seres vivos, existen tres clases de músculo, el músculo liso que hace parte de los órganos del cuerpo, el músculo cardíaco que compone el sistema cardíaco y el músculo esquelético o estriado que compone el sistema muscular<sup>37</sup> y locomotor con acciones voluntarias al contrario de los otros dos que son controlados por el sistema nervioso autónomo.



El músculo se caracteriza por la capacidad de contracción en respuesta a un estímulo nervioso.

FIGURA 3.63 SISTEMA MUSCULAR HUMANO. MÚSCULOS ESTRIADOS.

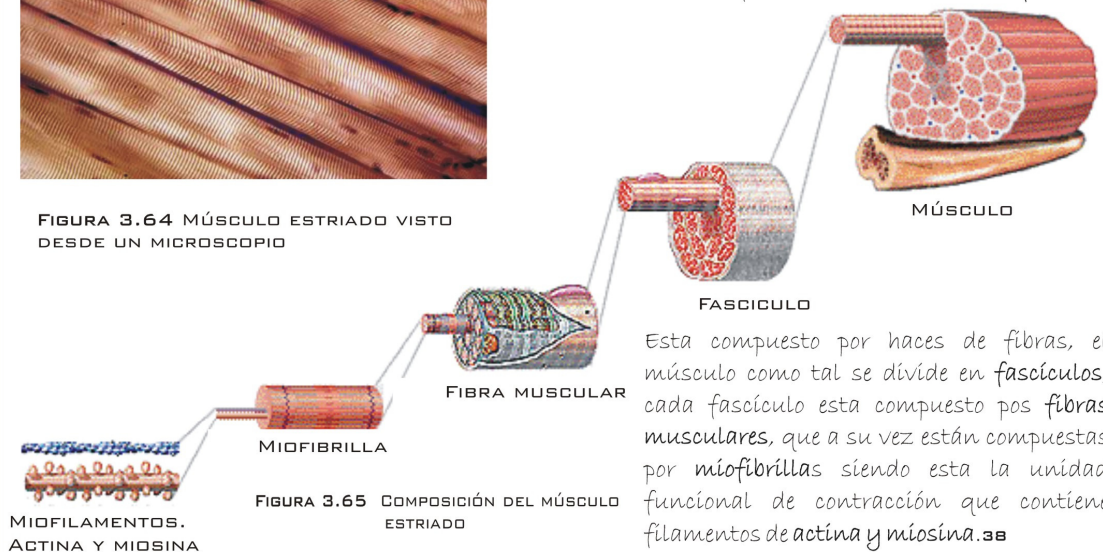
## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### FORMA COMO FUNCIÓN.



FIGURA 3.64 MÚSCULO ESTRIADO VISTO DESDE UN MICROSCOPIO

El músculo estriado presenta estrias longitudinales y transversales en toda las fibras ya que posee gran cantidad de células fulimormes llamadas miofibrillas.



## ESTRUCTURA.

El músculo estriado se relaciona directamente con el esqueleto y el movimiento, está compuesto por haces de fibras que desempeñan funciones específicas dentro de la estructura y cubierto de una membrana externa llamada sarcolema.

Permanece libre de infecciones ya que mantiene un abundante riego sanguíneo constante.

Las fibras de los sarcolemas, membrana externa del músculo, son alargadas compuestas por muchos núcleos. Está directamente conectado con el sistema nervioso central y unidos al esqueleto mediante tendones permitiendo el movimiento de los huesos y las articulaciones.

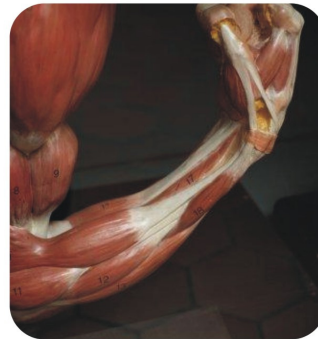


FIGURA 3.66 MÚSCULO ESQUELÉTICO EN EXTREMIDADES

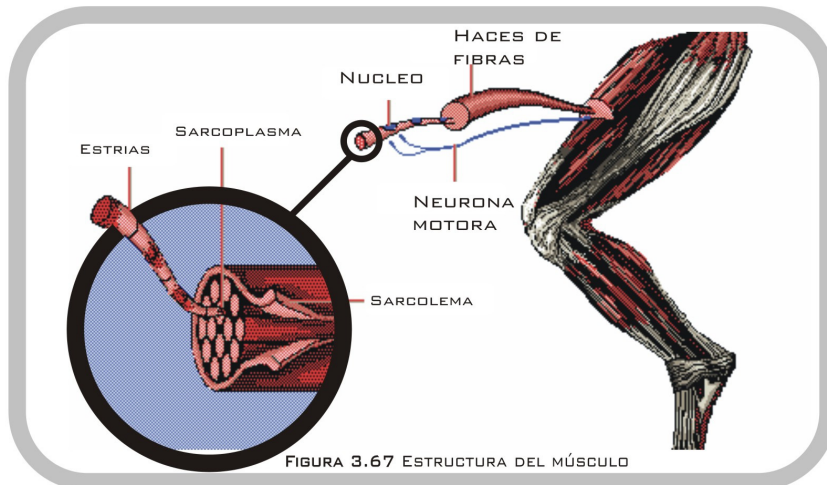


FIGURA 3.67 ESTRUCTURA DEL MÚSCULO

El músculo estriado está compuesto por fibras largas y delgadas formadas por pequeñas fibras proteicas, las miofibrillas, cada una de estas se divide en pequeños segmentos llamado sarcomeros.

El sarcomero es la unidad funcional del músculo que permite la contracción, está compuesto por proteínas de miosina actina y unos tabiques delgados llamados estrias z.

**MECANISMOS.**



FIGURA 3.68 MIOFIBRILLA

La unidad básica del músculo estriado es la miofibrilla compuesta por miofilamentos gruesos y delgados donde se encuentran moléculas de miosina y actina respectivamente; estas moléculas con las estrías z son las que provocan la contracción de los músculos, siendo las estrías z quien excite el movimiento mediante un estímulo nervioso. Este conjunto de proteínas de actina, miosina y estrías z

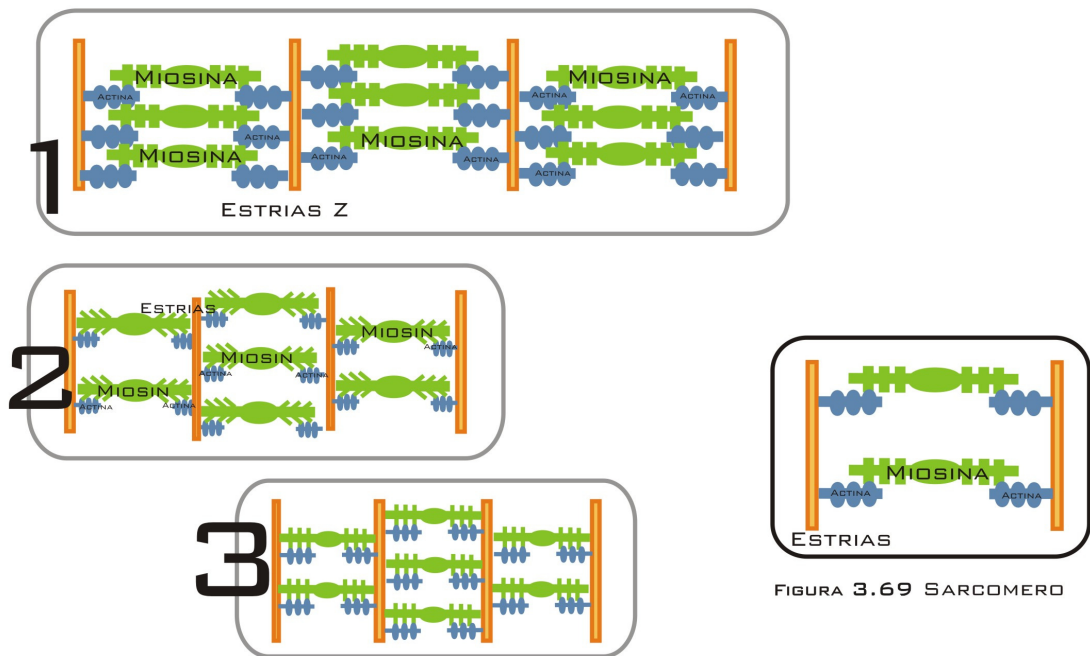


FIGURA 3.69 SARCOMERO

FIGURA 3.69 CONTRACCIÓN DEL MÚSCULO ESTRIADO. 1. MIOFILAMENTOS DE ACTINA Y MIOSINA EN ESTADO NATURAL (MÚSCULO RELAJADO). 2. MIOFILAMENTOS DE MIOSINA PLEGADOS. 3. MIOFILAMENTOS DE ACTINA ACOPLADOS A LOS DE MIOSINA, CONTRACCIÓN DEL MÚSCULO.

La contracción se realiza en cada sarcomero mediante modelos deslizantes, comienza con un estímulo nervioso, ante este estímulo las partículas de miosina se contraen y se acoplan al centro de los filamentos de actina, al enderezarse las partículas de miosina provocan en deslizamiento de la actina provocando a su vez el acortamiento de las estrías Z contrayéndose los sarcomeros, las miofibrillas, las fibras musculares se acortan y se contrae el músculo. 40

**MECANISMOS.**

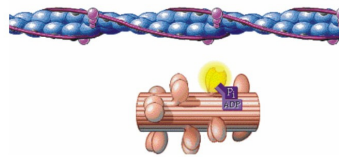


FIGURA 3.70 MIOFILAMENTOS DE ACTINA Y MIOSINA CON ATP

El ATP (Adosin trifosfato) es la unidad de "energía" del músculo, ella es la responsable que los miofilamentos se puedan relajar y preparar para la contracción bloqueando moléculas de calcio y acetil colasa. (Sustancias químicas que provenientes de la neurona motora).

El músculo esquelético es el único que posee movimientos voluntarios, controlados por el sistema nervioso central por medio de neuronas motoras y espacios sinápticos que envían impulsos a las estrías Z.

**ENTORNO**

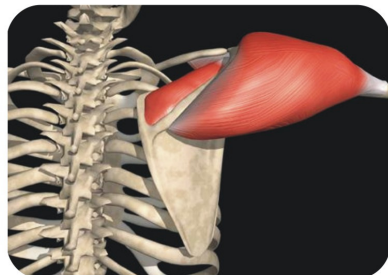


FIGURA 3.72 ESQUELETO HUMANO

El músculo se encuentra en el cuerpo humano y animal estructurando junto con los tendones, articulaciones y huesos el sistema locomotor del organismo.

Con él interactúan el esqueleto, el sistema nervioso central, el sistema vascular que irradia oxígeno continuamente alrededor de las células.

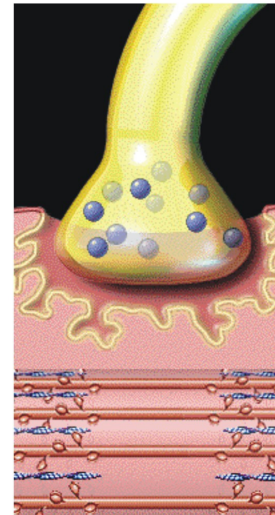


FIGURA 3.71 TERMINALES NERVIOSAS EN SARCÓMERO

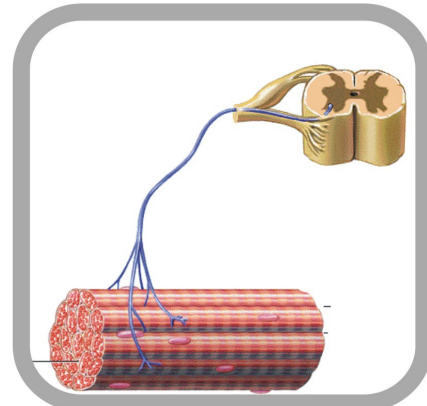


FIGURA 3.73 SISTEMA NERVIOSO CENTRAL INTERACTUANDO CON LAS FIBRAS MUSCULARES

### 4.3.2.7 ARMADILLO DE NUEVE BANDAS

#### DASYPUS NOVEMCINCTUS

**REINO:** Animalia  
**PHYLUM:** Chordata  
**CLASE:** Mammalia  
**ORDEN:** Xenarthra  
**FAMILIA:** Dasypodidae  
**GENERO:** Dasypus  
**ESPECIE:** Dasypus novemcinctus



#### ANÁLISIS



FIGURA 3.75 DASYPUS NOVEMCINCTUS

El armadillo es un mamífero terrestre, posee una longitud de 40 cm mas el largo de la cola y un peso promedio de 4 a 8 k. Se alimenta de gusanos, pequeños vertebrados y carroña.<sup>42</sup>

#### FORMA COMO FUNCIÓN

La composición de las bandas en el armadillo permite enrollarse en sí mismo para protegerse de forma que los extremos componen una única placa y las nueve bandas centrales son mas delgadas permitiendo mayor flexibilidad al enrollarse. Cada placa osea esta cubierta por pequeñas escamas triangulares, al igual que su cola y su cabeza, que aunque desprovistas de placas oseas están cubiertas por escamas corneas con forma hexagonal.<sup>43</sup> la cola esta compuesta por hileras marcadas de escamas hexagonales, estas hileras permiten también mayor flexibilidad al enrollarse y mayor movilidad del cuerpo inferior.



FIGURA 3.74 ARMADILLO CON POCAS SEMANAS DE NACIDO

Cuando los peligros son inminentes el armadillo tiende a enrollarse en sí mismo en forma de esfera con su caparazón o a huir escondiéndose en las madrigueras que el mismo escava con una profundidad de hasta 4 metros.



FIGURA 3.76 ESCAMAS EN EL ARMADILLO



FIGURA 3.77 ARMADILLO DE NUEVE BANDAS CON PELO ENTRE LAS LACAS DE SU ARMADURA.

## ELEMENTOS DE ANÁLISIS

### ESTRUCTURA.



Posee una armadura formada por huesos dérmicos y la capa superior de su piel, la epidermis. Estas placas se desarrollan desde su nacimiento, fortaleciéndose con el crecimiento posterior.

### ESTRUCTURA DE LA ARMADURA

La armadura está compuesta por dos placas que cubren la parte posterior y la parte anterior del animal y nueve bandas flexibles en el medio que permiten una mayor flexibilidad que la de las otras especies.

Las bandas están unidas por una capa gruesa de piel y pelos, no existe contacto óseo entre las bandas y el esqueleto, pero sí una red de músculos carnosos llamados pániculos y terminales nerviosas que permiten su movimiento<sup>44</sup>. Las placas óseas están cubiertas por pequeñas escamas de color marrón.

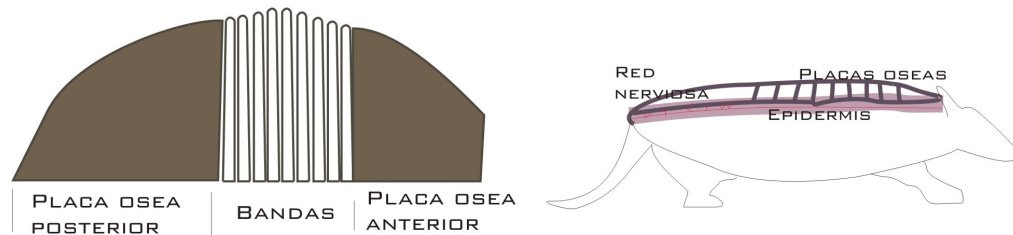


FIGURA 3.78 ESTRUCTURA Y COMPONENTES DE LA ARMADURA DEL ARMADILLO

### MECANISMOS



Las placas óseas se contraen por medio de los Músculos ventrales que reaccionan ante impulsos nerviosos cuando se encuentran en peligro.<sup>45</sup>

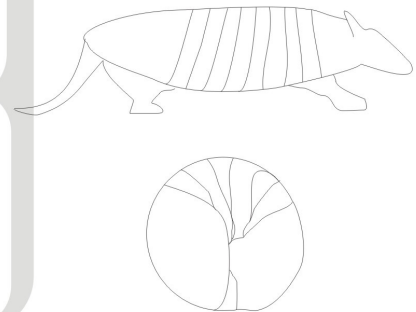


FIGURA 3.79 ENCAPSULAMIENTO DE LA CORAZA DEL ARMADILLO, DESDE LA POSICIÓN NORMAL, HASTA EL TOTAL ENCORVAMIENTO

## ENTORNO.

### CARACTERÍSTICAS.

El armadillo se encuentra en bosques tropicales o húmedos de América del Sur y América Central. Vive en madrigueras subterráneas que el mismo cava con sus patas delanteras, estas madrigueras pueden medir hasta 8m de longitud, les sirven de refugio durante el día ya que los hábitos de caza son usualmente nocturnos.

En una misma madriguera suele vivir con sus crías hasta que alcanzan una edad adulta y estos cavan sus propias madrigueras en los remansos de los ríos y cerca de los matorrales.

Sus principales depredadores son diferentes carnívoros, como por ejemplo: perros, coyotes, pumas y jaguares<sup>46</sup>.

### ADAPTACIONES.

El Armadillo ha desarrollado una capacidad para retener el aire cuando cava las madrigueras o cuando busca insectos dentro de la tierra por medio de un ensanchamiento de los bronquios y la traquea, puede realizar esta actividad hasta por 6 minutos.

Para excavar con más rapidez posee mayor número de vasos sanguíneos en sus patas delanteras lo que le permite más velocidad y mayor movilidad.



FIGURA 3.80 MADRIGUERA



FIGURA 3.81 ARMADILLOS EN AMBIENTES NATURALES

### 4.3.2.8 ERIZO DE MAR

PARACENTROTUS LIVIDUS

**REINO:** Animalia  
**CLASE:** Invertebrados  
**FAMILIA:** Equinodermos  
**GENERO:** Paracentrotus  
**ESPECIE:** Paracentrotus lividus

#### ANÁLISIS

El nombre de equinodermo proviene de la palabra equino que significa espina, y derma, piel, se dice que están en la tierra hace 200 millones de años,<sup>47</sup> utilizados desde tiempos de Aristóteles como alimento para humanos, poseen un esqueleto compuesto por placas óseas divididas por secciones que dependen de funciones específicas y un sistema de locomoción muy especializado llamado sistema vascular acuífero.

#### ELEMENTOS DE ANÁLISIS

En la edad adulta poseen simetría penta radial, formados por un dermoesqueleto compuesto principalmente por calcio, este está dividido en diez secciones pentagonales soldadas entre ellas, cinco radiales y cinco interradiales<sup>48</sup>, en las placas radiales se localizan los pies ambulacrales, y en las interradiales las espinas.



FIGURA 3.83 ESTRUCTURA ÓSEA DEL ERIZO DE MAR, DISPOSICIÓN DE PLACAS CALCÁREAS Y LINTERNA DE ARISTÓTELES



FIGURA 3.82 ERIZO DE MAR COMUN

#### FORMA COMO FUNCIÓN.

El cuerpo se divide en dos hemisferios, uno bucal donde se encuentra la boca compuesta por la linterna de Aristóteles y otro aboral donde se encuentra el ano conocido como periprocto.

El esqueleto es de forma esférica, las espinas, con diferentes grosores y longitudes componen, simultánea y casi simétricamente, una forma esférica.

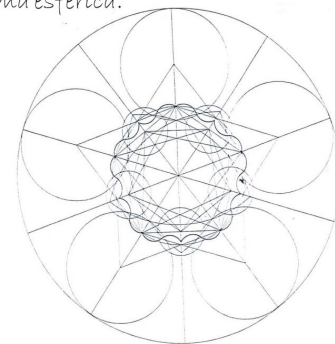


FIGURA 3.84 GEOMETRIZACIÓN DEL ERIZO DEL ESQUELETO DE UN ERIZO DE MAR

## ESTRUCTURA.

El erizo de mar está compuesto por placas calcáreas que realizan diferentes funciones, además de soportar todos los órganos internos, pies ambulacrales y espinas.

Una de las placas posee la linterna de Aristóteles, esta formada por cinco dientes pequeños y fuertes, realizan movimientos de arriba a abajo que permite desmenuzar el alimento y trepar por diferentes superficies.

Otra placa muy importante es la placa madreporita, en donde inicia el aparato acuífero.

El sistema ambulacral es quien conforma el sistema locomotor del erizo, esta compuesto por una serie de conductos radiales que transportan líquidos desde el exterior por medio de la placa madreporita, hasta las ventosas y los pies ambulacrales quienes realizan, por medio de cambios de presión, el movimiento del animal.

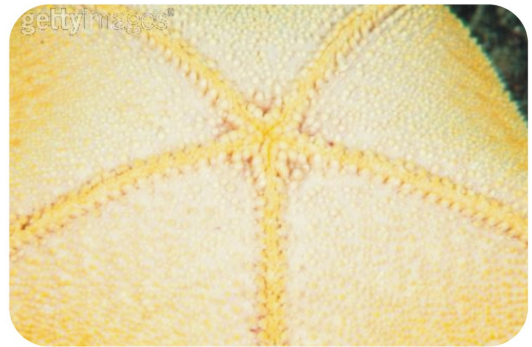


FIGURA 3.85 ESTRUCTURA PENTA RADIAL.

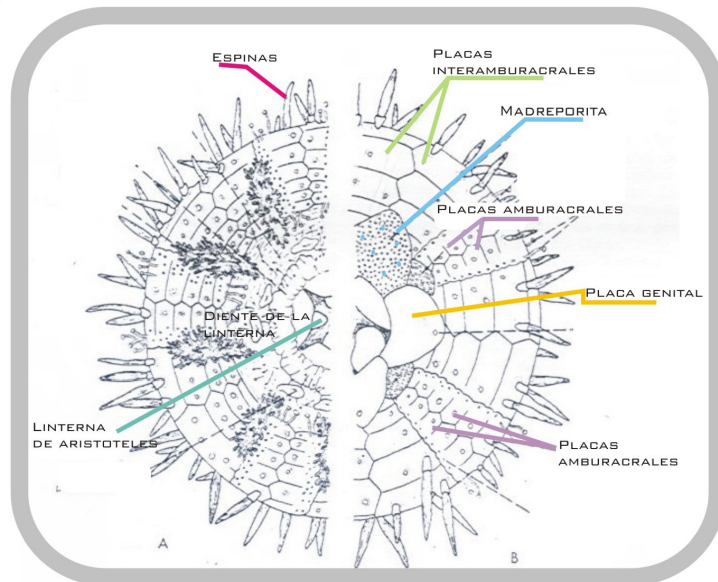
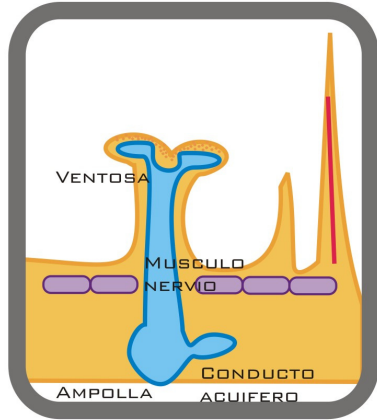


FIGURA 3.86 ESTRUCTURA DEL ERIZO, EN EL LADO DERECHO VISTA DEL HEMISFERIO BUCAL, LADO IZQUIERDO, HEMISFERIO ABORAL.

**MECANISMO**



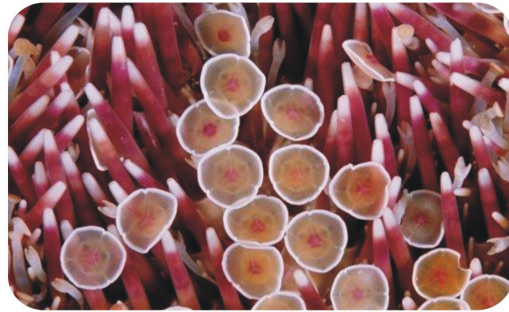
**FIGURA 3.87** ESQUEMA DE COMPONENTES DEL SISTEMA AMBURACRAL

El sistema acuífero comienza con la entrada de agua por la placa madreporita hacia los anillos ambulacrales que distribuyen los fluidos hacia las ampollas y los pedicelarios.

Cuando llegan estímulo nerviosos a los músculos de las ventosas y las ampollas ocurren contracciones que permiten un intercambio de presión entre el conducto acuífero y la ampolla ocasionando una succión a través del pie ambulacral o pedicelario que provoca, además del movimiento en conjunto con los músculos y la acción de glándulas mucosas, una mayor adherencia a las superficies externas.<sup>50</sup>

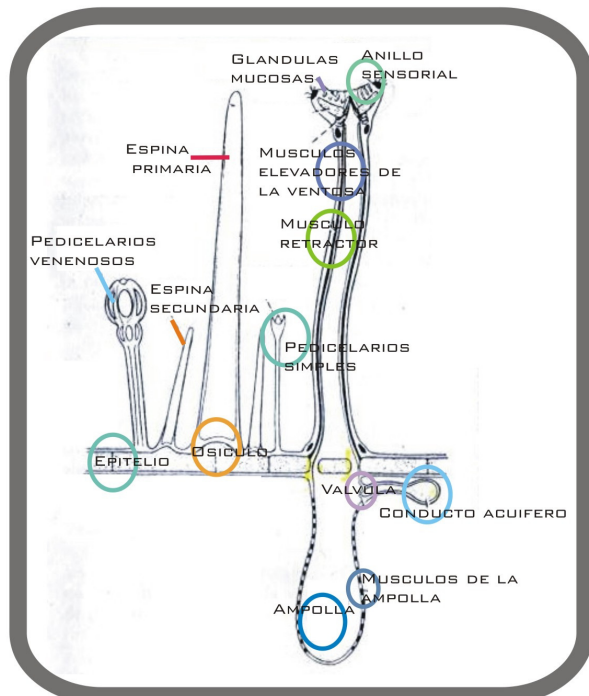
El conducto acuífero posee una válvula que permite y regula la entrada y salida de agua desde la ampolla al mismo.

El epitelio y el oscículo soportan estos mecanismos haciendo parte de las placas ambulacrales y el esqueleto.



**FIGURA 3.88** PEDICELARIOS Y ESPINAS

El sistema acuífero además de ser el responsable del movimiento del erizo, posee funciones alimentarias y sensoriales que permiten ubicación en el entorno, la búsqueda de alimento y protección de algunos depredadores.



**FIGURA 3.89** COMPONENTES DEL SISTEMA AMBURACRAL.

## ENTORNO



El erizo de mar es común en los corales y paredes rocosas de las costas, se caracteriza por conformar grupos de erizos de la misma especie, se ubican en superficie lisas y profundas, haciéndolas más profundas todavía por medios adaptativos.



FIGURA 3.90 ERIZO EN SU AMBIENTE NATURAL.

Se alimentan de materia orgánica como plantas, algas o animales, vivos o muertos, usualmente lo hacen de noche para evitar a algunos depredadores.

### ADAPTACIONES.

Han desarrollado capacidades especiales por medio de las espinas, el aparato masticador y los pies ambulacrales para excavar en superficies duras como rocas y depresiones contrarrestando la acción de las olas y protegiéndose de depredadores.

Han logrado adaptarse asombrosamente a diferentes entornos y condiciones medioambientales limitando sus actividades corporales y adaptándolas al ambiente, por ejemplo, cuando la comida es poca las actividades somáticas y reproductoras decrecen adaptándose a las condiciones existentes.



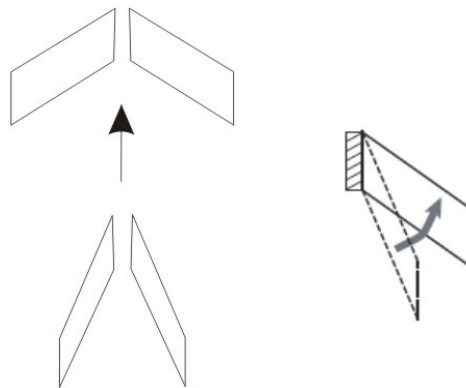
FIGURA 3.91 ERIZO DE MAR EN COMUNIDAD.

### 4.3.3 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE LOS PRINCIPIOS DE SOLUCIÓN.

#### 4.3.3.1 ANÁLISIS CONCEPTUAL CULEBRA VOLADORA.

La sección transversal de la culebra voladora, es la que sufre la transformación que permite que esta especie pueda deslizarse en el aire. Esta estructura responde a un mecanismo de articulación continua que se transmite a través de todos los miembros estructurales de esta, logrando un movimiento uniforme. Así mismo cada miembro estructural responde a un mecanismo de cuatro barras.

Las aplicaciones para este principio de solución son variadas y corresponden a estructuras de tipo plegable, articulaciones, mecanismos de transmisión de movimiento, etc.



**Figura 3.92 Análisis conceptual culebra voladora** Mecanismo de cuatro barras.

**Fuente: Elaboración propia**

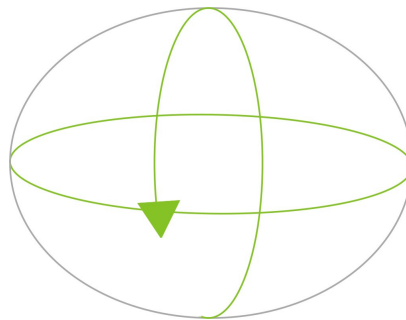
#### 4.3.3.2 ANÁLISIS CONCEPTUAL HUEVO.

El principio de solución extraído del huevo tiene que ver con la resistencia de su cáscara. El huevo debe su alta rigidez en sentido longitudinal, netamente a su forma, debido a la fortaleza estructural que se obtiene al disponer su morfología

según las cargas que debe soportar<sup>38</sup>. Esta estructura se encuentra en el grupo de superficie en acción y se caracterizan por que “las cáscaras delgadas son estructuras resistentes por la forma, suficientemente delgadas para no desarrollar tensiones apreciables por flexión, pero también suficientemente gruesas para resistir cargas por compresión, corte y tracción (membranales). Las cáscaras delgadas permiten la construcción económica de cúpulas y otros techos curvos de formas diversas, gran belleza y excepcional resistencia”<sup>39</sup>

Aunque su material, la calcita, no es muy resistente, cuenta con una estructura porosa que permite que los esfuerzos no se concentren, si no que por el contrario se distribuyan en toda la superficie. Adicionalmente aporta más rigidez a la cáscara, debido a que el aire atrapado al interior del poro, ejerce una presión que se opone a las cargas externas, haciéndola mas resistente.

La trayectoria en que se mueven las cargas van en sentido de la forma ovoide del huevo.



**Figura 3.93 Análisis conceptual cáscara.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

---

<sup>38</sup> Sierra Rodríguez F., Sañudo LG., Vanegas D.E., Estructuras ligeras: ¿Por qué miramos la naturaleza? Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana; 2006. 17p.

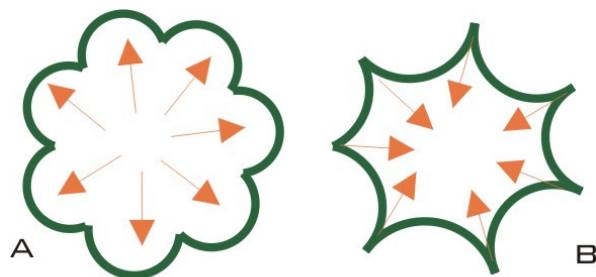
<sup>39</sup> Identificación de los Sistemas Estructurales Básicos

### 4.3.3.3 ANÁLISIS CONCEPTUAL CACTUS.

La estructura interna de cactus cuenta con la propiedad de contraerse de acuerdo a sus necesidades funcionales. Su morfología es modificada de forma tal, que responde de la manera más eficiente a sus necesidades biológicas. El mecanismo que permite este funcionamiento esta basado en un cambio de presiones a nivel interno, generado por la presencia o ausencia de fluidos. De esta forma la estructura esta compuesta por una serie de elementos estructurales en forma de costillas que cuentan con la propiedad de expandirse o reducir su sección transversal de acuerdo a su necesidad de volumen interno.

Este tipo de estructuras son de gran utilidad para el almacenamiento, ya que brindan la posibilidad del ahorro de espacio no utilizado. Por ejemplo, en el caso de un recipiente con cierto contenido de liquido, en la medida que el liquido se acaba, el espacio ocupado por el recipiente se reduce, ahora, si se decide recargarlo, este puede retomar su forma original.

Modificación formal por medio de cambios de presión interna.



**Figura 3.94 Análisis conceptual cactus**

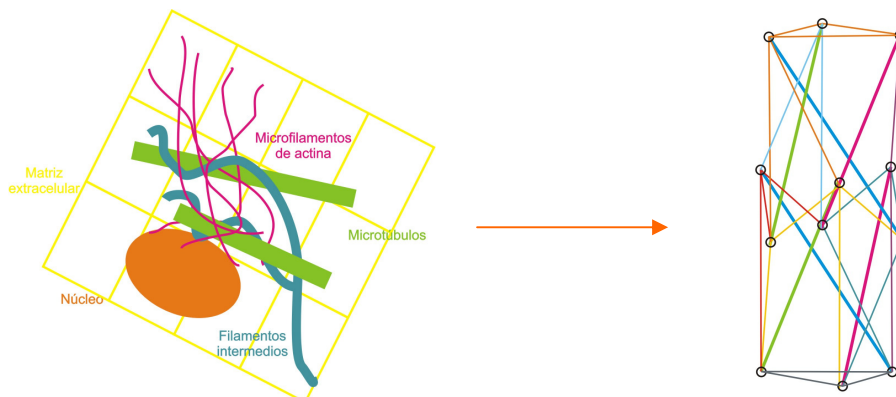
**Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.3.3.4 ANÁLISIS CONCEPTUAL CITOESQUELETO.

El citoesqueleto en si es una estructura de soporte. El entramado de elementos proteicos que lo conforma equilibra sus fuerzas y logra a su vez cumplir otras funciones gracias a esta posibilidad. Así mismo, responde a un modelo estructural denominado integridad tensional, en donde se diferencian elementos a tensión y a compresión, que por medio de la geometría de la estructura, logran el equilibrio del sistema.

La integridad tensional es un concepto que cuenta con un sin numero de posibles aplicaciones. Principalmente es una estructura apta para cualquier necesidad de soporte, debido a la rigidez y equilibrio que evidencia en su funcionamiento, adicionalmente cuenta con características flexibles que permiten que también pueda ser utilizada con fines dinámicos.

Elementos a tensión y compresión con cargas que finalmente se anulan.



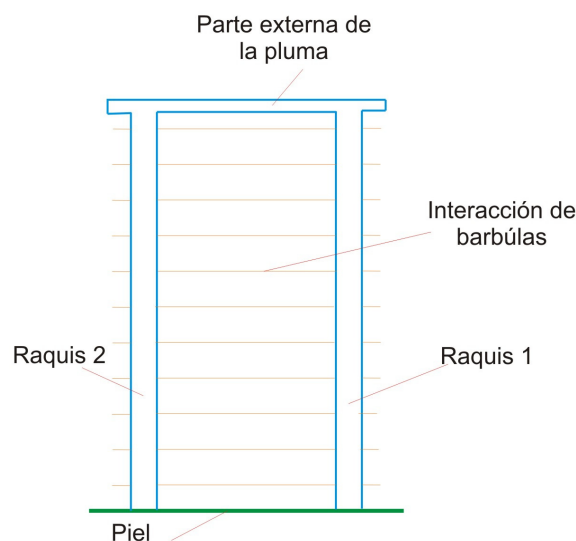
**Figura 3.95 Análisis conceptual citoesqueleto.**

**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.3.3.5 ANÁLISIS CONCEPTUAL PINGÜINO EMPERADOR.

La pluma, es una macroestructura, que a su vez esta compuesta por microestructuras. Este tipo de estructura aunque es rígido permite variaciones en su configuración obteniendo de acuerdo a ciertos cambios propiedades de resistencia, termorregulación e impermeabilidad.

Lo anterior es aplicable a empaques o almacenamiento que requiera de una regulación en términos de humedad o temperatura, ya que la configuración estructural le brinda resistencia con un mínimo peso.



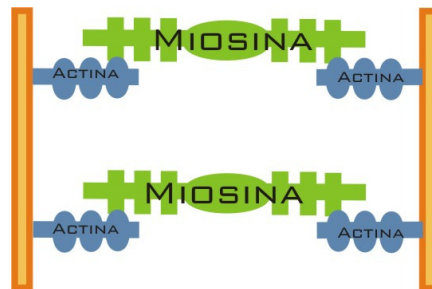
**Figura 3.96 Análisis conceptual pluma**

**Fuente: Elaboración propia**

#### 4.3.3.6 ANÁLISIS CONCEPTUAL MÚSCULOS.

Las miofibrillas son el principio funcional seleccionado de los músculos. Corresponden a estructuras de tipo retractil, que permiten variar la longitud de una estructura, mediante la modificación de sus enlaces por medio de un estímulo externo.

Este tipo de estructuras son útiles en elementos portátiles. Además también podría ser aplicado como un snap fit en piezas plásticas.



**Figura 3.97 Análisis conceptual miofibrilla**

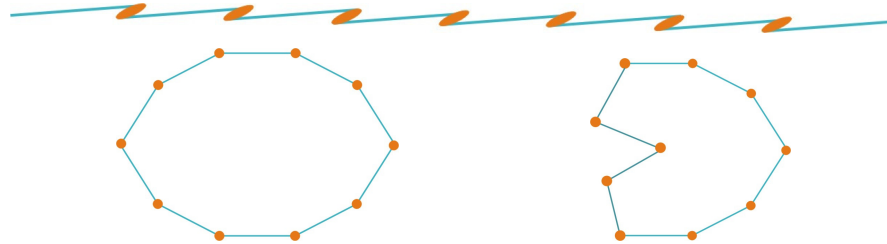
**Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.3.3.7 ANÁLISIS CONCEPTUAL ARMADILLO.**

El principio de solución extraído del armadillo es el del funcionamiento articulado de sus bandas, el cual le permite contraer su cuerpo y convertirlo en una esfera como medio de protección. Este tipo de estructuras articuladas son aptas para el desarrollo de sistemas plegables, los cuales se caracterizan por la capacidad de tener una geometría variable, la cual puede causar efectos a nivel formal y estructural. Adicionalmente cuenta con las propiedades de la esfera mencionadas en el capítulo 2.3.1 en su estado plegado, y es una clara aplicación de la capacidad de contener el mayor volumen con la menor superficie.

Por lo tanto los campos de aplicación de este principio de solución están dentro del ámbito de estructuras plegadas de rápida respuesta, aptas para un óptimo almacenamiento. La respuesta rápida esta dada por la construcción geométrica de la estructura, articulada por una película flexible, que con un solo movimiento logra plegarse y no requiere de elementos adicionales a los estructurales. Por otro

lado, el óptimo almacenamiento se evidencia por su forma de esfera, la cual podría contener un volumen grande en un recipiente pequeño.



**Figura 3.98 Análisis conceptual armadillo.** Configuraciones estructurales en donde las líneas azules corresponden a los elementos estructurales y los elementos naranja son las articulaciones flexibles. **Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.3.3.8 ANÁLISIS CONCEPTUAL ERIZO DE MAR.

El sistema ambulacral del erizo de mar responde a un mecanismo de soporte, basado un cambio de presión a nivel interno que causa succión. Este mecanismo adicionalmente cumple la función de una válvula que permite y restringe el paso del agua. Entre las aplicaciones para este concepto se encuentran sistemas de soporte y de sujeción por medio de la succión y válvulas.



**Figura 3.99 Análisis conceptual del sistema ambulacral del erizo de mar.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.3.4 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Según el Requerimiento 7.2<sup>40</sup> del anteproyecto, se ha verificado su cumplimiento dado que partiendo de una investigación general sintetizada en una ficha inicial se ha escogido un sistema específico en cada ser natural, y se ha analizado éste respecto a los cuatro conceptos específicos de la biónica.

---

<sup>40</sup> Ver anexo A. Requerimientos del proyecto

## **4.4 ABSTRACCIÓN DEL CONCEPTO.**

### **4.4.1 SELECCIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO.**

El criterio elegido para el desarrollo de este estudio es estructural y trata sobre la optimización geométrica de estructuras de soporte, con el fin de obtener una propuesta que sustituya una estructura mecánica convencional, logrando que su comportamiento sea más eficiente.

Bajo este criterio, el principio de solución que se elija debe mejorar la relación rigidez – masa, respecto a una estructura de soporte convencional. Así mismo como la distribución de sus esfuerzos debe ser la mas optima. Lo anterior se debe lograr sin incrementar significativamente la complejidad en el proceso de fabricación en términos de tiempo y costo.

La rigidez de una estructura esta determinada por los siguientes factores:

- Los materiales de los componentes.
- Las fuerzas externas que debe soportar la estructura.
- La combinación o topología de la estructura.
- La geometría de la estructura<sup>41</sup>.

Lo cual indica que se debe tener especial atención con los tipos de sistemas que demuestren superioridad en estos aspectos, sobretodo en la ventaja estructural denotada por la geometría de esta, ya que afecta de una manera directa la distribución de las fuerzas en la estructura.

---

<sup>41</sup> Christiaans, H Research methods and techniques.BasicsI.BasicsII.

“Uno de los problemas más interesantes en el campo de la optimización es el de encontrar la forma de la pieza o sistema estructural que teniendo el menor peso posible (menor cantidad de material) y una menor distribución de esfuerzos (zonas con mejor concentración de esfuerzos) resulte ser la mejor para resolver el problema que se pretende optimizar”.<sup>42</sup> La eficiencia será denotada como el porcentaje entre la masa de la estructura y su rigidez.

#### **4.4.2 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS ANALIZADOS EN EL PORTAFOLIO DE SERES NATURALES CON BASE EN EL CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN GEOMETRICA EN ESTRUCTURAS DE SOPORTE.**

Con base en el criterio de optimización geométrica, los sistemas biológicos analizados en el portafolio de seres naturales serán evaluados bajo conceptos inherentes a dicho criterio como lo son la rigidez, el peso, la distribución de esfuerzos y la eficiencia estructural.

Según el análisis de aplicabilidad realizado en el numeral 3.3 los referentes que clasifican son el citoesqueleto, la cáscara de huevo y la pluma.

Valores asignados a la evaluación: 5.Optimo 1. Deficiente.

El porcentaje de importancia es igual para las tres características a evaluar.

<b>Principio de solución</b>	<b>Rigidez</b>	<b>Bajo peso</b>	<b>Distribución de esfuerzos</b>	<b>Total</b>
<b>Cáscara de huevo</b>	4	5	3	12
<b>Citoesqueleto</b>	5	5	5	15
<b>Plumas</b>	3	5	-----	8

**Tabla # 1. Matriz de selección.**

<sup>42</sup> Posgrado. Universidad de Venezuela. [Artículo en

Por consiguiente, el principio de solución seleccionado para la optimización geométrica de estructuras de soporte es el esqueleto celular. Debido a que su eficiencia es mayor en términos de su relación rigidez/masa.

#### **4.4.3 ABSTRACCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL COMO PRINCIPIO DE SOLUCIÓN DEL SISTEMA BIOLÓGICO SELECCIONADO: EL CITOESQUELETO.**

##### **4.4.3.1 EL CITOESQUELETO.**

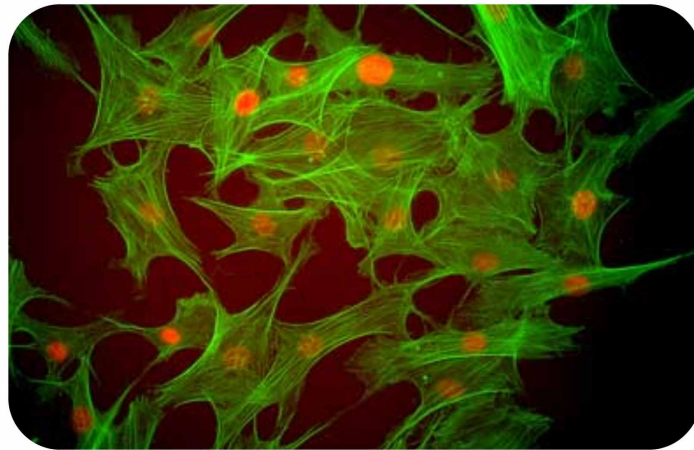
Los esqueletos celulares o citoesqueletos están formados por una serie de cadenas proteicas dentro de las cuales se identifican tres elementos principales, los microtúbulos, los microfilamentos de actina y los filamentos intermedios. Cada uno de ellos cumple una función en la organización y estabilización de la estructura celular conformando un entramado tridimensional que provee el soporte interno de la célula, ancla las organelas, e interviene en los procesos de movilidad y división celular,<sup>43</sup> controlados por los esfuerzos mecánicos, los cuáles están directamente relacionados con modificaciones en la forma de la célula. “Es una estructura dinámica que mantiene la forma de la célula, facilita la movilidad celular (usando estructuras como los cilios y los flagelos), y desempeña un importante papel tanto en el transporte intracelular (por ejemplo, los movimientos de vesículas y organelas) y en la división celular<sup>44</sup>.”

---

Internet] <http://www.postgrado.ucv.ve/biblioteca/tesis.asp?id=Tlg150&fecha=3>

<sup>43</sup> Ingber DE. The architecture of life. Scientific American 1998; 278: 48-57

<sup>44</sup> Cerrada JF. Tenseguridad arquitectura de la vida. APEG 2006; 31: 18 p.

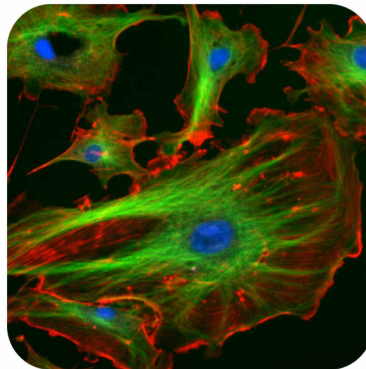


**Figura 4.1 Grupo de células de un vaso sanguíneo.**

**Verde: microfilamentos de actina. Rojo: Núcleo**

**Fuente: <http://www.childrenshospital.org/dream/DrmRsch04/mechanical.html>**

Para el cumplimiento de estas funciones, el citoesqueleto cuenta con un diseño estructural basado en el comportamiento de sus miembros, elementos sometidos a tensión y que la transmiten continuamente a través de la totalidad del esqueleto, y elementos que soportan compresión discontinuamente. De esta manera estos elementos conforman una red reticulada que cuenta con una característica primordial, se autoestabiliza.

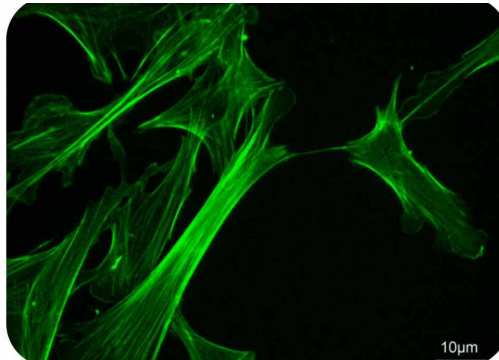


**Figura 4.2 Fluorescencia citoesqueleto célula eucariótica. Verde: microtúbulos.**

**Rojo: microfilamentos. Azul: Núcleo. Fuente:**

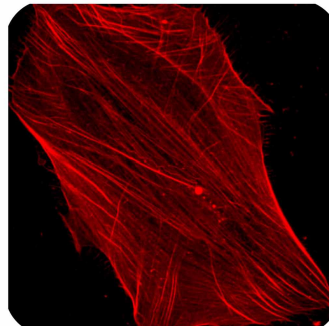
**<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:FluorescentCells.jpg>**

Los miembros que soportan la tensión en la estructura son los microfilamentos de actina y los filamentos intermedios. Los microfilamentos de actina son redes de fibras proteicas que sirven de soporte para los microtúbulos. Son flexibles y por lo tanto permiten el movimiento dentro del citoesqueleto, además le confieren propiedades de contractibilidad a la estructura. La actina se puede encontrar de dos formas dentro de la célula, en forma de ramillete y en red de filamentos entrecruzados, los primeros se encuentran en la periferia de la célula y crean protuberancias que dan forma a los cilios y seudópodos (que permiten movilidad), las redes entrecruzadas pueden ser las estructurales que se encuentran en el citoesqueleto o las que ocupan el citosol, que son estructuras tridimensionales que cuentan con características de gel.



**Figura 4.3** Microfilamentos de actina en fibroblastos de embrión de ratón.

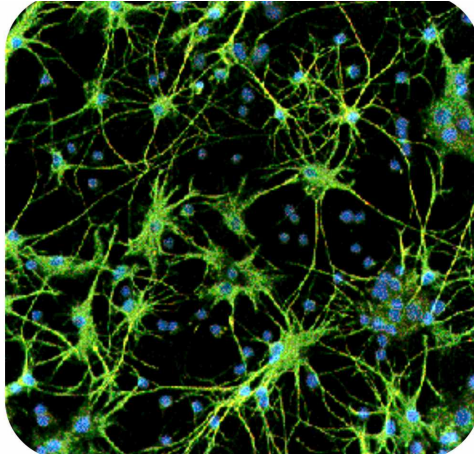
Fuente: [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:MEF\\_microfilaments.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Image:MEF_microfilaments.jpg)



**Figura 4.4** Esqueleto de actina

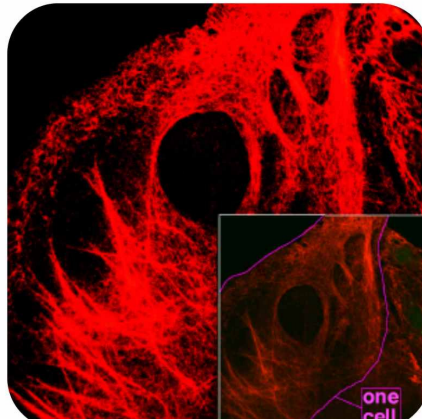
Fuente: [http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion\\_imagenes\\_fluorescencia.htm](http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion_imagenes_fluorescencia.htm)

Al igual que los microfilamentos de actina, los filamentos intermedios están formados por fibras proteicas, las cuales se caracterizan por ser fuertes, resistentes a la tracción y estables. Son elementos integradores y conectan tanto la membrana extracelular con el núcleo, como los microtúbulos con los microfilamentos, por lo tanto organizan la estructura tridimensional del citoesqueleto.



**Figura 4.5 Cultivo de astrositos. Verde: filamentos intermedios. Azul: unión al ADN**

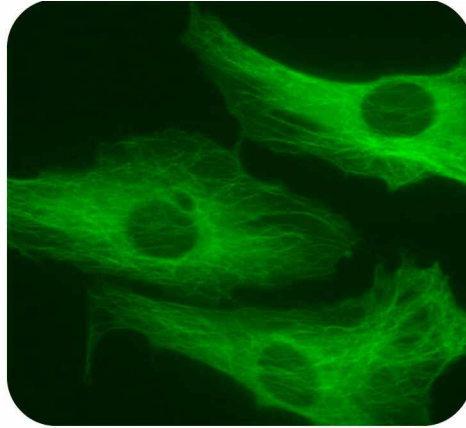
**Fuente:** <http://web.usal.es/~jralonso/web2001/recursos/Citoesqueleto/Alberts%20856.htm>



**Figura 4.6 Filamento de queratina al interior de una célula (filamento intermedio).**

**Fuente:** <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:KeratinF9.png>

Por otro lado se encuentran los elementos a compresión, los microtúbulos. Estos elementos están formados por subunidades de una proteína llamada túbulina que les da una forma tubular, rígida y no ramificada, con la cual pueden formar el armazón interno del citoesqueleto. Adicionalmente según las necesidades de la célula, los microtúbulos pueden ensamblarse o desensamblarse, y permitir el movimiento de cuerpos como vesículas o lisosomas a través de esta.



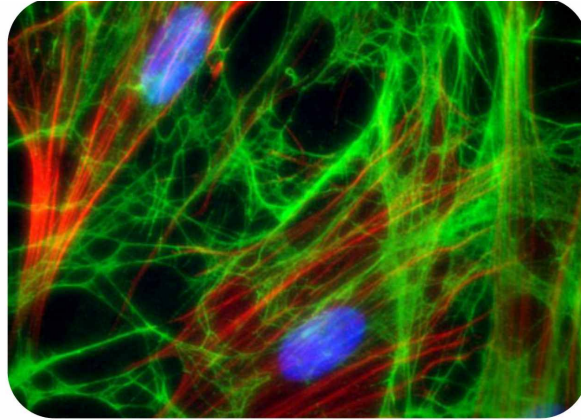
**Figura 4.7 Microtúbulos en microscopio.**

**Fuente:** [http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion\\_imagenes\\_fluorescencia.htm](http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion_imagenes_fluorescencia.htm)

La matriz extracelular también soporta compresión, pero como un elemento externo del citoesqueleto. Este elemento responde también a una forma de entramado de fibras proteicas largas, semiflexible, que sirve de unión entre células. Sobre su entramado se encuentran los receptores integrines que unen la célula con la membrana y que son quienes se oponen a los movimientos de los microfilamentos y filamentos intermedios. Adicionalmente las integrinas al ser receptores, transmiten los estímulos del exterior al interior de la célula.<sup>45</sup> Y en los puntos en donde se encuentran pueden alterar procesos tanto mecánicos como químicos.

---

<sup>45</sup>Tensegrity in a cell. Children Hospital Boston. [Artículo en internet]. Disponible en: <http://www.childrenshospital.org/research/Site2029/mainpageS2029P23sublevel24.html> [Abril 2006]



**Figura 4.8 Fibroblastos humanos. Verde: matriz extracelular.  
Rojo: microfilamentos. Azul: núcleos.**

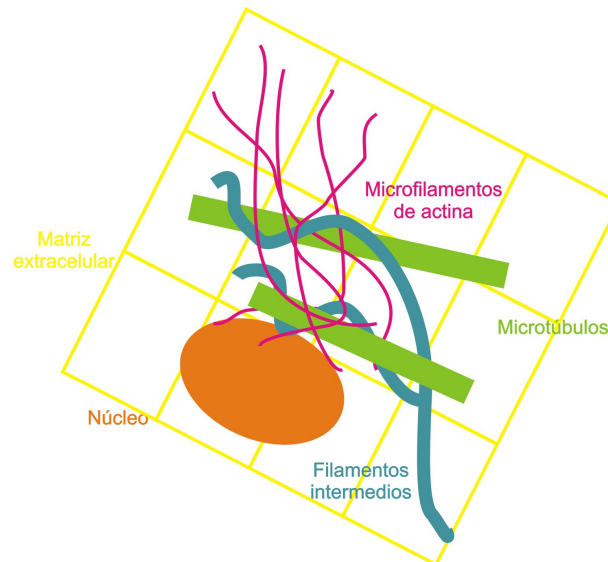
**Fuente:** [http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion\\_imagenes\\_fluorescencia.htm](http://www.ub.es/biocel/wbc/recursos/coleccion_imagenes_fluorescencia.htm)

El sistema mecánico bajo el cual trabaja el citoesqueleto se basa en la interrelación de sus miembros estructurales de la siguiente forma:

Del interior de la célula hasta el exterior de esta, se extiende una red de microfilamentos de actina ejerciendo tensión, logrando tirar de la membrana celular y de todos sus componentes internos hacia el núcleo de la célula. Oponiéndose a este movimiento se encuentran los microtúbulos a nivel interno, y la membrana extracelular a nivel externo. Estos elementos se encuentran a compresión y actúan como columnas dentro de la estructura del citoesqueleto. En algunos casos cuando se encuentran ramilletes grandes de microfilamentos, estos también pueden ser resistentes a la compresión. Los filamentos intermedios conectan los microfilamentos de actina con los microtúbulos, así como la membrana celular y el núcleo<sup>46</sup>.

---

<sup>46</sup> Ingber DE. Op.cit.



**Figura 4.9 Esquema del citoesqueleto. Fuente: Elaboración propia.**

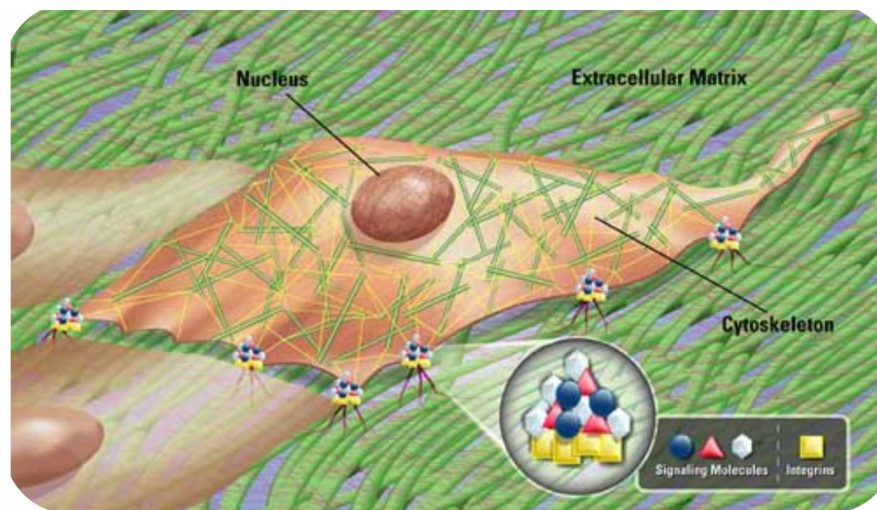
Los microtúbulos pueden modificar la forma de la célula cambiando su longitud, este fenómeno responde a las fuerzas de tracción transmitidas por los microfilamentos, ya que cuando los microtúbulos incrementan su longitud, ejercen mayor resistencia frente a estos, mientras que cuando su longitud decrece la resistencia que ejercen hacia los microfilamentos es menor, lo cual implica que el tirón hacia el interior de la célula causado por la tensión logra que esta tome una forma aplanada.

Al modificar la membrana extracelular, la rigidez del citoesqueleto también cambia, esto se debe a que al variar la magnitud de la fuerza a compresión que ejerce la membrana celular sobre la estructura, las fuerzas a tensión deben ser balanceadas nuevamente para equilibrarla, ya que los microtúbulos a nivel interno no pueden soportar las fuerzas que anteriormente soportaba la membrana<sup>47</sup>.

---

<sup>47</sup> Tensegrity in a cell. Op.cit.

El citoesqueleto percibe cualquier tipo de fuerza por medio de las integrinas. Según los estudios realizados por el biólogo Ingber cuando a las integrinas se les ejerce tensión el citoesqueleto se endurece, y a medida que se incrementa la tensión aplicada, la estructura se vuelve más rígida, “Aún más, las células vivas podían hacerse resistentes o flexibles al variar la pretensión en el citoesqueleto por ejemplo cambiando la tensión en los microfilamentos contráctiles”<sup>48</sup>. Esto se debe a que en el momento de aplicar tensiones crecientes a la estructura, muchos de sus elementos se disponen en dirección de la fuerza aplicada, obteniendo una fuerza externa creciente que se encuentra con una resistencia también creciente. A este proceso se le conoce como endurecimiento lineal<sup>49</sup>.



**Figura 4.10** Las integrinas se encuentran ancladas a la membrana celular y de allí se oponen al movimiento de los microfilamentos. Esta conexión permite que la célula reciba entradas mecánicas que después ejercen tensión sobre la matriz. En la imagen puntos amarillos

**Fuente:**<http://www.childrenshospital.org/research/Site2029/mainpageS2029P23sublevel24.html>.

Estos enlaces que constituyen la estructura esquelética de la célula, son realizados por medio del autoensamblaje, principio que no solo se encuentra

<sup>48</sup>.Ibíd. , p. 53

<sup>49</sup> Ingber DE. Op.cit. p52.

presente en la célula, sino también en muchos otros sistemas naturales. Según Ingber<sup>50</sup>, este autoensamblaje confiere propiedades a la estructura con las que no cuentan los elementos individuales por si solos. Y es posible encontrarlo en diferentes escalas desde lo molecular hasta lo macroscópico, siguiendo ciertos patrones como las espirales, pentágonos y formas triangulares, cristales y proteínas, y organismos tan complejos como el ser humano.

El sistema mecánico que forman los microtúbulos, los microfilamentos y los filamentos intermedios, presenta el mismo comportamiento de un tipo de estructura desarrollada por el escultor Kenneth Snelson, conocida como estructura de integridad tensional o tensegridad<sup>51</sup>.

Las estructuras de tensegridad toman forma y distribuyen sus esfuerzos por medio de su geometría. Esta geometría, esta compuesta por elementos que soportan tensión continua y compresión local, obteniendo la estabilidad mecánica por la sinergia creada entre sus miembros, logrando que los esfuerzos se distribuyan y equilibren a través de esta, reduciendo su peso sin afectar sus características de rigidez<sup>52</sup>. Según los estudios realizados por Ingber y su equipo, el modelo de integridad tensional al igual que el citoesqueleto, actúa como una red que transporta fuerzas. En este caso las fuerzas externas afectan a los receptores integrines y causan reacciones en su interior, alterando el balance de las fuerzas físicas transmitidas a través de la superficie celular, dando como resultado una modificación de la estructura y de su comportamiento. Los receptores se conectan con el citoesqueleto en unos puntos focales de adhesión enlazando con eficacia el núcleo con la superficie de la célula.

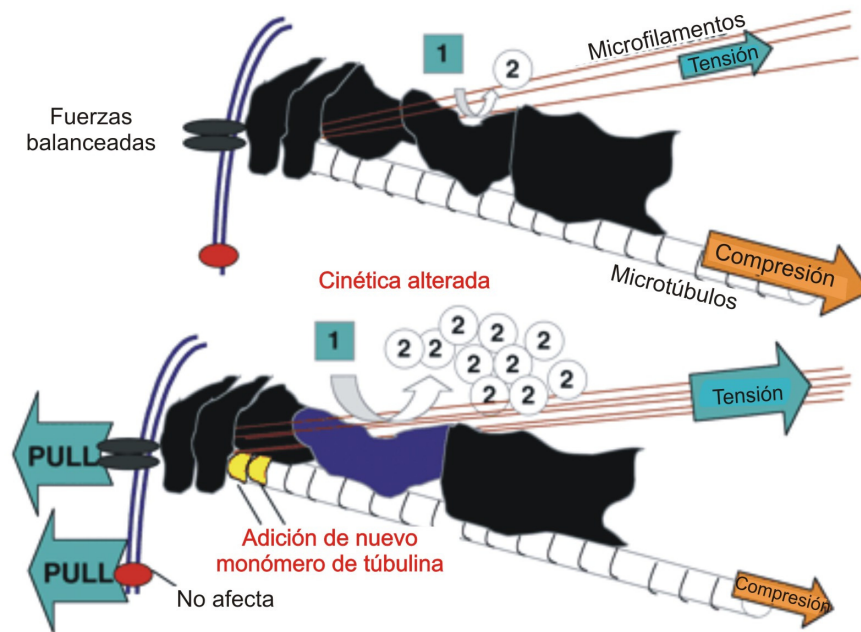
---

<sup>50</sup> Ibid, p 48.

<sup>51</sup> Ibid., p 49

<sup>52</sup> Ibid. , p. 49

## Mecano-química celular

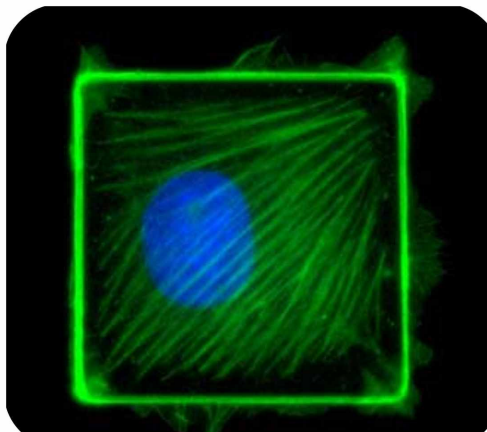


**Figura 4.11** La figura describe en dos imágenes el proceso mecanoquímico por medio del cual la célula responde a las fuerzas externas, tomando como base un modelo de integridad tensional. Arriba. Diagrama esquemático del equilibrio de fuerzas complementario entre los microfilamentos a tensión, los microtúbulos a compresión y los receptores integrines (óvalos color gris) en una célula viva. Las secciones negras representan las enzimas y proteínas inmóviles sobre el citoesqueleto, mientras que los puntos rojos son proteínas que no se enlazan con la estructura interna del citoesqueleto. Abajo. La carga es aplicada en las integrinas enlazadas al citoesqueleto (óvalos grises), cambiando localmente los parámetros cinéticos y termodinámicos asociados a las moléculas del citoesqueleto que experimentan las cargas mecánicas. En este diagrama se adiciona un nuevo monómero de tubulina en la terminación del microtúbulo (color amarillo), cuando la carga es ejercida y el microtúbulo se descomprime como respuesta a un cambio en la concentración de tubulina. Las formas azules indican la distorsión en algunas moléculas causada por los cambios cinéticos producidos por la fuerza trasferida por la acción de las integrinas. De esta forma la estructura del citoesqueleto y la pretensión pueden modular la respuesta celular a la tensión mecánica<sup>53</sup>.

**Fuente:** [http://jcs.biologists.org/cgi/content/full/116/8/1397?maxtoshow=&HITS=10&hits=10&RESULTFORMAT=&author1=ingber&andexactfulltext=and&searchid=1131984873234\\_1515&stored\\_search=&FIRSTINDEX=0&sortspec=relevance&resourcetype=1&journalcode=joces](http://jcs.biologists.org/cgi/content/full/116/8/1397?maxtoshow=&HITS=10&hits=10&RESULTFORMAT=&author1=ingber&andexactfulltext=and&searchid=1131984873234_1515&stored_search=&FIRSTINDEX=0&sortspec=relevance&resourcetype=1&journalcode=joces)

<sup>53</sup> *Journal of Cell Science* 116, 1397-1408 (2003) The Company of Biologists Limiteddoi: 10.1242/jcs.00360 Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks

Para probar la relación entre la forma y la función celular, el equipo de Ingber realizó experimentos en donde forzaron células vivas a tomar diferentes formas: esférica o aplanada, redonda o cuadrada, ubicándolas en unas islas de matriz extracelular delimitadas con dichas formas. Con este experimento demostraron como un cambio en la matriz extracelular sugería una modificación de forma que al mismo tiempo afectaba programas genéticos de la célula, en donde por ejemplo en las formas aplanadas se multiplicaban, mientras que en las esféricas en donde las células competían por el espacio, activaban un programa genético llamado apoptosis para que las sobrantes murieran. En el caso de las que contaban con las suficientes células, estas no morían ni se multiplicaban, se diferenciaban a si mismas en su modo de tejido (por ejemplo las células capilares se unieron en tubos capilares)<sup>54</sup>.



**Figura 4.12** Las formas que adoptaban las células activaban programas de crecimiento o letalidad a nivel genético. En el caso de la imagen al tomar una forma plana descrita por un cuadrado las células tendían a multiplicarse para ocupar el espacio.

**Fuente:** <http://www.childrenshospital.org/dream/DrmRsch04/mechanical.html>

“Una fantástica y amplia variedad de sistemas naturales, que incluye átomos de carbono, moléculas de agua, proteínas, virus, células, tejidos y aun humanos y

---

<sup>54</sup> Ingber DE. Op.cit., p 52-53

otras criaturas vivas, están contruidos mediante esa forma de arquitectura de la que ya hablamos antes: la tensegridad”<sup>55</sup>.

#### **4.4.3.2 ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

Teniendo en cuenta la semejanza entre una estructura de tensegridad y el esqueleto celular, es posible señalar que la primera estructura de integridad tensional que existió no fue la creada por Snelson en su escultura, sino que es una estructura que abunda en la naturaleza de diferentes formas, permitiendo que diversos organismos cumplan con sus funciones vitales. Y no es paradójico pensarlo, debido al gran numero de prestaciones que este tipo de estructuras ofrece como bajo peso, flexibilidad y rigidez.

La palabra tensegridad es tomada de dos conceptos mencionados anteriormente que son Tensión e integridad y fue creada por Richard Buckminster Fuller, uno de los pioneros en el estudio de estas estructuras. Según Fuller la integridad de toda la estructura es modificada dentro de una red cerrada de tensión finita, mientras que las compresiones son islas locales<sup>56</sup>.

Snelson, a quien se le atribuye el desarrollo concreto de estructuras de integridad tensional con la construcción de sus esculturas, define el principio de estas estructuras como compresión flotante de la siguiente forma. “Tensegrity describes a closed structural system composed of a set of three or more elongate compression struts within a network of tension tendons, the combined parts mutually supportive in such a way that the struts do not touch one another, but press outwardly against nodal points in the tension network to form a firm, triangulated, prestressed, tension and compression unit.” (Snelson, 2004).

---

<sup>55</sup>Ingber DE. Op. cit., p 48.

Snelson define las estructuras de integridad tensional como sistemas cerrados, compuestos por más de tres elementos a compresión, dentro de una red de elementos a tensión, la configuración de esta estructura no contempla el contacto entre miembros a compresión, pero presionan contra el exterior los vértices en la red de tensión, obteniendo una unidad firme, triangulada y pretensada de tensión y compresión.

Son muchas las definiciones pero todas confluyen en un concepto básico: estructuras en equilibrio compuestas por un número de elementos que soportan compresión y una red de tensión que delimita la estructura. Como la compresión es discontinua, las barras que la soportan solo trabajan localmente, por lo tanto las líneas de acción que la soportan son específicas y cortas, evitando esfuerzos que lleven al pandeo. Adicionalmente la compresión local también hace posible que la estructura no sufra momentos de torsión<sup>57</sup>. Esta configuración permite que la estructura cuente con propiedades particulares superiores a las de una de carácter convencional.

#### **4.4.3.3 PROPIEDADES DE UNA ESTRUCTURA DE TENSEGRIDAD.**

**4.4.3.3.1 Simplicidad.** Una estructura de tensegridad evidencia simplicidad en su construcción y adicionalmente en su funcionamiento. La razón de esta simplicidad esta en sus miembros estructurales, cables y barras, los cuales tienen una gran ventaja, todas la barras de la estructura cuentan con la misma longitud al igual que los cables, por lo tanto las uniones son sencillas y la construcción no es compleja. Eventualmente pueden prometer una reducción en la masa de esta. En teoría su comportamiento funcional también cuenta con esta característica, ya que

---

<sup>56</sup> Fuller, B. Tensegrity. 1997 Capitulo 700

<sup>57</sup> Gomez, Jáuregui, V. Tensegrity structures and the application to arquitectura [Sitio en Internet] Disponible en: <http://www.alumnos.unican.es/uc1279/5-Typologies.pdf>. [Abril 2006]

solo variando la tensión de un cable es posible modificar la respuesta de toda la estructura. En la práctica, esta ventaja es limitada debido a que la resistencia de los materiales limita la pretensión que pueda aplicarse al cable.

**4.4.3.3.2 Geometría y equilibrio de fuerzas.** Estos dos aspectos se complementan en estas estructuras, ya que la configuración de los miembros estructurales afecta directamente el comportamiento de las fuerzas y su distribución a través de estas.

El concepto de tensegridad habla de un equilibrio o balance entre los miembros estructurales en un arreglo de este tipo. Las cargas de la estructura están distribuidas de forma tal que la tensión sea ininterrumpida, mientras que la compresión sea local. La compresión es transportada por las barras, mientras que la tensión lo realiza por medio de los cables. Los cables no pueden soportar compresión, por lo tanto los elementos no deben entrar en contacto unos con otros. Solamente una estructura que cuente con todos sus miembros en equilibrio estable puede recibir el nombre de integridad tensional<sup>58</sup>.

La geometría es quien dispone la orientación de los componentes estructurales de forma tal que los esfuerzos pasen a través de estos rápidamente sin generar concentraciones y que dichos esfuerzos se equilibren de acuerdo a la interacción de los componentes. Por lo tanto la geometría es clave para las estructuras de integridad tensional, ya que indica la configuración de los elementos a tensión y compresión para que puedan autoequilibrar el sistema. La simetría rotacional con la que cuentan este tipo de estructuras simplifica el problema geométrico y lo optimiza.

---

<sup>58</sup> Skelton, R. The mechanical systems design handbook. San Diego: Universidad de California. 2002. cap 17 An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures

En contraste a las estructuras convencionales construidas por el hombre que manejan en general una configuración ortogonal, las estructuras de integridad tensional adoptan una configuración no ortogonal de sus miembros longitudinales, con lo cual logra una disminución de masa sin afectar el comportamiento de esta, logrando por lo tanto optimizar geoméricamente la estructura<sup>59</sup>

**4.4.3.3 Pretensión.** Los miembros que soportan la tensión cuentan con una pretensión antes de ser sometidos a la acción de fuerzas externas. Esta pretensión le da mayor rigidez a la estructura y presenta una relación directamente proporcional en donde a mayor pretensión de los cables, mayor es la rigidez de la estructura.

**4.4.3.3.4 Economía.** Las estructuras de integridad tensional cuentan con una importante característica a nivel de economía. Pueden resistir determinado esfuerzo con el mínimo de material posible. Esto se debe a que en estas estructuras los miembros que soportan la tensión proyectan el camino mas corto entre miembros adyacentes. Las fuerzas de tensión normalmente se transmiten a través del camino mas corto entre dos puntos, por lo tanto sus miembros están dispuestos de manera precisa para soportar esfuerzos. Otra característica que permite la economía en las estructuras de tenseguridad tiene que ver con su comportamiento sinergetico. Esto quiere decir que con la mas mínima alteración sobre su estructura, esta modifica de la forma mas simple y directa su totalidad para responder al estímulo externo, debido a que en la reacción no intervienen elementos adicionales a los que forman la estructura como tal<sup>60</sup>. “La simplicidad de las estructuras de tenseguridad, esencialmente con dos tipos de sencillos elementos, barras y tendones, con su economía de energía y de espacio, hace

---

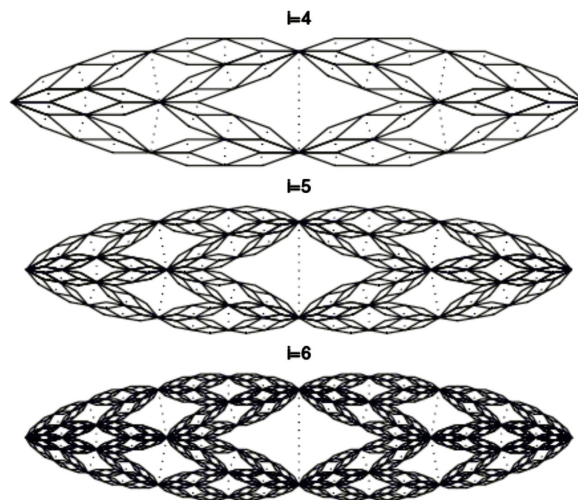
<sup>59</sup> Ibíd. p 5

<sup>60</sup> Ibíd., p. 170-171

posible si es deseable, una redundancia que resulta bien económica desde muchos puntos de vista<sup>61</sup>.

**4.4.3.3.5 Flexibilidad.** El cambio de forma en estas estructuras requiere el mínimo de energía. Lo cual se debe a que el cambio en la forma es logrado por el cambio del equilibrio en la estructura. Por lo tanto esta facilidad en el cambio de forma por la acciones de fuerzas a tensión y compresión, hace que estas estructuras sean aptas para trabajos no solo en el campo estático, sino en el dinámico.

Adicionalmente cada estructura por simple o compleja que sea, puede ser tomada como un modulo. Este aspecto se puede aplicar en caso de requerir una estructura de mayor tamaño o de menor peso, con las mismas características estructurales. En ambos casos se identifica un modulo que se repetirá n veces, en el caso de aumento de tamaño sumando módulos, y en el de reducción de peso descomponiendo los elementos estructurales en los módulos.



**Figura 4.13 Utilización de módulos.**  
**Fuente: Mechanical Systems Design Handbook Modeling Measurement and Control. Figura 17.27**

---

<sup>61</sup> Ibid. , p. 172

**4.4.3.3.6 Estabilidad en cualquier posición.** No depende de la gravedad ya que se autoestabiliza, por lo tanto no es necesario que se encuentre anclada a una superficie. La fuerza de gravedad, base de las estructuras convencionales es anulada.

**4.4.3.3.7 Rápida transferencia de cargas.** Las estructuras vibran fácilmente, de lo cual se infiere que las fuerzas se transmiten rápidamente a través de la estructura, evitando concentraciones de esfuerzos indeseadas. Esta propiedad cobra importancia gracias a su aplicabilidad en estructuras que requieran de absorción de energía<sup>62</sup>.

#### **4.4.4 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Según el requerimiento 7.3<sup>63</sup> del anteproyecto, se ha verificado el cumplimiento del mismo, dado que a partir del citoesqueleto se abstraieron conceptos estructurales como los domos geodésicos, estructuras de integridad tensional, etc.

---

<sup>62</sup> Gomez. Op.cit p 54- 55

<sup>63</sup> Ver Anexo A. Requerimientos del proyecto

## **4.5 ESTUDIO TÉCNICO DE VIABILIDAD.**

### **4.5.1 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

#### **4.5.1.1 ESTUDIO PREVIO DE DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL**

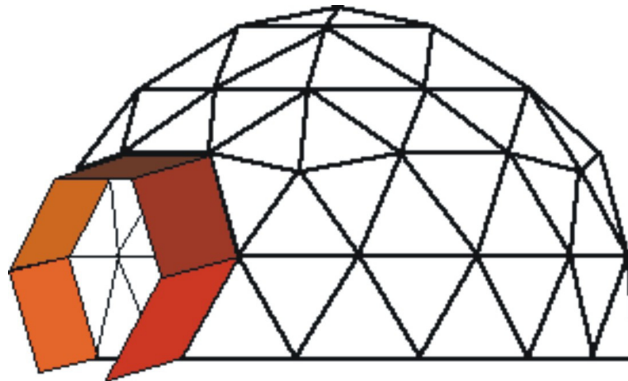
Una división general de las estructuras de integridad tensional contempla dos grandes grupos, las estructuras pretensadas en sus diferentes configuraciones, y las estructuras geodésicas. El principio funcional bajo el cual trabajan es el mismo, tensión continua y compresión discontinua, lo que cambia es la configuración de sus elementos que va desde la mas simple hasta sistemas complejos de diferentes niveles.

##### **4.5.1.1.1 ESTRUCTURAS GEODÉSICAS.**

Las estructuras geodésicas son armazones compuestos de barras rígidas, las cuales pueden soportar tensión o compresión según la geometría de esta. Las barras estructurales son conectadas formando triángulos, pentágonos o hexágonos, y cada barra es orientada tanto para restringir cada vértice a una posición fija, como para asegurar la distribución y el equilibrio de los esfuerzos a través de la estructura<sup>64</sup>. Las estructuras más comunes de este tipo son las cúpulas o domos geodésicos, las cuales a partir de esferas cuentan con su propiedad de contener el mayor volumen con la menor superficie, (Sección. 2.3.1) permitiendo hacer más con menos.

---

<sup>64</sup> Ingber. Op.cit., p 49



**Figura 5.1 Cúpula geodésica.**

**Fuente:** <http://archilibre.org/ESP/revolution/DOMES/construire.html>

**4.5.1.1.2 Estructuras pretensadas.** Las estructuras pretensadas, como su nombre lo indica, cuentan con una pretensión inicial antes de ser sometida a una fuerza externa, por medio de esta pretensión y de la configuración de sus miembros, la estructura se estabiliza a sí misma. Los miembros estructurales en esta categoría se diferencian según su comportamiento, de forma que los que soportan compresión son de un tipo, mientras que los que soportan tensión son de otro<sup>65</sup>.

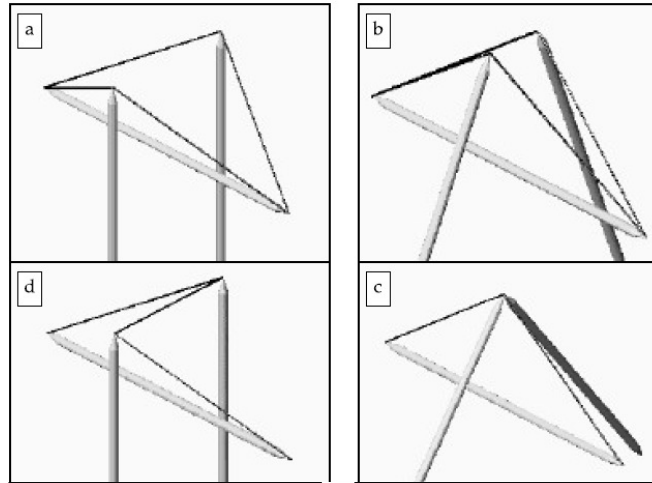
Dentro de las estructuras pretensadas se encuentran diferentes configuraciones según el número de miembros a compresión, a tensión, de vértices, la regularidad del sistema y el tipo de sistema. De acuerdo a esta clasificación los sistemas son los siguientes.

**4.5.1.1.2.1 Sistemas esféricos.** Estos sistemas son homeomórficos a una esfera y son de los sistemas más comunes y simples.

---

<sup>65</sup>Ibid. p49

*Configuración en rombo.* Configuración en la que cada barra del sistema representa la diagonal mas larga del rombo formado por otros 4 cables, (figura. 5.2 a) doblado siguiendo la diagonal<sup>66</sup>.



**Figura 5.2 Clasificación de sistemas esféricos.**

**Fuente:** <http://www.alumnos.unican.es/uc1279/5-Typologies.pdf>

Dentro de este tipo de sistemas se encuentran las estructuras de integridad tensional prismáticas. Esta estructura surge de un prisma al cual se le introduce una rotación relativa entre su polígono base (inferior) y el superior. La estructura de este tipo más conocida, es al mismo tiempo la más sencilla, y es la tridimensional con el mínimo número de barras, la estructura prismática de tres barras, o según Snelson “the simplex”<sup>67</sup>.

*Configuración en circuito.* Esta configuración comprende componentes a compresión formados por circuitos de barras, que cierran la forma de rombo. (Figura 5.2 b y c). Es posible crear estructuras de diferentes niveles adicionando circuitos a la original. Según Anthony Pugh (1976), un sistema en circuito es más rígido que uno en rombo teniendo el mismo número de

---

<sup>66</sup> Gomez, Op.cit.

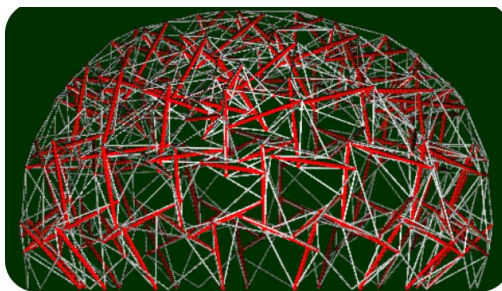
<sup>67</sup> Ibíd.

barras, debido a que estos son un desarrollo a partir de los en rombo y son más compactos por la interacción de los componentes a compresión<sup>68</sup>.

*Configuración en “Zigzag” o “Tipo Z”.* Esta configuración es obtenida partiendo de un sistema en rombo en el cual los cables son modificados formando una “Z”, de tres tendones no alineados (figura 5.2 d)<sup>69</sup>.

**4.5.1.1.2.2 Sistemas en estrella.** Son sistemas esféricos derivados de los anteriores. Se pueden obtener por la inserción de barras o vértices siguiendo ejes de simetría centrales, dentro de una estructura de configuración esférica. Por ejemplo, a partir de un sistema en rombo, si se inserta una barra vertical en el centro, siguiendo el eje de simetría principal y conectada por cables mediante tendones, se puede obtener un sistema de estrella<sup>70</sup>.

**4.5.1.1.2.3 Sistemas cilíndricos.** Son una variación de los sistemas en rombo, en donde la configuración de la estructura final se obtiene de adicionar niveles a la estructura inicial. De acuerdo al número de niveles la estructura puede modificar su altura<sup>71</sup>.



**Figura 5.3 Domo 10V (niveles) de doble capa. Fuente:**  
<http://www.intergate.com/~bobwb/ts/prospect/prospect.htm>

---

<sup>68</sup> Ibíd.

<sup>69</sup> Ibíd.

<sup>70</sup> Ibíd.

<sup>71</sup> Ibíd.

**4.5.1.1.2.4 Sistemas irregulares.** Sistemas que no son construidos bajo ningún sistema de reglas o patrones, estudiados previamente. (Esculturas de Snelson)<sup>72</sup>

#### **4.5.1.2 ANÁLISIS FUNCIONAL DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

Con base en el estudio anterior, pretendemos verificar la eficiencia de una estructura de integridad tensional frente a una estructura prismática convencional. Los parámetros de comparación entre ambas estructuras son:

1. Análisis de frecuencias y modos propios de vibración de ambas estructuras.
2. Análisis de rigidez a flexión.
3. Porcentaje de incremento de masa.
4. Porcentaje de eficiencia, como relación rigidez / masa.

Más adelante se profundizará en cada uno de los parámetros evaluados. Adicionalmente, se fabricaron ambas estructuras y se verificó su comportamiento a flexión mediante un experimento el cual se detallara más adelante, así como la metodología empleada en el mismo.

Se desarrolló un primer prototipo para familiarizarse con estructuras de integridad tensional, seleccionándose la estructura prismática de 3 barras, por su simplicidad de construcción y la visualización del equilibrio. Lo anterior se evidencia en uno de los muchos nombres que se le dan a esta estructura, "Equilibrio elemental".

Esta estructura está formada por tres barras de igual longitud, separadas en el espacio, y tres cables de igual longitud que confluyen cada vértice, uniendo y separando los extremos de las barras, adicionalmente cuenta con simetría

---

<sup>72</sup> Ibid.

rotacional alrededor de un eje sobre el cual se busca el ángulo de rotación de la estructura<sup>73</sup>.

En este caso donde la estructura de integridad tensional es un prisma de tres barras, la disposición de los elementos es la siguiente. La estructura cuenta con 6 vértices, 3 superiores a los que llamaremos A, B y C; y tres inferiores A\*, B\* y C\*. Estos vértices van unidos por tres barras y nueve cables.

El vértice "A" esta en equilibrio porque las tres fuerzas que actúan sobre el, correspondientes a las tres tensiones de los cables que coinciden en este punto, tienen una resultante dirigida hacia el vértice "A\*", que se cancela con la fuerza que aparece en el vértice "A" por razón de la reacción a la deformación de la barra que une el punto "A" y "A\*" (Figura. 5.4). Esta reacción sucede en cada vértice logrando distribuir las fuerzas de la forma más eficiente según el ángulo en que se inclinen las barras<sup>74</sup>.

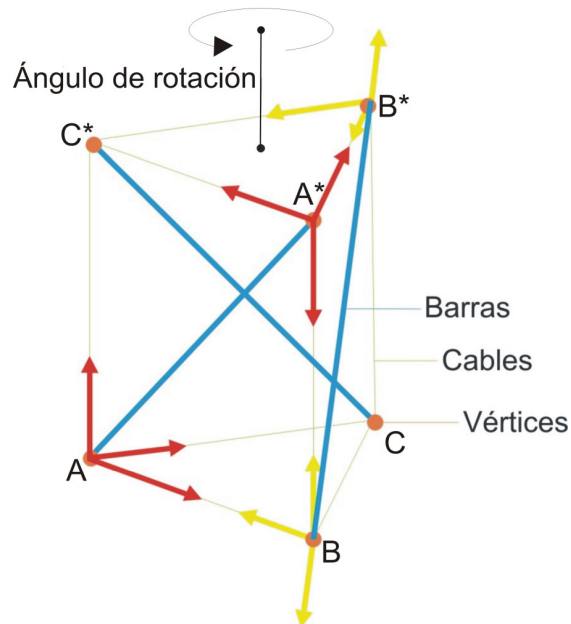
La resultante de cada triada de fuerzas en cada nodo, además del peso relativamente pequeño de cada componente debe estar alineado con el eje de cada barra, de no ser así, la barra sería afectada por un momento de flexión y no estaría en equilibrio "en cada nodo hay un equilibrio de tensiones y compresiones"<sup>75</sup>.

---

<sup>73</sup> Guzmán, M. Identificación de los sistemas estructurales básicos. [Artículo en Internet]. Disponible en: <http://usuarios.bitmailer.com/mdeguzman/tenseguridad/mdeguzmangeomtenseg2004/seminario021203.html> [Abril 2006]

<sup>74</sup> Guzmán M. "Tenseguridad: de la escultura a la célula". ARS Medica. Revista de humanidades. 2002, 2: 166-176.

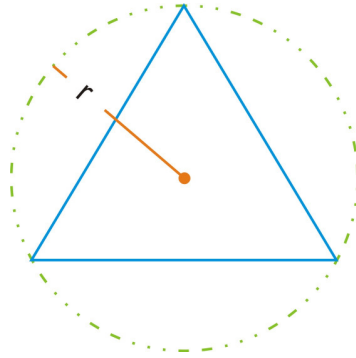
<sup>75</sup> Gómez., Op. Cit. p49.



**Figura 5.4** Distribución de cargas en una estructura prismática de tres barras con un ángulo de rotación de 30°. Las flechas amarillas indican el sistema de fuerzas que afecta a las barras y las rojas el sistema de fuerzas que afecta los cables. **Fuente: elaboración propia.**

#### 4.5.1.2.1 CALCULOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE TENSEGRIDAD PRISMÁTICA DE TRES BARRAS.

Como se mencionó anteriormente estas estructuras están compuestas de tres barras de igual longitud, al igual que de tres cables por cada vértice. Para obtener las longitudes de los componentes se debe partir de una estructura prismática convencional, la cual cuenta con dos bases triangulares que están circunscritas en un círculo de radio "r".



**Figura 5.5 Base triangular circunscrita en una circunferencia de radio “r”**

**Fuente: Elaboración propia.**

Según la nomenclatura observada en diferentes documentos de tensegridad, a las barras les corresponde la variable “S”, y a los cables “L”. La altura a la que están distanciadas las dos bases triangulares se le denomina “Z” y el ángulo de rotación de estas misma recibe la variable “ $\Theta$ ”. Por lo tanto las coordenadas de los vértices de la estructura esta dados de la siguiente manera.

Vértice	Coordenadas		
	Altura	Radio	Ángulo
<b>A</b>	0	r	0
<b>B</b>	0	r	$2\pi/3$
<b>C</b>	0	r	$4\pi/3$
<b>A*</b>	Z	r	$\Theta$
<b>B*</b>	Z	r	$\Theta + 2\pi/3$
<b>C*</b>	Z	r	$\Theta + 4\pi/3$

**Tabla # 2 Coordenadas generales del prisma de integridad tensional.**

Para la construcción del primer prototipo se eligió un valor para Z de 245mm. Y para r de 140mm. Con base en el documento “A practical guide to tensegrity design” (Burkhardt, 2001) se decidió tomar un ángulo de  $150^\circ$ , para lo cual las coordenadas del prototipo serian:

Vértice	Coordenadas		
	Altura (mm)	Radio(mm)	Ángulo(°)
<b>A</b>	0	140	0°
<b>B</b>	0	140	120°
<b>C</b>	0	140	240°
<b>A*</b>	245	140	150°
<b>B*</b>	245	140	270°
<b>C*</b>	245	140	390°

Tabla #3. Coordenadas primer prototipo.

La longitud de las barras se obtiene por medio de la formula:

$$S^2 = Z^2 + 2r^2 - 2r^2 \cos \Theta \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Reemplazando los valores de altura, radio y ángulo extraídos de la Tabla 3.

$$S^2 = (245)^2 + 2(140)^2 - 2(140)^2 \cos 150$$

Obtenemos,

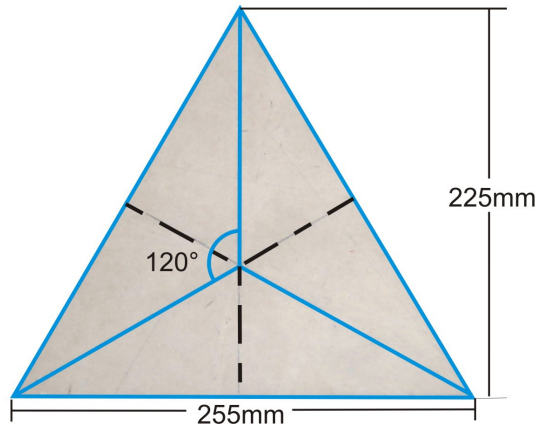
$$S = 365 \text{ mm.}$$

La longitud del cable estará dada según la construcción del prototipo, ya que de acuerdo al método que se utilice para pretensionar los cables, se debe determinar la longitud del mismo. En este caso la tensión se dará por medio de tensores, así que la longitud del cable se determinara en el momento de la construcción y según la necesidad de tensión.

#### 4.5.1.2.2 CONSTRUCCIÓN.

Con base en los cálculos anteriores, se inicia cortando la base triangular del prisma. Como las fuerzas resultantes que intervienen en este marco triangular se equilibran entre ellas, se utiliza una placa con esta forma en lugar de los cables que normalmente van, para simplificar su construcción.

Teniendo en cuenta que  $r = 140\text{mm.}$ , la altura del triángulo es de  $225\text{mm.}$ , y el lado es de  $255\text{mm.}$



**Figura 5.6 Dimensiones de la base triangular del prisma.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Los materiales requeridos para la construcción de la estructura son:

- 3 Barras de madera de  $330\text{mm}$  de largo y  $20\text{mm}$  de diámetro.
- Cable de acero de  $1/16''$  de diámetro.
- 3 tensores pequeños ( $5/32''$ )
- 12 Grilletes para guaya de  $1/16''$
- 12 Cancamos para madera de  $2\text{mm}$ .



**Figura 5.7 Componentes a compresión.**

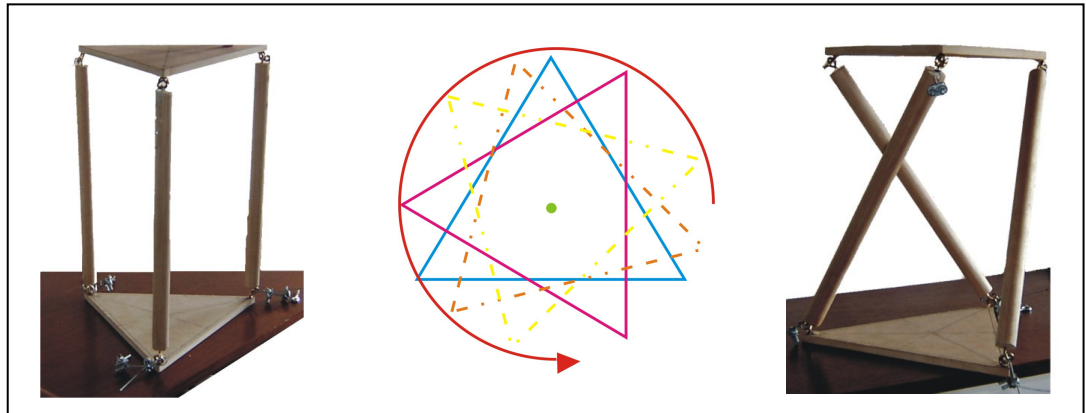
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 5.8 Componentes a tensión.**

**Fuente: Elaboración propia.**

A continuación se construye la estructura como un prisma convencional, para posteriormente darle el ángulo de rotación seleccionado, girando la base superior  $150^\circ$ , respecto a la inferior.



**Figura 5.9 Rotación del prisma convencional.**

**Fuente: Elaboración propia**

Al completar el giro de la base llegando a  $150^\circ$ , se prosigue con la disposición de los componentes a tensión. Para esto se debe cortar la guaya en longitudes iguales y pasarla por los cáncamos que se encuentran en cada vértice.

A medida que reduce la longitud de los cables por medio de los tensores, es notorio como la estructura va adquiriendo rigidez. Pero debido a los materiales empleados no se alcanzan pretensiones apreciables.



**Figura 5.10 Estructura sin tensión.**  
**Fuente: Fotografía del autor.**



**Figura 5.11 Estructura con pretensión inicial.**  
**Rigidez normal.**  
**Fuente: Fotografía del autor.**



**Figura 5.12 Estructura con pretensión final.**  
**Alta rigidez.**  
**Fuente: Fotografía del autor**

De este primer prototipo se extrajeron conclusiones útiles para el diseño, fabricación y montaje del prototipo definitivo.

#### **4.5.2 ESTUDIO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE EXISTENTES.**

Los sistemas estructurales son cuerpos capaces de resistir cargas sin causar una deformación excesiva en una de sus partes con respecto a otra. Por lo tanto su función principal, es la de transmitir fuerzas entre diferentes puntos en el espacio conservando la estabilidad necesaria para la finalidad que fue diseñada.<sup>76</sup>

De acuerdo a su geometría, materiales, y a las condiciones específicas de carga, las estructuras pueden ser sometidas a tensión, compresión, flexión y torsión; además son utilizadas para cubrir claros horizontales, verticalmente; en voladizo u horizontal.<sup>77</sup>

##### **4.5.2.1 CLASIFICACION DE SISTEMAS ESTRUCTURALES.**

###### **4.5.2.1.1 SISTEMAS DE FORMA ACTIVA.**

Son estructuras que trabajan a tracción o a compresión simples. (Cargas axiales). Como por ejemplo los cables o los arcos<sup>78</sup>.

---

<sup>76</sup> Postgrado universidad de Venezuela. Op.cit.

<sup>77</sup> Interconexión Eléctrica S.A., Estructuras metálicas para líneas y subestaciones: Comportamiento de las estructuras de acero. Medellín. Publicación interna. p. 343-359

#### **4.5.2.1.1.1 CABLES.**

Estructuras flexibles debido a la relación que existe entre su longitud y su área transversal, la flexibilidad que presentan los hace menos resistentes a la flexión, por lo tanto este tipo de carga es convertida a tensión y modifica la forma del cable según esta sea aplicada. Un ejemplo típico de construcciones con base en este sistema son los puentes.



**Figura 5.13 Puente Akashi-Kaikyo en Japón.**

**Fuente:** [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pont\\_Akashi-Kaikyo](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_Akashi-Kaikyo)

#### **4.5.2.1.1.2 ARCOS.**

Los arcos básicamente, son estructuras a compresión utilizadas para cubrir grandes luces, y pueden considerarse como uno de los elementos fundamentales de la arquitectura. El arco funicular fue utilizado por Gaudí en la construcción de la iglesia de la Sagrada Familia.

---

<sup>78</sup> Gomez. Op. Cit.

#### **4.5.2.1.2 SISTEMAS DE VECTOR ACTIVO.**

Estructuras que pueden soportar tanto tensión, como compresión. Por ejemplo las cerchas<sup>79</sup>.

##### **4.5.2.1.2.1 MIEMBROS A TENSIÓN.**

Muchos tipos de estructuras metálicas contienen miembros cargados primordialmente a tensión. Dentro de una configuración estructural, los miembros a tensión pueden ser barras o varillas, tubos huecos, cables o secciones roladas, utilizadas en forma aislada o en secciones armadas.

Los miembros a tensión no se pandean, por lo tanto en la mayoría de estructuras son esbeltos. Pero están sujetos a cargas laterales accidentales, a vibración debida a maquinas o trafico sobre puentes y a problemas causados por lo vientos. Adicionalmente el esfuerzo en un miembro a tensión puede ser afectado por la presencia de concentraciones de esfuerzos ocasionados por el cambio de la geometría en la sección<sup>80</sup>.

##### **4.5.2.1.2.2 MIEMBROS A COMPRESIÓN.**

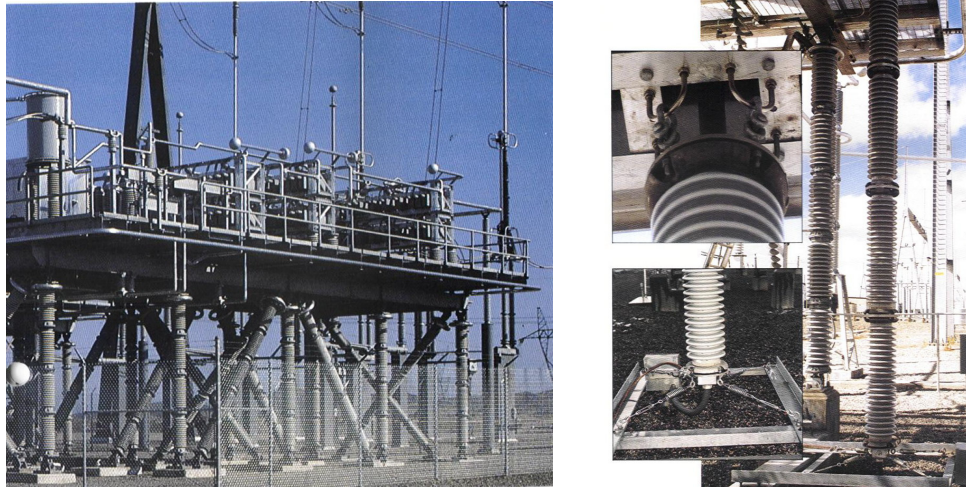
En casi todas las estructuras se incluyen elementos esforzados a compresión, o a compresión y flexión combinadas. Aproximadamente la mitad de un edificio convencional o de una estructura de puente son miembros a compresión. Los elementos a compresión generalmente son partes rígidas que provén el armazón a la estructura, pero debido a su esbeltez son susceptibles al pandeo<sup>81</sup>.

---

<sup>79</sup> Gomez. Op. Cit.

<sup>80</sup> Interconexión Eléctrica S.A., Op. Cit. p. 343-359

<sup>81</sup> Ibíd.



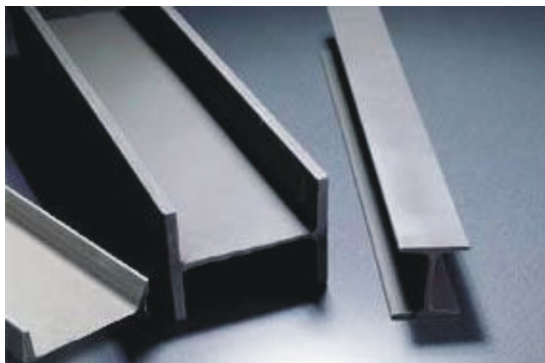
**Figura 5.14 Estructuras con componentes a compresión y tensión.**  
**Fuente: General Electric, Series Capacitors with Capquell protection.**

#### **4.5.2.1.3 SISTEMAS DE MASA ACTIVA.**

Estructuras que trabajan a flexión. Por ejemplo vigas, pilares y pórticos<sup>82</sup>.

##### **4.5.2.1.3.1 VIGAS.**

Elemento lineal sometido a un esfuerzo transversal. Debe generar resistencia interna a los esfuerzos cortantes y de flexión, y resistir excesos de deflexión<sup>83</sup>.



**Figura 5.15 Vigas en I y en U. Fuente: <http://www.acoinfor.com.br/>**

<sup>82</sup> Gomez. Op.cit.

<sup>83</sup> Ibíd.

#### 4.5.2.1.4 SISTEMAS DE SUPERFICIE ACTIVA.

Estructuras que basan su funcionamiento en la tensión superficial como las membranas<sup>84</sup>.

##### 4.5.2.1.4.1 MEMBRANAS.

Superficie de material delgada y con diferentes usos. Las membranas se estabilizan por medio de un esqueleto interno o de pretensión ocasionada a nivel externo o interno. El pretensado permite que una membrana cargada desarrolle tensiones de compresión hasta llegar a equilibrar las tensiones de tracción de ellas<sup>85</sup>.



Figura 5.16 Carpas (membranas)

Fuente: <http://www.bonk.com.ar/harrods/pix/muestra-carpas-2.jpg>

#### 4.5.2.2 COMENTARIO.

---

<sup>84</sup> Ibíd.

Al observar las estructuras de soporte desarrolladas por la ingeniería tradicional se concluye que las formas de estas son geometrías regulares, con las que se ha venido trabajando desde hace cientos de años con muy poca evolución formal. Las estructuras de soporte convencionales están compuestas generalmente de vigas ortogonales, placas y columnas, en su mayoría elementos rígidos que se encuentran a compresión dentro de la estructura. Sin embargo autores como Bendsoe and Kikuchi, confluyen en que este tipo de estructuras de carácter ortogonal no cuentan con una optima relación en términos de resistencia y peso. Los componentes a compresión, contruidos en material sólido, son necesarios en las trayectorias de la estructura que soporta cargas y no en las trayectorias ortogonales como normalmente son utilizados en las estructuras convencionales<sup>86</sup>.

#### **4.5.3 DEFINICIÓN DE LAS DOS ESTRUCTURAS DE ESTUDIO.**

Se plantean dos estructuras, una de integridad tensional y una prismática convencional, a fin de comparar su comportamiento con base en los parámetros de evaluación mencionados en la sección 5.1.2 La descripción de ambas estructuras se presenta a continuación.

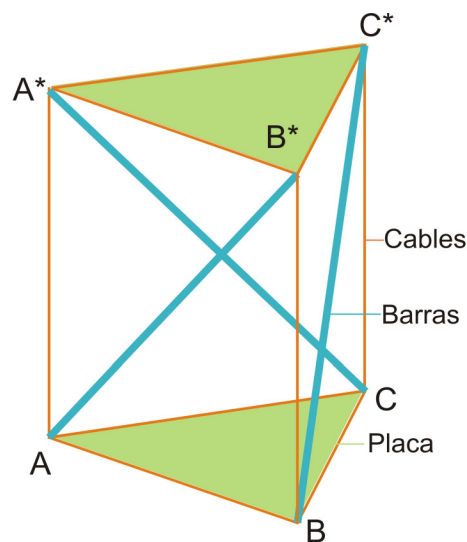
- Estructura prismática de integridad tensional (3 barras). Como su nombre lo especifica esta estructura esta compuesta por tres barras y buscando la simplicidad para el montaje solo contara con tres cables, ya que tanto la base triangular superior como la inferior serán remplazadas por placas triangulares. La finalidad de estas placas es por un lado dar soporte rígido

---

<sup>85</sup> Ibíd.

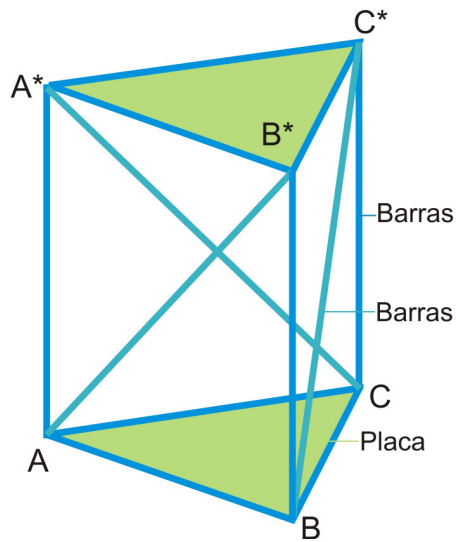
(placa inferior) para el ensayo a flexión (descrito en la sección 5.1.2) y segundo, distribuir uniformemente la carga flexionante en el mismo ensayo (placa superior). La articulación de las barras se realizara utilizando rótulas de cabeza en cada vértice de estas.

- Estructura prismática convencional. Esta estructura es un prisma triangular y rígido. Esta compuesto por seis barras y al igual que la estructura de tensegredad, por dos placas triangulares, una superior y otra inferior, que cumplen idénticas funciones para el ensayo a flexión.



**Figura 5.17 Estructura prismática de integridad tensional compuesta por 3 cables y 3 barras.**

**Fuente: elaboración propia.**



**Figura 5.18 Estructura prismática convencional compuesta por 6 barras.**

**Fuente: elaboración propia.**

Adicionalmente se tratara de estandarizar las piezas para que el mismo diseño sirva para las dos construcciones. Por lo tanto las placas triangulares, tanto inferior como superior, las barras y los nodos para el ensamble, partirán de la misma forma y geometría, pero con las modificaciones necesarias para cada tipo.

#### **4.5.3.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y MATERIALES**

El material seleccionado para la construcción de las estructuras es el aluminio debido que proporciona la rigidez necesaria, pero con bajo peso.

##### **4.5.3.1.1 PARÁMETROS PARA LA CONSTRUCCION DE LAS ESTRUCTURAS.**

###### **Materiales.**

Barra de Aluminio de 2" de diámetro.

Barra de Aluminio de ½" de diámetro.

Placa de Aluminio. Espesor 5mm.

Cable de acero inoxidable de 1mm de diámetro.

### Propiedades.

Material	Modulo de elasticidad (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia a la tracción (Mpa)
Aluminio	69000	0.24	150
Cable de acero inoxidable	187500	0.3	650 - 800

Tabla # 4 Propiedades mecánicas de los materiales

La altura de ambas estructuras será de 700mm y la longitud del lado del triangulo base de 400mm. Por lo tanto "r", se calcula, mediante la ley de senos:

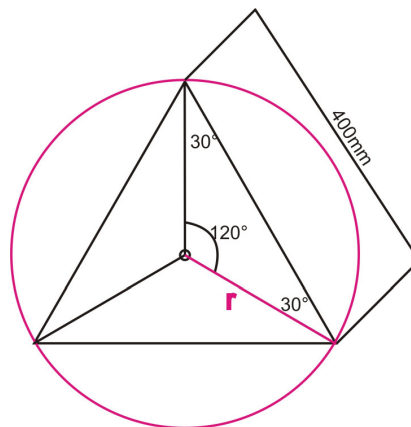


Figura 5.19 "r" para el triangulo de lado 400mm. Fuente: elaboración propia.

$$\frac{R}{\text{sen}30^\circ} = \frac{400}{\text{sen}120^\circ}$$

Obteniendo,

$$r = 230.1$$

La información de propiedades mecánicas de los materiales y sus dimensiones, es introducida al software de análisis de elementos finitos ANSYS, como variables. Este análisis tiene como finalidad verificar las ventajas de las estructuras de integridad tensional, comparándolas con una estructura convencional de características similares en cuanto a peso, altura y rigidez. De acuerdo a los resultados arrojados por ANSYS, se definirá el ángulo de rotación de la estructura que la haga más eficiente y con el cual se culminaran los cálculos requeridos para la construcción del prototipo funcional.

#### **4.5.4 IDENTIFICACIÓN DEL ANALISIS A REALIZAR.**

Para la comparación de las dos estructuras, se realizara un análisis de elementos finitos, con el fin de estudiar su comportamiento a flexión y un análisis modal que determine los modos y frecuencias de vibración en función del parámetro geométrico, “ $\Theta$ ”, que es el ángulo de rotación relativo, entre ambos triángulos. Debido a que es la configuración geométrica la que proporciona rigidez a la estructura de integridad tensional, este ángulo se toma como parámetro, ya que modifica la disposición y longitud de los miembros a tracción, alterando la estructura. También se analiza la pretensión aplicada a los cables, expresándose ésta, en función del porcentaje de deformación admisible.

La deformación admisible del cable se define como:

$$\sigma_{yp} = \varepsilon \cdot E \quad (\text{Ec 4.2})$$

Donde  $\sigma_{yp}$  es la resistencia a la cedencia del material y  $\varepsilon$  es el modulo de elasticidad del material. La pretensión del cable se calcula como:

$$P = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (\text{Ec 4.3})$$

Donde  $A$  es el área del cable.

Para la estructura convencional, igualmente se analiza el comportamiento de la misma, variando el ángulo de rotación del triángulo superior respecto al triángulo inferior.

Los ángulos seleccionados para el análisis son  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $165^\circ$ ; mientras que el porcentaje de deformación admisible en los miembros a tensión son 25%, 50%, 75% y 100%, es decir, la pretensión varía desde un 25% hasta un 100% de la máxima admisible por el cable, de acuerdo con la ecuación 4.3

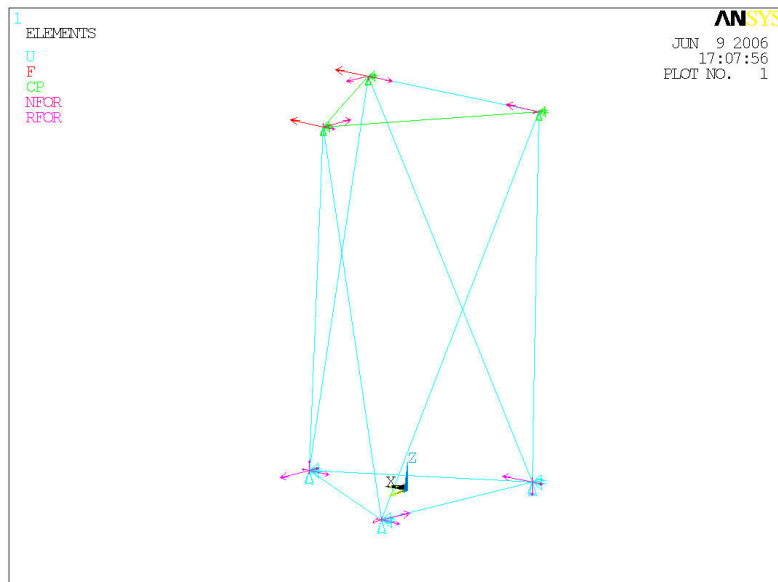


Figura 5.20 Geometría de la estructura, empotramiento y dirección de las cargas.

Fuente: Elaboración propia.

1. **Análisis modal.** En este estudio se verifica la variación de las frecuencias propias de la vibración, con la variación del ángulo " $\theta$ " y la pretensión. Se

analizan los modos de flexión y compresión, que corresponden a los primeros modos de vibración de la estructura. El modo de torsión, aparece con una frecuencia alta en el espectro, por lo cual no se considera relevante.

2. **Análisis de rigidez a flexión.** Verifica la variación del desplazamiento de la viga ante la variación del ángulo “ $\Theta$ ” y la pretensión.

De esta forma, se cuantifica la rigidez a flexión, dada por:

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (\text{Ec 4.4})$$

Donde F es la fuerza aplicada y  $\delta$  es el desplazamiento en el extremo.

3. **Porcentaje de incremento de masa.** Se analiza como se incrementa la masa de la estructura al variar el ángulo “ $\Theta$ .” Se compara este incremento con el aumento de rigidez.
4. **Porcentaje de eficiencia.** Se calcula el porcentaje de eficiencia de la estructura como, la relación entre la rigidez a flexión de la estructura  $K$ , y la masa de la misma,  $m$

$$\%ef = \frac{K}{m} \times 100\% \quad (\text{Ec 4.5})$$

#### **4.5.5 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

Para el análisis de elementos finitos de la estructura de integridad tensional se emplean elementos tipo barra de tres grados de libertad por nodo, es decir no se considera la transmisión de momentos flectores en los extremos de las mismas.

Esta suposición debe materializarse adecuadamente en la fabricación del prototipo, empleando rótulas en lo extremos de las barras, de tal manera que su comportamiento sea únicamente a tracción y compresión sin transmitir momentos.

#### 4.5.5.1 ANALISIS MODAL.

Se realizó un análisis de modos y frecuencias propias de vibración de la estructura, sobre el cual se obtuvieron dos modos simétricos de flexión y un tercer modo de compresión.

##### 4.5.5.1.1 FRECUENCIA EN FLEXIÓN SEGUN EL ANGULO DE ROTACIÓN. (MODO N1).

Se observa como la frecuencia en flexión aumenta conforme aumenta el ángulo de rotación. Adicionalmente, el aumento de pretensión, como porcentaje de deformación admisible, no supone aumentos apreciables en la frecuencia de vibración.

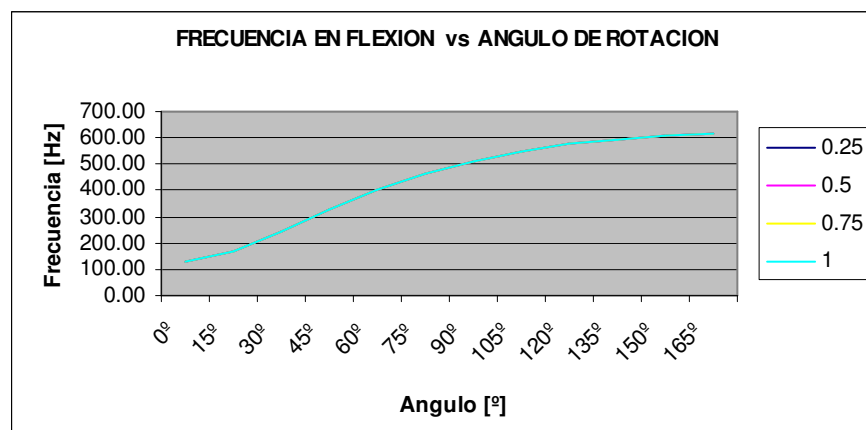


Figura 5.21 Frecuencia en flexión vs. ángulo de rotación

**Frecuencia en modo N1. Flexión.**

	<b>0.25</b>	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>
<b>0°</b>	126.19	126.19	126.20	126.20
<b>15°</b>	164.34	164.34	164.35	164.36
<b>30°</b>	245.82	245.83	245.84	245.85
<b>45°</b>	329.97	329.98	329.99	330.01
<b>60°</b>	404.34	404.36	404.37	404.39
<b>75°</b>	465.5	465.52	465.54	465.56
<b>90°</b>	513.47	513.49	513.51	513.52
<b>105°</b>	549.79	549.81	549.83	549.85
<b>120°</b>	576.53	576.55	576.57	576.59
<b>135°</b>	595.66	595.68	595.7	595.72
<b>150°</b>	608.76	608.78	608.8	608.82
<b>165°</b>	616.89	616.91	616.93	616.95

**Tabla # 5 Datos de frecuencia en Modo N1 según ángulo de rotación y factor de pretensión.**

**4.5.5.1.2 FRECUENCIA EN COMPRESIÓN SEGÚN EL ÁNGULO DE ROTACIÓN. (MODO N3).**

Se observa como las frecuencias de vibración en compresión disminuyen conforme aumenta el ángulo de rotación. Esto supone que a mayor ángulo, la estructura presenta una mayor sensibilidad al pandeo. Del mismo modo la pretensión no modifica sensiblemente los valores de frecuencias propias de vibración.

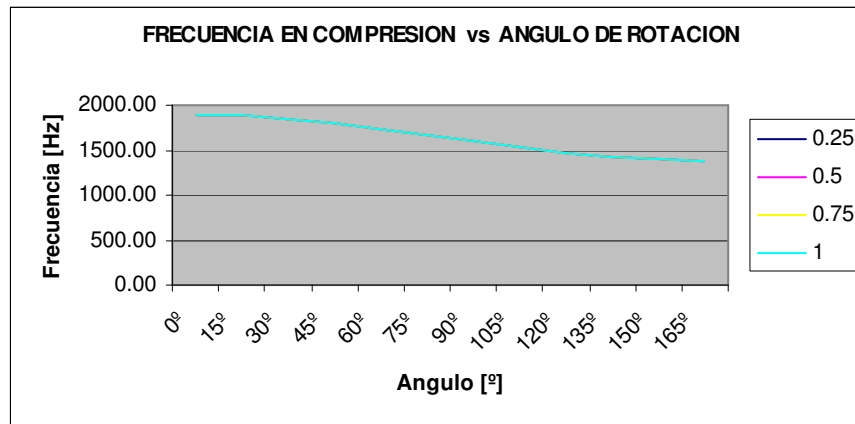


Figura 5.22 Frecuencia en compresión vs. ángulo de rotación

Frecuencia en modo N3. Compresión.

	0.25	0.5	0.75	1
0°	1889.20	1899.3	1899.40	1899.50
15°	1888.40	1888.50	1888.60	1888.60
30°	1853.4	1853.4	1853.5	1853.6
45°	1799.3	1799.4	1799.4	1799.5
60°	1733.2	1733.3	1733.4	1733.4
75°	1662.3	1662.4	1662.4	1662.5
90°	1592.5	1592.6	1592.6	1592.7
105°	1528.2	1528.3	1528.3	1528.4
120°	1472.4	1472.4	1472.5	1472.5
135°	1426.8	1426.8	1426.9	1426.9
150°	1392.4	1392.5	1392.5	1392.6
165°	1370.2	1370.2	1370.3	1370.3

Tabla #6 Datos de frecuencia en Modo N3 según ángulo de rotación y factor de pretensión.

#### 4.5.5.2 ANALISIS A FLEXIÓN.

Después de realizar un análisis modal se realizó un análisis a flexión de la estructura con una carga de 100N, en este análisis se midieron desplazamientos

en X, cambios de masa respecto al ángulo de rotación, y se analizaron factores como la rigidez, el porcentaje de incremento de masa y el porcentaje de eficiencia.

#### 4.5.5.2.1 DESPLAZAMIENTO EN X.

Los desplazamientos en el eje X decrecen con el aumento del ángulo. Nótese como el valor se estabiliza a partir de los 120°. (Eje x, figura 5.33)

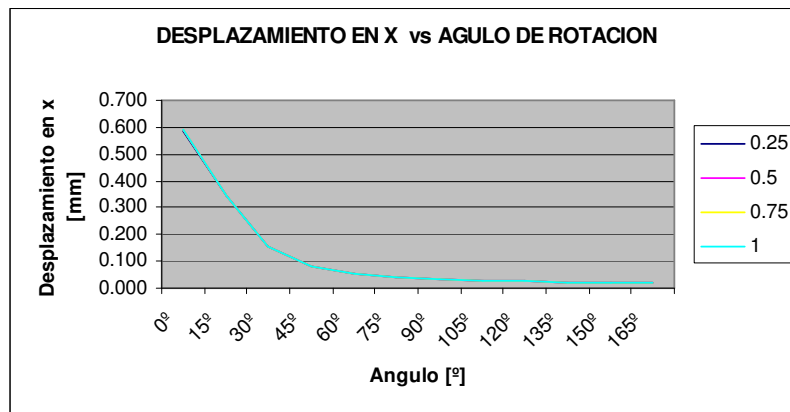


Figura 5.23 Desplazamiento en X vs. ángulo de rotación.

#### Desplazamiento x

	0.25	0.5	0.75	1
0°	0.588	0.589	0.589	0.590
15°	0.346	0.346	0.346	0.346
30°	0.153	0.153	0.153	0.153
45°	0.083	0.083	0.083	0.083
60°	0.054	0.054	0.054	0.054
75°	0.040	0.040	0.040	0.040
90°	0.032	0.032	0.032	0.032
105°	0.027	0.027	0.027	0.027
120°	0.024	0.024	0.024	0.024
135°	0.023	0.023	0.023	0.023

<b>150°</b>	0.021	0.021	0.021	0.021
<b>165°</b>	0.021	0.021	0.021	0.021

Tabla # 7 Datos de desplazamientos en X según ángulo de rotación y factor de pretensión.

#### 4.5.5.2.2 RIGIDEZ A FLEXIÓN.

Se observa como la rigidez de la estructura aumenta conforme aumenta el ángulo de rotación. No se aprecia influencia significativa de la pretensión. El aumento en rigidez es del 2800%. Para una rotación del triángulo superior respecto al inferior de 0° a 165°.

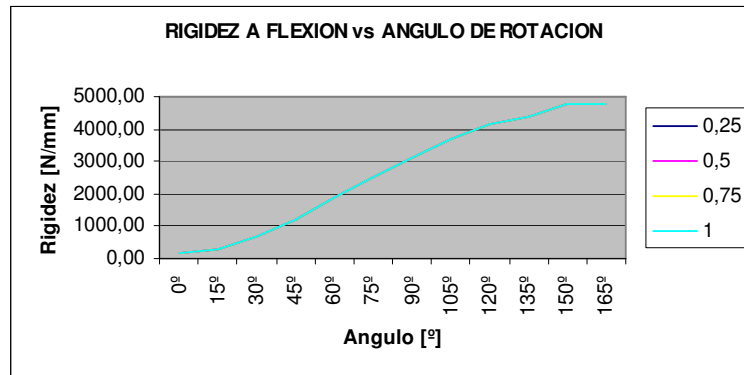


Figura 5.24 Rigidez a flexión vs. ángulo de rotación

#### Rigidez a flexión

	<b>0.25</b>	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>
<b>0°</b>	170.07	169.78	169.78	169.49
<b>15°</b>	289.02	289.02	289.02	289.02
<b>30°</b>	653.59	653.59	653.59	653.59
<b>45°</b>	1204.82	1204.82	1204.82	1204.82
<b>60°</b>	1851.85	1851.85	1851.85	1851.85
<b>75°</b>	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00
<b>90°</b>	3125.00	3125.00	3125.00	3125.00
<b>105°</b>	3703.70	3703.70	3703.70	3703.70
<b>120°</b>	4166.67	4166.67	4166.67	4166.67

<b>135°</b>	4347.83	4347.83	4347.83	4347.83
<b>150°</b>	4761.90	4761.90	4761.90	4761.90
<b>165°</b>	4761.90	4761.90	4761.90	4761.90

Tabla # 8. Datos de rigidez a flexión según ángulo de rotación y factor de pretensión.

#### 4.5.5.3 VARIACIÓN DE LA MASA RESPECTO AL ÁNGULO DE ROTACIÓN.

Se observa un incremento de masa de 0.139 Kg. desde 0° a 165°

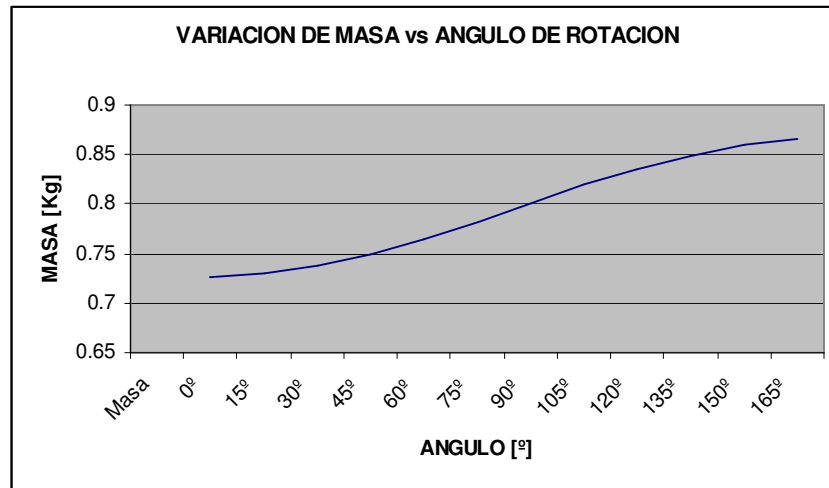


Figura 5.25. Variación de masa vs. ángulo de rotación

Masa	
<b>0°</b>	0.727
<b>15°</b>	0.730
<b>30°</b>	0.737
<b>45°</b>	0.749
<b>60°</b>	0.765
<b>75°</b>	0.782
<b>90°</b>	0.801
<b>105°</b>	0.819
<b>120°</b>	0.835
<b>135°</b>	0.849
<b>150°</b>	0.860
<b>165°</b>	0.866

Tabla # 9 Datos de la variación de masa según ángulo de rotación.

#### 4.5.5.3.1 PORCENTAJE DE INCREMENTO DE MASA.

Cruzando estos datos, con la tabla de rigidez, se observa como con un aumento de 19% de masa, la estructura de integridad tensional aumenta su rigidez en un 2800%. Esto confirma las ventajas de la optimización geométrica respecto a optimizaciones convencionales, como por ejemplo el isoesfuerzo.

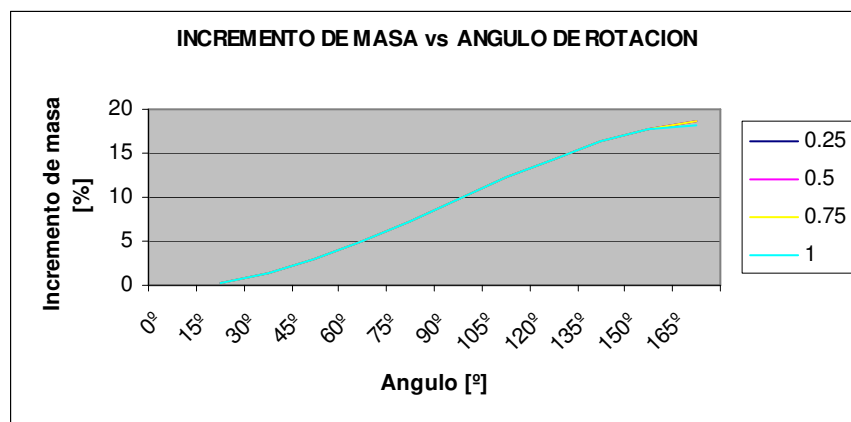


Figura 5.26. Incremento de masa vs. ángulo de rotación

Porcentaje de incremento de masa

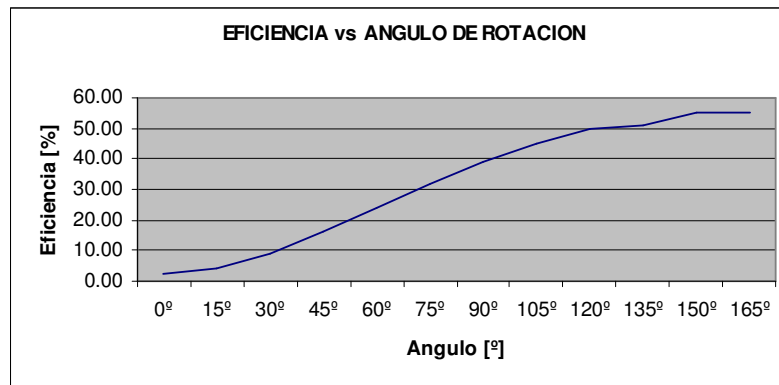
	0.25	0.5	0.75	1
0°				
15°	0.323	0.323	0.323	0.323
30°	1.325	1.325	1.325	1.325
45°	2.918	2.919	2.919	2.919
60°	4.970	4.970	4.970	4.970
75°	7.316	7.316	7.316	7.317
90°	9.784	9.784	9.785	9.785
105°	12.205	12.205	12.205	12.206
120°	14.421	14.422	14.422	14.423
135°	16.301	16.301	16.302	16.302

<b>150°</b>	17.734	17.734	17.735	17.735
<b>165°</b>	18.641	18.642	18.642	18.261

**Tabla # 10 Datos de incremento de masa según ángulo de rotación y factor de pretensión.**

#### **4.5.5.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA.**

El análisis de eficiencia, entendido como la relación de la rigidez y la masa por carga aplicada, respecto al ángulo de rotación de la estructura, se obtienen datos que muestran una mayor eficiencia ante un cambio brusco de la geometría, es decir, a mayor ángulo de rotación, mayor porcentaje de eficiencia. Se observa como el incremento del ángulo supone un aumento en eficiencia del más del 50%.



**Figura 5.27 Eficiencia vs. ángulo de rotación**

#### **Porcentaje de eficiencia**

<b>0°</b>	2.33
<b>15°</b>	3.96
<b>30°</b>	8.87
<b>45°</b>	16.09
<b>60°</b>	24.21
<b>75°</b>	31.97
<b>90°</b>	39.01
<b>105°</b>	45.22

120°	49.90
135°	51.21
150°	55.37
165°	54.99

**Tabla #11 Datos porcentaje de eficiencia según ángulo de rotación en la estructura tipo tensegrity.**

#### **4.5.5 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL.**

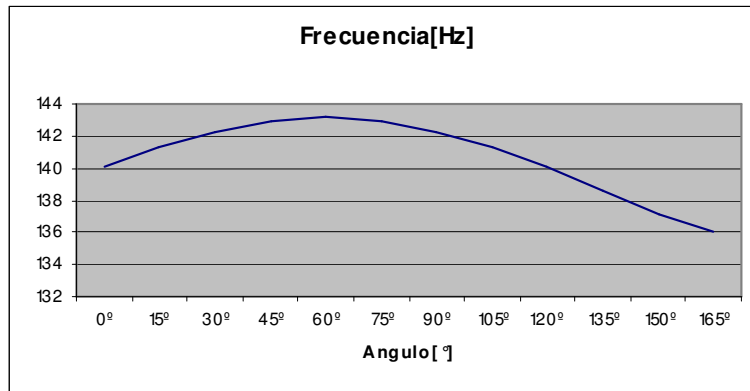
Para el análisis por elementos finitos de la estructura convencional, se emplean elementos tipo viga, de seis grados de libertad por nodo, esto es, tres traslaciones y tres rotaciones. Debido a esto, la viga transmite momentos flectores en los extremos. Se utiliza este elemento dado que las estructuras convencionales son generalmente soldadas en las uniones, presentándose esta transmisión de momentos flectores. Esto se tiene en cuenta para la fabricación del prototipo de estructura convencional.

##### **4.5.6.1 ANÁLISIS MODAL.**

Se realizó un análisis de modos y frecuencias propias de vibración de la estructura convencional, sobre el cual se obtuvieron dos modos simétricos de flexión y dos modos de flexión local que indican una vibración parcial en las barras y no en el conjunto mismo de la estructura, estos dos últimos no fueron analizados dadas estas características.

Se observa como la frecuencia en flexión permanece estable, dentro de un rango de diferencia de 7 décimas entre el mayor dato de frecuencia y el menor con un leve aumento entre 45° y 60°, conforme aumenta el ángulo de rotación la

frecuencia disminuye a partir de este giro entre placas, así que se deduce que el ángulo de rotación en la estructura convencional no supone diferencias significativas en el aumento de la frecuencia, y por ende en la rigidez de la estructura.



**Figura 5.28 Frecuencia en flexión vs. ángulo de rotación**

Angulo	Frecuencia
0°	140,06
15°	141,26
30°	142,23
45°	142,89
60°	143,13
75°	142,89
90°	142,23
105°	141,26
120°	140,06
135°	138,67
150°	137,11
165°	136,02

**Tabla #12 Datos de frecuencia de la estructura convencional según ángulo de rotación.**

#### **4.5.6.2 ANALISIS A FLEXIÓN.**

Para la estructura convencional se relacionaron los mismos factores de análisis con el fin de obtener resultados comparativos que conlleven a conclusiones que demuestren cual estructura es más eficiente bajo estos parámetros.

Se aplicaron las mismas condiciones de carga para este análisis con mediciones de desplazamientos en x, incremento de masa respecto a un ángulo de rotación, con el fin de analizar para esta estructura que tan relevante es el criterio de optimización geométrica como en las estructuras tipo integridad tensional, con variación cada 15 grados, y se analizaron factores como la rigidez, y el porcentaje de eficiencia.

La rigidez y el porcentaje de eficiencia se entienden de igual manera que se enunciaron anteriormente en el análisis a flexión de la estructura tipo tensegrity con iguales ecuaciones matemáticas.

#### 4.5.6.2.1 DESPLAZAMIENTO EN X.

Se nota un incremento inicial del desplazamiento en el eje X, hasta los 120°, donde comienza a decrecer.

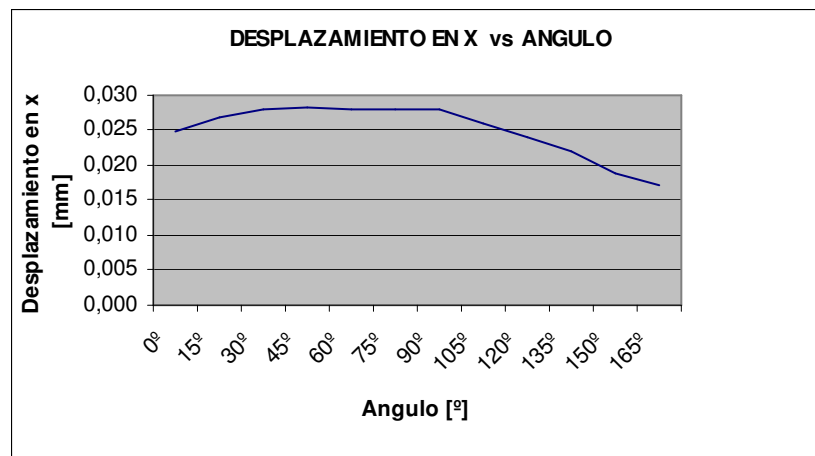


Figura 5.29 Desplazamiento en X vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.

Angulo	Desp. x
0°	0.025
15°	0.027
30°	0.028
45°	0.028
60°	0.028
75°	0.028
90°	0.028
105°	0.026
120°	0.024
135°	0.022
150°	0.019
165°	0.017

Tabla # 13 Datos de Deformación en X según ángulo de rotación en la estructura convencional.

#### 4.5.6.2.2 RIGIDEZ A FLEXIÓN.

Se observa como al variar el ángulo de rotación, la rigidez disminuye, hasta 120°, donde comienza a aumentar hasta llegar a un incremento máximo de rigidez del 46%.

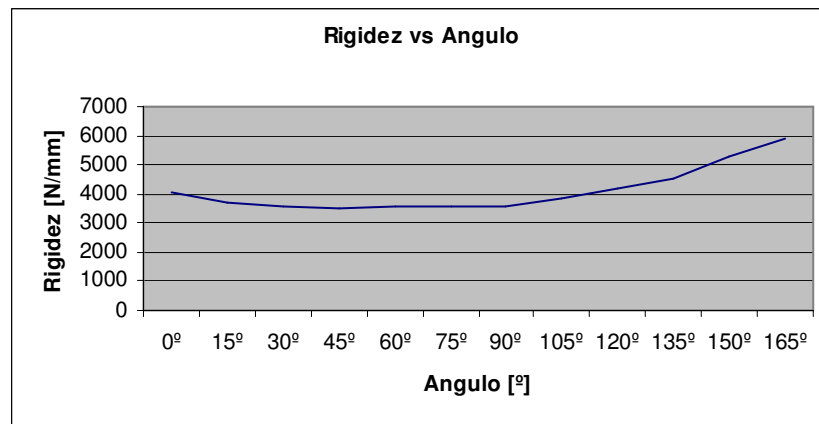


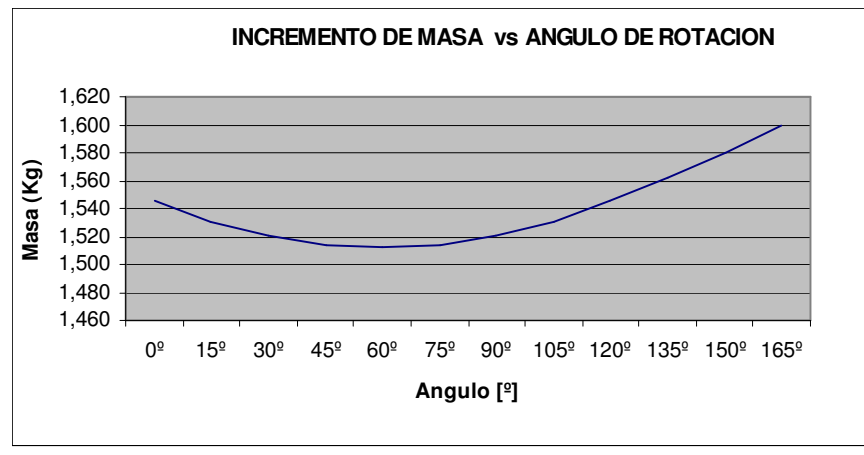
Figura 5.30 Rigidez vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.

Angulo	Rigidez
0°	4016.064
15°	3717.472
30°	3571.429
45°	3521.127
60°	3571.429
75°	3571.429
90°	3571.429
105°	3846.154
120°	4166.667
135°	4545.455
150°	5263.158
165°	5882.353

Tabla #14 Datos de Rigidez según ángulo de rotación en la estructura convencional.

#### 4.5.6.3 VARIACIÓN DE LA MASA RESPECTO AL ÁNGULO DE ROTACIÓN.

Se observa como inicialmente la masa disminuye hasta una rotación de 60°, en donde posteriormente inicia un crecimiento de hasta 1.6Kg. Se obtienen cambios del orden de décimas en el porcentaje resultante.



**Figura 5.31 Masa vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.**

<b>Angulo</b>	<b>Masa</b>
<b>0°</b>	1.545
<b>15°</b>	1.531
<b>30°</b>	1.521
<b>45°</b>	1.514
<b>60°</b>	1.512
<b>75°</b>	1.514
<b>90°</b>	1.521
<b>105°</b>	1.531
<b>120°</b>	1.545
<b>135°</b>	1.562
<b>150°</b>	1.580
<b>165°</b>	1.599

**Tabla #15 Datos masa según ángulo de rotación en la estructura convencional.**

#### **4.5.6.4 PORCENTAJE DE EFICIENCIA.**

Los datos muestran relaciones similares antes de los 120°, incrementando a partir de esta un 10% hasta 165°. Finalmente con la variación del ángulo su eficiencia aumenta un 11%.

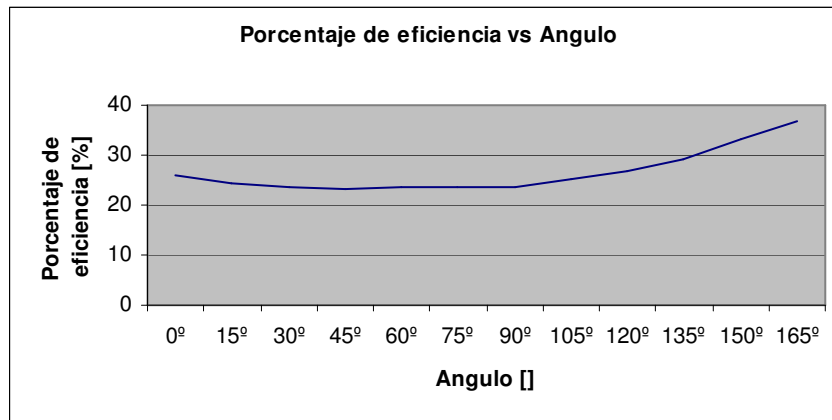


Figura 5.32 Porcentaje de eficiencia vs. ángulo de rotación en la estructura convencional.

Angulo	% eficiencia
0°	25.994
15°	24.281
30°	23.481
45°	23.257
60°	23.621
75°	23.589
90°	23.481
105°	25.122
120°	26.969
135°	29.100
150°	33.311
165°	36.788

Tabla #16 Datos eficiencia según ángulo de rotación en la estructura convencional.

#### 4.5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se presentan en este apartado las imágenes de deflexión y los modos propios correspondientes a la estructura convencional con ángulo de rotación de 0° y la estructura de integridad tensional con ángulo de rotación de 150°. Las imágenes

correspondientes a los demás análisis que complementan el estudio presentado pueden observarse en el Anexo B. Imágenes de resultados del análisis de elementos finitos

#### 4.5.7.1 RESULTADOS ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.

##### 4.5.7.1.1 RESULTADOS ANÁLISIS MODAL.

Se han analizado los primeros tres modos de vibración de la estructura, observando como la frecuencia propia de vibración a flexión aumenta conforme se incrementa el ángulo de rotación entre triángulos. Esto es un indicativo claro del aumento de rigidez a flexión de la misma. No sucede lo mismo con las frecuencias de vibración en compresión, que disminuyen conforme aumenta el ángulo de rotación, Esto confirma el efecto de la variación de la geometría en la sensibilidad al pandeo de la estructura de integridad tensional.

#### Modo 1

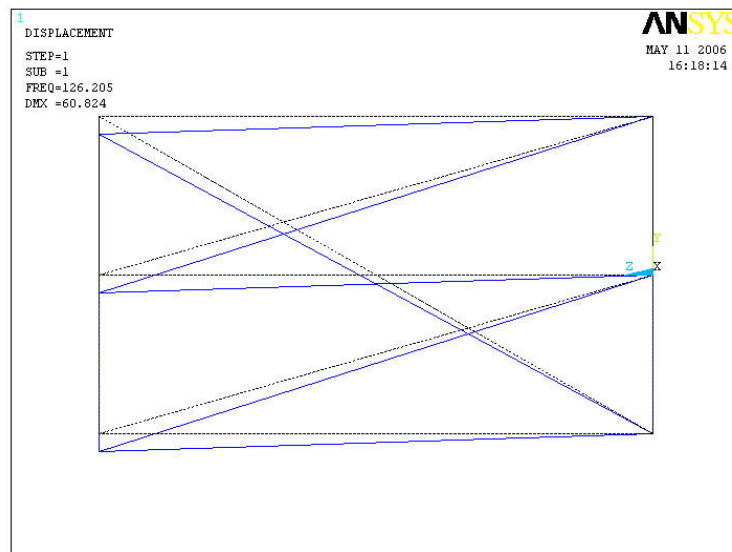


Figura 5.33 Comportamiento de la estructura en modo N1. Flexión hacia arriba.

## Modo 2

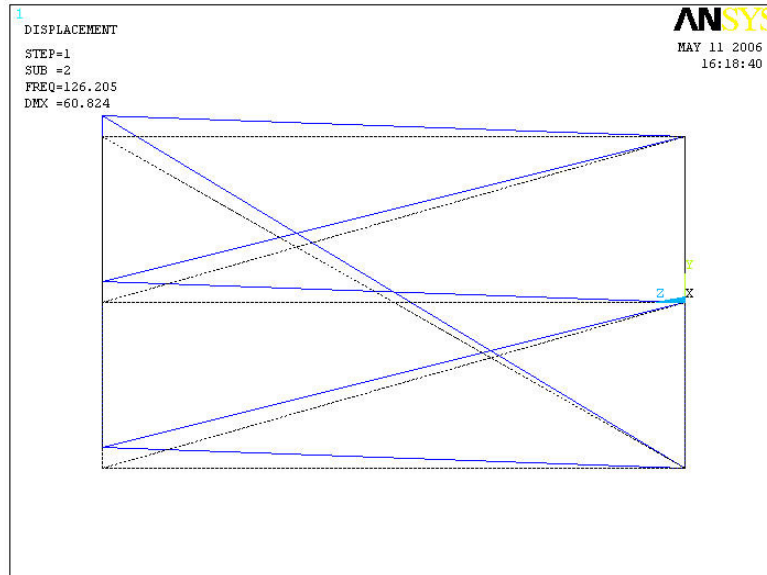


Figura 5.34 Comportamiento de la estructura en modo N2. Flexión hacia abajo.

## Modo 3

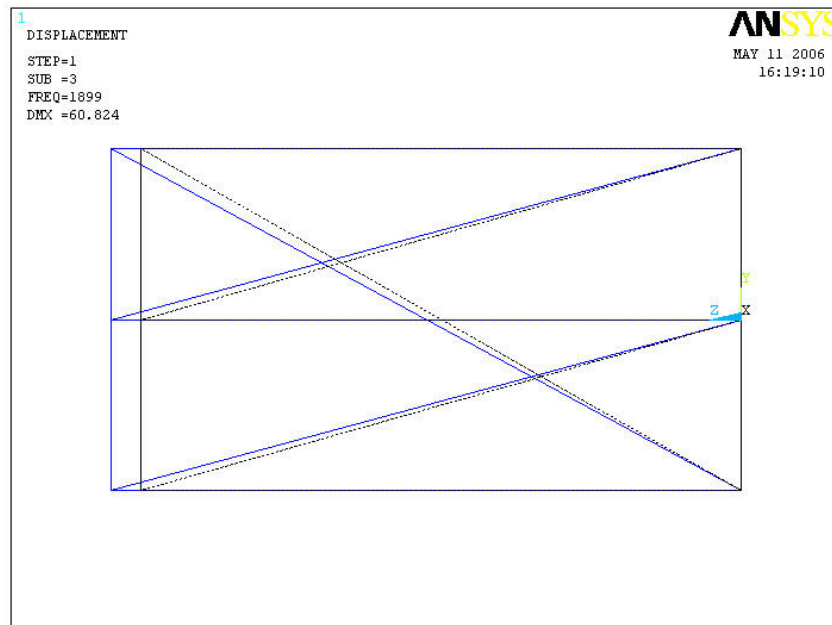


Figura 5.35 Comportamiento de la estructura en modo N3. Compresión.

#### 4.5.7.1.2 RESULTADOS ANÁLISIS A FLEXIÓN.

Se observa un aumento de la rigidez a flexión de la estructura conforme se aumenta el ángulo de rotación relativo entre los triángulos. Los cambios geométricos suponen un aumento de masa cercano al 19%, el cual se considera bajo respecto a la ganancia en rigidez, que es del orden de un 2800%. La pretensión no aparece como un factor relevante, al menos en valores cercanos al límite de cedencia del material. Obviamente, la pretensión toma un efecto relevante a medida que el cable pasa de estar distensionado a adquirir tensión inicial.

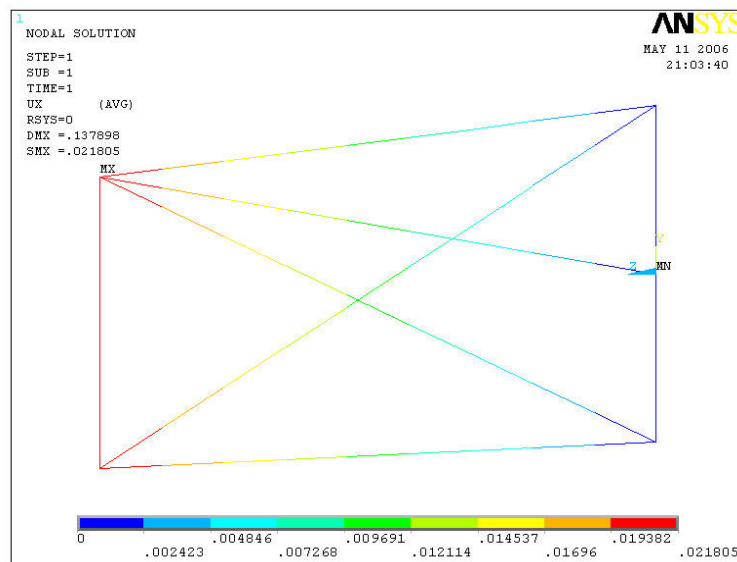


Figura 5.36 Deformación en x para un ángulo de 150°

La eficiencia, entendida como la relación entre la rigidez y la masa aumenta un 52% debido a la variación geométrica.

#### 4.5.7.2 RESULTADOS ESTRUCTURA CONVENCIONAL.

#### 4.5.7.2.1 RESULTADOS ANÁLISIS MODAL.

Como se observa en la sección anterior, los cambios geométricos no suponen un cambio significativo en las frecuencias propias de vibración de la estructura. La aparición de modos locales de flexión en las vigas denota esbelteza en las mismas.

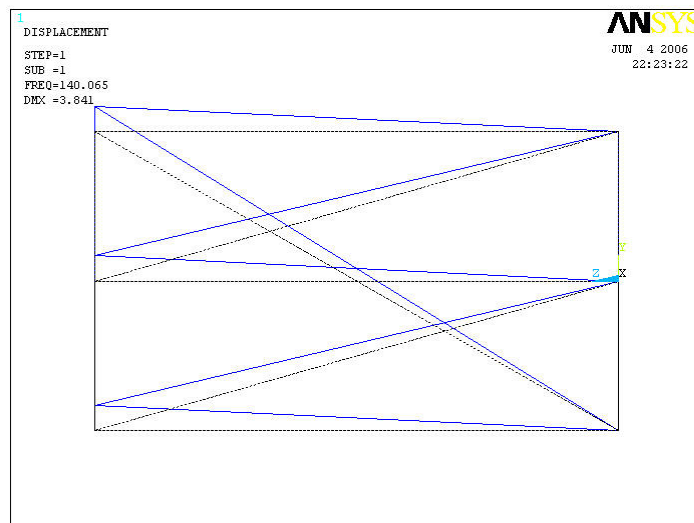


Figura 5.37 Comportamiento de la estructura convencional. Flexión hacia arriba.

#### 4.5.7.2.2 RESULTADOS ANÁLISIS A FLEXIÓN.

En factores como la deformación en X y el porcentaje de incremento de masa, el ángulo de rotación para la estructura convencional no es relevante ya que se obtienen cambios en los resultados del orden de milésimas en las variaciones analizadas.

Se obtiene un mayor porcentaje de eficiencia cambiando la geometría a partir de  $90^\circ$  en las estructuras convencionales por el aumento de la rigidez al variar el ángulo de rotación, los resultados en porcentaje de eficiencia aumentan hasta  $165^\circ$  en un 13.3%, a partir de  $90^\circ$  como se enuncio anteriormente.

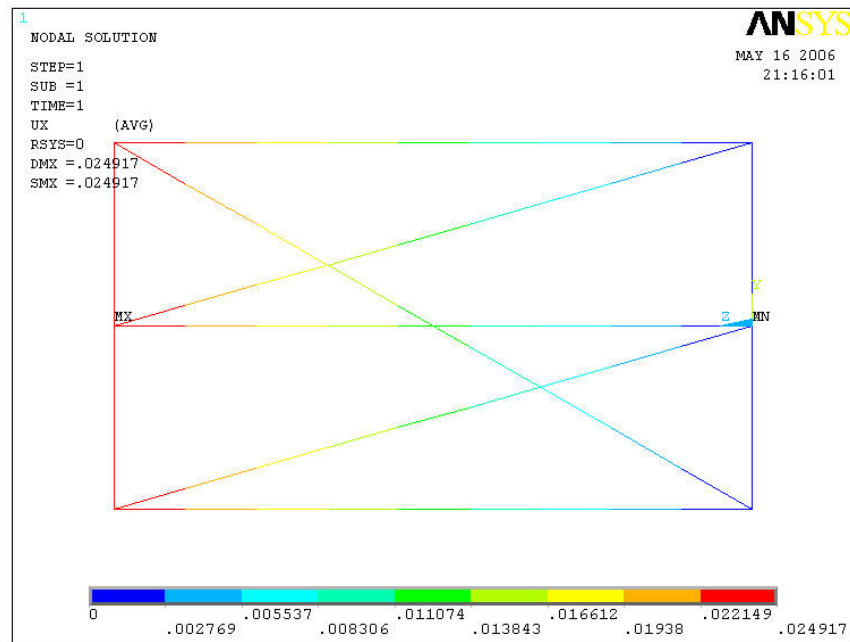


Figura 5.38 Deformación en x para un ángulo de 150°

### 4.5.7.3 COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE AMBAS ESTRUCTURAS

La comparativa entre ambas estructuras se presenta en la Tabla # 17

	INTEGRIDAD TENSIONAL	CONVENCIONAL
<b>FRECUENCIA</b>	1392.5Hz	140.06Hz
<b>MASA</b>	0.86 Kg.	1.54 Kg.
<b>RIGIDEZ</b>	4761.9 N/mm	4016.06N/mm
<b>EFICIENCIA</b>	55.37%	33.3%

Tabla #17 Variables geométricas para la estructura de integridad tensional.

#### 4.5.8 CONCLUSIONES.

La eficiencia en las estructuras de integridad tensional es determinada por la geometría de la misma y no por el factor de pretensión emitido en los cables. “Esto explica la eficiencia de masa en las estructuras de integridad tensional obteniendo la mayor rigidez escogiendo la geometría correcta”<sup>87</sup>.

El comportamiento ante posibles vibraciones de las estructuras prismáticas con principios de integridad tensional es mejor mientras exista mas variación de la geometría, aplicando mayor ángulo de rotación ya que la frecuencia aumenta a medida que se aplica un cambio significativo en la geometría de la estructura.

Se pueden observar propiedades isostáticas en la estructura de integridad tensional cuando es sometida a tracción, esto permite una mejor distribución de esfuerzos y un rango más amplio de posibles aplicaciones futuras, incluidas aplicaciones ópticas de precisión.

Aunque se observa un incremento de la masa ante cambios de geometría, el aumento en la rigidez y la resistencia a la deformación ante este cambio es más significativa, y por ende mejorando la eficiencia de la estructura.

Según los resultados obtenidos mediante el análisis de elementos finitos y contando con los factores de influencia para el análisis de estructura se definió que  $150^\circ$  es un ángulo de rotación eficiente aplicable a la estructura tipo integridad tensional a desarrollar.

---

<sup>87</sup> Skelton p28

La geometría no es un factor determinante de eficiencia en la estructura convencional propuesta con relación a la de integridad tensional pues presenta un incremento en eficiencia de un 13.3% en comparación a un 52.7% de eficiencia en la estructura tipo tensegrity, por esta razón, y por ser mas utilizados los sistemas ortogonales en cerchas convencionales se propone una estructura convencional prismática con un ángulo de 0° respecto a la superficie inferior, para su correspondiente comparación con la estructura de integridad tensional a 150° ya mencionada.

#### 4.5.9 MODELACIÓN.

Las variables necesarias para la modelación de la estructura de integridad tensional se especificaron previamente en la sección 4.5.3.1, a excepción del ángulo de rotación el cual se obtuvo a partir del análisis anterior. Por lo tanto la longitud de las barras a compresión se calcula, recordando la ecuación:

$$S^2 = Z^2 + 2r^2 - 2r^2 \cos \Theta$$

*En donde*

$$Z = 700mm, \quad r = 230.1mm, \quad \Theta = 150^\circ.$$

*Entonces*

$$S^2 = (700)^2 + 2(230.1)^2 - 2(230.1)^2 \cos 150$$

$$S^2 = 687597.2$$

$$S = 829.2mm$$

#### 4.5.9.1 MODELACIÓN ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.

Con base en las siguientes dimensiones se realizó la modelación de la estructura de integridad tensional.

<b>Variables</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>r (mm)</b>	<b><math>\theta</math> (°)</b>	<b>S (mm)</b>
<b>Valores para estructura de integridad tensional</b>	700	230.1	150	829.2

Tabla #18. Variables geométricas para la estructura de integridad tensional.

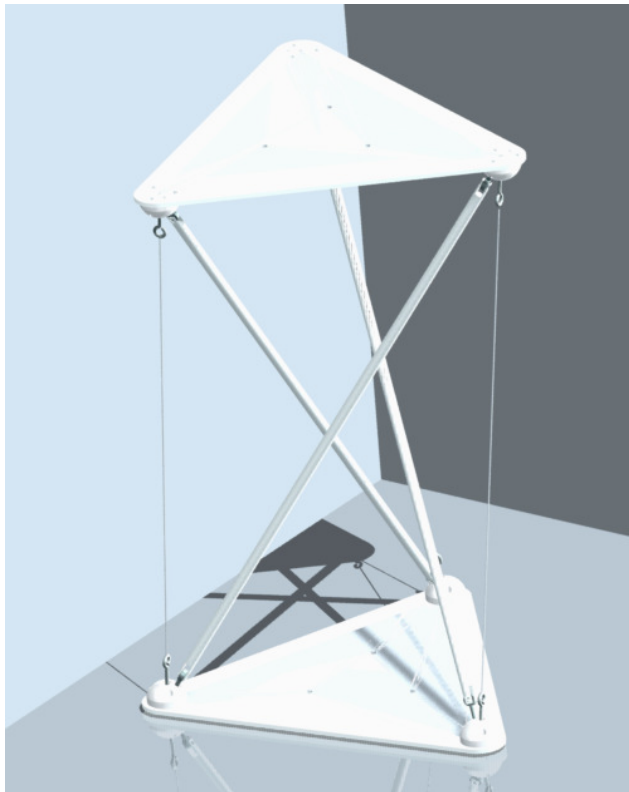
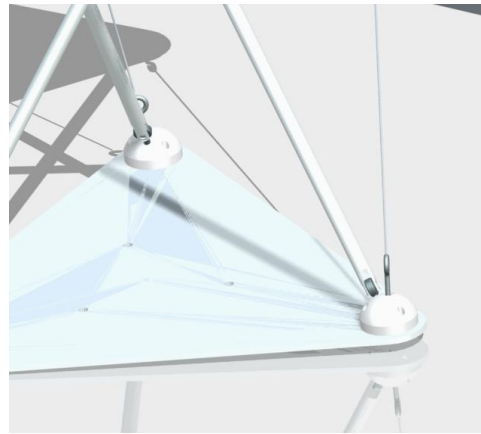


Figura 5.39 Isométrico estructura de integridad tensional.



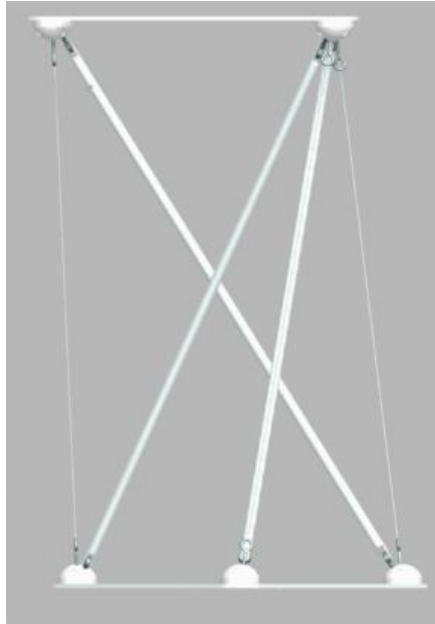
**Figura 5.40** Nodos, barras de compresión y cables. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.41** Detalle inferior de nodos, barras de compresión y cables. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.42** Vista superior de estructura de integridad tensional. (Ángulo de rotación)  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.43 Vista frontal de estructura de integridad tensional**  
**Fuente: Elaboración propia.**

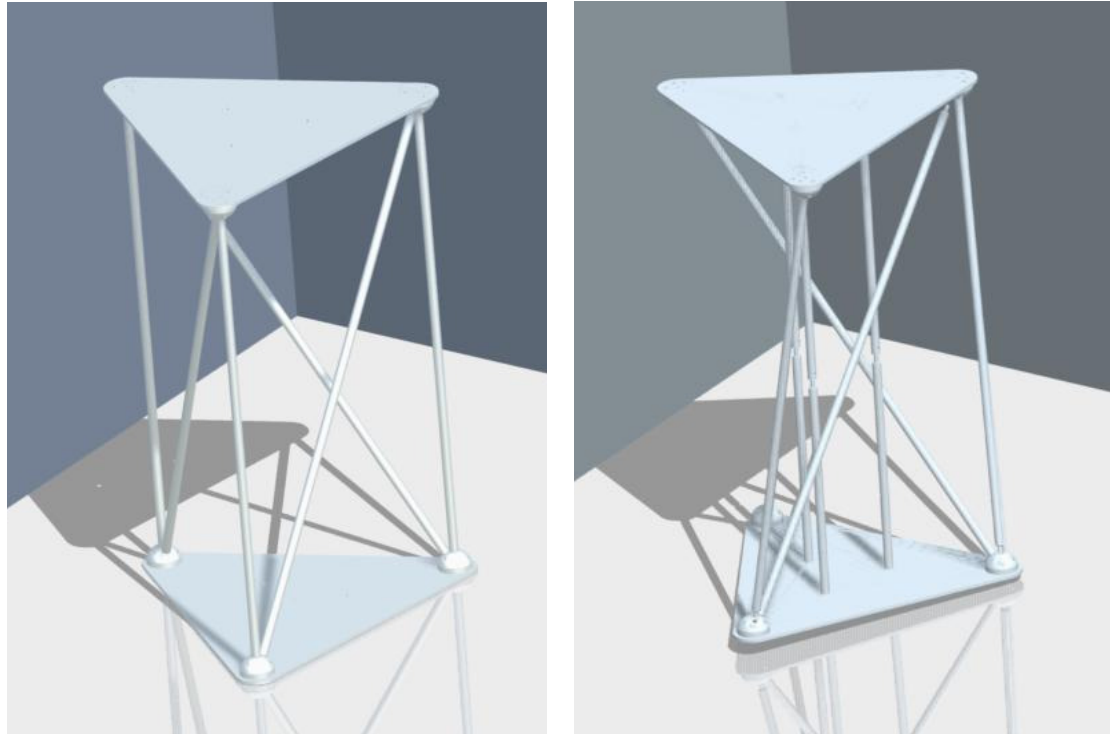
#### **4.5.9.2 MODELACIÓN ESTRUCTURA CONVENCIONAL.**

Para la modelación de la estructura convencional se utilizaron las siguientes variables.

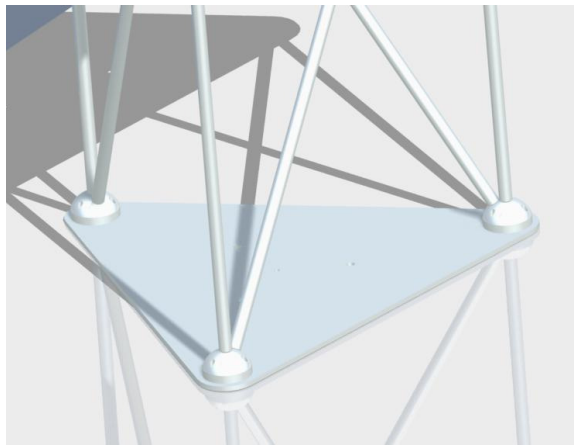
<b>Variables</b>	<b>Z (mm)</b>	<b>r (mm)</b>	<b><math>\theta</math> (°)</b>	<b>Barras tensión (mm)</b>	<b>Barras compresión (mm)</b>
<b>Valores para estructura convencional</b>	<b>700</b>	<b>203.1</b>	<b>0</b>	<b>653</b>	<b>780</b>

**Tabla # 19.Variables de la estructura convencional.**

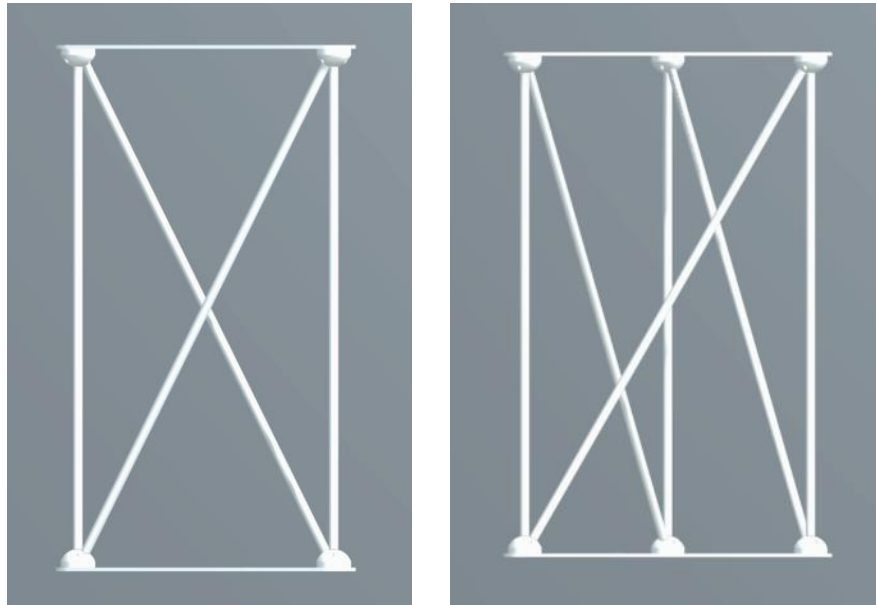
A continuación se presentan imágenes de la modelación de la estructura convencional.



**Figura 5.44** Isométricos de estructura convencional. der.: estructura con barras de montaje. Izq.: estructura convencional. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.45** Detalle inferior de estructura convencional. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.46 Vista frontal y lateral de estructura convencional. Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.5.10 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS.**

Con el fin de comprobar los resultados arrojados por el análisis de elementos finitos en donde la estructura de integridad tensional es mas eficiente que la convencional, se prosigue con la construcción de los dos prototipo estructurales, para poder realizar las pruebas funcionales de estos y corroborar los resultados de la simulación numérica.

##### **4.5.10.1. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA CONVENCIONAL.**

Para la construcción de la estructura convencional se utilizaron procesos de corte con plasma y fresado para la platina inferior y superior, de igual manera se utilizo la fresadora para el maquinado de los agujeros, tanto en las platinas como en los nodos.

Los nodos se realizaron en el torno de control numérico del laboratorio de maquinas y herramientas de la universidad EAFIT, las barras de montaje en el torno manual de la misma, así mismo se utilizo la fresadora para el maquinado de los agujeros de posicionamiento<sup>88</sup>.

Después de tener cada una de las piezas construidas se procedió al montaje de la estructura con ayuda de unas barras de montaje para el posicionamiento de las platinas en altura y ángulo de rotación, el cual corresponde a cero grados para esta estructura, y los pasadores para el posicionamiento de los nodos en las platinas.



**Figura 5.47. Perforaciones de los nodos en la fresadora. Fuente: fotografía del autor.**

Posteriormente se reviso el montaje y se soldó la estructura punteándola primero para verificar los requerimientos de la misma, al comprobar el estado correcto se aplico el cordón de soldadura en los nodos, y en las barras que soportarían la tensión y la compresión.

---

<sup>88</sup> Ver en anexos: Planos de construcción.



**Figura 5.48. Construcción de estructura convencional. Fuente: fotografía del autor**



**Figura 5.49 Fotografía de Estructura convencional  
Fuente: fotografía del autor.**

#### **4.5.10.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

Para la construcción de las platinas inferior y superior, y para el maquinado de los nodos, los agujeros y las barras de compresión se utilizaron los mismos procesos realizados en la estructura convencional, a diferencia de estas ultimas que requerían un fresado y un maquinado en los extremos para la sujeción de la rotula de cabeza.

Para lograr la diferencia de rotación de  $150^\circ$  en las platinas se utilizaron elementos de medición geométrica como goniómetro, compás, pie de rey, escuadras, etc.

Para el posicionamiento de las platinas se utilizaron las mismas barras de montaje que en la estructura convencional proporcionando igual altura en ambas estructuras, con ayuda de los pasadores se posicionaron los nodos en las platinas respecto al centro de los mismos y los vértices del triangulo interno; con mediciones de ángulos internos en los triángulos de las platinas y los nodos se posicionaron los agujeros inclinados y se unieron mediante puntos de soldadura.

En el ensamble de componentes, primero se insertaron las barras de compresión dentro de los nodos con ayuda de las rotulas y dos tornillos de sujeción en cada barra verificando el nivel de la platina inferior, la distancia entre platinas y los ángulos respectivos de las barras, al igual que el recorrido de las rotulas dentro de la rosca en los agujeros angulares de los nodos, mas tarde se ubicaron los cancamos que soportarían los cables y los tensores, verificando la distancia de los mismos y sujetándolos con terminales de guaya en cada extremo del cable, al tener una longitud adecuada en los cables se procedió a nivelar la estructura por

medio de los tensores ubicados en medio de los cables. Verificando la altura, el ángulo de rotación entre las platinas y el nivel de la estructura se dio una primera pretensión que mantuviera la estructura con la rigidez suficiente para mantenerse firme.



**Figura 5.50** Fotografía de la construcción en estructura de integridad tensional

Fuente: fotografía del autor

#### **4.5.11 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Según el requerimiento 7.4<sup>89</sup> se ha verificado el cumplimiento del mismo, dado que se ha probado mediante análisis por elementos finitos que la solución abstraída de la biónica emplea un referente funcional, más no formal,

---

<sup>89</sup> Anexo A. Anteproyecto

obteniéndose una estructura liviana y resistente valida como alternativa de sustitución de las estructuras convencionales.

#### 4.6 PRUEBAS FUNCIONALES.

Si bien los análisis por elementos finitos confirman las ventajas de las estructuras de integridad tensional sobre las convencionales, es necesario comprobar este hecho verificando las prestaciones de cada una de ellas sobre estructuras reales. Para ello se realiza un experimento con cada estructura, consistente en someterla a una carga transversal en un extremo mientras el otro se encuentra empotrado. Luego se aplica una fuerza mediante un tornillo y un resorte del cual se conoce previamente la constante de rigidez. (Anexo D. Proceso de construcción y pruebas de prototipo).

Del lado opuesto a la aplicación de la carga se coloca un comparador de carátula para medir la deflexión de la estructura.

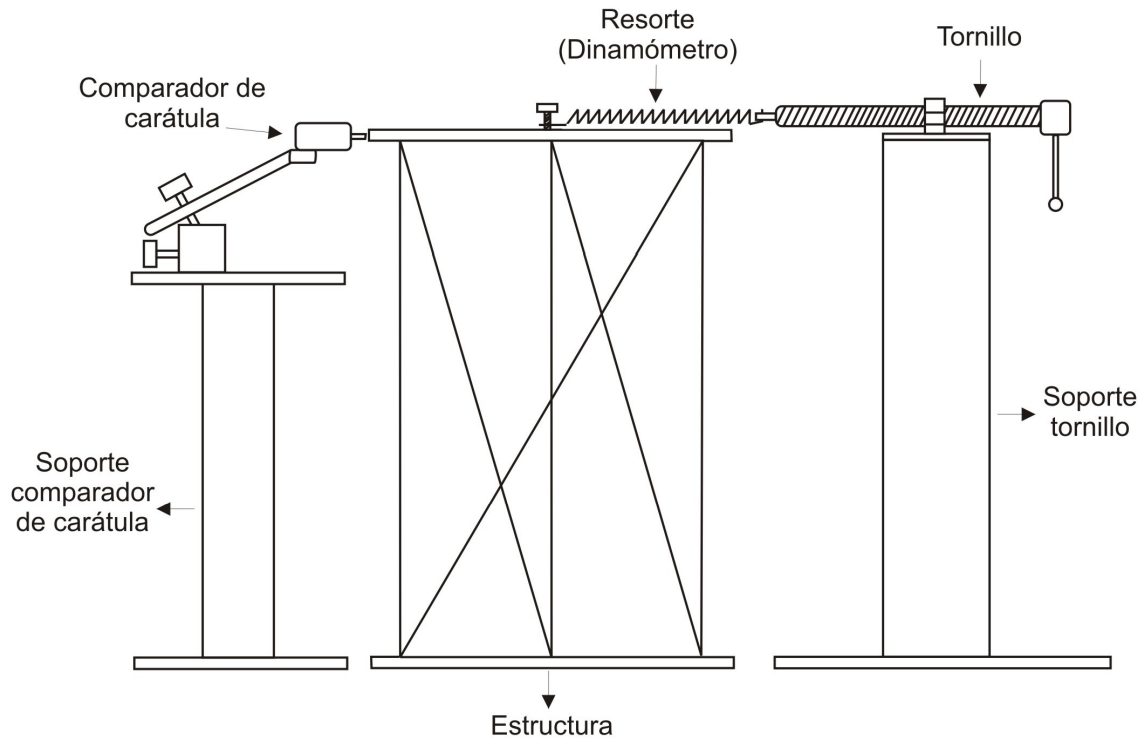
El resorte fue utilizado como dinamómetro debido a que dentro de la universidad no se encontró uno adecuado para medir los 100N de la prueba. Para esto se calculo previamente la  $K$  del resorte, con lo cual posteriormente midiendo la elongación de este se pudo conocer la carga aplicada mediante la relación.

$$F = K \cdot x \quad (\text{Ec 4.6})$$

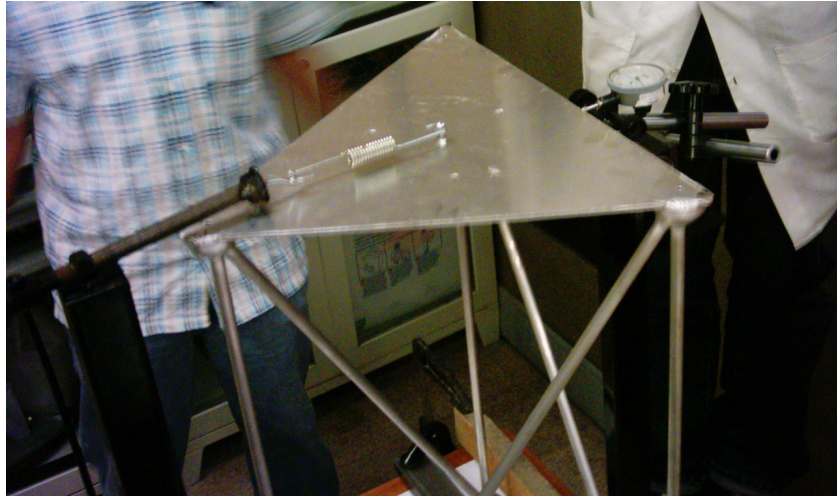
Donde  $K$  es la constante de rigidez del resorte y  $x$  es la elongación del resorte. Con la carga aplicada y la deflexión de la estructura se calcula la rigidez de la misma. Luego se procede a pesar cada estructura y se calcula y compara la eficiencia de cada una de ellas.

#### 4.6.1 DISEÑO DEL MONTAJE.

Para la realización de las pruebas se construirán dos estructuras de soporte para el comparador de carátula y el dinamómetro, la disposición de ambas es dependiente de la mesa de montaje, teniendo en cuenta que la fuerza se debe aplicar en el centro de la estructura y hacia uno de los vértices del triángulo, y el desplazamiento se debe medir en el lado recto, adyacente al vértice mencionado, en las dos estructuras.



**Figura 6.1 Diagrama del ensayo. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 6.2 Fotografía del montaje de las pruebas en la estructura convencional.**

**Fuente: fotografía del autor**

#### **4.6.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS PARA LAS PRUEBAS.**

##### **MATERIALES**

- Prensas de sujeción de diferentes tamaños.
- Hombrosolo en c grande.
- Placas de aluminio y acero para facilitar la sujeción de ambas estructuras a la mesa.
- Base para sujeción del comparador de carátula.
- Base para sujeción del dinamómetro.
- Mesa de soporte para el montaje.

##### **INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.**

- Comparador de carátula análogo KAFER.  
Rango de medición: 0 -5mm.

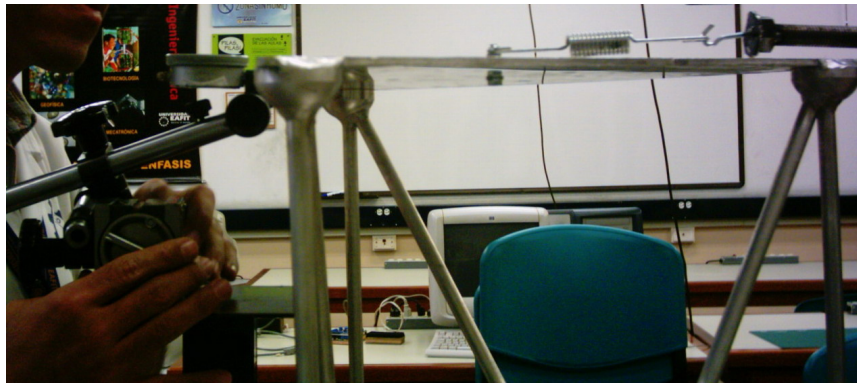
Lectura mín. 0.001mm.

Calibración: Laboratorio de metrología Universidad Eafit.

Informe de calibración: 3092

- Dinamómetro de 100 N.<sup>90</sup>
- Pie de rey.

#### 4.6.3 DOCUMENTACIÓN.



**Figura 6.3 Fotografía del montaje de los instrumentos.**

**Fuente: fotografía del autor**

K del resorte=45.77 (Ver Anexo D)

Longitud inicial= 44.3

Fuerza aplicada: 100N.

Masa estructura convencional: 4.52Kg.

Masa estructura tensegrity: 4.05Kg.

(Ver Anexo D)

---

<sup>90</sup> Ante carencia de un dinamómetro con las especificaciones necesarias se construyo un elemento que permitiera medir la fuerza aplicada por medio de un resorte de  $K= 45.77$  N/mm, y un tornillo de potencia de longitud: 150 mm.



**Figura 6.4. Pruebas de la estructura convencional. Fuente: fotografía del autor.**

El empotramiento de la estructura se realizó mediante prensas sobre una mesa que soportara el montaje, por las condiciones del mismo no se ejerció sobre los puntos indicados en el análisis de elementos finitos, ya que los instrumentos utilizados y las condiciones del montaje no lo permitían. Se sujetó la estructura desde la platina inferior, pero no en el punto exacto de triangulo en el que se unen los elementos a compresión y flexión.

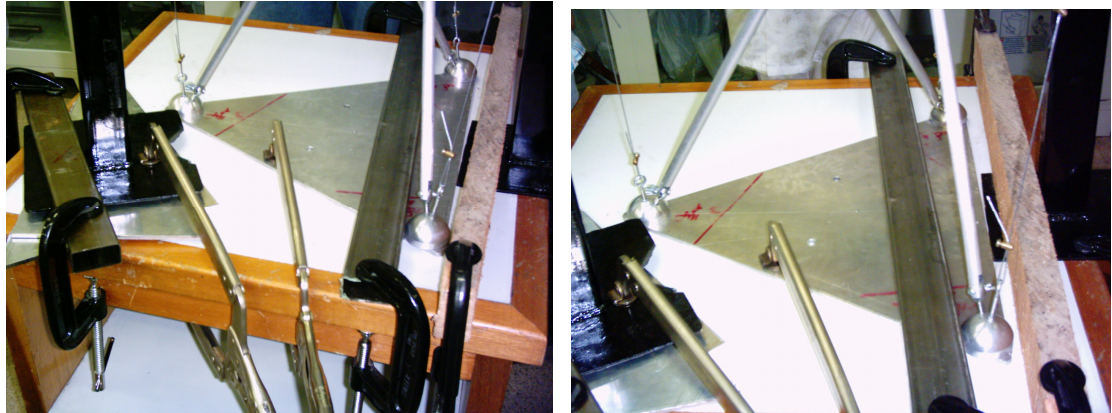


Figura 6.5 Fotografía de la sujeción de la estructura. Fuente: fotografía del autor

#### 4.6.3.1 PRUEBAS DE DEFLEXIÓN ESTRUCTURA CONVENCIONAL.

Se realizó la misma prueba seis veces bajo las mismas condiciones con el fin de corroborar la repetitividad de los datos, obteniendo los siguientes resultados:

Ensayo No.	Desplazamiento. [mm]
1	0.80
2	0.93
3	0.88
4	0.85
5	0.80
6	0.84
$\bar{x}$	<b>0.85</b>

Tabla # 20 Datos de desplazamientos en X en estructura convencional

#### 4.6.3.2 PRUEBA DE DEFLEXIÓN ESTRUCTURA DE INTEGRIDAD TENSIONAL

A la estructura de integridad tensional inicialmente se le aplicó una pretensión inicial para la cual los valores de deflexión fueron:

Ensayo No.	Desplazamiento. [mm]
1	1.40
2	1.180
3	1.10
4	1.20
5	1.18
6	1.15
$\bar{x}$	<b>1.2</b>

Tabla #21 Datos de desplazamientos en X en estructura de integridad tensional con pretensión inicial

Posteriormente se aplicó más pretensión con el fin de verificar su influencia en el comportamiento de la misma y verificar si podría superar a la estructura convencional. Los valores de deflexión para este ensayo fueron:

Ensayo No.	Desplazamiento. [mm]
1	0.75
2	0.67
3	0.69
4	0.68
5	0.70
6	0.66

$\bar{x}$	0.69
-----------	------

Tabla #22 Datos de desplazamientos en X en estructura de integridad tensional con una segunda pretensión.



Figura 6.6. Fotografía del aumento de pretensión. Fuente: fotografía del autor.

#### 4.6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

##### RIGIDEZ REAL DE LA ESTRUCTURA.

Estructura de integridad tensional

$$K_{tens} = \frac{100N}{0.69mm} = 144.9 \text{ N/mm}$$

Estructura convencional

$$K_{tens} = \frac{100N}{0.85mm} = 117.64 \text{ N/mm}$$

## MASA REAL DE LAS ESTRUCTURAS

Masa estructura de integridad tensional

$$MASA_{tens} = 4.05Kg.$$

Masa estructura convencional

$$MASA_{conv} = 4.52Kg.$$

## PORCENTAJE DE EFICIENCIA.

Porcentaje de eficiencia estructura de integridad tensional

$$\%E_{tens} = \frac{K}{m} = \frac{144.92}{4.05} = 3.5\%$$

Porcentaje de eficiencia de estructura convencional

$$\%E_{conv} = \frac{K}{m} = \frac{117.64}{4.52} = 2.6\%$$

## RESULTADOS

	INTEGRIDAD TENSIONAL	CONVENCIONAL
MASA	4.05Kg	4.52Kg
RIGIDEZ	144.92N/mm	117.64Kg
EFICIENCIA	3.5%	2.6%

Tabla # 23 Comparación de resultados en ambas estructuras.

#### **4.6.5 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS.**

La estructura de integridad tensional se deforma un 19% menos que la estructura convencional, siendo un 26% más eficiente que las convencionales.

Las diferencias de resultados con los análisis de elementos finitos se deben a las dificultades del montaje para lograr un empotramiento perfecto en las estructuras, la estabilidad del montaje del instrumento de medida, el error en la medición de las cargas aplicadas inducido por la falta de un dinamómetro adecuado, la imprecisión en la dirección de la fuerza aplicada y la pretensión en la estructura de integridad tensional que bajo las condiciones reales del ensayo no son posibles de igualar respecto al programa.

Dado que no es posible alcanzar el valor mínimo de pretensión, simulado en el programa de elementos finitos, se concluye que por debajo de este nivel la pretensión en las estructuras de integridad tensional es un factor determinante en la rigidez de la misma. Es de suponer que alcanzando cierto valor de pretensión, cercano al límite de cedencia del material, el aumento de esta tendrá un efecto mínimo en la rigidez.

Aunque se concluye que las estructuras de integridad tensional son más eficientes que las convencionales, se debe tener en cuenta para su elección las dificultades en la fabricación y las restricciones reales de pretensión que se debe dar.

#### 4.6.6 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

Según el requerimiento 7.5 del anteproyecto<sup>91</sup>, se verifica el cumplimiento del mismo, dado que la construcción de ambos prototipos se realizó en las instalaciones de la universidad EAFIT por los autores de la monografía, con ayuda del personal técnico de los laboratorios de modelos, máquinas y herramientas, y soldadura. Se utilizaron procesos de corte y maquinado en fresa y torno.

Según el requerimiento 7.6 del anteproyecto<sup>92</sup>, se verifica el cumplimiento del mismo, dado que se realizaron pruebas funcionales que si bien no coincidieron con los resultados encontrados por elementos finitos, si confirmaron el hecho que las estructuras de integridad tensional son susceptibles de optimización geométrica que les proporciona ventajas cuantitativas respecto a las convencionales, tales como eficiencia, entendida como relación entre rigidez y la masa.

---

<sup>91</sup> Ver Anexo A. Anteproyecto

<sup>92</sup> Ver Anexo A. Anteproyecto

## **4.7 PROCESO DE DISEÑO DE UN PRODUCTO CON BASE EN EL PRINCIPIO CONSTRUCTIVO DE LAS ESTRUCTURAS DE INTEGRIDAD TENSIONAL.**

### **4.7.1 ESTUDIO DEL USUARIO.**

El segmento hacia el cual apunta el producto, corresponde a hombres y mujeres, jóvenes, solteros y seducidos por el diseño, de aproximadamente 22 a 35 años de edad, y de clase socioeconómica media-alta a alta.

Actualmente este sector representa un 44.4% de personas en nuestro país, cifra que muestra una firme tendencia de crecimiento debido a que en el censo de 1993 esta era del 41%<sup>93</sup>. Por lo tanto los nuevos productos deben tener en cuenta el cambio en la realidad demográfica en donde las personas han optado por aplazar la vida de pareja y mantener un hogar unipersonal.

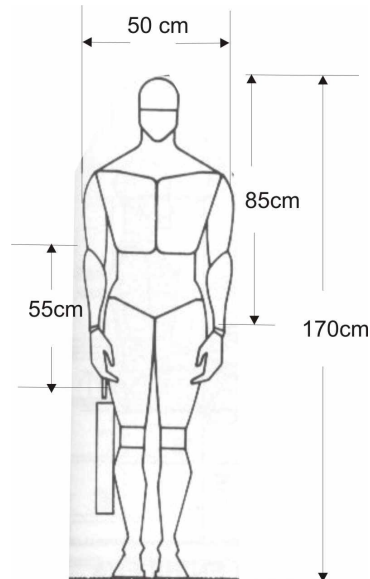
Partiendo del antecedente anterior se evidencia un vacío en el mercado tradicional el cual generalmente apunta a satisfacer las necesidades de familias numerosas, abriendo oportunidades en un nuevo mercado dirigido a hogares unipersonales en el cual sobresale la demanda de finca raíz, mobiliario y electrodomésticos<sup>94</sup>.

Adicionalmente se marca una fuerte tendencia dentro de este sector por identificar el espacio propio con sus pertenencias, generando un ambiente en sus hogares coherente con su personalidad.

---

<sup>93</sup> Ramírez Ospina GL. Creciente soltería cambiara el rumbo del sector. El colombiano. Medellín 2006 9 de Octubre. Sección 1B,

<sup>94</sup> *Ibíd.*



**Figura 7.1 Aspectos antropométricos del usuario.**

**Fuente: Figura modificada por el autor de: Panero, J, Zelnik, M. Las dimensiones humanas en los espacios interiores: estándares antropométricos. México: ED. G Gill. 1991**

#### **4.7.1.1 PERFIL Y COMPORTAMIENTO DE COMPRA.**

Entre otras, las características del segmento seleccionado son:

Profesionales, exitosos, independientes, prácticos, sensibles y aventureros. Muestran agrado por la exclusividad de sus pertenencias, buscan un estilo propio. Generalmente cuentan con estudios superiores, postgrados, etc., y son ejecutivos exitosos o con proyección de empresarios.

Cuentan con un poder de adquisición medio a alto, y en lo posible tratan de hacer y comprar lo que les gusta, “Los jóvenes solteros son propensos a gastar su dinero en renta, mobiliario básico para el hogar, compra y mantenimiento de

automóviles, viajes, diversión, ropa y accesorios. Con frecuencia tienen suficiente dinero para permitirse algunos lujos”<sup>95</sup>.

Frente a la apertura económica y el alto nivel de comunicación y tecnología se abren nuevos estilos de vida en los que se aplazan prioridades anteriormente impuestas por la sociedad como el formar una familia, el matrimonio y el ser empleado, para dar paso a opciones de vida diferentes; Según Rafael España, director económico de FENALCO, “La aspiración de toda persona es independizarse y no necesariamente salir de la casa a casarse”<sup>96</sup>,

“La tendencia a prolongar la decisión de casarse y formar una familia ya no es algo tan inconcebible como hace veinte años. Actualmente, la opción de vivir solo implica invertir en uno mismo y armarse un espacio identificador”<sup>97</sup>.

Estas nuevas opciones de vida implican libertad e independencia, lugares pequeños, ajenos a grandes familias, prácticos y adaptables a los distintos cambios de vida que incluyen poca pertenencia al hogar, que se refleja en el poco tiempo que pasan en el por largos turnos de trabajo, viajes, salidas con amigos o parientes, etc.

"Ellos prefieren vivir en departamento, porque son viajeros y es más seguro. Se preocupan de cocinar, saben de vinos y buscan sentirse reflejados con la decoración. Esto se aprecia no sólo en el diseño, sino también están empezando a invertir en arte”<sup>98</sup>.

---

<sup>95</sup> Shiffman LG., Lazar L. Comportamiento del consumidor: los consumidores y sus entornos sociales y culturales. 5 ed. México, Prentice Hall; 1997. p. 349-406.

<sup>96</sup> Ramírez Op. Cit.

<sup>97</sup> Elisa Cárdenas O. Disponible en [http://www.puntomujer.emol.com/mujer\\_y\\_trabajo/noticia/detallenoticia.asp?id=%7BBF4E74B7-3623-4494-BBA8-DFE14C813778%7D#](http://www.puntomujer.emol.com/mujer_y_trabajo/noticia/detallenoticia.asp?id=%7BBF4E74B7-3623-4494-BBA8-DFE14C813778%7D#)

Con estos cambios de vida en las nuevas generaciones surgen nuevos mercados caracterizados por una gran influencia en aspectos formales de los productos, alto grado de diseño, innovación en materiales y procesos de manufactura, productos prácticos y con un corto ciclo de vida seguido mas por las tendencias de diseño que por la calidad de los materiales, surgen espacios caracterizados por la exclusividad y el buen gusto, con amplias capacidades de evolución por la capacidad adquisitiva de sus miembros y la generación de nuevos nichos.

“Los solteros están cada vez más preocupados de diseñar originalmente sus hogares. El living, comedor y sitios configurados como bar son prioridad de este segmento; son lugares de sociabilidad y que dan una primera imagen del dueño de casa”<sup>99</sup>.

Ante esta nueva ola surgen también nuevos productos que se acomodan a las necesidades de estos mercados, además de materiales y procesos novedosos, se generan necesidades de alta funcionalidad aun en los productos mas básicos del hogar o la sala, los productos deben ser innovadores con alto grado de adaptabilidad, es por esto que surgen muebles adaptables a diferentes espacios o renovables en telas o formas, muebles adaptables para diferentes funciones, etc. “Se puede hablar de una tendencia de diseño para solteros; por lo reducido de los espacios, se hace mucho mueble 'en obra', que se integre al espacio y multifuncional, para meter el bar, el equipo de música y la TV”<sup>100</sup>.

Se destaca también el uso del color y el contraste de materiales y texturas. En general dentro del sector del mueble los materiales mas apetecidos son:<sup>101</sup>

La madera. Cálida, natural, bella y elegante, íntima y acogedora, sana y limpia, vital.

---

<sup>98</sup> Ibíd.  
<sup>99</sup> Ibíd.  
<sup>100</sup> Ibíd.

El acero. Robusto, fuerte y potente, esencial, limpio, frío, tecnológico.

El cristal. Limpio, nítido, transparente, luminoso.

Cerámica. Cálido, antiguo, acogedor, práctico.

Mármol. Bello, elegante, sólido, lujoso.

#### **4.7.2 DEFINICION DEL PROBLEMA.**

Como es presentado en el estudio del usuario, este tipo de consumidor no cuenta con tantas restricciones en su presupuesto y por el contrario esta en la búsqueda de productos que identifiquen su estilo de vida y su personalidad.

Con base en lo anterior se evidencia que el mercado dirigido a este segmento debe mantenerse en continuo cambio, explorando nuevas alternativas que satisfagan al cliente tanto estética como funcionalmente, haciendo énfasis en la practicidad y en la exclusividad.

Así mismo, el estudio del usuario muestra como los lugares de socialización son de primordial importancia dentro de su entorno. Entre estos espacios se encuentra la sala, el comedor y el estudio, lugares que en la actualidad comparten un mismo espacio con la tendencia de vivienda denotada por los Lofts, apartamentos de un solo ambiente, los cuales son de gran aceptación para el usuario de este segmento.

---

<sup>101</sup> España. Ilva polimeri. Un observatorio sobre la evolución del diseño, de la casa y del habitar. Disponible en [http://www.ilvapolimeri.com/Spagna/News\\_osservatorio.htm#casa](http://www.ilvapolimeri.com/Spagna/News_osservatorio.htm#casa)

Las bibliotecas hacen parte de estos lugares y actualmente están subutilizadas debido a la falta de evolución en el diseño formal y funcional. El usuario ve la necesidad de almacenar sus libros en otros lugares donde estos sufren daños por la posición o el hacinamiento en donde se encuentran.

El diseño actual de las bibliotecas en su mayoría, es el convencional, ortogonal, pesado físicamente y visualmente, no apto para cualquier lugar de un apartamento, difíciles de mover, de limpiar, y sin ninguna identidad.

Por lo tanto no se requiere solo un mueble, sino una solución que equilibre la funcionalidad, la practicidad y la estética en un solo producto, que se acople a la personalidad de este usuario con un diseño innovador, enfocándose en la eficiencia, la flexibilidad y la facilidad de manipularlo.

#### 4.7.2.1 ESTADO DEL ARTE

	<b>Empresa</b>	<b>Características</b>
	Quimifierro	Mueble en madera abierto, Dimensiones: 0.90* 1.50 m
	Maderformas	Muebles modulares o compactos en madecor laminado en formica.
	Rimax	Estantería modular en plástico.
	Multiformas	Estantería para libros en madera, 150 * 70 cm.
	De-Colombia	Estantería modular en roble. 150*90 cm.

Cuadro N 1. Estado del arte. Fuente de imágenes: [www.quimifierro.com](http://www.quimifierro.com), Industrias Maderformas, Muebles Rimax, [www.Multiformas.com.co](http://www.Multiformas.com.co), [www.De-colombia.com](http://www.De-colombia.com).

#### 4.7.2.2 REQUERIMIENTOS DEL PRODUCTO.

<b>FACTOR</b>	<b>DEMANDA</b>	<b>DESEO</b>	<b>REQUERIMIENTO</b>
<b>DESEMPEÑO</b>	Capacidad para almacenar sus libros	Que sea liviano Que sea resistente Que tenga gran capacidad de almacenamiento	Soporte máx. 100 Kg. Peso máx. De 30 Kg.
<b>ENTORNO</b>	Que no ocupe mucho espacio.	Que sea flexible.	Que no requiera de un lugar específico (esquinas o paredes) para su ubicación.
<b>ERGONOMIA</b>	Fácil ensamble y limpieza Accesibilidad al mueble		Altura máxima 187.9cm
<b>TAMAÑO</b>	Que utilice de la forma más eficiente el espacio.	Que no sea aparatosa	Disposición no convencional. Medidas: Largo: 80 cm., ancho 100cm. Altura máxima 187.9cm
<b>ESTÉTICA Y FORMA</b>	Diseño innovador.	Que sea exclusiva Que cuente con varios materiales no convencionales. Contraste de materiales y colores. Cambio en la forma.	Forma no convencional. Aplicación de nuevos materiales, plásticos, materiales orgánicos. Colores fuertes.

		Que no parezca una biblioteca.	
<b>MANTENIMIENTO</b>	Que se pueda mover y limpiar fácilmente. Fácil de ensamblar.		Peso de máx. 30 Kg. Máx. 8 pasos para el ensamble.
<b>PROCESOS DE MANUFACTURA</b>	Procesos de producción de alto rendimiento	No requerir de procesos especiales como rectificadas ni tratamientos térmicos.	Reducir al máximo el número de mecanizados y proceso de manufactura.
<b>MATERIALES</b>	Materiales resistentes, a la carga de los libros y otros artículos, resistentes al impacto. Livianos.	Materiales no convencionales.	Acrílicos, bambú, materiales compuestos, aluminio
<b>COMPETENCIA</b>	Que se diferencia fácilmente de las bibliotecas convencionales. Precio competitivo. Concepto innovador.		Aplicación de nuevos conceptos en el diseño. Precio Máx.

Tabla # 24 P.D.S del producto.

### **4.7.3 DISEÑO CONCEPTUAL.**

Según la metodología propuesta se continua con una fase de diseño conceptual en el que se evalúan las funciones del producto a diseñar, las alternativas estructurales y formales según los métodos propuestos y desarrollados durante el postgrado, para realizar una serie de alternativas de diseño, evaluarlas y proceder a la elección de la que mejor cumpla con los requerimientos del usuario. Desarrollarla a fondo, utilizando lo mecanismos de ensamble mas eficientes par alas funciones establecidas, realizar los planos técnicos y proceder a la construcción.

#### **4.7.3.1 PARTICULARIZACIÓN DEL CONCEPTO.**

Con base en el análisis realizado en esta monografía en cuanto a la aplicación de estructuras de integridad tensional a sistemas de soporte, y su eficiencia en términos de su relación rigidez-peso. Se propone como alternativa base para el diseño de la biblioteca una estructura de este tipo.

Al analizar el PDS del producto, toma mas fuerza la aplicación de una estructura de integridad tensional, ya que además de cumplir con los requerimientos de desempeño, es un principio innovador que seguramente será depurado en un diseño novedoso, que permite jugar con todas las variables en términos de material, forma, tamaño, apariencia, etc.

#### 4.7.3.2 ANÁLISIS FUNCIONAL: CAJA NEGRA.

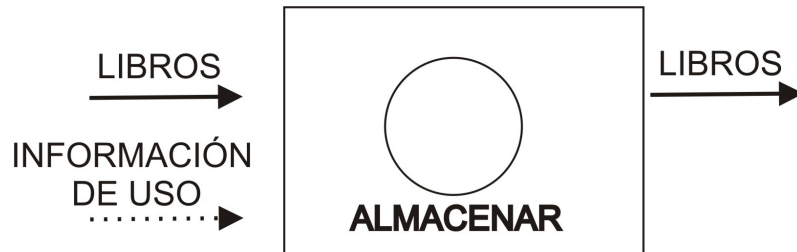


Figura 7.2 Caja negra del producto. Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.3.3 ARBOL DE FUNCIONES

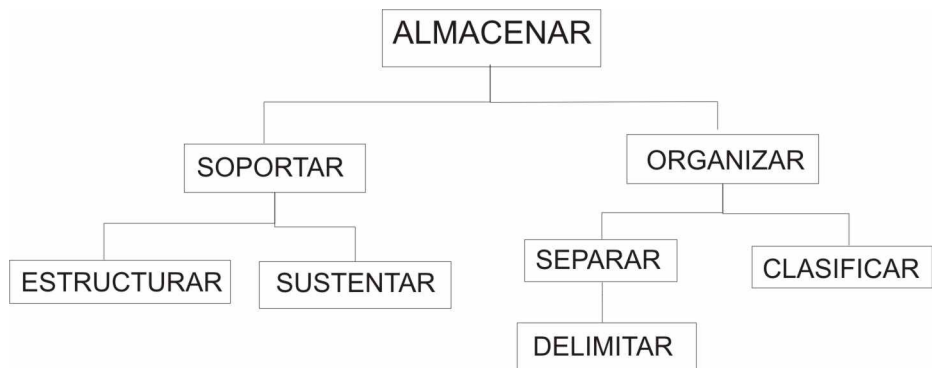


Figura 7.3 Árbol de funciones del producto. Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.3.4 MATRIZ MORFOLOGICA

<b>ESTRUCTURAR</b>		
		
<p><b>Estructura empotrada</b> Fuente: <a href="http://www.hogarmax.com.ar">Http://www.hogarmax.com.ar</a></p>	<p><b>Estructura en Madera</b> Fuente: <a href="http://www.amoblamientosmcg.com.ar">Http://www.amoblamientosmcg.com.ar</a></p>	<p><b>Estructura de integridad tensional.</b> Fuente :Elaboracion propia</p>
<b>SUSTENTAR</b>		
		
<p><b>Superficie tensil.</b> Fuente: <a href="http://www.iaso.es">http://www.iaso.es</a></p>	<p><b>Acrílico</b> Fuente: <a href="http://www.ikarusaudiokit.it">http://www.ikarusaudiokit.it</a></p>	<p><b>Peldaño en Madera</b> Fuente: <a href="http://www.flickr.com/photos/">Http://www.flickr.com/photos/</a></p>
<b>DELIMITAR</b>		
		
<p><b>Separadores de barras</b> Fuente:<a href="http://www.elcompas.com">www.elcompas.com</a></p>	<p><b>Sujetadores horizontales</b> Fuente:<a href="http://www.superrobotica.com">www.superrobotica.com</a></p>	<p><b>Sujetadores verticales</b> Fuente:<a href="http://www.superrobotica.com/">ww.superrobotica.com/</a></p>

**Cuadro # 2. Matriz morfológica. Fuente: Elaboración propia**

## 4.7.3.5 MOOD BOARDS

### 4.7.3.5.1 MOOD BOARD USUARIO

#### MOOD BOARD USUARIO



Figura 7.4 Mood board del usuario. Fuente: modificación de los actores de imágenes obtenidas en: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

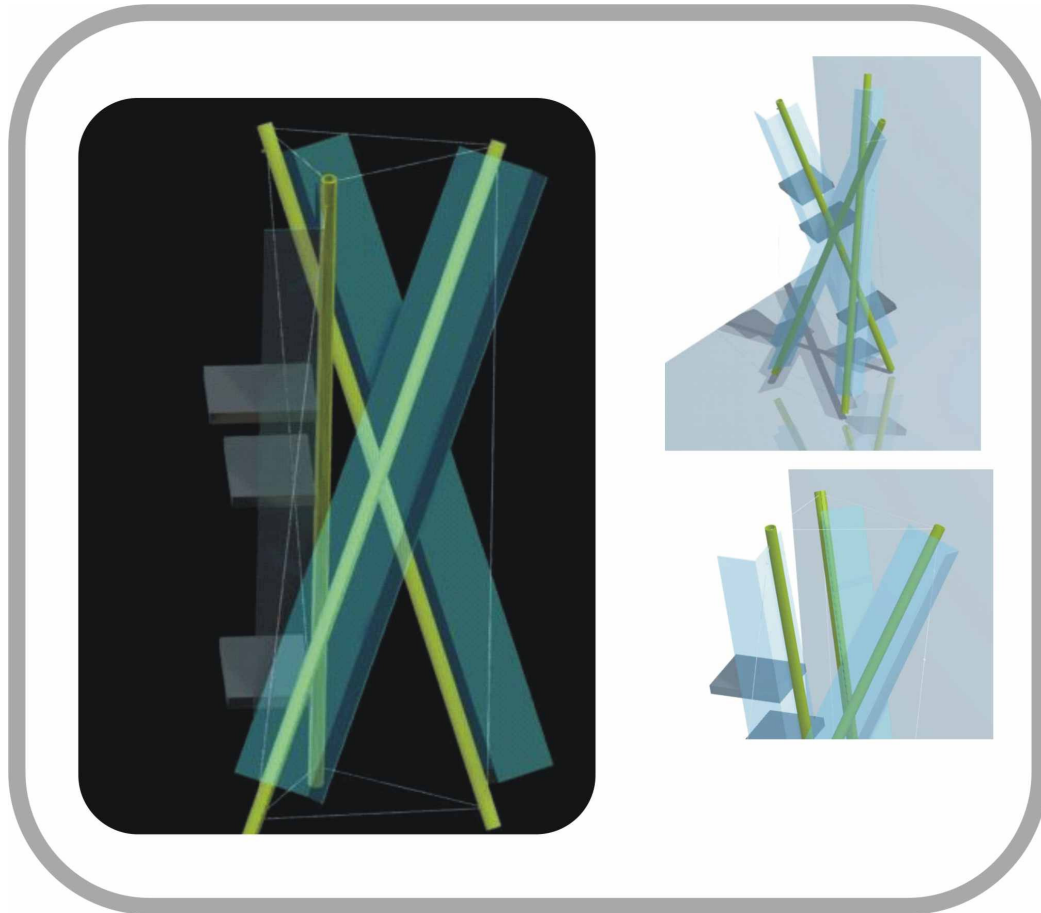
#### 4.7.3.5.2 MOOD BOARD CONTEXTO



Figura 7.5 Mood board del contexto. Fuente: modificación de los actores de imágenes obtenidas en: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

#### 4.7.4 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO

##### ALTERNATIVA No1.

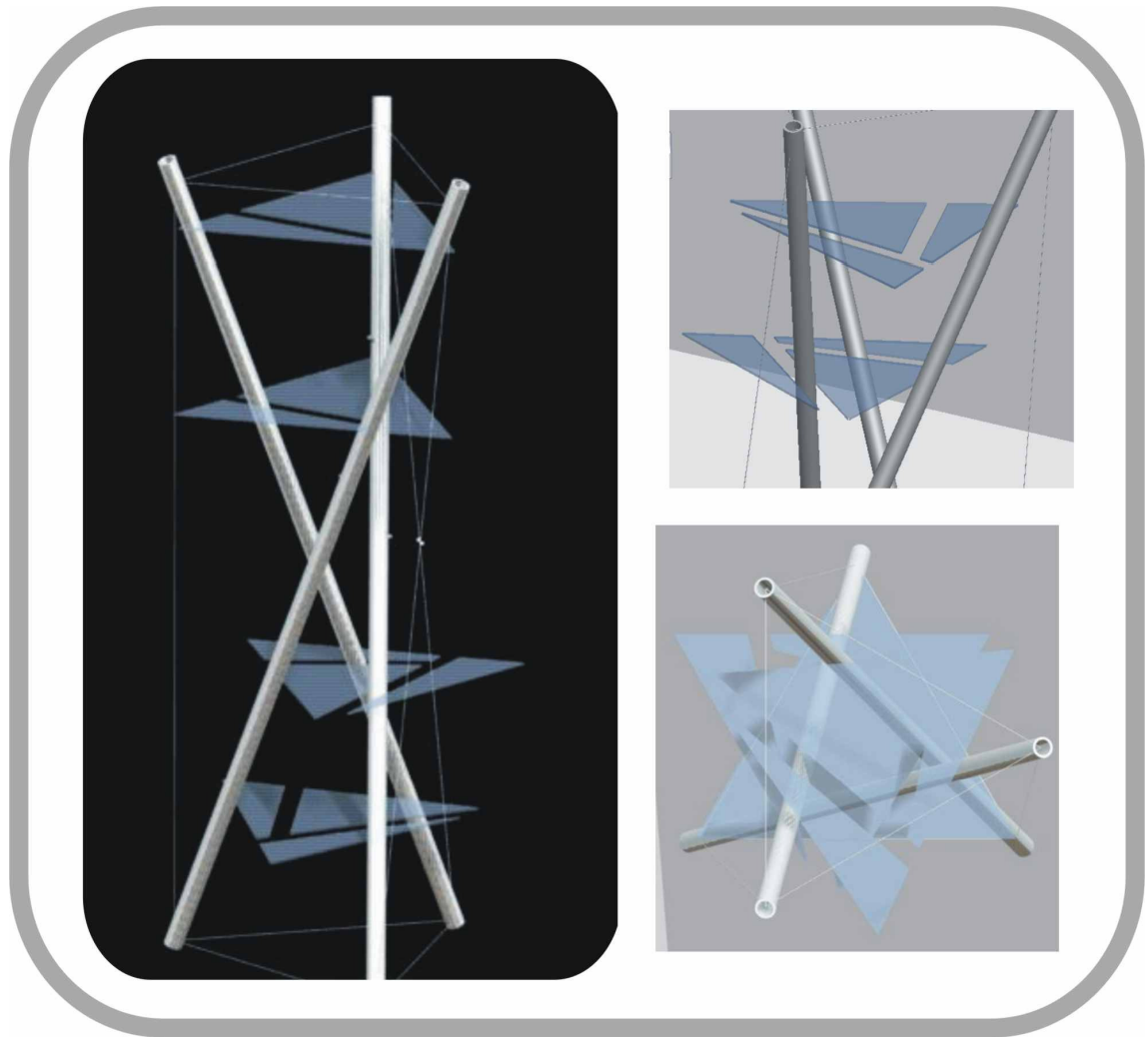


**Figura 7.6 Alternativa de diseño No 1. Fuente: Elaboración propia**

Estructura tipo tensegrity con paneles diagonales dobles en acrílico transparente soportadas con tornillos para ensamble a barras de guadua.

Soporte único para libros de gran tamaño con separadores acoplables según las necesidades del usuario.

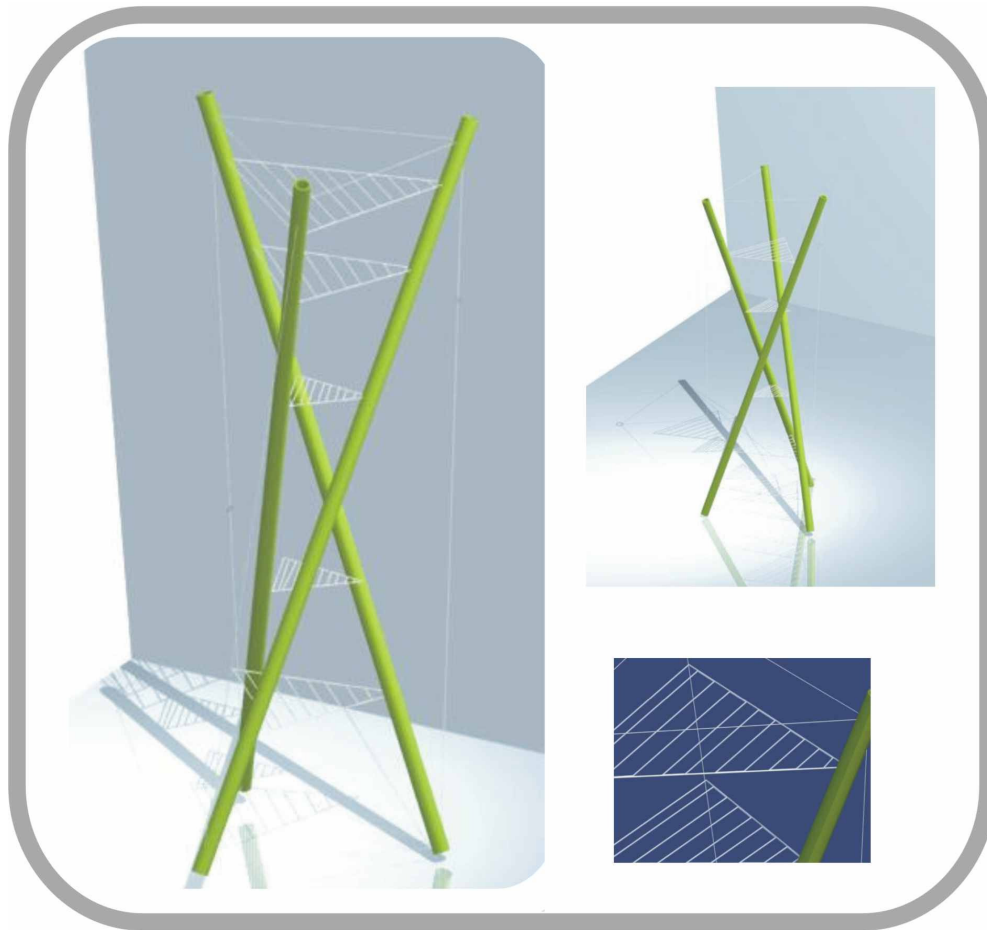
## ALTERNATIVA No 2.



**Figura 7.7 Alternativa de diseño No 2. Fuente: Elaboración propia**

Estructura tipo tensegrity con paneles triangulares dispuestos en forma horizontal sobre perfiles de aluminio circular de 1" de diámetro, cuatro paneles compuestos de tres triángulos internos que forman un triángulo isósceles de 50 cm. de lado. Sostenidos por bujes y espárragos internos que unen las laminas de vidrio templado. La tensegrity esta unida por cables formando los elementos a tensión de la estructura.

### ALTERNATIVA No 3.



**Figura 7.8 Alternativa de diseño No 3. Fuente: Elaboración propia**

Estructura tipo tensegrity con barras de bambú y peldaños en perfiles circulares de aluminio de ¼" formando una red que soportara los libros o elementos que almacenara el usuario. Se compone de 5 peldaños incrustados dentro de la estructura, peldaños de diferentes tamaños variando según la altura de la misma. Altura= 170 cm. Ancho máx. De peldaños, 60 cm.

#### ALTERNATIVA No 4.

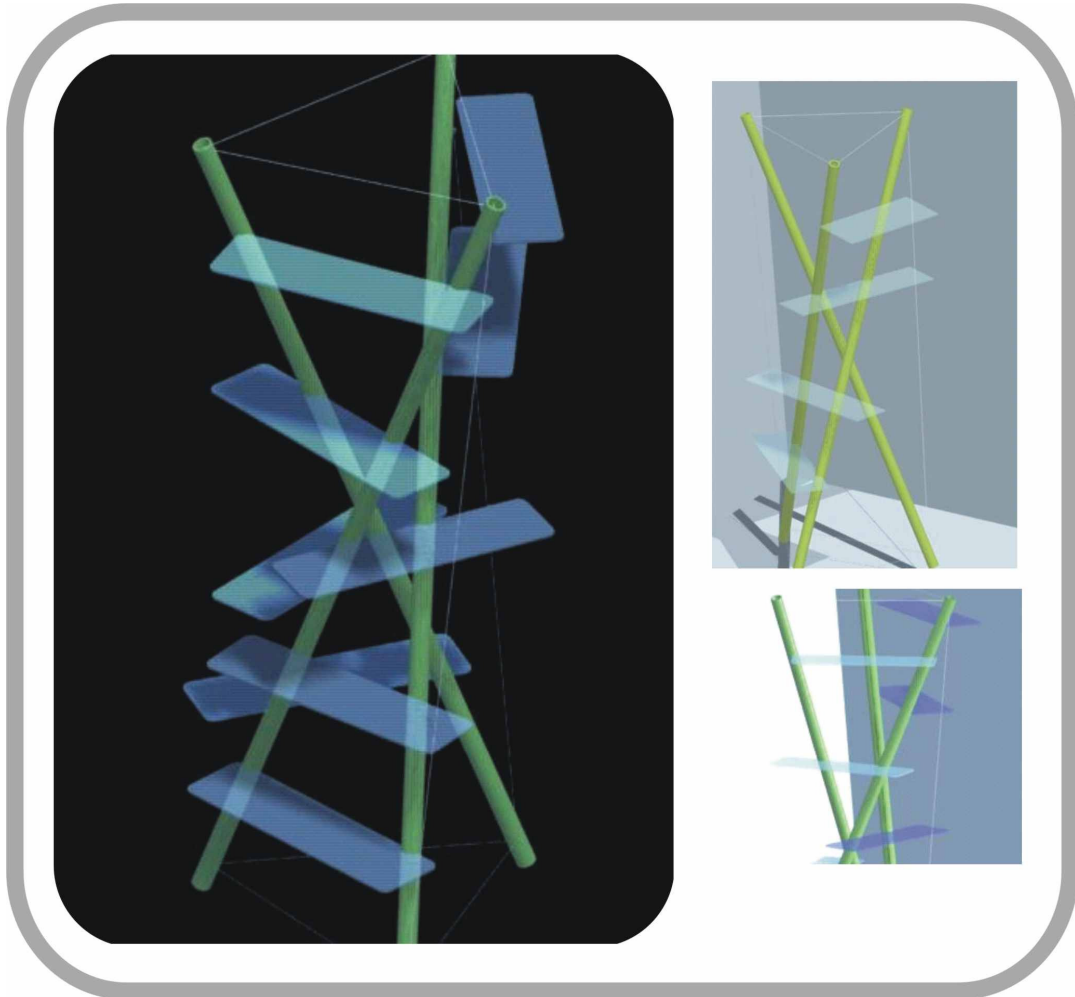
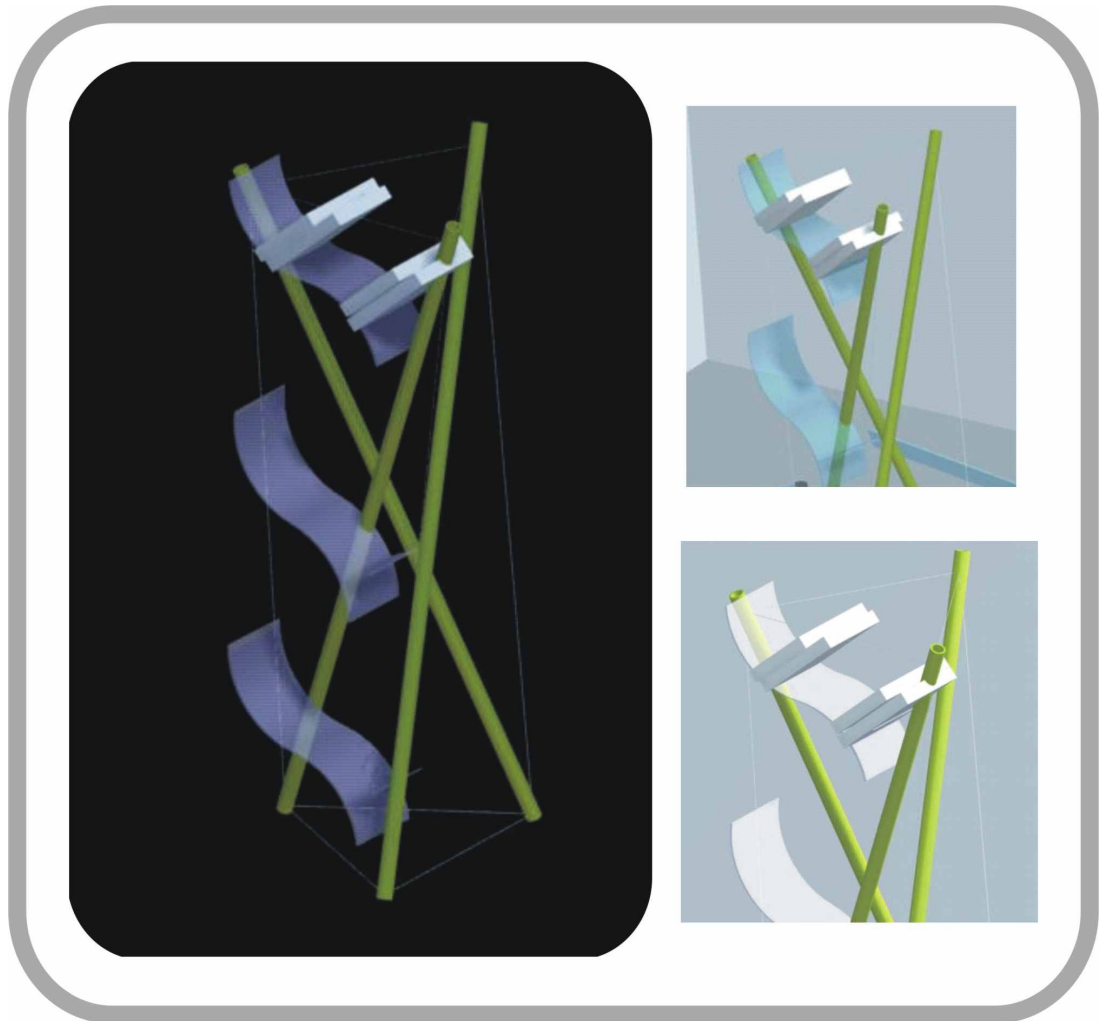


Figura 7.9 Alternativa de diseño No 4. Fuente: Elaboración propia

Estructura tipo tensegrity compuesta por barras de bambú, cables de 1/16" como elementos de tensión y nueve peldaños de acrílico de 55 cm. de largo x 20 cm. de ancho girados en torno a el ángulo de rotación e la estructura en dos lados del triangulo base de la estructuras. Separadores ajustables según necesidades del usuario.

## ALTERNATIVA No 5.



**Figura 7.10 Alternativa de diseño No 5. Fuente: Elaboración propia**

Estructura tipo tensegrity con tres peldaños en acrílico doblado que disponen los libros en forma perpendicular a la curva, brindando formas innovadoras en la disposición de estos elementos.

Barras en bambú y elementos a tracción compuestos por cables.

Peldaños sujetos entre los cables a tensión y las barras de compresión por medio de tornillos de ensamble, bujes y cables sujetos desde el triangulo superior.

#### 4.7.5 MATRIZ DE EVALUACIÓN

Los criterios de evaluación fueron seleccionados según los requerimientos del usuario, y el PDS (numeral 4.7.2.2). Se evaluaron los criterios en términos del cumplimiento de los requerimientos siendo 5 el que más cumple y 1 el menos.

Materiales novedosos: varios materiales no convencionales, contraste en colores, posibilidad de innovación en forma según los materiales. Livianos y resistentes a cargas axiales.

Apariencia: formas no convencionales, esbelta y liviana.

Desempeño: gran capacidad de almacenamiento

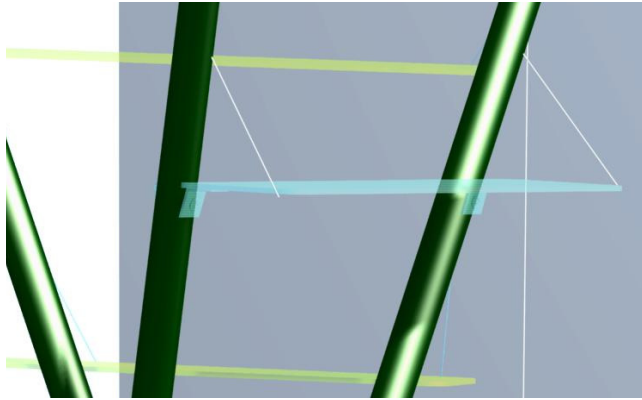
Procesos de manufactura: procesos de producción de alto rendimiento, reducción de mecanizados y procesos de manufactura.

ALTERNATIVA	MATERIALES	APARIENCIA	PROCESOS	DESEMPEÑO	TOTAL
1	2	3	4	4	13
2	2	4	3	2	11
3	4	4	2	2	12
4	4	5	4	4	<b>17</b>
5	4	4	2	3	13

Tabla # 25 Matriz de evaluación

Alternativa seleccionada: Alternativa N 4

#### 4.7.6 DISEÑO DE DETALLE.



Los peldaños se sostiene por medio de cables fijos a las barras de soporte, ubicados cada 15° mm del mismo.

Materiales innovadores y renovables como bambú, nylon, acrílico, ligeros pero resistentes a cargas y al uso pertinente al producto.

Figura 7.11 Detalle de peldaño. Fuente: Elaboración propia

En la parte inferior van sujetos con ángulos en acrílico, uniendo las barras y los peldaños y donde soporte base para los libros, estos ángulos están ensamblados por medio de tornillos M8<sup>102</sup>.

Posee nueve peldaños que envuelven formalmente la estructura y la recorren en su giro de 150° por dos superficies del triángulo. Estas dos superficies son diferenciadas por colores distintivos para dar más orden a la estructura.

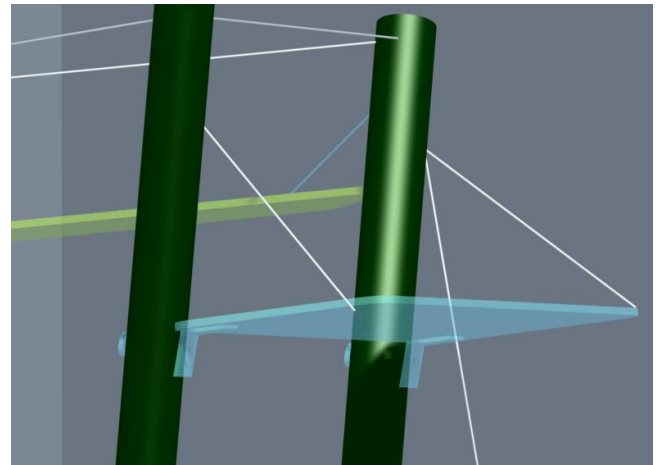
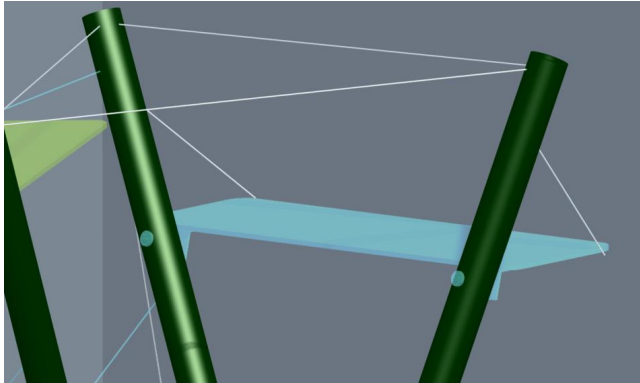


Figura 7.12 Detalle de sujeción. Fuente: Elaboración propia

<sup>102</sup> ver anexo D. Planos de construcción.



Ensamble sencillo con tornillos de ensamble, tuercas y terminales de guaya para los cables a tracción.

Figura 7.13 Detalle de sujeción 2. Fuente: Elaboración propia

Elementos separadores de acrílico, que impiden que los libros sufran algún peligro ante fuerzas involuntarias y separan adecuadamente algún material específico del usuario, que se necesite clasificar u ordenar.

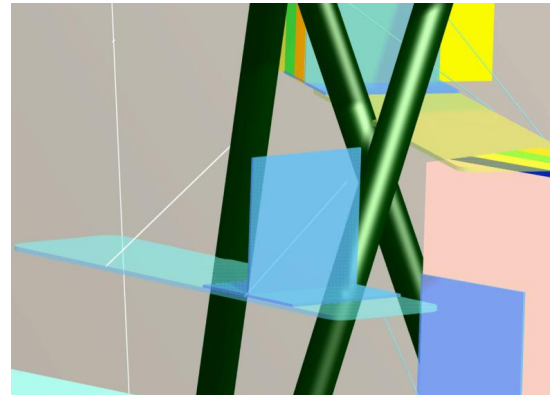


Figura 7.14 Separador Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.6.1 MODELACIÓN.

##### 4.7.6.1.1 COMPONENTES

- **Barras.**



Figura 7.15 Barras de la estructura. Fuente: Elaboración propia

Construidas en Bambú, con una longitud de 170 cm. y diámetro aproximado de 4 cm.

- **Peldaños.**

Construidos en acrílico, medidas externas: ancho: 22cm, Largo: 55cm, espesor 5mm.

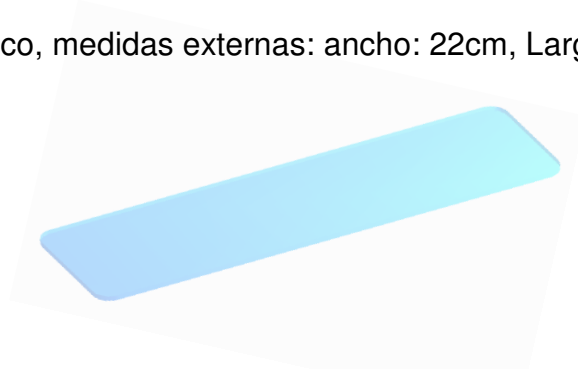


Figura 7.16 Peldaños. Fuente: Elaboración propia

- **Ángulos de sujeción.**

Construidos en acrílico con agujeros para la inserción de tornillos y sistema de ajuste y refuerzo entre los peldaños y el bambú.



Figura 7.17 Ángulos de sujeción. Fuente: Elaboración propia.

- **Separadores.**

Separadores para organizar y dividir los espacios dentro de la biblioteca, construidos en acrílico de diversos colores.

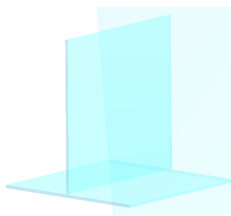


Figura 7.18 Separadores. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.7.6.1.2 RENDER.

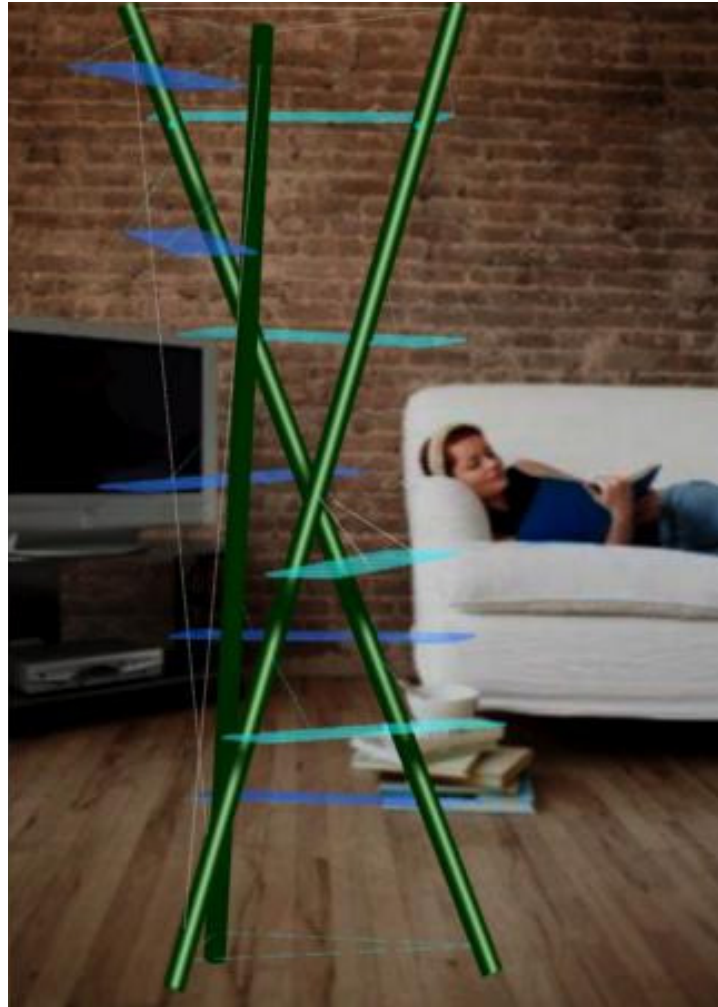


Figura 7.19 Producto en contexto. Fuente: Elaboración propia

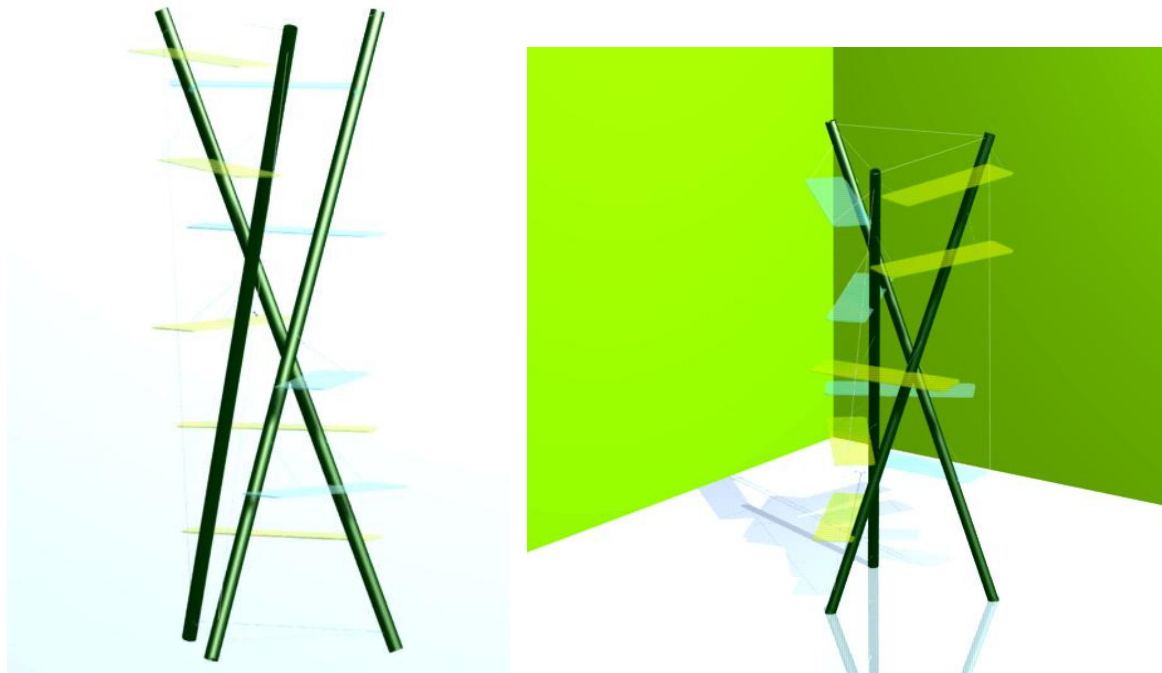


Figura 7.20 Isométricos del producto. Fuente: Elaboración propia

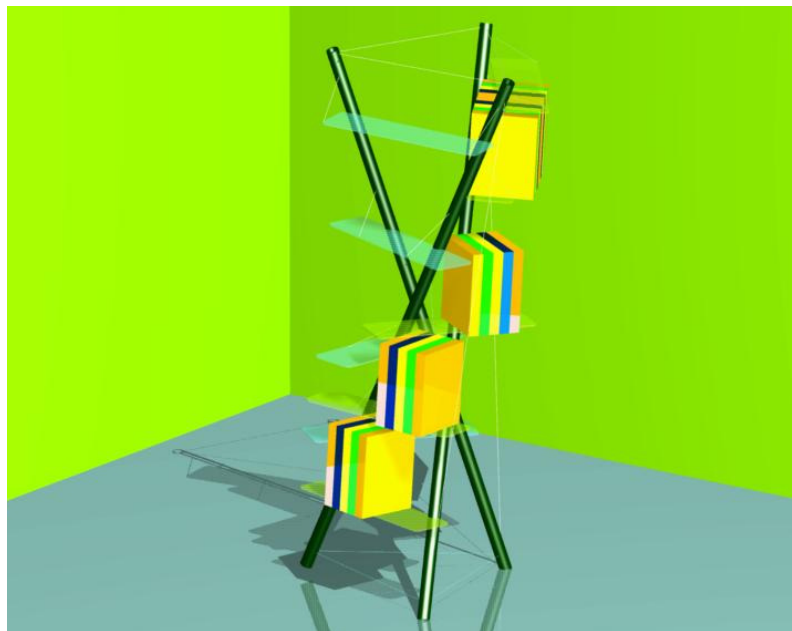


Figura 7.21 Biblioteca en uso. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.22 Biblioteca en Contexto. Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.7.7 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Aunque en el anteproyecto no se había planteado el diseño de un producto como fruto de este estudio, se consideró pertinente la realización del mismo, dado que con éste, se cierra de manera coherente el proceso de diseño planteado en este

trabajo. Por ello, se propone el diseño de un mueble partiendo del referente formal y funcional obtenido del proceso de diseño propuesto. Este producto conserva los elementos esenciales del concepto de estructura de integridad tensional en el cuales esta inspirado, es decir, resistencia y bajo peso. Además se ha introducido un elemento esencial en desarrollo de un producto como es la forma enmarcada en el entorno y en el usuario.





Formato de Presentación de Propuestas de Investigación con Financiación Interna

Grupo de Investigación	Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño
Persona Contacto	Santiago Correa Velez
E-mail	scorrea@eafit.edu.co
Teléfono	25195000 ext 963

**Resumen del Proyecto**

La biónica es una metodología que busca aplicar soluciones descritas en la naturaleza al desarrollo de nuevas tecnologías. Esto lo realiza por medio de analogías biológicas, que apuntan a la abstracción de soluciones conceptuales, con base en los principios funcionales de un sistema natural.

Ante fundamentos internos de la universidad y demanda creciente de métodos y aplicaciones en investigación, la biónica aplica a una lista de soluciones ante una lista de problemas en campos como la ingeniería, mecanismos, estructuras, constructores formales, métodos de diseño, planeación, gestión y organización de sistemas, etc. Siendo una herramienta útil y eficiente para desarrollar aptitudes propias del perfil del ingeniero de diseño de producto que se plantea dentro del departamento, a nivel de desarrollar cualidades relacionadas al ser mismo, al entorno y a la función.

Por lo tanto es evidente la aplicabilidad de esta herramienta para el diseño y desarrollo de productos a nivel formal y sobretodo funcional, complementada con metodologías propias de la Ingeniería de Diseño como el diseño conceptual, el análisis de estructuras, etc. Desarrollando una estrategia y una metodología con base en la biónica que permita optimizar el proceso de abstracción de una solución dentro de la ingeniería se encontraría un método esencial, probado dentro de varias universidades y empresas a nivel mundial con excelente resultados, que contribuiría a la formación propia del ingeniero de diseño, enfocada a la investigación y a la solución de problemas desde distintos ámbitos.

Se pretende entonces desarrollar, probar y aplicar una metodología que involucre la biónica, la ingeniería y el diseño hacia un enfoque investigativo que conduzca a la solución de problemas y el desarrollo de métodos eficaces de diseño dentro de la ingeniería de diseño de producto y el estudiante mismo.

No solo se pretende el desarrollo y la aplicación de una metodología, sino también abordar temas específicos de investigación que aporten mecanismos y soluciones aplicables al ingeniero de diseño y al estudiante mediante seminarios, actividades y charlas que conduzcan a nuevas alternativas de desarrollo de producto y nuevas tecnologías en temas como estructuras ligeras, geometría fractal, bioestructuras, Superficies estructurales y estructuras mínimas, líneas de pensamiento, mecanismos de ahorro y eficiencia, genes formales en la naturaleza, biogenética: principios de autoorganización, etc.

<b>Palabras clave:</b>	
Biónica	Innovación
Eficiencia	Diseño
Ingeniería	Metodología de diseño
Analogías	Investigación
Optimización	Conceptualización

<b>Programa Nacional de Ciencia y Tecnología sugerido:</b>	
<input type="checkbox"/> Ciencias y Tecnología de la salud	<input type="checkbox"/> Ciencias Sociales y Humanas:
<input type="checkbox"/> Ciencias Básicas	<input checked="" type="checkbox"/> Desarrollo Tecnológico Industrial y Calidad:

<input type="checkbox"/> Ciencias y Tecnología del Mar	<input type="checkbox"/> Ciencias del Medio Ambiente y Hábitat
<input type="checkbox"/> Estudios Científicos de la Educación:	<input type="checkbox"/> Ciencia y Tecnologías Agropecuarias:
<input type="checkbox"/> Biotecnología:	<input type="checkbox"/> Investigaciones en Energía y Minería:

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### Planteamiento del problema

Dentro de los alcances educativos de la Universidad EAFIT se han postulado los programas de investigación como fundamentos propios y soporte básico del conocimiento intelectual expresados en los propósitos institucionales como el deber de, entre otros, *“Preservar la excelencia en sus procesos de enseñanza-aprendizaje, investigación y proyección social”* y *“conservar el reconocimiento de la comunidad académica nacional e internacional para sus investigaciones y diseñar los programas de formación”*<sup>1</sup> y en la misión como:

*“La Universidad EAFIT, inspirada en los más altos valores espirituales, en el respeto de la dignidad del ser humano y consciente de su responsabilidad social, aspira a ser reconocida nacional e internacionalmente, por sus logros académicos e investigativos y porque:*

*Desarrollará la capacidad intelectual de sus alumnos y profesores en todos los programas académicos, con la investigación como soporte básico.*

*Contribuirá al progreso de la Nación con programas innovativos de investigación y profesionales con formación académica respaldada en los valores fundamentales de la persona y en especial en el respeto a la democracia y a la libre iniciativa privada”*<sup>2</sup>.

Estos principios direccionan las actividades, seminarios y grupos de investigación que se realizan dentro de la universidad (contando ahora con 40 grupos de investigación, 35 de ellos reconocidos por coediciones<sup>3</sup>) y fundamentan las políticas implementadas para el apoyo de esta clase de proyectos enfocados al mejoramiento continuo del conocimiento de los docentes, estudiantes y por consiguiente de los programas académicos. Dentro de estos fundamentos el programa de Ingeniería de Diseño de Producto ha comenzado a implementar estos lineamientos, proponiendo como punto de partida el seminario de investigación HECAS-ID (Herramientas para el cálculo y simulación en Ingeniería de Diseño) que complementa la formación académica de los estudiantes y los docentes en diversas áreas de la Ingeniería de Diseño y la conformación del grupo mismo del departamento GRID (Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño) con diversas líneas de investigación que involucran estudiantes, docentes y egresados del programa.

En el momento en el que la tecnología evoluciona rápidamente en las diferentes disciplinas del saber, es que el diseño se ve implícito en cada uno de los productos y la innovación es una herramienta

<sup>1</sup> Propósitos institucionales. Universidad EAFIT. Reglamento universitario.

<sup>2</sup> Misión Universidad EAFIT. Reglamento universitario.

<sup>3</sup> Fuente: Página [web](http://www.eafit.edu.co/Eafit/ConInvestigacion/index) de la Universidad EAFIT - <http://www.eafit.edu.co/Eafit/ConInvestigacion/index>

Fundamental para el desarrollo de procesos en todas las áreas de conocimiento, la investigación se convierte en un pilar básico para la búsqueda continua de métodos, fundamentos y principios elementales que soporten dicha evolución. Dicho esto, cabe resaltar que el futuro de la investigación actualmente radica en el desarrollo de convergencias disciplinares. El diseño no escapa a esta tendencia. La ingeniería y la biología han encontrado un punto de convergencia y de él han surgido una nueva disciplina: la biónica.

La biónica es una ciencia basada en una técnica analógica que toma como objeto de estudio la fisiología, el comportamiento y los procesos biológicos de sistemas y seres naturales, para aplicar los principios de su funcionamiento al desarrollo de soluciones tecnológicas. Este aprendizaje que obtiene el hombre a través de la observación de la naturaleza tiene como mayor reto su uso en la producción de diseños cotidianos, adicionándole una característica que es inherente a todas las soluciones abstraídas de la biónica, la innovación. Esta ciencia ha sido precursora de un gran conocimiento científico ha ayudado al desarrollo tecnológico de varios siglos como medio para excavar en la naturaleza mecanismos y estructuras que sirven de soporte a nuevos desarrollos aplicados a productos de alta ingeniería.

Teniendo como base los antecedentes mencionados, la biónica es una disciplina que integra la investigación con una técnica para el desarrollo de soluciones. Por lo tanto se hace necesario profundizar en esta metodología, y en su aplicación dentro del pregrado de Ingeniería de Diseño de Producto, como una herramienta de innovación que genere nuevos conocimientos dentro del diseño con base en el análisis de elementos tomados de la naturaleza, y con miras a ser competitivos en un campo que actualmente ha generado cuantiosos desarrollos y que gracias a las virtudes que ofrece ha sido implementada en grandes universidades y centros de investigación a nivel nacional e internacional.

La pregunta de investigación que se desea responder es: *¿Será posible implementar y probar una metodología de diseño basada en la biónica para sustentar el desarrollo de productos y tecnologías innovadoras en el sector de estructuras livianas para cubiertas y carpas.*

**Objetivo general**

Implementar y probar una metodología de diseño sustentada en la biónica como herramienta para el desarrollo de productos y tecnologías innovadoras, funcionales y eficientes en el área o sector de estructuras livianas para cubiertas y carpas.

**Objetivos específicos**

Implementar una metodología de diseño que involucre la ingeniería y la ciencia como punto de partida para la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras en el área de estructuras livianas para cubiertas y carpas.

Aplicar la metodología en el diseño de productos del sector de estructuras livianas para cubiertas y carpas, proponiendo especificaciones de diseño cuantificables que permitan establecer parámetros de evaluación para la metodología propuesta.

Construir modelos funcionales fruto de la aplicación de la metodología de diseño.

Cuantificar el grado de cumplimiento de las especificaciones de diseño en los modelos funcionales propuestos.

**Marco teórico y estado del arte**

La naturaleza ha desarrollado desde sus orígenes una infinidad de materiales, procesos, estructuras y estrategias que han demostrado su efectividad.<sup>4</sup> Los sobrevivientes de la selección natural pueden demostrar como lograron con diferentes características de adaptación, aprendizaje, autoorganización, autoreparación, etc. continuar poblando este planeta.

Como su nombre claramente lo indica la biónica es una combinación entre BIO, que significa vida y el sufijo NICA de la palabra técnica, es una metodología que busca aplicar soluciones encontradas en la naturaleza al desarrollo de nuevas tecnologías por medio de analogías biológicas, que apuntan a la abstracción de soluciones conceptuales, la técnica analógica no es una simple emulación textual de un referente biológico. Se trata de abstraer con base en el pensamiento analógico los principios de funcionamiento, morfológicos y estructurales de estos, por medio de un análisis que tiene como resultado soluciones conceptuales, las cuales son la plataforma de diseño de productos.

La forma, los mecanismos, la estructura y el entorno constituye los elementos de análisis de un sistema natural. Estos elementos están directamente relacionados, y dependiendo de las características adaptativas que deba adoptar para su supervivencia en un contexto dado, sufren modificaciones que especializan los procesos y funciones requeridas respecto a las condiciones del medio.

Dentro de las soluciones más comunes que se encuentran en la naturaleza está la flexibilidad, el ahorro de energía, lo máximo en lo mínimo, el todo es más que la suma de las partes, el aligeramiento y la forma como elemento funcional y estructural<sup>5</sup>. Por lo tanto es evidente que la aplicación de estas cualidades que ofrece la gran diversidad de sistemas naturales que coexisten en el planeta, permite construir un modelo óptimo, económico y armonioso; orientado a obtener soluciones y productos que faciliten la vida humana. Generalmente este tipo de soluciones no han sido exploradas, por lo tanto no cuentan con una explicación que justifique el modelo encontrado. Cuando esto sucede es el mismo modelo el que se asume como fundamento.

Por lo tanto aplicar la metodología de la biónica al diseño y desarrollo de productos, implica romper paradigmas y explorar nuevas soluciones formales y funcionales para los problemas y necesidades del día a día. En el momento en que en el mundo se habla fuertemente del diseño, con énfasis en la innovación, la eficiencia, la sostenibilidad, etc. esta metodología aporta todo el conocimiento que la sabia naturaleza ha adquirido en los miles de años de su existencia a una dinámica de búsqueda de nuevas propuestas que tiene su base en la investigación y el análisis.

Esta metodología, complementada con los fundamentos de diseño conceptual aprendidos durante el pregrado, incluyendo el estudio del usuario basado en las características del contexto y del estudio del arte de productos similares, como condicionantes de los requerimientos para el diseño de productos.

Con base en lo anterior vemos como la fusión reducida en una metodología aplicable en Ingeniería de diseño ya que se fundamenta en tres elementos claves. La naturaleza como fuente de inspiración, conceptualizada posteriormente por una técnica analógica de la cual se obtengan soluciones innovadoras y superiores a las convencionales. La Ingeniería, aportando sus fundamentos de carácter técnico-funcional con herramientas como el diseño conceptual que depura la idea inicial y la traduce en un objeto funcional. Y en tercer lugar, pero siendo un elemento primordial es el diseño, el usuario, que es

isa, aprovecha y estrota el producto, convirtiéndose en el eje e entorno al cual gira todo lo demás.

Desde el año 1500 el hombre ya se había preocupado por explorar y comprender el funcionamiento de los seres vivientes, comenzando con Leonardo Da Vinci con su diseño de un aparato volador llamado "ornitóptero" concebido desde el análisis y estudio de las alas del maripolago. En esta misma época el ingeniero suizo Georges de Mestral cerca de 1948 al analizar la planta de la bardana y como las semillas con pequeños cardos se adherían a la ropa, construyó un cierre utilizado hoy en día en miles de productos. Más tarde, el arquitecto español Antoni Gaudí, basándose en formas y estructuras naturales realizó composiciones arquitectónicas extraordinarias admiradas hoy en día por su perfección. Actualmente algunas cortinas antoimplantes de los rascacielos de Nueva York imitan el párpado y el ojo humano. La columna vertebral humana ha sido tan analizada y estudiada, que, con base en ella se ha construido "Torso", un edificio diseñado por el arquitecto español Santiago Calatrava el cual imitando el movimiento de torsión de la espalda humana se retorce sobre sí mismo dando un giro de 90 grados desde su base hasta la planta más alta, o el auto biológico desarrollado por Mercedes Benz en el último año e inspirado en el Box F1, con componentes estructurales que evidencian mayor eficiencia que un automóvil convencional en cuanto a resistencia estructural, economía y propiedades aerodinámicas.

En cuanto a grupos de investigación, se encuentra un gran número solo en Colombia, dentro de universidades públicas y privadas como la Universidad Pontificia Bolivariana que trabaja hace varios años en la estructuración del grupo de investigación en biología aplicado a Morfología experimental con resultados en productos específicos y publicaciones en revistas y libros acerca de diversos temas como estructuras ligeras, y manual de la biología (en construcción), dentro de la facultad de diseño, o la Universidad de los Andes en Bogotá que forma un grupo con énfasis en nuevos materiales, también dentro de la facultad de diseño, todos estos soportados en líneas de énfasis o asignaturas específicas orientadas en la biología como parte del diseño industrial.

A nivel internacional el Instituto Europeo de Diseño con Maestrías y Posgrados en biología ha contribuido a la formación de diseñadores en cuanto al tema, con grandes resultados proyectados a formación de empresas que innovan a partir de la biología como metodología de desarrollo de productos<sup>3</sup> y proyectos desarrollados para empresas como Fiat, 3M, SONY, etc. Con soluciones eficientes e innovadoras aplicadas a productos.

Esta ciencia ha sido persora de un gran conocimiento científico, y ha ayudado al desarrollo tecnológico de varios siglos como medio para excavar en la naturaleza mecanismos y estructuras que sirven de soporte a nuevos desarrollos aplicados a productos de alta ingeniería.

#### Justificación

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados anteriormente se hace evidente la necesidad de sustentar la base de la ingeniería y el diseño en el fortalecimiento de la investigación científica, profundizando en conocimientos interdisciplinarios que converjan entre sí, y que apoyen la búsqueda de soluciones innovadoras a las necesidades actuales en términos de productos y procesos, ya que los encontramos en un universo de desarrollos tecnológicos cada vez más complejos los cuales deben ser comprendidos y por lo tanto se requiere una actualización de conocimiento permanente.

<sup>3</sup> La biología es una ciencia que examina sistemáticamente las posibles transposiciones de mecanismos naturales y procesos biológicos a la tecnología humana<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> El caso de *Quero Innovato*, empresa italiana que trabaja con la técnica como metodología de investigación para el desarrollo de soluciones y aplicaciones en productos.

Esta definición sustenta la hipótesis de la aplicación de la biónica como metodología de diseño, puesto que toma elementos de sistemas naturales analizando aspectos como forma, mecanismos, entorno y estructura con el fin de aplicarlos a desarrollos técnicos y conceptuales para innovar en el diseño de productos, involucrando otras diferentes ciencias como las matemáticas, la física y la biología como herramientas de dichos desarrollos.

Al respecto, la aplicación de la biónica en el desarrollo de productos, puede suponer grandes ventajas, entre las cuales se destacan:

- La biónica con frecuencia propone soluciones no viables con la tecnología disponible, por lo que se hace necesario desarrollar nueva tecnología y de esta manera se genera auténtica innovación.<sup>9</sup>
- Las soluciones que la biónica propone son de carácter general y sistémico, y por lo tanto no se aplican a un problema específico sino a un género de problemas o producen sistemas más que soluciones particulares, siendo por esto muy versátiles y adaptables.<sup>9</sup>
- Las analogías empleadas producen soluciones que la mayoría de las veces no recordadas de forma evidente al punto de partida natural, ya que son una interpretación de éste.<sup>10</sup>

Dicha hipótesis pretende sustentar la biónica como fuente de innovación en el desarrollo de nuevas tecnologías y por lo tanto puede convertirse en una herramienta eficiente para el desarrollo de nuevos productos dentro de la ingeniería, puesto que después de su análisis se pueden obtener diferentes soluciones con combinaciones de mecanismos múltiples que sirven de punto de partida para este fin. Además de tener como base una metodología que en las manos de un ingeniero de diseño de producto podría tener grandes beneficios en desarrollo de proyectos, avances en conocimiento científico y desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a determinado número de productos.

**Metodología**

Esta metodología describe tres elementos claves para el diseño los cuales son, la Naturaleza como fuente de inspiración, conceptualizada posteriormente por una técnica analógica de la cual se obtengan soluciones innovadoras y superiores a las convencionales. La Ingeniería, aportando sus fundamentos de carácter técnico-funcional con herramientas como el diseño conceptual que depura la idea inicial y la traduce en objeto funcional. Y en tercer lugar, pero siendo el elemento primordial es el diseño, el Usuario. Quien usa, aprovecha y crea el producto, convirtiéndose en el eje entorno al cual gira todo lo demás.

Analizar un problema desde la biónica puede hacerse de dos formas. La primera es partir de un problema específico, y con base en las características de este, buscar soluciones aproximadas en la naturaleza para

<sup>9</sup> Murgado A. Bionica: el arte de copiar a la naturaleza. [www.ingenio.com](http://www.ingenio.com). Disponible en

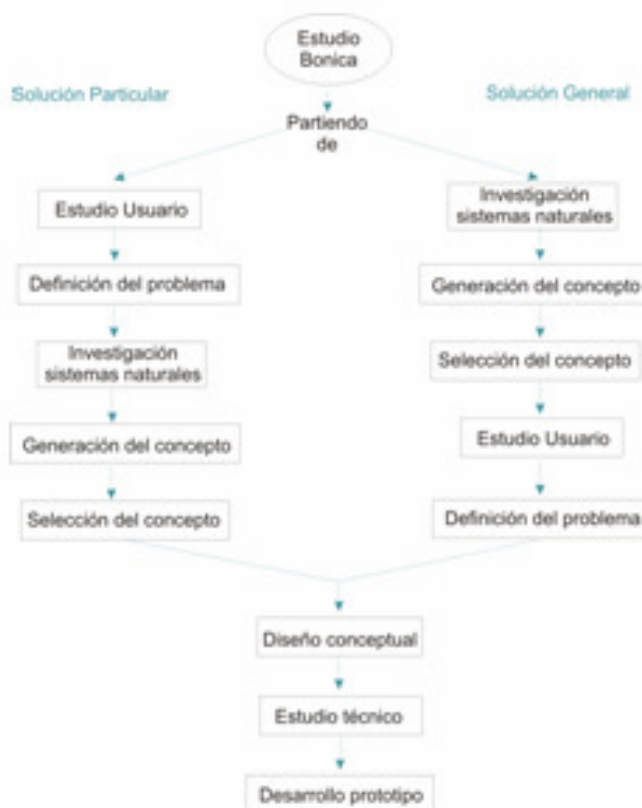
[http://webdianlog.blogspot.com/2009/08/01\\_webdianlog\\_archivo.html](http://webdianlog.blogspot.com/2009/08/01_webdianlog_archivo.html)

<sup>10</sup> Sierra Rodríguez P., Señado LG., [www.ingenio.com](http://www.ingenio.com). Estructuras ligeras: ¿Por qué mirar a la naturaleza?, Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2008. 13 p.

<sup>11</sup> [www.ingenio.com](http://www.ingenio.com).

<sup>12</sup> [www.ingenio.com](http://www.ingenio.com).

su posterior estudio. La segunda opción, es estudiar bases biológicas que ofrezcan soluciones generales las cuales pueden ser adaptadas en soluciones particulares para problemas específicos. Por lo tanto se plantea la siguiente metodología de trabajo.



**DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA A UTILIZAR.**

**1. Investigación de sistemas naturales.**

Etapa que comprende una investigación profunda de diferentes sistemas biológicos que crean con potencial para encontrar soluciones innovadoras. Esta investigación analiza los seres de una forma general hasta llegar a lo específico, sus especializaciones. Estas especializaciones son condiciones que hacen único a cada sistema y se le pueden hacer abstracciones de tipo morfológico, funcional, estructural y contextual; los cuales son los elementos de análisis: Forma, Mecanismos, Estructuras y Entorno.

**2. Generación del concepto.**

Etapa de abstracción de un principio de solución, donde se busca llegar a una aproximación tecnológica, funcional y formal de un producto. En esta etapa se analiza el sistema natural en términos solamente conceptuales utilizando como base el pensamiento analógico.

3. Selección del concepto.

Con base en las dos etapas anteriores se selecciona un concepto que contenga un principio de solución que euidencie en el innovación y optimización.

4. Estudio Usuario.

El estudio del usuario comprende la relación Hombre, Artefacto, Contexto incluyendo un estudio de las necesidades del usuario en términos de su contexto y los productos existentes con similitud en función.

5. Definición del problema.

Etapa en la que se establece la necesidad específica a solucionar con base en el concepto seleccionado y los requerimientos del usuario. En este punto se expone específicamente lo que se va a hacer con énfasis en la carencia que ocasiona el problema de diseño. Se debe retomar el estudio del estado del arte con el fin de evidenciar porque la situación estudiada requiere una solución u optimización; y finaliza con una lista de requerimientos técnicos con los cuales debe cumplir el producto.

6. Diseño conceptual.

Proceso de diseño en el cual se realiza un estudio de los requerimientos y una abstracción de la función principal con el fin de generar alternativas de solución de tipo esquemático. El análisis funcional se realiza por medio de cajas negras y una estructura funcional. Posteriormente se realiza la selección de la alternativa más eficiente.

7. Estudio técnico.

Etapa de diseño de detalle y de pruebas pertinentes y culmina con la modelación del prototipo y la elaboración de planos para su construcción.

8. Construcción prototipo.

Observaciones adicionales

Lista de anexos

Actividad	Meses en que se desarrollará la actividad											Resultado Esperado		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Plantear una metodología de diseño que incluya la Ingeniería con el estudio de la biblioteca para el desarrollo de nuevos productos y servicios.													Producto de formación.	Descripción del Resultado Metodología de diseño para Ingeniería basada en la biblioteca.
Convocar a la empresa privada (pre-seleccionada), para que se vincule al proyecto de Investigación, acordando conjuntamente los términos del alcance del mismo, según las necesidades de la empresa.			X	X									Sin producto.	Financiación y desarrollo de nuevos productos.
Generar el programa con base en la metodología de diseño, orientado a la Investigación con fines de desarrollo tecnológico para			X	X									Producto de formación.	Plan de desarrollo de productos bajo la metodología ya seleccionada.

✳ Escribe si hay un tipo de producto asociado a este resultado. Ten en cuenta los siguientes criterios:

- Producción que genere nuevo conocimiento. Artículos de investigación, libros de investigación, capítulos de libros, producciones o procesos tecnológicos mejorados o patentados, producciones o procesos tecnológicos no patentados o protegidos por secreto industrial, memoria basadas en resultados de investigación.
- Producción de formación: Tesis y trabajos de grado de integrantes del grupo o asociados, vinculación de jóvenes investigadores, formación de asistentes de investigación, desarrollo de programas académicos (doctorado, maestría o pregrado), desarrollo de cursos para docentes o maestría, cursos de extensión.
- Producción de divulgación: conferencias y servicios técnicos, artículo publicado en revistas de divulgación, cartilla, libro de divulgación científica, video o película, artículos de periódicos, programas de radio sobre los resultados, organización de eventos, presentación de ponencias en un evento científico o tecnológico, capítulos de memoria en congresos, editados como libro, entre otros.
- Sin producir. Cuando las actividades no generen ningún producto indique que tipo de resultados parciales arrojará la misma.



**PRESUPUESTO**

Recuerde que para la valoración del presupuesto se utilizará el sistema de investigación.

Para realizar un presupuesto correcto detalle en cada actividad las necesidades en términos de :

- **Personal**  
Santiago Correa, Personal Administrativo o Docente. Un cuarto de tiempo. \$21,363,216  
Lina María Méndez, Asistente de Investigación (Planta Nueva). Tiempo completo. \$27,553,886  
Viviana Otalvaro, Asistente de Investigación (Planta Nueva). Tiempo completo. \$27,553,886
- **Equipos**  
Computador Portátil Especial (Piv 3.2ghz O Pentium M 2.2, ~~Centurión~~, 2gb Ram, ~~Quetorador~~, Dvd, Red ~~local~~mbxica-Ultra Liviano) \$6,800,000
- **Materiales**  
Correos, Fotocopias y otros. \$1,630,000
- **Viajes**
- **Otros**
- **Software**

( Tener en cuenta la Guía de procedimiento de Investigación publicado por la Dirección de Investigaciones de la Universidad

#### **4.8.1 VERIFICACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS.**

Según el requerimiento 7.7<sup>103</sup> se verifica el cumplimiento del mismo dado que, se ha presentado una propuesta de investigación que pretende contextualizar el estudio en un contexto industrial. Esta propuesta se ha presentado en el formato exigido en el formato de investigación y docencia de la Universidad Eafit (El archivo original se encuentra en el CD como anexo).

## CONCLUSIONES.

Según los objetivos específicos planteados en el anteproyecto se concluye.

- *Investigar los fundamentos y teorías de la biónica, que sirvan como base para el desarrollo del alcance del proyecto mediante la búsqueda de información de fuentes primarias y secundarias.*

Actualmente la biónica cuenta con pocos autores latinoamericanos, en su mayoría son de procedencia alemana, y su difusión es reducida a pesar de los adelantos tecnológicos que han surgido con base en esta disciplina.

- *Investigar los desarrollos existentes y las metodologías utilizadas en el diseño de productos con base en la biónica, con el fin de conocer las características de este proceso mediante la búsqueda de información de fuentes primarias y secundarias.*

No existe una metodología estándar de la biónica, cada autor plantea una forma de trabajo diferente pero confluyen en el mismo principio funcional, el pensamiento analógico de un modelo natural. Adicionalmente se concluye que el estudio, análisis y abstracción de una solución funcional desde la biónica es un proceso complejo que requiere de cuantiosos recursos, económicos y tecnológicos.

---

<sup>103</sup> Ver Anexo A. Anteproyecto

- *Realizar una investigación de sistemas naturales que analice los fundamentos básicos de la biónica aplicada al diseño de productos: forma, función, estructura y contexto.*

La aplicación de la metodología de la biónica en el diseño de productos, fortalece el factor de innovación, saliendo de las soluciones convencionales y aumentando la eficiencia en el desempeño funcional del producto al emplear principios de solución inspirados en la naturaleza, lo cual garantiza mayor desempeño, ahorro de energía, reducción de peso, flexibilidad, adaptación a un entorno dado, etc.

El método utilizado en esta monografía, basado en la búsqueda general de una solución desde la biónica por medio de una investigación de seres naturales, evidencia el sinnúmero de posibles aplicaciones de las formas, estructuras y mecanismos de la naturaleza en campos como el industrial, tecnológico y del hogar.

- *Desarrollar un portafolio con una selección de los sistemas naturales aplicables como principios de solución para el desarrollo de productos, teniendo en cuenta el enfoque de la investigación (soluciones estructurales).*

La solución abstraída de la biónica muestra claramente la transformación conceptual a la que se somete el principio funcional del modelo biológico seleccionado. El punto de partida para el desarrollo de un producto no es la analogía formal de un referente, sino su análisis funcional; aunque no se descarta su utilización para el desarrollo formal de este.

- *Identificar las diferentes estructuras mecánicas convencionales, en el ámbito de la Ingeniería de Diseño de Productos, susceptibles de sustitución mediante un proceso de diseño sustentado en la biónica y empleando como herramienta metodológica el Portafolio de Sistemas Naturales.*

Las estructuras convencionales cuentan con geometrías ortogonales y una sobreutilización de elementos a compresión. Estas características las hacen rígidas pero pesadas y poco flexibles funcionalmente. Por otro lado las estructuras de la naturaleza fueron diseñadas pensando en una alta eficiencia en términos de su relación masa – rigidez, así como también cuentan con una alta flexibilidad de sus componentes, lo cual permite que además de ofrecer soluciones estructurales, estas puedan ser funcionales.

- *Seleccionar una de las alternativas identificadas para realizar el proceso de sustitución basado en biónica atendiendo al criterio de optimización geométrica, esto es, disminución de masa y aumento de la resistencia mecánica, sin incrementar significativamente los costos de producción.*

El sistema biológico seleccionado es altamente eficiente bajo el criterio de optimización geométrica. Debido a que no solo presenta una óptima relación entre la resistencia y su peso, sino que se autestabiliza, una de las características de la naturaleza en donde el organismo por si mismo equilibra las fuerzas que actúan sobre el, generando una distribución óptima de sus esfuerzos, además de ser muy flexible y presentar características de motilidad. La optimización se basó en el cambio del ángulo relativo entre los dos triángulos base, para la estructura analizada.

- *Sustentar el diseño de la alternativa seleccionada mediante la aplicación de técnicas como modelación geométrica y simulación por elementos finitos, que verifiquen la validez funcional y estructural de la misma.*

La veracidad de la metodología se evidencio en el análisis de elementos finitos y en la modelación, en los que la estructura de integridad tensional (biónica), presento un comportamiento un 53% mas eficiente que la convencional, al ser sometidas a una carga de flexión de 100N.

- *Construir un prototipo funcional por medio de la aplicación de técnicas de modelos y prototipos.*

La metodología de la biónica puede arrojar soluciones más eficientes que las convencionales, pero su emulación funcional, es complicada de llevar a cabo, debido a que los materiales no están suficientemente desarrollados.

- *Demostrar la validez del diseño propuesto mediante pruebas de uso y/o función aplicadas al prototipo.*

A pesar de que hubo dificultades en los procesos de fabricación de los prototipos y en la instalación del montaje de pruebas, la estructura de integridad tensional (biónica) presento una eficiencia superior, en un 26% respecto a la convencional. Estos valores podrían ser más elevados, pero no fue posible lograr mayor pretensión en los cables debido a dificultades en la fabricación. Sin embargo superó a la convencional.

- *Desarrollar una propuesta formal de investigación a la Universidad EAFIT por parte del semillero HECAS-ID, sustentada en los resultados obtenidos en la presente investigación.*

A nivel nacional e internacional la biónica esta siendo aplicada para el desarrollo de nuevas tecnologías dentro del campo del diseño y de ingeniería, por lo tanto se retoma como recomendación la necesidad de implementar esta disciplina en la universidad con el fin de fomentar no solo esta técnica sino la investigación en los estudiantes de Ingeniería de Diseño de Producto.

- *Documentar la información recolectada en las diferentes etapas del proyecto.*

Se presenta el portafolio de seres naturales como una herramienta que puede ser utilizada para el desarrollo de nuevos conceptos funcionales y por ende de nuevos productos.

## BIBLIOGRAFÍA.

- BARNES, R. Zoología de los invertebrados. México d.f: ED. Interamericana.1989.
- Bbranstom, M. Interactive Physiology: Muscular system [Software educativo]. S.I.A.D.A.M. Benjamin/Cummings. 1996.
- Bonsiepe, G. Teoría y práctica del diseño industrial. Barcelona: Ed Gustavo Pili. 1978.
- Burkhardt, W. A practical guide to tensegrity design. Cambridge. 2004.
- Cook, T.A. The curves of life. New York: Dover publications. 1979.
- Doczi, G. The power of limits. Boston: Ed Shambhala. 1994
- Cross, N. Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos. México: Limusa editores. 1999.
- Enciclopedia visual seres vivos tomo 2 mundo animal. Casa editorial el tiempo.
- Feduccia, A. The origin and evolution of birds. 2 ed. Ed Yale University. 1999.
- Geometry of design: studies in proportion and composition. New York: Ed. Princenton Architectural press. 2001.
- Ghyka, M “The geometry of art and life”. Dover Publications, Inc. New York. 1977.
- Grillo, P. Form, function and design. New York: Dover publications. 1960.
- Kimberly, E. Geometry of design. Princeton Architectural Press. New York. 2001.
- P.8
- Llovet, J. Ideología y metodología del diseño. Barcelona: ED. Gustavo Pili. 1979.
- Sanpieri, R. Metodología de la investigación. 2 Ed. S.L: Mc Graw Hill. 1998.
- Otto, F, Rash B. Finding form. S.L.Edition Axel Menges.1995
- Rodríguez, CM. (2000). Arquitectura Metamórfica. Universidad Nacional de Colombia. 286 p.
- Sánchez Valencia, M. Morfogénesis del objeto de uso. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogota.
- Scarpa, G, Modelli di bionica: Catire la natura attraverso i modelli. Bologna: Incola Zanichelli Editore, 1985.

Shiffman LG., Lazar L. Comportamiento del consumidor: los consumidores y sus entornos sociales y culturales. 5 ed. México, Prentice Hall; 1997. p. 349-406.

Sierra Rodríguez F., Sañudo LG., Vanegas D.E., Estructuras ligeras: ¿Por qué miramos la naturaleza? Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana; 2006. 17p.

Skelton, R. The mechanical systems design handbook. San Diego: Universidad de California. 2002. Cap 17 An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures

Wagensberg, J, La rebelión de las formas. Barcelona: Tusquets editores. 2004.

Williams, C. Los orígenes de la forma. S.L: Ed. Gustavo Gili. 1984

#### **ARTICULOS DE REVISTAS Y PUBLICACIONES.**

Arbelaez Ochoa, E, Bravo Márquez, D. Geometría para el diseño. En: Universitas científica. Vol. VI. Medellín: ED: Universidad Pontificia Bolivariana. Diciembre 2005

Cerrada JF. Tensegridad arquitectura de la vida. APEG 2006; 31: 18 p.

Ergonomía y diseño: Una propuesta metodológica para el aprendizaje. En: Universitas científica. Vol. VI. Medellín: Ed. Universidad pontificia Bolivariana. Diciembre 2005. p 63-66.

Guzmán M. "Tensegridad: de la escultura a la célula". ARS Medica. Revista de humanidades. 2002, 2: 166-176.

Interconexión Eléctrica S.A., Estructuras metálicas para líneas y subestaciones: Comportamiento de las estructuras de acero. Medellín. Publicación interna. p. 343-359

Patiño Mazo, E. Mobiliario desplegable, una aproximación a la biónica. En: Universitas científica. Vol. VI. Medellín: Ed. Universidad pontificia Bolivariana. Diciembre 2005.

Sanin Santamaría, J. Diseño responsable. En: Universitas científica. Vol. VI. Medellín: Ed. Universidad pontificia Bolivariana. Diciembre 2005

Tensegrity in a cell. Children Hospital Boston. [Artículo en internet]. Disponible en: <http://www.childrenshospital.org/research/Site2029/mainpageS2029P23sublevel24.html> [Abril 2006]

Urbina Polo, I. Biónica: rescate de sistemas naturales. Artículo publicado en la sección de Arquitectura del Diario Economía Hoy. 1997

### **SITIOS EN INTERNET.**

Edificio "torso" (Malmö, Suecia). Santiago Calatrava [Sitio en Internet]. [www.calatrava.com](http://www.calatrava.com) [Febrero. 2006]

Fundamentos de investigación, Universidad EAFIT. [Sitio en Internet]. Disponible en: <http://www.eafit.edu.co/EafitCn/Investigacion/Index>. [Octubre 2005]

Gomez, J,V. Tensegrity structures and the application to arquitectura [Sitio en Internet] Disponible en: <http://www.alumnos.unican.es/uc1279/5-Typologies.pdf>. [Abril 2006]

La torra biónica. [Sitio en Internet] Disponible en: [www.torrebionica.com](http://www.torrebionica.com) [Febrero 2006]

Los cactus [Sitio en Internet]. [www.planetacactus.com](http://www.planetacactus.com). [Marzo. 2006]

Posgrado. Universidad de Venezuela. [Artículo en Internet]<http://www.postgrado.ucv.ve/biblioteca/tesis.asp?id=TIg150&fecha=3>

Velcro. [Sitio en Internet]. <http://www.asci.org/artikel648.html>. [Marzo. 2006]

Von der Becke. CH. Glosario de Carlos von der Becke: Biónica. Portal de Carlos Horacio von der Becke. Disponible en <http://members.fortunecity.es/rednovohcop/b.html>

## ARTICULOS EN INTERNET

El futuro esta en la naturaleza. Biónica: Descubrir y aprovechar tecnologías mejoradas durante millones de años. Claasvision 2006. Se encuentra en [www.claas.com/countries/generator/cl-pw/es/fun-shop/claas-vision/artikel/Titelbericht,lang=es\\_ES.pdf](http://www.claas.com/countries/generator/cl-pw/es/fun-shop/claas-vision/artikel/Titelbericht,lang=es_ES.pdf)

Elisa Cárdenas O. Disponible en

[http://www.puntomujer.emol.com/mujer\\_y\\_trabajo/noticia/detallenoticia.asp?id=%7BBF4E74B7-3623-4494-BBA8-DFE14C813778%7D#](http://www.puntomujer.emol.com/mujer_y_trabajo/noticia/detallenoticia.asp?id=%7BBF4E74B7-3623-4494-BBA8-DFE14C813778%7D#)

España. Ilva polimeri. Un observatorio sobre la evolución del diseño, de la casa y del habitar. Disponible en

[http://www.ilvapolimeri.com/Spagna/News\\_osservatorio.htm#casa](http://www.ilvapolimeri.com/Spagna/News_osservatorio.htm#casa)

Gómez, Jáuregui, V. Tensegrity structures and the application to arquitectura [Sitio en Internet] Disponible en: <http://www.alumnos.unican.es/uc1279/5-Typologies.pdf>. [Abril 2006]

Guzmán, M. Identificación de los sistemas estructurales básicos. [Artículo en Internet]. Disponible en:

<http://usuarios.bitmailer.com/mdeguzman/tensegridad/mdeguzmangeomtenseg2004/seminario021203.html> [Abril 2006]

Mangado A. Biónica: el arte de copiar a la naturaleza. Webanalog. Disponible en [http://webanalog.blogspot.com/2003\\_08\\_01\\_webanalog\\_archive.html](http://webanalog.blogspot.com/2003_08_01_webanalog_archive.html)

Socha, J. The biomechanics of flight in snakes. [Documento electrónico]. Illinois. The university of Chicago. December 2002. En:

<http://www.flyingsnake.org/publications/publications.html>. [Marzo. 2006]

Universidad de Salamanca. El Centro BioInfo. Biotecnología. IUFRO. Disponible en <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,1743258,00.html?maca=spa-mozilla-547-rdf> [febrero. 2006]

Valdosierra, c. Biónica y la reinención de lo natural [Artículo en Internet]  
Disponibile en: [http://iufro-archive.boku.ac.at/iufro/silvavoc/glossary/3\\_0es.html](http://iufro-archive.boku.ac.at/iufro/silvavoc/glossary/3_0es.html)  
Yahya, H. El diseño en la naturaleza. [Documento electrónico]. Harun Yahya  
internacional. 2006. [Febrero 2006]

### **ENTREVISTAS A EXPERTOS.**

Leonardo Morales. MA Diseño Industrial. Profesor asistente. Investigador Grupo de investigación en Biónica. Departamento de diseño Universidad de los Andes. Bogota. Colombia

Ever Patiño. Diseñador Industrial. Jefe Línea de investigación en morfología dentro del grupo de Estudios en Diseño GED de Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. Colombia.

Luís Salazar. Biólogo de la universidad Nacional de Colombia. Docente Cátedra de la universidad EAFIT Medellín. Colombia.

Roberto Horta. Docente Instituto Politécnico Nacional. Mexico D.F. Mexico.

## **BILIOGRAFÍA DE FIGURAS.**

Figura 2.1 Estructura del velcro vista desde un microscopio. En: Velcro. [Sitio en Internet]. <http://www.asci.org/artikel648.html>. [Marzo. 2006]

Figura 2.2 Ganchillos y superficie de adherencia. Ganchillos y superficie de adherencia. En: Velcro. [Sitio en Internet]. <http://www.velcro.es>. [Marzo. 2006]

Figura 2.3 Velcro. En: Velcro. [Sitio en Internet]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Velcro>. [Marzo. 2006]

Figura 2.4 Flor de Cardo alpino. [www.velcro.es](http://www.velcro.es). Op.cit.

Figura 2.5 localización de presas del murciélago. YAHYA, Harun. El diseño en la naturaleza. [Documento electrónico]. Harun Yahya internacional. 2006. [Febrero 2006]

Figura 2.6 sistema de localización del Radar. Radar. [Sitio en Internet]. [http://www.volalibero.it/creare\\_un\\_radar\\_con\\_gimp.html](http://www.volalibero.it/creare_un_radar_con_gimp.html) [Marzo. 2006]

Figura 2.7 Murciélago. En: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

Figura 2.8 Automóvil biónico diseñado por Mercedes Benz. Biónica automotriz: una nueva ciencia. En: Revista motor Junio 29. 2005. pág.6

Figura 2.9 Vista superior del automóvil. Biónica automotriz. Op.cit. pág.6

Figura 2.10 Vista frontal del automóvil. Biónica automotriz. Op.cit. pág. 6

Figura 2.11 Pez en el que se baso el diseño del automóvil Box Fish. Box Fish [Sitio en Internet]. [www.germancarfans.com](http://www.germancarfans.com) [Febrero 2006]

Figura 2.12 Hojas de loto. En: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

Figura 2.13 Superficie autolimpiante. Biónica [Sitio en Internet]. [http://www.magazine-deutschland.de/issue/Bionik\\_3-05\\_SPA\\_S.php](http://www.magazine-deutschland.de/issue/Bionik_3-05_SPA_S.php) [Febrero. 2006]

Figura 2.14 Flor de loto. En: [www.gettyimages.com](http://www.gettyimages.com)

Figura 2.15 Superficie del loto en el microscopio en conjunto con una molécula de agua. [Sitio en Internet]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Lotus2mq.jpg>.

[Febrero. 2006]

Figura 2.16 Edificio “torso”. Santiago Calatrava [Sitio en Internet].

[www.calatrava.com](http://www.calatrava.com) [Febrero. 2006]

Figura 2.17 Ciudad de las Ciencias y las Artes de Valencia. Santiago Calatrava

[Sitio en Internet]. [www.cas.es](http://www.cas.es) [Febrero2006].

Figura 2.18 Museo de las Ciencias Príncipe Felipe. [www.cas.es](http://www.cas.es) op.cit.

Figura 2.19 Auditorio de Tenerife. Sta Cruz de Tenerife. (España). Fotografía de Santiago Correa Vélez

Figura 3.1 Chrysopelea Paradisi. En: SOCHA, Jhon Joseph. The biomechanics of flight in snakes. [Documento electrónico]. Illinois. The university of Chicago. December 2002. En:

<http://www.flyingsnake.org/publications/publications.html>. [Marzo. 2005]

Figura 3.2 Esqueleto de la serpiente. En: SUMMERS, Adam. Serpents in the air: a little contortionist can go a long way - Biomechanics - flying snake

[Documento electrónico]. Mayo. 2003. En:

[http://biomechanics.bio.uci.edu/\\_html/nh\\_biomech/flyingsnake/flyingsnake.ht](http://biomechanics.bio.uci.edu/_html/nh_biomech/flyingsnake/flyingsnake.ht)

Figura 3.3 Cambio de forma para el vuelo. Ibíd.

Figura 3.4 Aplanamiento de costillas. Elaboración propia.

Figura 3.5 Superficie ventral de la serpiente. Socha, op.cit., p194.

Figura 3.6 Sistema esquelético de la culebra. En: Diccionario Enciclopédico Encarta 2005.

Figura 3.7 Diagrama de cuerpo libre. Socha, op.cit., p137

Figura 3.8 Sección transversal de la culebra. Socha, op.cit., p198

Figura 3.9 Diagrama de vértebras y costillas en la culebra. Socha, op.cit., p204

Figura 3.10 Paradisi en ambiente natural. Flying tree snake. [Sitio en Internet]. [http://www.naturia.per.sg/buloh/verts/flying\\_tree\\_snake.htm](http://www.naturia.per.sg/buloh/verts/flying_tree_snake.htm). [Marzo. 2005]

Figura 3.11. Geometría del huevo. CALVIMONTES ROJAS, Carlos. Geometría de la parábola según el número de oro, [artículo en Internet]. [www.webs.adam.es/rlllorens/picudad/oro.htm](http://www.webs.adam.es/rlllorens/picudad/oro.htm), [Marzo. 2006]

Figura 3.12 Cáscara de huevo. En: Gettyimages.com. Cod: 200016434-001

Figura 3.13 Polluelo saliendo del cascaron. En: Gettyimages.com. Cod: a0047-000019

Figura 3.14 Componentes de un huevo. Elaboración propia.

Figura 3.15 Intercambio de oxígeno a través de los poros. YAHYA, Harun. El diseño en la naturaleza. [Documento electrónico]. Harun Yahya internacional. 2006. [Febrero 2006]

Figura 3.16 Poro de un huevo visto en el microscopio. [Sitio en Internet]. <http://science.exeter.edu/jekstrom/SEM/SEM.html> [Marzo. 2005]

Figura 3.17 Huevo y nido del huevo en ambiente natural. Gettyimages.com. Cod: 57532323

Figura 3.18 Huevos de avestruz. cerca de su madre En: Gettyimages.com. Cod: ab1423-001.

Figura 3.19 Huevo dentro de su nido. En: Gettyimages.com. Cod: 200425517-001

Figura 3.20 Carnegiea Gigantea. Los cactus [Sitio en Internet]. [www.planetacactus.com](http://www.planetacactus.com). [Marzo. 2006]

Figura 3.21 Costillas externas. En: Gettyimages.com. Cod: E009219

Figura 3.22 Dilatación de costillas del cactus. Elaboración propia.

Figura 3.23 Espinas y areolas en los cactus. Plantas del desierto. [Sitio en Internet]. [www.arizonacactus.com](http://www.arizonacactus.com). [Marzo. 2006]

Figura 3.24 Areola con espinas. [www.Planetacactus.com](http://www.Planetacactus.com), Op.cit.

Figura 3.25 Esquema de las areolas. Elaboración propia.

Figura 3.26 Paisajes característico del cactus. En: [Gettyimages.com](http://Gettyimages.com). Cod: 200364505-001

Figura 3.27 Cactus en su ambiente natural. En: [Gettyimages.com](http://Gettyimages.com) Cod: 71241574

Figura 3.28 Adaptaciones características, flores, espinas y raíces [www.Planetacactus.com](http://www.Planetacactus.com), Op.cit.

Figura 3.29 Citoesqueleto de una célula epitelial.

<http://sun.menloschool.org/~birchler/cells/animals/cytoskeleton/>

Figura 3.30 Componentes generales de una célula.

En:[www.biosci.uga.edu/almanac/bio\\_103/notes/may\\_16.html](http://www.biosci.uga.edu/almanac/bio_103/notes/may_16.html).

Figura 3.31 Componentes de la célula. En:

<http://sun.menloschool.org/~birchler/cells/animals/cytoskeleton/>

Figura 3.32 Microtubulos. Tovar Franco, J. "Estructura y función celular estructuras de soporte: citoesqueleto y motilidad". [Artículo en Internet]

<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/celular/citoesqueleto.html> [Marzo 2006].

Figura 3.33 Filamentos de actina en la célula endotelial de una vaca. Las células y la estructura celular. Emory University. [Artículo en Internet]. En:

<http://cancerquest.org/index.cfm?page=41&lang=spanish>. [Marzo 2006].

Figura 3.34 Monómeros de actina. Elaboración propia

Figura 3.35 Subunidad Fibrosa. En:[whfreeman.com/life/update/chap04.html](http://whfreeman.com/life/update/chap04.html).

Figura 3.36 Filamentos intermedios. En:

<http://web.usal.es/~jralonso/web2001/recursos/Citoesqueleto/Alberts%20856>

Figura 3.37 Estructura conformada por subunidades de túbulina.

En:<http://anatomy.med.unsw.edu.au/teach/phph1004/1998/WWWlect4/sld001.htm>

Figura 3.38 Microtúbulo de célula endotelial de vaca. cancerquest.org. Op.cit.

Figura 3.39 Enlace entre microfilamentos y microtubulos. En:

<http://sun.menloschool.org/~birchler/cells/animals/cytoskeleton/>

Figura 3.40 Filamentos intermedios. Citoesqueleto y centro celular En:

<http://fig.cox.miami.edu/~cmallery/255/255chem/tensegritymodel.htm>

Figura 3.41 Modelos tensegrity. En:

<http://fig.cox.miami.edu/~cmallery/255/255chem/tensegritymodel.htm>

Figura 3.42 Microtubulos. anatomy.med.unsw.edu.au. Op.cit.

Figura 3.43 Proceso de regeneración y transporte. Ibíd.

Figura 3.44. Célula animal. The cell [Sitio en Internet]. En:

[www.Cellsalive.com](http://www.Cellsalive.com). [Marzo. 2006]

Figura 3.45. Glóbulos rojos. Ibíd.

Figura 3.46 Pingüino emperador. En: <http://www.emperor-penguin.com/icecrack.html>

Figura 3.47 Principales tipos de plumas.

[www.bcn.es/museuciencias\\_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf](http://www.bcn.es/museuciencias_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf)

Figura 3.48 Diferencias formales en las plumas de las aves según su función.

Feduccia, Alan, The origin and evolution of birds. 2 ed. Ed Yale University. 1999.

Figura 3.49 En los pingüinos específicamente los nodos que forman las bárbulas reciben el nombre de cilios. [www.bcn.es](http://www.bcn.es). Op.cit.

Figura 3.50 Barbulas y ganchillos. Elaboración propia

Figura 3.51 Disposición de las plumas dejando hacia afuera el extremo superior del vexilo. En: [Gettyimages.com](http://Gettyimages.com)

Figura 3.52 Forma hidrodinámica [www.emperor-penguin.com](http://www.emperor-penguin.com). Op.cit

Figura 3.53 Estructura de la pluma Plumas y plumajes. Navarro, A, Benítez, H. El dominio del aire: Plumas y plumajes. [Artículo electrónico].

[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec\\_8.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec_8.htm)  
[Marzo2006]

Figura 3.54 Semi pluma pingüino. Dawson, C., Vincent, J. F. V., Jeronimidis, G., Rice, G. & Forshaw, P. (1999). Heat transfer through penguin feathers. *Journal of Theoretical Biology* 199(3): 291-5.

[www.bcn.es/museuciencias\\_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf](http://www.bcn.es/museuciencias_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf)

Figura 3.55 Filamentos de queratina. [www.bcn.es](http://www.bcn.es). Op.cit

Figura 3.56 Ala de pingüino.

<http://www.collectioncare.org/treatm/treatmpenguin.html>

Figura 3.57 Diagrama para estudio de aislamiento térmico. Dawson., Op.cit.

Figura 3.58 Pingüino saliendo del agua aun con la cámara sin aire. [www.emperor-penguin.com](http://www.emperor-penguin.com),. Op.cit.

Figura 3.59 Disposición de las plumas en diferentes situaciones. Elaboración propia

Figura 3.60 Antártida. [www.emperor-penguin.com](http://www.emperor-penguin.com),Op.cit.

Figura 3.61 Pingüinos en su hábitat natural. *Ibíd.*

Figura 3.62 Pingüinos bebe dentro de la bolsa de su madre. *Ibíd.*

Figura 3.63 Sistema muscular humano. En: [Gettyimages.com](http://www.gettyimages.com). Cod: bol00537

Figura 3.64 Músculo estriado visto desde un Microscopio. Encarta 2005, Op.cit.

Figura 3.65 Composición del músculo Estriado. BBRANSTOM, Marving. *Interactive Physiology: Muscular system [Software educativo]*. S.I.A.D.A.M. Benjamin/Cummings. 1996.

Figura 3.66 músculo esquelético en extremidades. En: [Gettyimages.com](http://www.gettyimages.com) Cod: 57027234

Figura 3.67 Estructura del músculo. Encarta 2005, Op.cit.

Figura 3.68 Miofibrilla. Bbranstom,Op.cit.

Figura 3.69 Contracción del músculo estriado. Elaboración propia.

Figura 3.70 Miofilamentos de actina y miosina con ATP. Bbranstom,Op.cit.

Figura 3.71 Terminales nerviosas en sarcomero Bbranstom,Op.cit.

Figura 3.72 Esqueleto humano En: Gettyimages.com. Cod: 71238499

Figura 3.73 Sistema nervioso central interactuando con las fibras musculares Bbranstom,Op.cit.

Figura 3.74 Armadillo con pocas semanas de nacido. En: Gettyimages.com.

Figura 3.75 Dasypus Novemencitus. Armadillo [Sitio en Internet].  
www.wfscnet.tamu.edu. [Marzo. 2006]

Figura 3.76 escamas en el armadillo

Figura 3.77 Armadillo de nueve bandas con pelo entre las lacas de su armadura.

Figura 3.78 estructura y componentes de la armadura del armadillo. Elaboración propia.

Figura 3.79 Encapsulamiento de la coraza del armadillo. Armadillos.  
www.magma.national/geographic.com/hgexplorer. [Marzo. 2005]

Figura 3.80 Madriguera

Figura 3.81 Armadillos en ambientes naturales. En: Gettyimages.com

Figura 3.82. Erizo de mar común. En: Gettyimages.com. Cod: ba19247

Figura 3.83 Estructura ósea del erizo de mar. En: Gettyimages.com Cod:  
56407732

Figura 3.84. Geometrización del erizo del esqueleto de un erizo de mar. SCARPA,  
Giorgio, Modelli di bionica: Catire la natura attraverso i modelli. Bologna: Incola  
Zanichelli Editore, 1985.

Figura 3.85 Estructura penta radial. En: Gettyimages.com. Cod: 200314170-001

Figura 3.86 Estructura del erizo. Modificado por el autor con base a: BARNES,  
Robert. Zoología de los invertebrados. México d.f: Ed. Interamericana.1989.

Figura 3.87 Esquema de componentes del sistema amburacral. Elaboración propia

Figura 3.88 Pedicelarios y espinas. En: Gettyimages.com Cod:ga10336

Figura 3.89 Componentes del sistema ambulacral. Modificado por el autor con base a: BARNES, Robert. Zoología de los invertebrados. Mexico d.f: Ed. Interamericana.1989.

Figura 3.90 Erizo en su ambiente natural. En: Gettyimages.com. Cod:ga10371

Figura 3.91 Erizo de mar en comunidad. En: Gettyimages.com. Cod: vis418690

## CITAS DEL PORTAFOLIO DE SERES NATURALES

1. SOCHA, J. The biomechanics of flight in snakes. [Documento electrónico]. Illinois. The university of Chicago. December 2002. En: <http://www.flyingsnake.org/publications/publications.html>
2. Ibid., p150
3. Ibid., p155
4. Ibid., p162
5. Ibid., p162
6. Ibid., p167
7. Ibíd., p167
8. Diccionario Enciclopédico Encarta 2005.
9. SUMMERS, A. Serpents in the air: a little contortionist can go a long way - Biomechanics - flying snake [Documento electrónico]. Mayo. 2003. En: [http://biomechanics.bio.uci.edu/\\_html/nh\\_biomech/flyingsnake/flyingsnake.htm](http://biomechanics.bio.uci.edu/_html/nh_biomech/flyingsnake/flyingsnake.htm)
10. Diccionario enciclopédico ESPASA. 3ED. Madrid: E despasa Calpe. 1986.
11. YAHYA, H. El diseño en la naturaleza. [Documento electrónico]. Harun Yahya internacional. 2006.
13. GILL, Frank B. Ornithologi. New Cork: Ed. W.H. Freeman and company.
14. YAHYA, op.cit.
15. YAHYA, op.cit.
16. YAHYA, op.cit.
17. Los cactus [Sitio en Internet]. [www.planetacactus.com](http://www.planetacactus.com). [Marzo. 2005]
18. CURTIS, H, BARNES, S. Biología. 5ta ED. Buenos aires: Ed panamericana.1993.
19. AUDESIRK, T, AUDESIRK, Gerald. Biología: La vida en la tierra. México: Ed Prentice Hall hispanoamericana.1996.

20. MARTINEZ, V. El mundo de las plantas. [Documento electrónico]. 1996. En: Botanica\_online.com. [Marzo de 2006]
21. MACCIONI, R, bases moleculares de la arquitectura y morfogénesis celular. [Documento electrónico]. Chile: Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. En: www. Uchile.cl/facultades/ciencias. [Marzo de 2006]
23. Tensegrity in a cell. Children Hospital Boston. [Artículo en internet]. Disponible en:  
<http://www.childrenshospital.org/research/Site2029/mainpageS2029P23sublevel24.html> [Abril 2006]
24. Anatomy. [Documento electrónico]. En:  
<http://anatomy.med.unsw.edu.au/teach/phph1004/1998/WWWlect4/sld001.htm> [Marzo de 2006]
25. Tovar Franco, J. "Estructura y función celular estructuras de soporte: citoesqueleto y motilidad". [Artículo en Internet]  
<http://www.javeriana.edu.co/Facultades/Ciencias/neurobioquimica/libros/celular/citoesqueleto.html> [Marzo 2006].
26. Tensegrity [Documento electrónico]. En:  
<http://fig.cox.miami.edu/~cmallery/255/255chem/tensegritymodel.htm>  
[whfreeman.com/life/update/chap04.html](http://whfreeman.com/life/update/chap04.html). [Marzo de 2006]
27. Anatomy. Op.cit
28. Ciencia. [Documento electrónico]. En:  
[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec\\_8.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec_8.htm)
29. Dawson, C., V, J. F. V., Jeronimidis, G., Rice, G. & Forshaw, P. (1999). Heat transfer through penguin feathers. Journal of Theoretical Biology 199(3): 291-5.  
[www.bcn.es/museuciencias\\_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf](http://www.bcn.es/museuciencias_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf)
30. Ibíd.
31. <http://www.emperor-penguin.com/icecrack.html>
32. Dawson, Op.cit.

- 33 La importancia del plumaje: Algunas nociones generales. [Documento electrónico]. En: [www.bcn.es/museuciencias\\_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf](http://www.bcn.es/museuciencias_fitxers/imatges/FitxerContingut2933.pdf). [Marzo de 2006]
34. YAHYA, H. Op.cit.
- 35 Dawson, C.,Op.cit.
36. Pingüino emperador. [Documento electrónico]. En: <http://www.emperor-penguin.com/icecrack.html>. [Marzo de 2006]
37. Encarta 2005, Op.cit.
38. BBRANSTOM, M. Interactive Physiology: Muscular system [Software educativo]. S.I. A.D.A.M. Benjamin/Cummings. 1996.
39. Encarta 2005, Op.cit.
40. Facultad de bioingeniería. Universidad de Antioquia. Memorias del curso. Fisiomecanica para ingenieros. Medellín: Universidad de Antioquia. Marzo 2002
41. Bbranstom,Op.cit.
42. Convenio Andrés Bello. Base de datos Biofauna. Sistemas de información y bases de datos
46. Op.cit. Base de datos biofauna
- 47.PONTES, M. Los erizos de mar. En: Aquanet: Revista virtual de buceo. No 69. Marzo 2006.
48. Equinodermos. [Sitio en Internet]  
<http://tolweb.org/tree?group=Echinodermata&contgroup=Metazoa> [Marzo. 2005]
49. BARNES, Robert. Zoología de los invertebrados. Mexico d.f: Ed. Interamericana.1989.p.1021
50. BARNES, op.cit.p.1029
51. PONTES, op.cit