

**Aplicación del Análisis Biomecánico Múlti-escala para Diseño Estándar de Sillas
de los Empleados de la Universidad de Antioquia**

Proyecto Positiva-Universidad de Antioquia

Informe Final

Elaborado Por:

Prof. Juan José Pavón Palacio, Ph.D.

Profesor Asociado del Programa de Bioingeniería
Director del Grupo de Biomateriales Avanzados y Medicina Regenerativa, BAMR

Laura Ocampo, Juan Pablo Arteaga, Robinson Montes, M.Sc. (c), Diego Fernando

Ospina, Oscar Santiago Jurado

Estudiantes de Bioingeniería, Miembros del Grupo BAMR

Presentado a:

Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo
Dirección de Desarrollo Institucional - Desarrollo del Talento Humano -Gestión de
Riesgos Ocupacionales
Universidad de Antioquia

Medellín, Octubre 31 de 2016

CONTENIDO

- 1. Resumen**
- 2. Introducción**
- 3. Objetivos**
- 4. Esquema general del proyecto**
- 5. Antropometría completa de los sujetos de los diferentes percentiles.**
- 6. Análisis biomecánico completo de sujetos elegidos: estática (In situ y LAM-FUMC)**
- 7. Diseño de sillas e implementación del CAD (computer assisted design)**
- 8. Implementación del método Ashby para diseño y selección de materiales**
- 9. Validación de la metodología en el análisis biomecánico**
- 10. Desarrollo la herramienta informática para la selección de sillas (Matlab)**
- 11. Herramienta para evaluación económica preliminar de los proveedores**
- 12. Agradecimientos**
- 13. Conclusiones**
- 14. Referencias**

1. Resumen

En este trabajo se ha desarrollado e implementado el análisis biomecánico cuantitativo multi-escala y las pautas metodológicas a tener en cuenta para obtener una herramienta informática para el diseño óptimo de las sillas en puestos de trabajo de la Universidad de Antioquia, al igual que los mejores materiales para dichos elementos. Este trabajo ha sido articulado con el trabajo previo que ha desarrollado el Dpto. de Salud Ocupacional, en el cual se ha levantado una importante información estadística sobre los tallajes representativos en la UdeA, como un insumo importante para la selección ergonómica de las sillas más adecuadas para los empleados de la UdeA.

2. Introducción

La importancia del análisis biomecánico cuantitativo aplicado a la ergonomía es evidente a partir de las estadísticas de incapacidades laborales de cualquiera de las empresas más grandes del país. También se destaca la relación de dichas incapacidades con la falta de rigurosidad en el estudio de la actividad laboral del puesto de trabajo en cuestión. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo simple de la relación entre el cálculo de una fuerza potencialmente nociva para el trabajador y el riesgo de presentar una lesión de columna que se puede convertir en un motivo de incapacidad laboral.

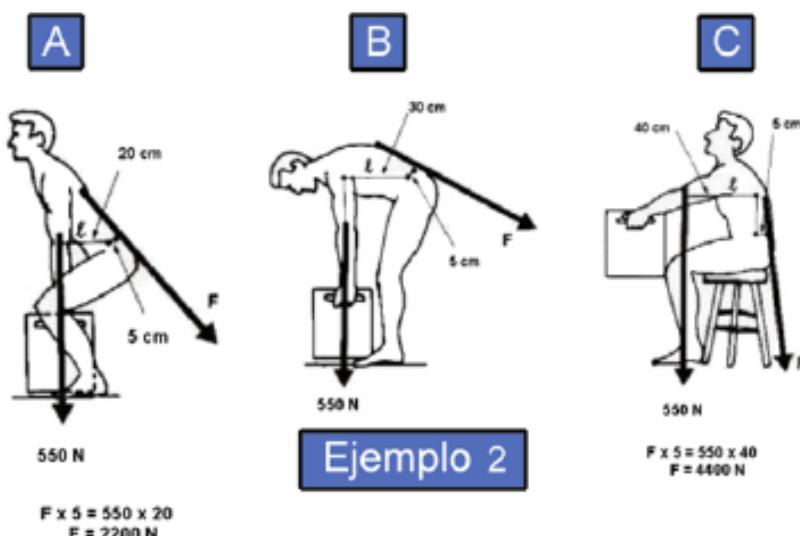


Fig. 1. Ejemplo simple de la importancia de los cálculos biomecánicos en la correcta realización de actividades de trabajo [1].

El hecho que la mayoría de las incapacidades laborales están relacionadas con actividades repetitivas (tipo cíclico) hace que la prevención a partir del análisis biomecánico sea aún más determinante, ya que los tejidos biológicos sufren daños de tipo acumulativo. Con el tiempo, una incapacidad laboral por lesión corre el grave riesgo de pasar de temporal a permanente.

3. Objetivos

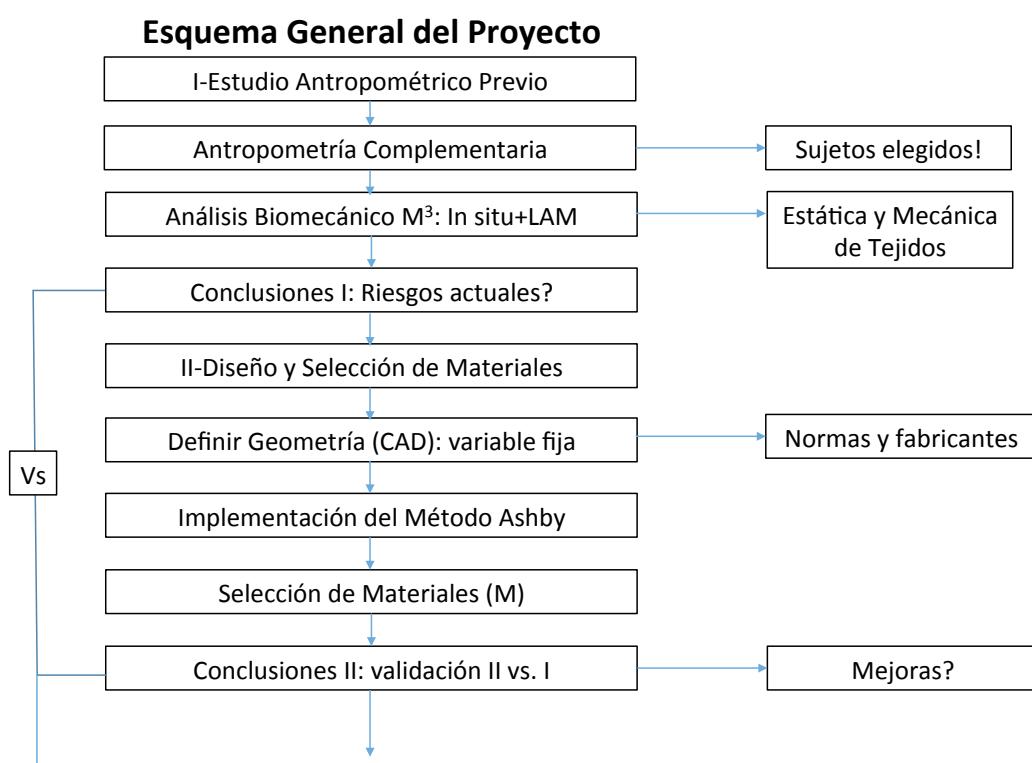
3.1. Objetivo general

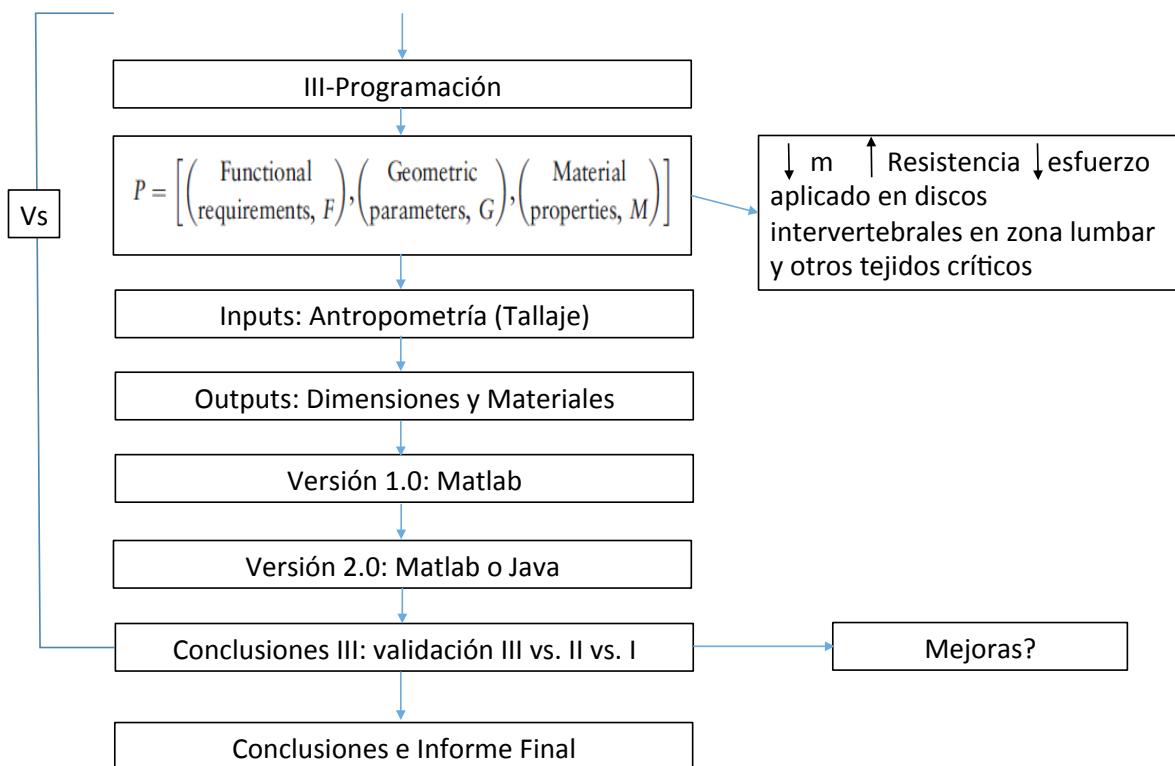
Llevar a cabo el análisis biomecánico cuantitativo multi-escala de los puestos de trabajo en la UdeA, sumado con la información antropométrica ya existente, para desarrollar una herramienta que ayude al diseño óptimo de las sillas en puestos de trabajo de la Universidad de Antioquia.

3.2. Objetivos específicos

- Seleccionar los puestos de trabajo a estudiar.
- Realizar la caracterización antropométrica pertinente y estadísticamente representativa del personal de las áreas de trabajo seleccionadas.
- Realización de los análisis biomecánicos pertinentes para cada puesto de trabajo seleccionado.
- Desarrollar la herramienta para el diseño de las sillas y selección de materiales, basados en el análisis biomecánico multi-escala y en las características antropométricas.
- Validación de las herramientas desarrolladas.

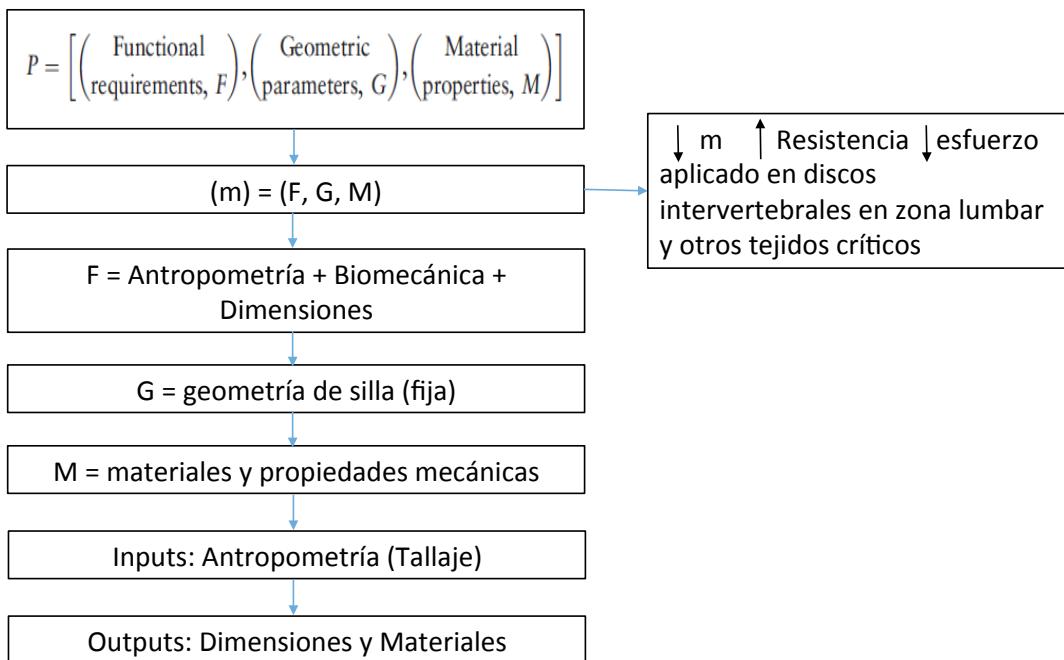
4. Esquema general del proyecto





Descripción general del algoritmo para desarrollar el programa informático.

Modelo y Algoritmo



5. Antropometría completa de los sujetos estudiados

La selección de los puestos de trabajo sometidos al estudio propuesto, representativos de los puestos administrativos de la UdeA, se llevó a cabo a partir del trabajo previo de antropometría y tallaje realizado por el Dpto. de Salud Ocupacional de la UdeA [2]. Para ello, se ha estudiado la información que permite elegir inicialmente 3 sujetos que representan los tres grupos determinados por el estudio de parámetros antropométricos de los empleados administrativos:

1. La generación del sistema de tallaje desarrollado a partir de la base de datos antropométricos existente en el Programa de Gestión Ocupacionales para los funcionarios de la UdeA (información de 1993 a 2012).
2. Aprovechar los modelos estadísticos desarrollados previamente para la aplicación del sistema de tallaje de sillas (STS), de acuerdo con la demanda de los docentes y administrativos de la UdeA.

Para realizar las mediciones antropométricas, debe construirse un protocolo que facilite la toma de las mismas y optimice el tiempo para su consecución. Por tal motivo debe tenerse una serie de cuidados durante el protocolo [3], por ejemplo:

- La sala donde se tomen las medidas debe ser amplia.
- Instrumental calibrado con antelación para evitar errores.
- Antes de comenzar se deberán realizar las marcas necesarias con un lápiz dermográfico para, posteriormente, pasar a realizar las mediciones tratando de realizar la secuencia de arriba abajo.

A partir del estudio de la información arrojada por el proyecto STS, se identifican tres grupos poblacionales y antropométricos, los cuales se dividen en Tallas Corporales muy pequeña-pequeña, mediana y muy grande-grande. Estos grupos son el resultado de los tres percentiles más significativos, los cuales permiten elegir a tres sujetos de cada grupo; esto, tanto para la implementación de nuestra nueva metodología, como para la validación, como por simulación en el LAM de la FUMC. Estos insumos antropométricos serán sumados a una nueva caracterización que se debe hacer de cada sujeto, debido al enfoque biomecánico multi-escala de este proyecto. Por tanto, se requiere una evaluación adicional, tanto física como antropométrica con enfoque a modelos biomecánicos, para lo cual se utilizan tablas antropométricas como las de la Fig. 2.

TABLE 3.1 Anthropometric Data

Segment	Definition	Segment Weight/ Total Body Weight	Center of Mass/ Segment Length		Radius of Gyration/ Segment Length			Density
			Proximal	Distal	C of G	Proximal	Distal	
Hand	Wrist axis/knuckle II middle finger	0.006 M	0.506	0.494 P	0.297	0.587	0.577 M	1.16
Forearm	Elbow axis/ulnar styloid	0.016 M	0.430	0.570 P	0.303	0.526	0.647 M	1.13
Upper arm	Glenohumeral axis/elbow axis	0.028 M	0.436	0.564 P	0.322	0.542	0.645 M	1.07
Forearm and hand	Elbow axis/ulnar styloid	0.022 M	0.682	0.318 P	0.468	0.827	0.565 P	1.14
Total arm	Glenohumeral joint/ulnar styloid	0.050 M	0.530	0.470 P	0.368	0.645	0.596 P	1.11
Foot	Lateral malleolus/head metatarsal II	0.0145 M	0.50	0.50 P	0.475	0.690	0.690 P	1.10
Leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.0465 M	0.433	0.567 P	0.302	0.528	0.643 M	1.09
Thigh	Greater trochanter/femoral condyles	0.100 M	0.433	0.567 P	0.323	0.540	0.653 M	1.05
Foot and leg	Femoral condyles/medial malleolus	0.061 M	0.606	0.394 P	0.416	0.735	0.572 P	1.09
Total leg	Greater trochanter/medial malleolus	0.161 M	0.447	0.553 P	0.326	0.560	0.650 P	1.06

Fig. 2. Tablas antropométricas biomecánicas [3].

Metodología y resultados para el nuevo modelo antropométrico

En la figura 3 se presenta una relación de algunas de las medidas antropométricas más utilizadas para el diseño de puestos de trabajo y las posiciones y posturas para su toma.

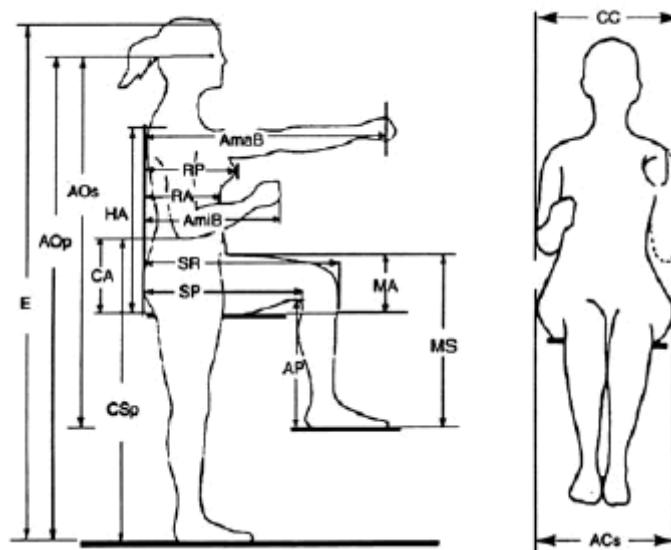


Fig. 3. Antropometría para puestos de trabajo [3].

Estos son los parámetros asociados:

1. Depresión poplítea (AP): es la superficie triangular del poplíteo limitada por la línea oblicua de la tibia.
2. Protuberancia superior del cóndilo exterior del fémur: es la extremidad inferior del fémur, cóndilo exterior en la cara lateral externa.

2. Distancia sacro-poplítea (SP): es la distancia horizontal medida desde el punto correspondiente a la depresión poplítea de la pierna, hasta el plano vertical situado en la espalda del individuo, cuando tiene el muslo en posición horizontal y formando un ángulo de 90° con las piernas y el tronco.
3. Distancia sacro-rótula (SR): es la distancia horizontal medida desde el punto correspondiente al vértice de la rótula hasta el plano vertical situado en la espalda del individuo, cuando éste tenga su muslo en posición horizontal y formando un ángulo de 90° con las piernas y el tronco.
4. Altura muslo-asiento (MA): es la distancia vertical desde el punto más alto del muslo a nivel inguinal, tomando como referencia el pliegue cutáneo que se forma entre el muslo y la cintura pélvica, y el plano horizontal del asiento al estar el individuo sentado, con un ángulo de 90° entre el tórax y el muslo.
5. Altura muslo-suelo (MS), sentado: es la distancia vertical medida desde el punto más alto del muslo a nivel inguinal, tomando como referencia el pliegue cutáneo que se forma entre el muslo y la cintura pélvica, y el plano horizontal del suelo al estar el individuo sentado, con un ángulo de 90° entre el tórax y el muslo.
6. Altura rodillas-suelo (RS), sentado: es la distancia vertical medida desde el punto más alto de la rodilla y el plano horizontal del suelo al estar el individuo sentado, con un ángulo de 90° entre el tórax y el muslo.
7. Altura codo-asiento (CA): es la distancia medida desde el plano del asiento hasta la depresión del codo, cuando el sujeto tiene su brazo paralelo a la línea media del tronco y el antebrazo formando un ángulo aproximadamente de 90°.
8. Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre (AmínBa): es la distancia horizontal medida desde el respaldo del asiento hasta el eje vertical que se produce en la mano con el puño cerrado y sosteniendo un eje, cuando el individuo tiene su brazo paralelo a la línea media del tronco y el antebrazo formando un ángulo igual o un poco menor de 90° con el brazo, en posición cómoda.
9. Alcance mínimo del brazo hacia delante sin agarre (AmínB): igual que con agarre, pero con los dedos unidos extendidos hacia delante.
10. Distancia codo-mano (CM): es la distancia horizontal medida desde el codo hasta la punta de los dedos con la mano abierta, cuando el individuo tiene su brazo paralelo a la línea media del tronco y el antebrazo formando un ángulo igual o un poco menor de 90° con el brazo; en posición cómoda.
11. Alcance máximo del brazo hacia delante con agarre (AmáxBa): es la distancia horizontal medida desde el plano vertical que pasa por el occipital, las escápulas y los glúteos, hasta el eje vertical que se produce en la mano con el puño cerrado, cuando el individuo tiene su brazo extendido.
12. Alcance máximo del brazo hacia delante sin agarre (AmáxB): es la distancia horizontal medida desde el plano vertical que pasa por el occipital, las escápulas y los glúteos, hasta la punta de los dedos unidos con la mano abierta y el brazo extendido hacia delante.
13. Altura ojos-suelo, sentado (OSs): se coloca un cartabón sobre el plano vertical de tal forma que la rama del cartabón esté a la altura de la pupila del ojo. La rama fija del antropómetro se sitúa en el plano del suelo, y se alarga la móvil hasta la superficie inferior del cartabón.
14. Altura hombros-asiento (HA): es la distancia vertical medida desde la superficie del asiento hasta el punto equidistante del cuello y el acromión, cuando el individuo se encuentra sentado con el tórax perpendicular al plano del asiento.

15. Anchura de caderas (muslos), sentado (CdCd): es la distancia horizontal que existe entre los muslos, encontrándose el sujeto sentado con el tórax perpendicular al plano de trabajo.
16. Ancho de rodillas, sentado (RRs): es la distancia horizontal que existe entre los puntos más exteriores de las rodillas, encontrándose la persona sentada con el tórax perpendicular al plano de trabajo.
17. Altura subescapular, sentado (AS): es la distancia vertical medida desde el ángulo inferior de la escápula hasta el plano del asiento, cuando el sujeto está en PAA modificada.
18. Altura iliocrestal, sentado (AI): es la distancia vertical desde la espina ilíaca anterior y superior hasta el plano del asiento, cuando la persona está en PAA modificada. Esta altura coincide con la altura sacrolumbar cuando el sujeto está sentado.
19. Ancho codo-codo (CC): es la distancia horizontal medida entre los codos, encontrándose el individuo sentado con los brazos colgando libremente y los antebrazos doblados sobre los muslos.
20. Profundidad del pecho (PP): es la distancia horizontal medida desde el plano vertical que pasa por el occipital, las escápulas y los glúteos hasta el punto más alejado del pecho.
21. Profundidad del abdomen (PA): es la distancia horizontal medida desde el plano vertical que pasa por el occipital, la escápula y los glúteos hasta el punto más alejado del abdomen.
22. Anchura de hombros (HH): distancia horizontal máxima que separa a los músculos deltoides.
23. Altura hombros-suelo, de pie (HSp): distancia vertical medida desde la superficie del suelo hasta un punto equidistante del cuello y el acromión, cuando el individuo se encuentra en posición PAA.
24. Altura codo-suelo de pie (CSp): es la distancia medida desde el suelo hasta la depresión del codo cuando el sujeto, de pie y en posición PAA, tiene su brazo paralelo a la línea media del tronco y el antebrazo formando un ángulo aproximado de 90°.
25. Altura ojos-suelo, de pie (OSp): es la distancia vertical desde el eje horizontal que pasa por el centro de la pupila del ojo hasta la superficie del suelo, cuando la persona está en posición PAA.
26. Ancho de tórax (AT): Es la distancia horizontal del ancho del tórax medido en la zona más externa de los pechos donde se encuentran con los brazos, con el sujeto en PAA, los brazos descansando normalmente a ambos lados del cuerpo y respirando con normalidad.
27. Estatura (E): es la altura máxima desde la cabeza hasta el plano horizontal de la base del estadiómetro o del suelo, con la persona en posición de atención antropométrica (PAA).

Las siguientes medidas fueron tomadas para 3 percentiles de la UdeA. Teniendo los siguientes esquemas de ubicaciones en sus sillas de trabajo, se realiza la respectiva toma de medidas antropométricas.

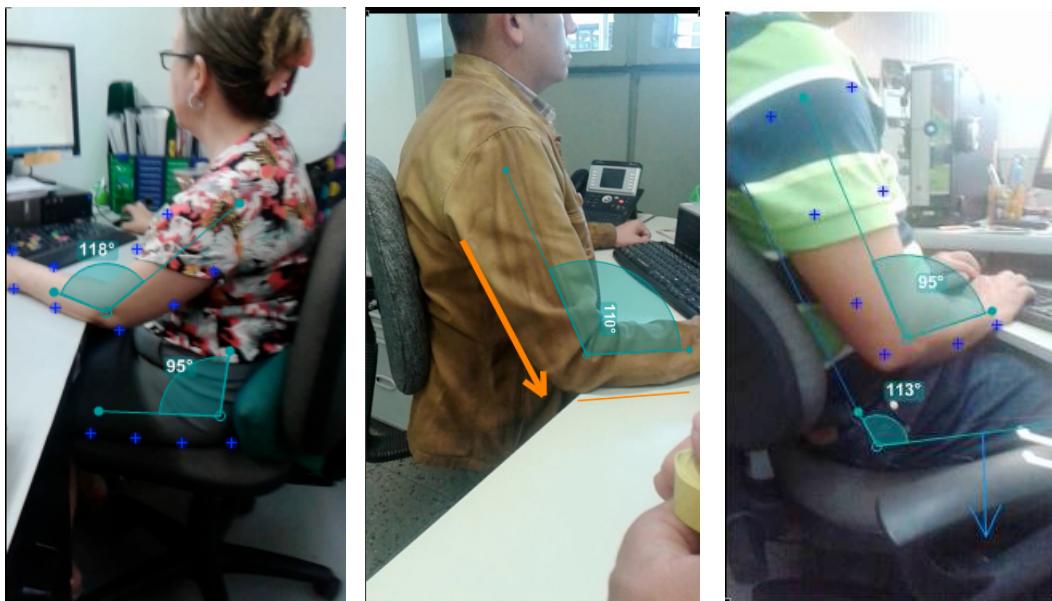


Fig. 4. Evaluación sujetos In situ: a) Secretaria; b) Abogado; c) Profesor

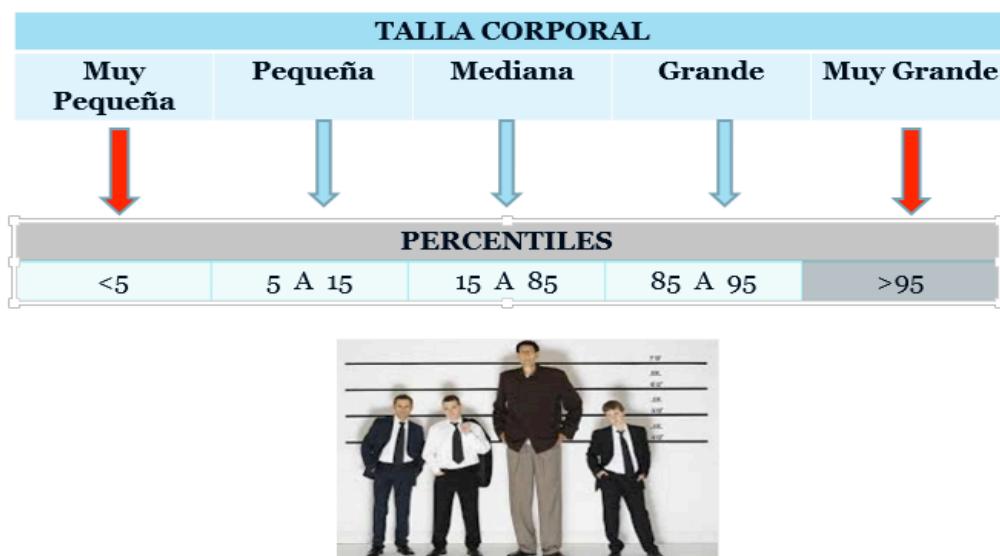


Fig. 5. Representación de cada una de las tallas en percentiles

5.1. Antropometría completa del sujeto de percentil grande

Tabla 1. Medidas antropométricas del del sujeto de percentil grande

Medidas antropométricas	Nomenclatura	Derecho	Izquierdo
Peso	W(Kg)	80	
Estatura	ESTT (cm)	175	
Altura sentado	HPOS	135	
Altura ojos sentado	HOJO	124,5	
Altura hombro sentado	HHOM	108	107
Altura escapular	HESC	100	
Altura Codo	HCOD	70	71,5
Altura cresta ilíaca	HCRE	68	67
Altura Muslo	HMUS	61,5	61,5
Altura Rodilla	HROD	55,5	55,5
Altura Fosa Poplítea	HPOP	47	47,5
Altura Codo Asiento	ACOA	23	23
Altura Muslo Asiento	AMA	12	12
Lar. Antebrazo-Mano	LCODE	48	48
Lar. Nalga a Rodilla	LNAROD	57	56
Lar. Nalga a Fosa Poplítea	LNAPOP	44,5	44,5
Ancho Hombros	AHOM	46	
Ancho del Tórax	ACTX	49	
Ancho de Rodillas	ACR	37	
Ancho Codo a Codo	ACOCO	53	
Anchura de Cadera	ACAD	52	
Perímetro Cintura	PCIN	98	
Perímetro Cadera	PCAD	105	
Perímetro Cabeza	PCAZ	61	
Perímetro tórax	PTX	99	
Ancho Cadera	AC	54	
Codo Hombro	CH	50	
Mano	M	20,5	
Pie	P	27	
Perímetro Cabeza	PrC	61	
Perímetro Tórax	PrT	99	

■ Corresponde a las medidas antropométricas relacionadas con el asiento

Para obtener la masa de los segmentos se debe seguir lo siguiente:

$$\frac{\text{masa del segmento}}{\text{Peso del cuerpo}} = \text{indicador tabla 1 correspondiente al segmento}$$

Para hallar el centro de masa, se sigue:

$$\frac{\text{Centro de Masa del segmento}}{\text{longitud del segmento}} = \text{indicador tabla 1 correspondiente al segmento}$$

Para hallar el Radio de giro, se sigue:

$$\frac{\text{Radio de giro del segmento}}{\text{longitud del segmento}} = \text{indicador tabla 1 correspondiente al segmento}$$

Tabla 2. Medidas antropométricas de los segmentos corporales percentil grande

Segmento	Masa del Segmento	Centro de Masa		Radio de Giro		
		Proximal	Distal	CM	Proximal	Distal
Mano	0,48	10,373	10,127	5,9655	12,0335	11,8285
Antebrazo	1,28	11,825	15,675	8,3325	14,465	17,7925
Brazo	2,24	21,8	28,2	16,2	27,1	32,25
Antebrazo y Mano	1,76	32,736	15,264	22,464	39,696	27,12
Todo el Brazo	4	51,935	46,06	36,064	63,21	58,408
Pie	1,16	13,5	13,5	12,825	18,63	18,63
Pierna	3,72	24,0315	31,4685	16,761	29,304	35,6865
Muslo	0,8	19,2685	25,2317	14,3737	24,03	29,0585
Pie y Pierna	4,88	49,995	32,505	34,32	60,6375	47,19
Toda la Pierna	12,88	47,7	55,3	32,2	56	65

5.2. Antropometría completa del sujeto de percentil mediano

Tabla 3. Medidas antropométricas del sujeto del percentil mediano.

Medidas antropométricas	Nomenclatura	Derecho	Izquierdo
Peso	W(Kg)	76	
Estatura	ESTT (cm)	170	
Altura sentado	HPOS	125,5	
Altura ojos sentado	HOJO	117	
Altura hombro sentado	HHOM	98,5	99
Altura escapular	HESC	99	
Altura Codo	HCOD	64,5	64

Altura crestá ilíaca	HCRE	59	60
Altura Muslo	HMUS	57	56
Altura Rodilla	HROD	50,5	50
Altura Fose Poplítea	HPOP	41	44
Altura Codo Asiento	ACOA	19	21
Altura Muslo Asiento	AMA	11,5	13
Lar. Antebrazo- Mano	LCODE	44	45
Lar. Nalga a Rodilla	LNAROD	51	51
Lar. Nalga a Fosa Poplítea	LNAPOP	39	38,5
Ancho Hombros	AHOM	54	
Ancho del Tórax	ACTX	102	
Ancho de Rodillas	ACR	42	
Ancho Codo a Codo	ACOCO	51	
Anchura de Cadera	ACAD	47	
Perímetro Cintura	PCIN	89	
Perímetro Cadera	PCAD	90	
Perímetro Cabeza	PCAZ	56	
Perímetro tórax	PTX	102	
Ancho Cadera	AC	48	
Codo Hombro	CH	43	
Mano	M	19	
Pie	P	24	
Perímetro Cabeza	PrC	56	
Perímetro Tórax	PrT	102	

■ Corresponde a las medidas antropométricas relacionadas con el asiento

Tabla 4. Medidas antropométricas de los segmentos corporales percentil mediano

Segmento	Masa del Segmento	Centro de Masa (cm)		Radio de Giro(cm)		
		Proximal	Distal	CM	Proximal	Distal
Mano	0,456	9,614	9,386	5,643	11,153	10,963
Antebrazo	1,216	10,75	14,25	7,575	13,15	16,175
Brazo	2,128	18,748	24,252	13,846	23,306	27,735
Antebrazo y Mano	1,672	30,008	13,992	20,592	36,388	24,86
Todo el Brazo	3,8	46,11	40,89	32,016	56,115	51,852
Pie	1,102	12	12	11,4	16,56	16,56
Pierna	3,534	21,65	28,35	15,1	26,4	32,15
Muslo	0,76	16,887	22,113	12,598	21,06	25,467
Pie y Pierna	4,636	44,844	29,156	30,784	54,39	42,328
Toda la Pierna	12,23	42,453	49,217	29,014	49,84	57,85

5.3. Antropometría completa del sujeto de percentil pequeño

Tabla 5. Medidas antropométricas del sujeto de percentil pequeño.

Medidas antropométricas	Nomenclatura	Derecho	Izquierdo
Peso	W(Kg)	62,5	
Estatura	ESTT (cm)	147	
Altura sentado	HPOS	120	
Altura ojos sentado	HOJO	101,5	
Altura hombro sentado	HHOM	94,5	94,1
Altura escapular	HESC	100	
Altura Codo	HCOD	70,5	69,5
Altura cresta ilíaca	HCRE	66,5	66
Altura Muslo	HMUS	59,5	59,5
Altura Rodilla	HROD	51	51
Altura Fose Poplítea	HPOP	41,5	41
Altura Codo Asiento	ACOA	19,5	34
Altura Muslo Asiento	AMA	11,5	12
Lar. Antebrazo-Mano	LCODE	39	39
Lar. Nalga a Rodilla	LNAROD	44	44
Lar. Nalga a Fosa Poplítea	LNAPOP	34,5	34
Ancho Hombros	AHOM	41	
Ancho del Tórax	ACTX	39	
Ancho de Rodillas	ACR	27	
Ancho Codo a Codo	ACOCO	38	
Anchura de Cadera	ACAD	50	
Perímetro Cintura	PCIN	85	
Perímetro Cadera	PCAD	101	
Perímetro Cabeza	PCAZ	58,4	
Perímetro Tórax	PTX	82	
Ancho Cadera	AC	57	
Codo Hombro	CH	47	
Mano	M	18	
Pie	P	22	
Perímetro Cabeza	PrC	58,4	
Perímetro Tórax	PrT	82	

■ Corresponde a las medidas antropométricas relacionadas con el asiento

Tabla 6. Medidas antropométricas de los segmentos corporales percentil pequeño

Segmento	Masa del Segmento	Centro de Masa (cm)		Radio de Giro (cm)		
		Proximal	Distal	CM	Proximal	Distal
Mano	0,375	9,108	8,892	5.346	10,566	10,386
Antebrazo	1	9,03	11,97	6,363	11,046	13,597
Brazo	1,75	20,492	26,508	15,134	25,474	30,315
Antebrazo y Mano	1,375	26,598	12,402	18,252	32,253	22,035
Todo el Brazo	3,125	45,58	40,42	31,648	55,47	51,256
Pie	0,90625	11	11	10,45	15,18	15,18
Pierna	0,9175	22,0833	28,917	15,402	26,928	32,793
Muslo	0,625	14,522	19,278	10,982	18,36	22,202
Pie y Pierna	3,18125	44,238	28,762	30,368	53,655	41,756
Toda la Pierna	10,0625	37,995	47,005	27,71	47,6	55,25

6. Análisis biomecánico completo de sujetos elegidos: estática (In situ y LAM-FUMC)

En esta etapa se realizaron los análisis biomecánicos estáticos *in situ* mediante la implementación del software Kinovea. Para dicho análisis también se utilizaron decámetros, cronómetro y cámara.

Los resultados de las fuerzas calculadas con los diferentes modelos biomecánicos estáticos, enfocados en zonas críticas (lumbar, cuello, trapecio, hombro, etc), son extrapolados a la mecánica de los tejidos mediante la implementación de una función multi-escala por comparación con valores críticos de la literatura. Este análisis permite convertir las fuerzas calculadas sobre cuerpos rígidos planos, en tensiones aplicadas en tejidos críticos. El acoplamiento final de las fuerzas calculadas, con las tensiones en tejidos, los parámetros antropométricos y las diferentes posturas de los sujetos (para diferentes diseños de sillas), permite hallar diferentes formas de la función objetivo que se busca optimizar: $\sigma_{tejidos} = f(F) = (\text{Antropometría, postura según diseño de silla, tejidos implicados})$. Nótese que esta misma ecuación nos sirve para hallar la función objetivo de parámetros antropométricos ideales para cada puesto de trabajo, la cual puede optimizarse en función de los riesgos de daños de los tejidos.

6.1. Estática articular In situ

Es necesario aplicar las condiciones de equilibrio estático, con el objetivo de analizar las articulaciones antes mencionadas. Se requiere, entonces, del marco teórico de la estática que permite hacer el análisis de fuerzas sobre los cuerpos rígidos en equilibrio. Por lo tanto, para que un cuerpo esté en estado de equilibrio translacional y rotacional, las ecuaciones de movimiento (segunda ley de Newton) toman las siguientes formas especiales [1]:

$$\sum F = 0 \text{ y } \sum M = 0 \quad (1)$$

Estas ecuaciones pueden ser aplicadas para investigar las fuerzas musculares y articulares implicadas sobre y alrededor de las articulaciones, para varias situaciones del cuerpo humano y sus segmentos.

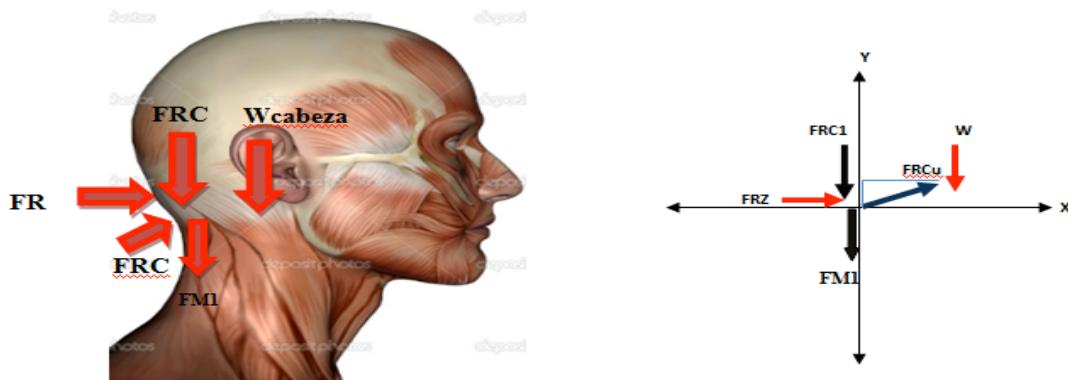
En general, las incógnitas en los problemas estáticos en el sistema músculo-esquelético son las magnitudes de las fuerzas de reacción articular y las tensiones musculares. El análisis biomecánico de una articulación requiere el conocimiento de las características vectoriales de las fuerzas en los músculos, las localizaciones apropiadas de las inserciones musculares, los pesos de los segmentos corporales y las localizaciones de los centros de gravedad y masa de dichos segmentos [1].

6.2. Metodología y resultados el análisis biomecánico de los sujetos elegidos: estática in situ

Determinación de las funciones biomecánicas estáticas para el diseño de la Silla.

Análisis estático Cabeza:

Fig. 6. Diagrama de cuerpo libre



FRCu: Fuerza de reacción de la cuello

W: Peso del la cabeza

FRC1: Fuerza de reacción en C1

FRZ: Fuerza de reacción del cabezal (Fuerza a determinar)

Medidas antropométricas:

- Peso del segmento (cabeza)
- Talla Perímetro cabeza

Cálculos estáticos:

$$\sum F = 0 \quad \sum M = 0$$

$$\sum F_x = FRZ - FRCu_x = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_y = -W_{cabeza} - FRCu_y - FRC1 + FM1 = 0 \quad (3)$$

$$\sum M = a * FCu + b * W_{torax} - C * FM1 = 0 \quad (4)$$

Se tiene:

$$FRCu_x = FRCu \cos \theta$$

$$FRCu_y = FRC \sin \theta$$

Donde θ es el ángulo de la articulación de la cabeza, con respecto al cuello.

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene la fuerza de reacción del cabezal FRZ:

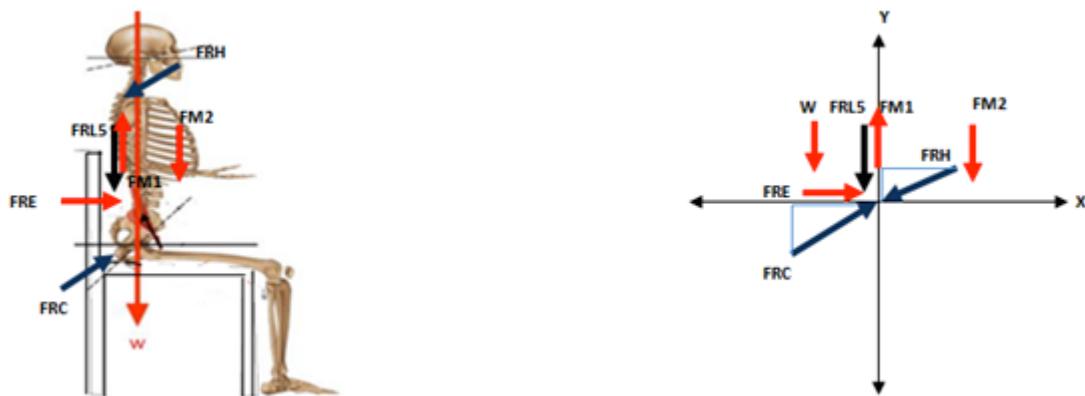
$$FRZ = A * (W_{cabezal} * (-\frac{CM}{0.009} + 1)) + A * FRC1)$$

Tabla 7. Resultados cabezal

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
FRZ	671.05 N	836.14 N	245.01N
FRC	1500 N región cervical	1500 N región cervical	1500 N región cervical
Fuerza Critica en el tejido	436N	436N	436N

Análisis estático Espaldar:

Fig. 7. Diagrama de cuerpo libre



FRH: Fuerza de reacción del hombro

FRC: Fuerza de reacción de la cadera

W: Peso del tronco

FRL5: Fuerza de reacción en L5

FRE: Fuerza de reacción del espaldar ç Fuerza a determinar

FM1: Fuerza de los músculos posteriores de la Columna

FM2: Fuerza de los músculos anteriores de la Columna

ASTF: Área de Sección Transversal Fisiológica

ASTF1: 14cm^2

ASTF2: 6cm^2

Medidas antropométricas:

- Peso
- Talla
- Altura hombros sentado
- Largura cadera fosa poplítea
- Ancho del tórax (tomado el perímetro a la altura del esternón)

Cálculos estáticos:

$$\sum F = 0 \quad \sum M = 0$$

$$\sum F_x = FRE - FRH_X + FRC_X = 0 \quad (5)$$

$$\sum F_y = W_{torax} + FRC_Y - FRH_Y + FRL5 + FM1 - FM2 = 0 \quad (6)$$

$$\sum M = a * FRH + b * W_{torax} + c * FRC + d * FMI + e * FM2 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{FMI}{ASTF1} = \frac{FM2}{ASTF2} \quad (8)$$

Tabla 8. Resultado espaldar

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
FRE	760N	855.94 N	878.04N
FRL5	3500 N región Lumbar	3500 N región Lumbar	3500 N región Lumbar
Fuerza Critica en el tejido	450N	450N	450N

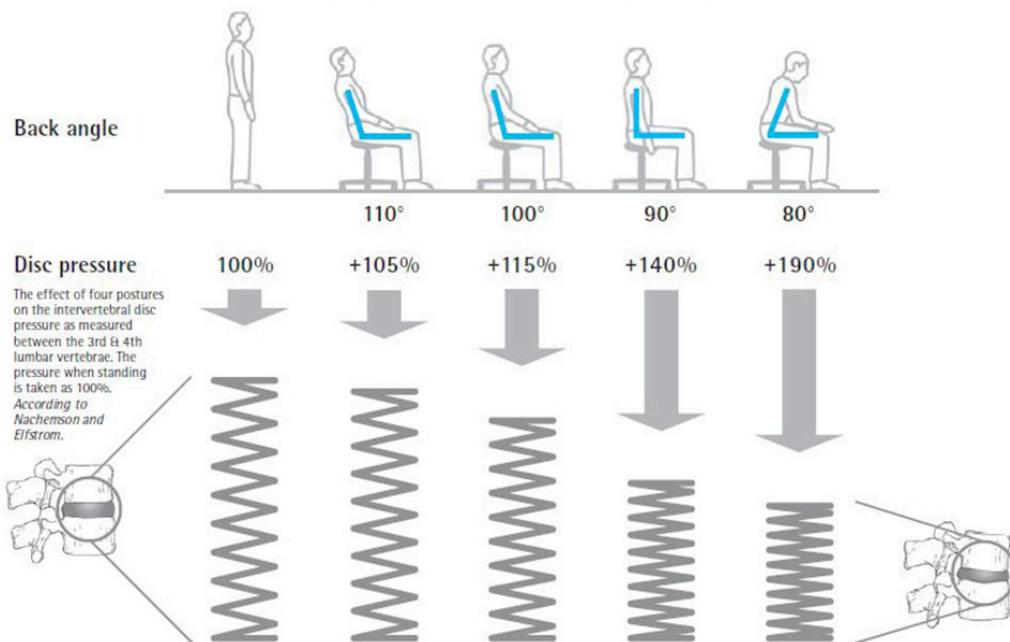


Fig. 8. Importancia de la postura sentado en la compresión de la zona lumbar [3].

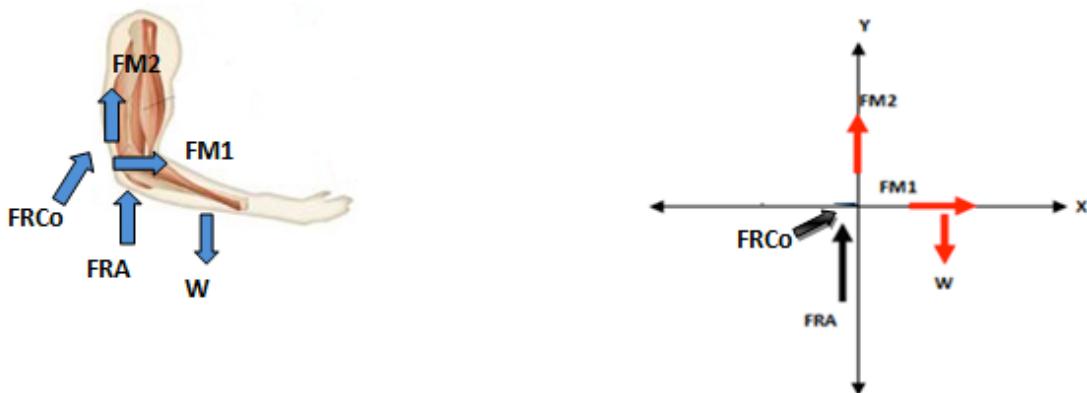
Table 1.
Summary of muscle parameters used in seated-posture-control neuroprosthesis model.

Muscle Segment	l_0 (m)	l_{st} (m)	α (°)	PCSA (cm ²)	r (N/cm ²)	F_{max} (N)
Erector Spinae	0.127 [1]	0.325 [1]	13.0 [1]	26.00 [2]	57.6	1.497.0
Latisimus Dorsi 1 (lateral)	0.328 [3]	0.111	0.0 [3]	2.00 [3]	57.6	115.2
Latisimus Dorsi 2 (medial)	0.321 [3]	0.142	0.0 [3]	2.10 [3]	57.6	121.0
Rectus Abdominis	0.280 [1]	0.076 [1]	0.0 [1]	6.80 [4]	22.0	149.6
External Obliques	0.129 [*] [5]	0.029	0.0	6.85 [6]	22.0	150.7
Internal Obliques	0.091 [*] [5]	0.031	0.0	5.68 [6]	22.0	125.0
Quadratus Lumborum	0.073 [1]	0.045 [1]	7.4 [1]	6.40 [4]	57.6	368.6
Gluteus Maximus 1 (lateral)	0.156 [†] [7]	0.144 [‡] [7]	5.0 [7]	15.01 [7]	32.0	480.4
Gluteus Maximus 2 (central)	0.162 [†] [7]	0.146 [‡] [7]	0.0 [7]	21.51 [7]	32.0	688.2
Gluteus Maximus 3 (medial)	0.158 [†] [7]	0.167 [‡] [7]	5.0 [7]	14.43 [7]	32.0	461.8
Adductor Magnus (posterior)	0.131 [7]	0.260 [7]	5.0 [7]	17.41 [7]	32.0	557.1
Semimembranosus	0.080 [7]	0.359 [7]	15.0 [7]	16.86 [7]	32.0	539.5
Semitendinosus	0.201 [7]	0.262 [7]	5.0 [7]	5.37 [7]	32.0	171.8
Biceps Femoris (long head)	0.109 [7]	0.341 [7]	0.0 [7]	11.74 [7]	32.0	375.7
Rectus Femoris	0.084 [7]	0.346 [7]	5.0 [7]	12.73 [7]	32.0	778.0
Sartorius	0.579 [7]	0.040 [7]	0.0 [7]	1.70 [7]	32.0	103.9
Iliacus	0.100 [7]	0.090	7.0 [7]	8.50 [7]	50.0	425.0
Psoas Major	0.137 [7]	0.183	8.0 [7]	14.70 [7]	50.0	735.0

Fig. 9. Valores típicos de fuerzas y esfuerzos aplicados en músculos y tejidos durante la postura sentado [3].

Análisis estático Apoya-brazos:

Fig.10. Diagrama de cuerpo libre



FRCo: Fuerza de reacción del codo

W: Peso antebrazo- mano

FRA: Fuerza de reacción del Apoya-Brazos ç Fuerza a determinar

FM1: Fuerza del músculo extensor radial corto del carpo

FM2: Fuerza del Bíceps

ASTF: Área de Sección Transversal Fisiológica

ASTF1: 1,5 m²

ASTF2: 4,6 m²

Medidas antropométricas:

- Peso
- Talla
- Altura hombros sentado
- Largura Antebrazo-mano

Cálculos estáticos:

$$\sum F = 0 \quad \sum M = 0$$

$$\sum F_x = FM1 - FRC_{Ox} = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_y = FM2 - W_{Ant} - FRC_{Oy} + FRA = 0 \quad (10)$$

$$\sum M = a * FM2 + b * FM1 + c * W_{tAnt} + d * FRC_o = 0 \quad (11)$$

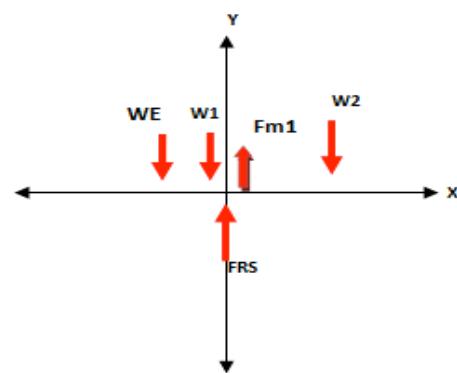
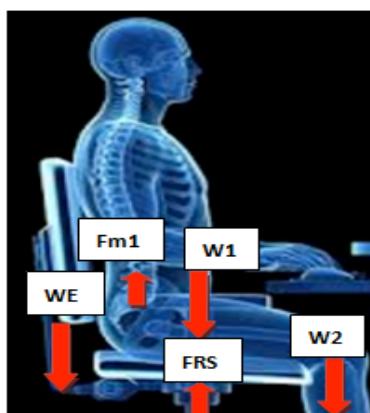
$$\frac{FMI}{ASTF1} = \frac{FM2}{ASTF2} \quad (12)$$

Tabla 9. Resultado apoya brazos

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
FRE	762.5N	764,89 N	765.87N
FM2	768N bíceps femoral	768N bíceps femoral	768N bíceps femoral

Análisis estático sentadura:

Fig 11. Diagrama de cuerpo libre



FRS Fuerza de reacción de la sentadera (Fuerza a determinar)

W1: Peso del la cabeza +peso del tronco

W2: Peso del pie y pierna

WE: Peso del espaldar

Fm1: Musculo Psoas

Medidas antropométricas:

- Peso
- Talla
- CM muslo
- Largo nalga fosa poplítea

Peso de la cabeza= 0.070*Peso corporal *9.8

Peso del tronco=0.507*Peso corporal *9.8

Peso pierna pie= 0.06*Peso corporal *9.8

Las constantes a, b y c hace referencia a la distancia de cada una de las fuerzas con respecto a la FRS

- a= CM
- b= Largo nalga fosa poplítea
- c= 0.02 m
- d=0.01

Cálculos estáticos:

$$\sum F_x = \sum F_y = \sum M = 0$$

$$\sum Fx = 0 \quad (13)$$

$$\sum Fy = Fm1 + FRS - W1 - W2 - WE = 0 \quad (14)$$

$$\sum M = a * W1 + b * W2 + c * WE + d * Fm1 = 0 \quad (15)$$

$$FRS = W1 * \left(1 + \frac{a}{0.01}\right) + W2 * \left(1 + \frac{b}{0.01}\right) + WE * 2$$

Donde WE es el peso del espaldar y se determino a partir del promedio de masas medidas de espaldares existentes.

Espaldar

0,9 Kg

1 Kg

1,2Kg

0,8Kg

0,9Kg

Prom=0.98

WE=0.98*9.8=9.4N

Para el análisis estático se tuvo en cuenta musculo Psoas ilíaco (Fm1) ya que las lesiones de la cadera y de la pelvis en muchos casos se presentan por las tendinitis o bursitis del iliopsoas, que están estrechamente interrelacionadas ya que la inflamación de una, inevitablemente causa inflamación de la otra, debido a su estrecha proximidad.

Tabla 10. Resultado sentadera

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
FRS	1456N	1825 N	2180N
Fuerza Critica en el tejido	688N	688N	688N

Análisis estático cilindro:

Fig 12. Diagrama de cuerpo libre



F_{RB} : Fuerza de reacción de la base (Fuerza a determinar)

W_1 : peso total del cuerpo

W_2 : Peso espaldar + peso de la sentadera

W_3 : Peso de la base

Medidas antropométricas:

- Peso

Masas de la silla

Para tener un control del peso de las partes de la silla, se realizó una toma de datos de dichas partes, donde se determinó la masa de cada una de ellas.

Tabla 11. Masas de partes de sillas

	Masa Silla					
	Base Metálica	Espaldar	Asiento y Patas	Asiento	Patas	Total Silla
1	5,2 Kg	0,9 Kg	7,6Kg	1,2Kg	6,4Kg	8,5Kg
2	5Kg	1 Kg	7,6Kg	1,2Kg	6,4Kg	8,8Kg
3	5,5Kg	1,2Kg	8,1Kg	1,6Kg	6,5Kg	9,1Kg
4	5,4 Kg	0,8Kg	7,3 Kg	0,9Kg	6,4Kg	8,5Kg
5	5,1Kg	0,9Kg	7,8Kg	1Kg	6,8Kg	8,9Kg
Promedio	5,24Kg	0,98Kg	7,68Kg	1,18Kg	6,5Kg	8,76Kg
Peso	51,35N	9,6N	75,26N	11,56N	63,7N	85,84N

Cálculos estáticos:

$$\sum F_x = \sum F_y = 0$$

$$\sum Fx = 0 \quad (16)$$

$$\sum Fy = F_{RB} - W_1 - W_2 - W_3 = 0 \quad (17)$$

$$F_{RB} = W_1 + W_2 + W_3$$

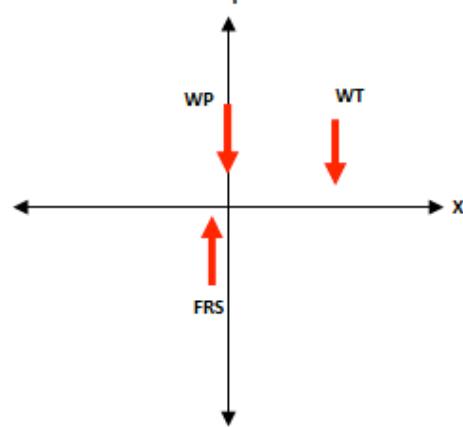
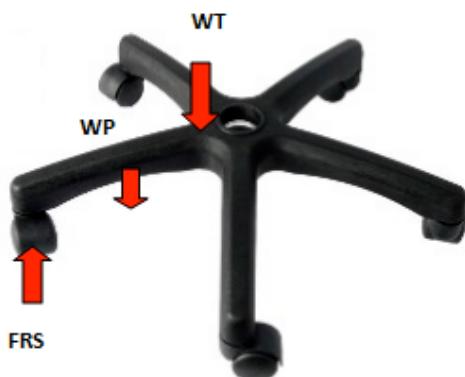
Con los registros de pesos de las partes de la silla y el peso de casa percentil, se determino F_{RB} .

Tabla12. Resultados Cilindro

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
F_{RB}	685N	817 N	856N

Análisis estático, patas de la silla:

Fig. 13. Diagrama de cuerpo libre



F_{RSu} : Fuerza de reacción del suelo (Fuerza a determinar)

WT : Peso total de la silla

WP : Peso de la persona

Medidas antropométricas:

- Peso

Masas de la silla

Se referencian en La Tabla 1

$$\sum F_x = \sum F_y = 0 \quad (18)$$

$$\sum F_y = F_{RSu} - W_T - W_p = 0 \quad (19)$$

$$F_{RSu} = W_T + W_p \quad (20)$$

La ecuación (20) está expresada de manera general para todo el conjunto de patas que conforman la base final de la silla, pero con fin de determinar el mejor material para el diseño de las patas, se redujo el análisis a una sola pata. Por lo que la ecuación (20) se simplifica en la ecuación (21) donde F_{RSu1} es la fuerza de reacción del suelo en cada pata:

$$F_{RSu1} = \frac{W_T + W_p}{5} \quad (21)$$

Con los registros de pesos de las partes de la silla y el peso de casa percentil, se determino F_{RB} (ver Tabla13).

Tabla 13. Resultados Patas

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
F_{Rsu}	149.74N	176.20 N	184.04N

Fig.14. Análisis in situ

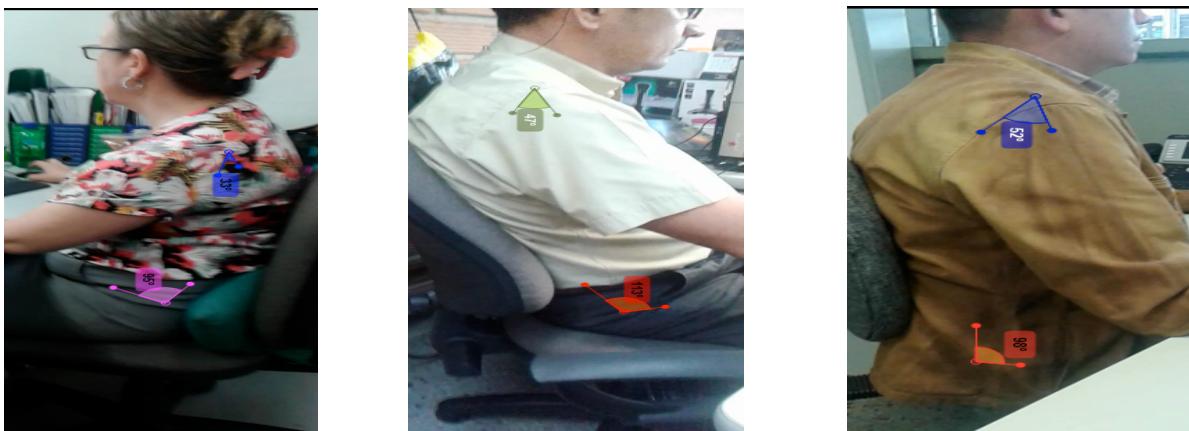


Fig. 15. Análisis simulado



Resultados del Análisis simulado

Por medio de la simulación del puesto de trabajo en el LAM-FUMC, se pudieron validar los ángulos en los cuales se encuentra el tronco con respecto a la cadera para cada percentil, con el fin de tener una aproximación al porque se presentan en ellos los dolores lumbares. Las figuras 16, 17 y 18, describen dichos ángulos en un periodo de tiempo para cada percentil.

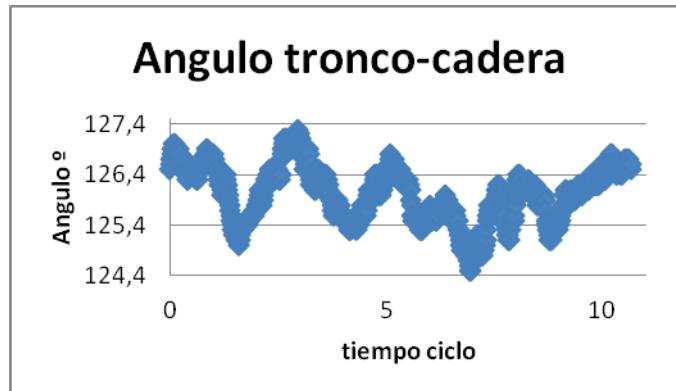


Fig. 16. Angulo tronco-cadera percentil Pequeño.

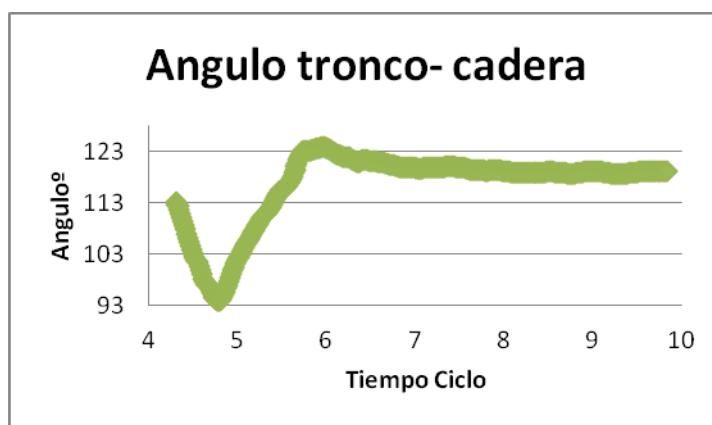


Fig. 17. Angulo tronco-cadera percentil Mediano.

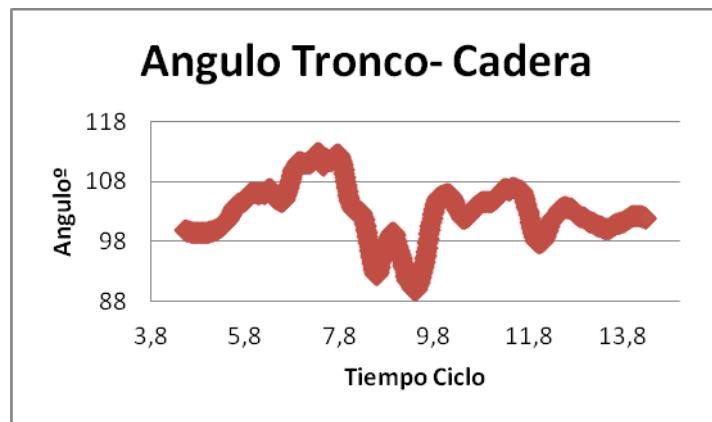


Fig. 18. Angulo tronco-cadera percentil Grande

Las figuras 16 y 17 correspondientes al percentil pequeño y grande, respectivamente, muestran como durante un ciclo de tiempo el cambio en el ángulo del tronco con respecto a la cadera cambia continuamente, lo que refleja movimientos propios de su jornada laboral. El percentil grande comparado con el percentil pequeño, tiene ángulos menores, es decir la inclinación de su tronco es mucho mayor, esto se presenta ya que

las proporciones de la silla son menores comparadas con sus medidas antropométricas, lo que lo lleva a adoptar estas posiciones, las cuales general mayor impacto sobre la zona lumbar. Por su parte como se observa en la Fig. 17, el percentil mediano mantiene un mismo ángulo en casi todo el ciclo de tiempo, lo que conlleva compresión de vasos por largo periodo de tiempo y con estos molestias y cansancio en zona lumbar y miembros inferiores.

7. Diseño de sillas e implementación del CAD (computer assisted design)

7.1. Diseño de sillas para puestos de trabajo

Según la norma ISO 9241-5 [5], el propósito de un buen asiento es proveer un soporte estable al cuerpo y una postura dinámica, la cual es confortable en un periodo de tiempo, fisiológicamente satisfactoria y apropiada a la tarea o actividad que se está desarrollando. Los aspectos de diseño más importantes destacados por esta norma son los siguientes:

1. La correcta altura del asiento asegura el confort de las extremidades inferiores evitando la presión debajo de los muslos. También es muy importante para fijar la posición de las manos y la altura de los ojos, lo cual es crítico para determinar la línea de visión.
2. Una adecuada profundidad del asiento, además de soportar los muslos, permite al usuario sentarse apoyándose en el espaldar del asiento sin causar presión detrás de las rodillas.
3. Un adecuado ancho del asiento permite a los usuarios ajustar su postura. Si el ancho del asiento es muy estrecho, ocurrirá una indebida presión en los muslos que puede restringir el flujo de sangre y causar incomodidad.
4. Una apropiada altura del respaldo permite un adecuado soporte para la espalda y una aceptable curvatura en la espina, minimizando la carga en músculo-esqueleto y reduciendo la probabilidad de dolor de espalda.
5. Una adecuada altura del apoya brazos soporta el sistema muscular del cuello y hombros.
6. La apropiada distancia entre los apoyabrazos permite la fácil entrada ó salida de la silla, mientras provee un soporte apropiado del antebrazo.

7.2. Definición de la geometría

Para definir la geometría adecuada de las sillas, se tuvo en cuenta tanto la normativa que rige según la ergonomía las sillas para oficina, como las recomendaciones según afecciones en dichas sillas. Evaluando las afecciones se tiene lo siguiente:

- Verdadero soporte lumbar: muchas sillas “económicas” dicen que tiene soporte lumbar, pero el verdadero soporte lumbar es algo más que tener un acolchado; es el que mantiene la curvatura natural del hueco que se produce en la espalda.

- Suave curvatura en cascada: el borde de la silla alivia la presión sobre los vasos sanguíneos de los muslos y previene el entumecimiento de las piernas, los pies fríos y las venas varicosas. El borde delantero del asiento debe inclinarse suavemente hacia abajo y no debe presionar su muslo.
- Acolchado: muchas personas se equivocan al comprar sillas muy acolchadas; con el tiempo, el acolchado se adaptará a la mala postura de su espalda.
- Mobilidad: la silla debe poder deslizarse sin esfuerzo para permitirle al cuerpo hacer movimientos de relax.
- Apoya brazos: dejar que la silla, no la parte superior de su espalda, soporte el peso de los brazos mientras trabaja.
- Profundidad: una silla muy profunda puede resultar problemática para una persona de contextura pequeña. Cuando está sentado con la espalda bien apoyada, debería haber suficiente espacio entre el borde de la silla y su rodilla para que quepa un puño cerrado.
- Altura: asegúrese que la silla es suficientemente alta para que sus muslos formen un ángulo de 90° con el piso.
- Cabezal: para evitar una acumulación de carga en el zona cervical, es recomendable descansar por periodos de tiempo la cabeza sobre una superficie confortable.

En Colombia la norma NTC1440 es la encargada de dar los parámetros propios de los implementos de trabajo como lo son las sillas y los escritorios desde la ergonomía por medio de la posición en el trabajo y las recomendaciones que permitan la correcto adaptación del puesto de trabajo a cada usuario por medio algunos parámetros antropométricos de los mismos.

Según la norma NTC 1440 existen dos tipos de sillas:

- Tipo I: Asiento reclinable. Ofrece una fuerza de contra-equilibrio por medio de la escala de inclinación.
- Tipo II: Asiento no reclinable. Asiento fijo; no incorporan fuerza de contra-equilibrio.
 - a) Espaldar reclinable: ofrece una fuerza de contra-equilibrio por medio de la escala de inclinación.
 - b) Espaldar fijo: ajustables manualmente, no incorporan fuerzas de contra-equilibrio.
- Características: Asiento reclinable, base de pedestal, patas o base deslizante, apoyabrazos, rodachinas.

Siguiendo lo descrito anteriormente, se elije en este trabajo una geometría que comprenda seis parte fundamentales para la contracción de la silla, las cuales son: cabezal, espaldar, asiento, apoyabrazos, base y vástago.

Existen algunos fabricantes que cumplen con el diseño descrito anteriormente, los cuales son:

Tabla14. Fabricantes de sillas en Colombia

Diseño	Fabricantes y Referencia
	Sillas y muebles Adempo Ltda. Ref: Silla Mónaco de lujo
	Líneas y Diseños Ref: Mysitz
	JeP mobiliari Ref: milenium
	Tapicería Apolo Referencia :E.003

7.3. Justificación del diseño de sillas

Para escoger el diseño más acorde para las sillas a implementar, se tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales: la geometría de las sillas y las dimensiones de las mismas. Con el fin de determinar la geometría de las sillas se realizó un estudio de algunos fabricantes, para obtener las referencias de sillas que se ajusten a la disminución de las afecciones que se pueden presentar por estas.

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta uno de los diseños proporcionados por los fabricantes que, según su geometría y partes incorporadas, se considera óptimo para propósitos de evitar lesiones en las personas que las usan (ver Fig. 19).



Fig. 19. Silla monaco de lujo.

Con base al estudio antropométrico previo en el cual se identificaron tres percentiles de los empleados de la UdeA, y a lo descrito en la norma, se obtuvieron las dimensiones de la silla como se presentan en las tablas a continuación.

Tabla 15. Medidas antropométricas para silla percentil pequeño

PERCENTIL PEQUEÑO			
	Norma	Antropometría	Dimensiones (cm)
Cabeza	Plano visual-asiento	Altura ojos sentado	101,5
	Ancho	Perímetro cabeza	58,4
Espaldar	Altura hombro codo, coco asiento	Codo hombro, Altura codo asiento	47- 19,5
	Ancho	Ancho hombros	41
Sentadera	Corva nalga	Lar. Nalga a Fosa Poplítea	34
	Ancho de bitrocante	Ancho Cadera	57
Base	Altura silla	Altura Rodilla	51

Tabla 16. Medidas antropométricas para silla percentil mediano

PERCENTIL MEDIANO			
	Norma	Antropometría	Dimensiones (cm)
Cabeza	Plano visual-asiento	Altura ojos sentado	117
	Ancho	Perímetro cabeza	56
Espaldar	Altura hombro codo, coco asiento	Codo hombro, Altura codo asiento	43-21
	Ancho	Ancho hombros	54
Sentadera	Corva nalga	Lar. Nalga a Fosa Poplítea	38,5
	Ancho de bitrocante	Ancho Cadera	48
Base	Altura silla	Altura Rodilla	50

Tabla 17. Medidas antropométricas para silla percentil grande

PERCENTIL GRANDE			
	Norma	Antropometría	Dimensiones (cm)
Cabezal	Plano visual-asiento	Altura ojos sentado	124,5
	Ancho	Perímetro cabeza	61
Espaldar	Altura hombro codo, coco asiento	Codo hombro, Altura codo asiento	50-23
	Ancho	Ancho hombros	46
Sentadera	Corva nalga	Lar. Nalga a Fosa Poplítea	44,5
	Ancho de bitrocante	Ancho Cadera	54
Base	Altura silla	Altura Rodilla	55,5

7.3. Diseño CAD según justificación

Para el modelado CAD de la silla se utilizaron fotos de diferentes versiones comerciales con el fin de detallar características de cada una y lograr un ensamblaje con la mayor cantidad de prestaciones posibles; entre estas características se encuentran:

- Espaldar reclinable.
- Reposa-Cabeza reclinable y de altura variable.
- Cojín del espaldar con un radio de curvatura recomendado para cada perfil antropométrico.
- Reposa-Brazos con una curvatura ergonómica.
- Ensamble sencillo de las piezas
- Dimensiones generales estándar para minimizar el espacio ocupado por la silla.

Una vez determinados los mecanismos y la geometría de la silla, se procedió a realizar las piezas con el software Autodesk Inventor®:



Fig. 20. Reposa-cabeza graduable.

Para el reposa-cabeza se utilizó un sistema corredizo que permite fijar la altura mediante un tornillo, además de un eje de pivote para ajustar el ángulo según la preferencia del usuario.

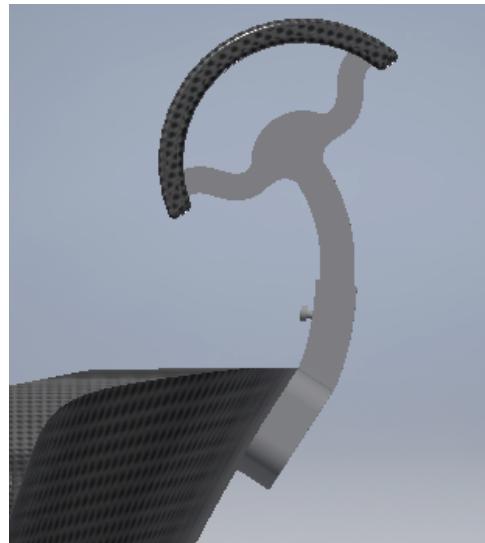


Fig. 21.Pivote del reposa-cabeza.



Fig. 22. Espaldar.



Fig. 23. Pivote del espaldar.



Fig. 24. Cojín del espaldar.

De manera similar al reposa-cabeza, se agregó un pivote en el soporte de acero para autoajustar el ángulo de inclinación según la posición de la persona. Se detalla también la geometría del cojín.



Fig. 25. Geometría del reposa-brazos



Fig. 26. Vista lateral reposa-brazos

El reposa-brazos fue dibujado tomando como referencia una geometría comercial, sin embargo, es valorado si el diseño del fabricante permite variar la altura y la inclinación de éste.



Fig. 27. Soporte.

El soporte dibujado corresponde al diseño estándar comercial compuesto de cinco patas con rodachines de nylon, la base del cojín y un cilindro neumático para variar la altura de la base mediante una palanca.

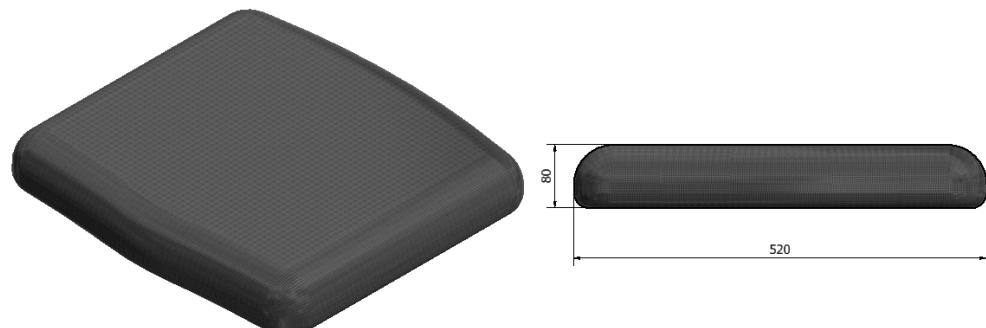


Fig. 28. Cojín.

Ensamble:

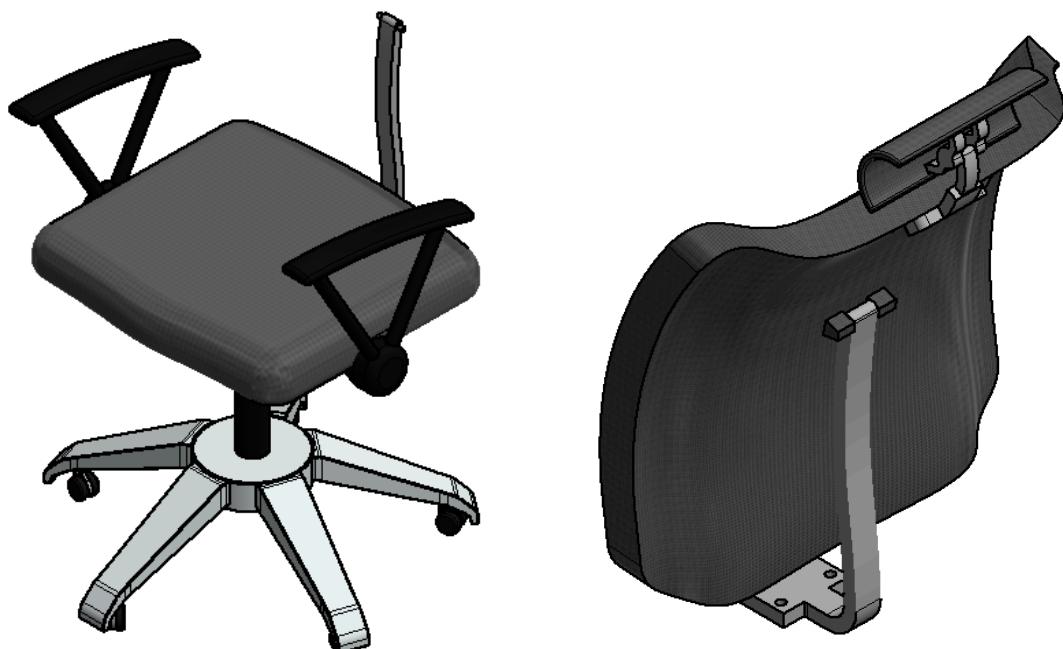


Fig. 29. Sub-ensambles.



Fig. 30. Ensamble final.

Finalmente, se ensamblan las piezas con sus respectivas restricciones para simular el movimiento relativo entre ellas.

8. Implementación del método Ashby para diseño y selección de materiales

Como ejemplos de tareas propias del Diseño Técnico, en términos de su impacto en la funcionalidad del producto, están: el diseño geométrico propiamente dicho, elección adecuada de materiales y procesos de fabricación, etc. En cuanto a la usabilidad a partir del Diseño Técnico, estas tareas deben resolver asuntos relacionados con la interacción del cuerpo humano con el producto (biometría y biomecánica), interacción con la mente (inteligibilidad), interacción con el entorno (biometría, biomecánica, medio ambiente, etc.). Finalmente, los aspectos de satisfacción que resultan de la combinación de las actividades conjuntas del Diseño Técnico e Industrial, comprende propiedades de carácter estético (atractivo para los sentidos), asociaciones (¿que recuerda?), percepciones (¿como hace sentir?), etc.

8.1. Claves metodológicas y selección de materiales

La principal y primera pregunta que activa cualquier método científico de diseño de un producto es...*cual es la necesidad y/o problema a solucionar?* (Ver Fig. 31, esquema de diseño). A partir de dicha pregunta, se genera una larga lista de interrogantes como, posible manera de resolver dicha pregunta (¿cómo se hace?), materiales y procesos para resolver la pregunta (¿de qué se hace?). Todas estas preguntas deben enlistarse y resolverse de manera metódica, como se describe en el esquema de la Fig. 31.

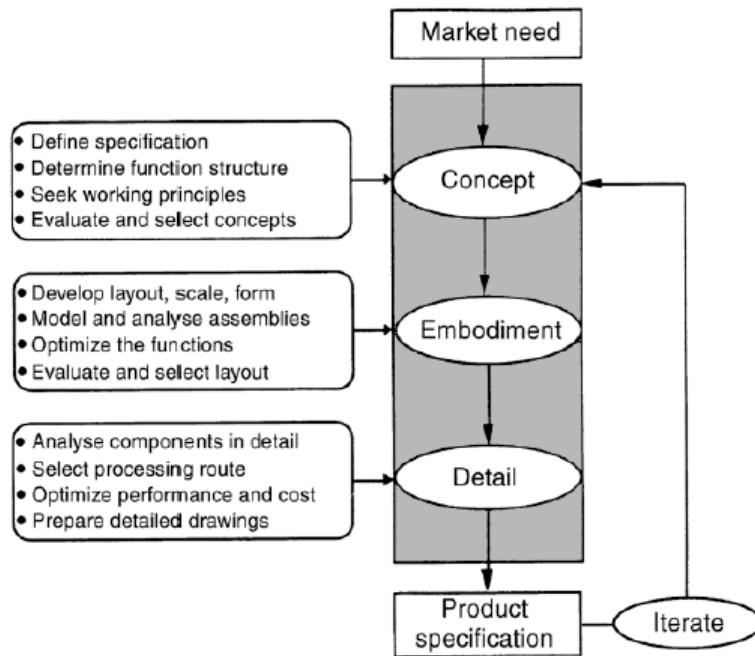


Fig. 31. Metodología de diseño de un producto [4].

Con el propósito de llevar a cabo esta selección de material de manera inteligente, Mike Ashby [4] desarrolló una metodología que se apoya en los diagramas que él mismo elaboró (Ver Fig. 32). Estos diagramas, también conocidos como *Diagramas de Ashby*, *de Globos* o *de Bucles*, ofrecen importantes ventajas con respecto a los primeros diagramas lineales, los cuales relacionan propiedades con los diferentes materiales de ingeniería (también conocidos como *Diagramas de Barras* o *de límites*):

1. El éxito de la aplicación de un material depende de la combinación de varias propiedades, tal y como lo relaciona los *Diagramas de Ashby*.
2. Es conveniente graficar relaciones entre propiedades, identificando campos de clases de materiales, ya que:
 - a. Se condensa un gran campo de información.
 - b. Se obtienen correlaciones entre propiedades del material.
 - c. Permite optimizar el comportamiento de un componente y, por tanto, del diseño.
 - d. Permiten obtener relaciones fundamentales entre propiedades.
 - e. Muestra varias familias de materiales separadas por envolventes.

La metodología inteligente desarrollada por Ashby [4], para la selección de materiales usando sus diagramas, consiste en los siguientes pasos:

1. Traducción del problema de diseño identificado: expresar los requisitos del diseño en términos de restricciones.
2. criba o filtro: descartar los materiales que no cumplen.
3. Clasificación: ponderar los materiales que mejor desempeñan la función.
4. Información de respaldo: complementar atributos e información adicional sobre los materiales, para seleccionar el primer candidato para fabricar el producto.

A su vez, la implementación del primer paso de traducción de requisitos de diseño en el lenguaje metodológico, debe desarrollarse según lo siguiente:

1. Función del producto: ¿qué misión funcional debe cumplir el producto?
2. Restricciones: ¿qué condiciones debe satisfacer el producto?
3. Función objetivo: ¿cuál es la función a maximizar o minimizar?
4. Variables libres: ¿cuáles son?
5. Función de performance para el producto, incluyendo el Índice de Material para usar los *Diagramas de Ashby*.
6. Filtrar, clasificar y seleccionar el mejor material candidato.

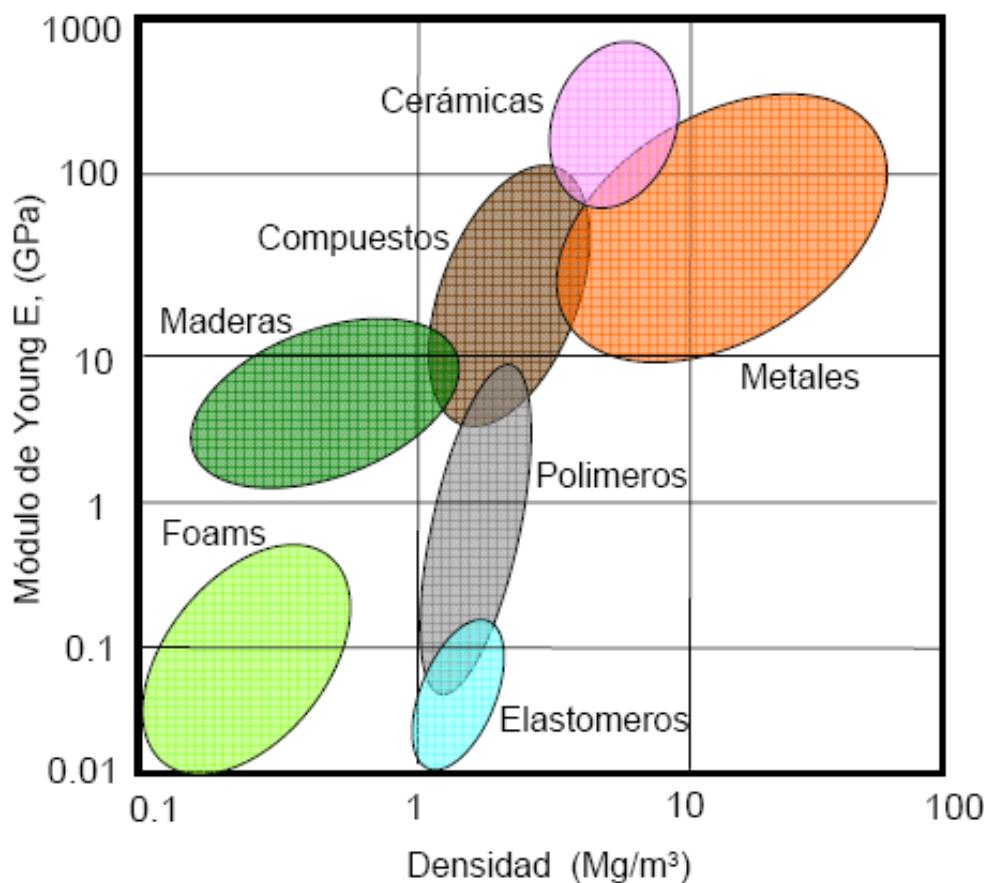


Fig. 32. **Diagramas de Globos desarrollados por Ashby [4].**

8.2. Metodología y resultados para la implementación del método Ashby: diseño y selección de materiales.

En este trabajo seguimos la metodología descrita en la Fig. 31. Para ello, en esta fase inicial fijamos una geometría estándar bajo criterios de confortabilidad encontrados en la teoría [5] y suministrados por normas [6], además de fabricantes internacionales, para concentrarnos en una óptima selección de los materiales.

En la selección de los materiales con mejores características, para el objeto de estudio de este proyecto, se adoptó la metodología propuesta por Ashby la cual por medio de la

relación entre las propiedades generales de los materiales ayuda a la correcta selección de los mismos. La metodología consta de cuatro pasos en los cuales se implementarán tanto las ecuaciones obtenidas anteriormente mediante el análisis biomecánico, como las características de diseño basadas en las normas internacionales, dichos pasos son los siguientes.

Traducción: expresar como función, objetivos (que hay que maximizar o minimizar), restricciones (condiciones que me limitan) y se establecen las variables libres. Finalmente se traduce el problema en una función de desempeño la cual depende de un estímulo mecánico (F), la geometría (G) y de las propiedades del material o índice del material (M).

$$P(\text{rendimiento}) = f\{[F], [G], [M]\} \quad (22)$$

Filtro: una vez determinada la función de desempeño se procede a buscar los materiales según las gráficas de Ashby, posteriormente se descartan los materiales que no cumplen con los requisitos de diseño.

Clasificación: en esta fase se buscarán de los materiales que pasen el filtro aquellos que realicen el mejor trabajo.

Información respaldada: Investigación y estudio a fondo de los materiales mejor clasificados.

Luego de emplear la metodología descrita anteriormente para cada uno de los componentes de la silla, se obtuvieron las ecuaciones de rendimiento y que, además, luego de realizar el análisis para cada índice de material en los gráficos de globo proporcionaron un listado amplio de materiales que luego de ser filtrados arrojaron los mejores candidatos para cada una de las partes como se mostrará a continuación.

Respaldo y cabecera

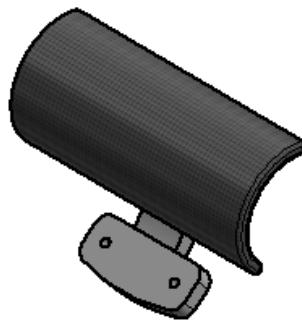


Fig. 33. Cabecera de la silla con la geometría seleccionada



Fig. 34. Respaldo de la silla con la geometría seleccionada.

Tanto para el respaldo como para el cabezal, el modelo implementado es el mismo pues soportan esfuerzos en la misma dirección y la estructura es similar. En este caso se realizó la aproximación a un sistema de viga en voladizo como se muestra en la figura 35.

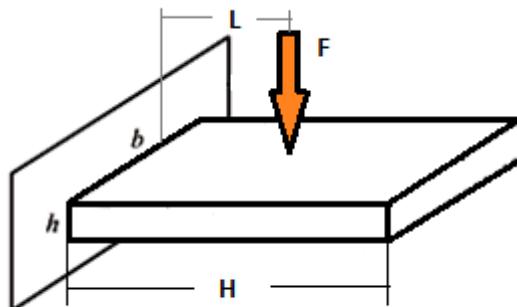


Fig. 35. Viga en voladizo.

Si se requiere que la silla sea relativamente liviana, se debe procurar que esta parte sea más liviana, pues gran parte del peso de la silla lo tiene su base.

Función: Respaldo, Cabezal

Objetivo: Minimizar Masa

$$\rho = \frac{m}{V}; m = \rho * V = \rho * A * h = \rho * H * b * h$$

Restricciones: Tamaño, capacidad de soportar la carga sin fallar

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_y}{F_s}; \sigma_a = \frac{6 * F_R * L}{b * h^2}; \therefore L = \frac{H}{2}; \sigma_a = \frac{3 * F_R * H}{b * h^2}$$

$$\text{Variable Libre: Área (b*h)} m = \rho * H * b * h \quad \therefore b * h = \frac{3 * F_R * F_s * H}{\sigma_y * h}$$

$$m = \rho * H * \frac{3 * F_R * F_s * H}{\sigma_y * h} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\text{Performance}}$$

$$m = \frac{3 * F_R * F_s * H^2}{h} * \frac{\rho}{\sigma_y}$$

Para minimizar la masa

$\rho \rightarrow$ Pequeño

$\sigma_f \rightarrow$ Grande

En el caso del espaldar

$F_R = F_{RE}$

$$FRE = A * W_{torax} + A * (P * 0.8 * W_{torax} * \sin \theta) + 150[A * (0.57 + (0.02 \frac{P}{\pi}) \sin \theta) - \cos \theta (0.02 + \frac{P}{\pi})] - AFRL\% - \cos \theta (P * 0.8 * W_{torax})$$

En el cabezal por su parte

$F_R = F_{RZ}$

$$FRZ = A * \left(W_{cabezal} * \left(-\frac{CM}{0.009} + 1 \right) \right) + A * FRC1$$

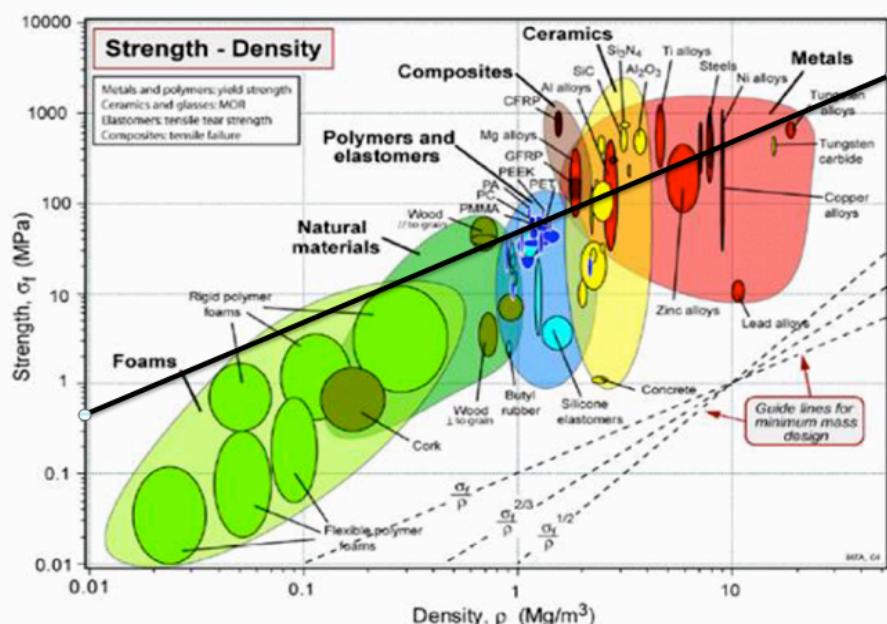


Fig. 36. Grafico Ashby, Esfuerzo vs Densidad [4].

Al analizar la Fig. 36 se encuentra una línea de pendiente 1 la cual indica cuales materiales tienen el mismo índice, para luego de acuerdo a la funcionalidad (función objetivo) realizar el filtro de los mismos computacionalmente en la herramienta desarrollada en Matlab seleccionando los materiales que permitan disminuir la masa y aumentar la resistencia

Asiento



Fig. 37. Asiento de la silla con geometría seleccionada.

Para realizar el análisis se hace necesario hacer una aproximación del objeto Figura 4 o parte estudiada de la silla, para el caso el asiento, como tiene dos apoyos laterales se simplificó el sistema como una biga de doble apoyo con una fuerza aplicada en el centro.

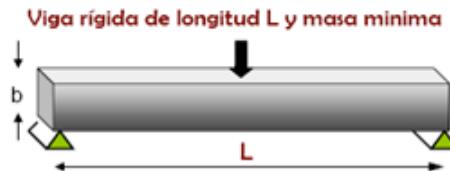


Fig. 38. Viga de doble apoyo.

Función: Asiento

Objetivo: Minimizar Masa

$$m = A \cdot d \cdot \rho$$

Restricciones: Tamaño, capacidad de soportar la carga sin fallar

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_f$$

Variable Libre: Área

$$m \geq \frac{F_{RS} \cdot d \cdot \rho}{\sigma_f} \longrightarrow m \geq F_{RS} \cdot d \cdot F_s \cdot \frac{\rho}{\sigma_f}$$

→ **Performance**

Para minimizar la masa

ρ → Pequeño

σ_f → Grande

$$FRS = W1 \cdot \left(1 + \frac{a}{0.01}\right) + W2 \cdot \left(1 + \frac{b}{0.01}\right) + WE \cdot 2$$

Se realiza el filtro de los materiales que no cumplen con el trabajo especificado mediante la Fig. 36, del cual se pueden descartar de manera intuitiva, materiales como las maderas por su alta densidad y los cerámicos por la fragilidad

Reposa brazos



Fig. 39. Reposa brazo con la geometría seleccionada.

Para realizar el análisis se hace necesario hacer una aproximación del objeto, para el caso el asiento, como tiene dos apoyos laterales se simplificó el sistema como una biga de doble apoyo con una fuerza aplicada en el centro.

Función: Asiento

Objetivo: Minimizar Masa

$$m = A \cdot d \cdot \rho$$

Restricciones: Tamaño, capacidad de soportar la carga sin fallar

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_f$$

Variable Libre: Área

$$m = \frac{F_{RA} \cdot d \cdot \rho}{\sigma_f} \longrightarrow m = F_{RA} \cdot d \cdot F_s \cdot \frac{\rho}{\sigma_f}$$

$$F_{RA} = F_{M2} \cdot \left[1 + \frac{\cos \alpha \cdot (0,05 + 0,32b)}{0,07} \right] - \frac{\cos \alpha \cdot W_{Ant} \cdot c}{0,07} + W_{Ant}$$

Performance

Para minimizar la masa

$\rho \longrightarrow$ Pequeño

$\sigma_f \cdot \longrightarrow$ Grande

Cilindro neumático



Fig. 40. Cilindro neumático

Se realizó la simplificación del sistema de la Fig. 40, como un vástago sometido a fuerzas de compresión, el cual debe tener como característica que sea Fuerte, rígido, durable (Figura 41).



Fig. 41.Vástago bajo fuerzas de compresión.

Función: vástago

Objetivo: Minimizar Masa

$$m = A \cdot L \cdot \rho$$

Restricciones: Tamaño, capacidad de soportar la carga sin fallar

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_f$$

Variable Libre: Área

$$m \geq \frac{F_{RB} \cdot L \cdot \rho}{\sigma_f} \longrightarrow m \geq F_{RB} \cdot L \cdot F_s \cdot \frac{\rho}{\sigma_f}$$

$$F_{RB} = W_1 + W_2 + W_3$$

Para minimizar la masa

ρ → Pequeño

σ_f . → Grande

Performance

Base de la silla

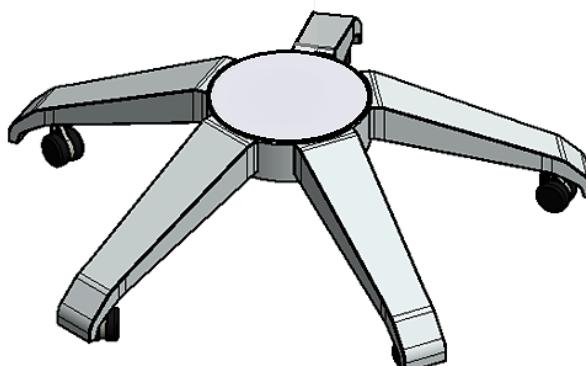


Fig. 42. Base de la silla con la geometría seleccionada.

Requerimientos de diseño

- Fuerte, rígido, durable
- Esfuerzos: en el centro debe garantizar que las puntas no se flexionen
- Debe ser lo suficientemente pesada para que la silla no se vuelque al reclinarse
- La fuerza debe considerarse especialmente en las conexiones entre el cilindro y las patas, para proteger contra fallas

Función: Soporte

Objetivo: Maximizar masa

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{AL}$$

Despejando la masa se tiene

$$m = \rho \cdot A \cdot L \quad (1)$$

Restricciones: Rígidez alta

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_y \quad (2)$$

Variable libre: de (2) despejo A

$$A = \frac{F_{Rsu}}{\sigma_y} \quad (3)$$

De (3) en (1)

$$m = F_{Rsu} * F_s * L * \frac{\rho}{\sigma_y}$$

$$F_{Rsu1} = \frac{W_T + W_P}{5}$$

Performance

ρ : debe ser alta para asegurar que sea una base pesada, para soportar el peso de la silla y la persona, y para que no se vuelque al reclinarse; pero además E y σ_y deben ser lo suficientemente altos para proteger contra deformaciones.

9. Validación de la metodología en el análisis biomecánico

Método de validación para el espaldar

Después de diseñar la nueva silla, según criterios de diseño y selección del material, se evaluó la fuerza de compresión en las vertebras lumbares. Para ello, se enfoca el análisis en L5 con el fin de ver si el nuevo diseño logra disminuir la incidencia la fuerza aplicada. Para el análisis de la fuerza, se parte del diagrama de cuerpo libre y las ecuaciones que se describen a continuación.

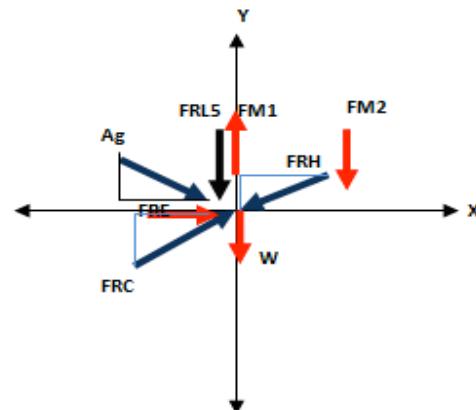
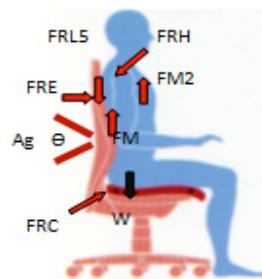


Fig. 43. Diagrama de cuerpo libre

FRH: Fuerza de reacción del hombro

FRC: Fuerza de reacción de la cadera

W: Peso del tronco

FRL5: Fuerza de reacción en L5 (Fuerza a determinar)

FRE: Fuerza de reacción del espaldar

FM1: Fuerza de los músculos posteriores de la Columna

FM2: Fuerza de los músculos anteriores de la Columna

Ag: Ángulo de curvatura de la columna, para este caso se tomó de 50°

Medidas antropométricas:

- Peso

- Talla
- Altura hombros sentado
- Largura cadera fosa poplítea
- Ancho del tórax (tomado el perímetro a la altura del esternón)

Peso del tronco= 0.507*Peso corporal *9.8

CM= 0.4883*altura hombros sentado

Ag= (Altura hombro codo + coco asiento)/2

FM2: Músculos anteriores de la columna

En la tabla1 se hace referencia a los músculos de la pared abdominal con su respectiva Área de Sección Transversal Fisiológica (ASTF) y la fuerza máxima soportada por los mismos.

Tabla 18. Músculos abdominales

MUSCULOS	ASTF(<i>cm</i> ²)	Fmax (N)
Recto Mayor	6,8	149
Oblicuo Mayor	6.85	150
Oblicuo Menor	5,68	126
Transverso	1,9	nc

Los músculos descritos en la Tabla 18 se tomaran como un bloque de músculos denominado FM2, por lo tanto el Área de Sección Transversal Fisiológica (ASTF) para este bloque será un Área aproximada de 6cm^2

FM1: Músculos posteriores de la columna

Los músculos que intervienen en la cinética de la columna lumbar, pueden clasificarse en función de la posición anatómica de los músculos. En la Tabla 19 se hace referencia a los músculos posteriores de la columna con su respectiva Área de Sección Transversal Fisiológica (ASTF) y la fuerza máxima soportada por los mismos.

Tabla 19. Músculos posteriores de la columna

MUSCULOS	ASTF(<i>cm</i> ²)	Fmax (N)
Dorsal largo lateral	2	115,2
Iliocostal	26	1497
Espinoso	26	1497
Dorsal largo Medial	2,1	121
Psoas	14,7	735

Los músculos descritos en la Tabla 19 se tomaran como un bloque de músculos denominado FM1, por lo tanto el Área de Sección Transversal Fisiológica (ASTF) para este bloque será un Área aproximada de 14cm^2

FRL5: Fuerza de compresión en L5

Según el NIOSH (National Institute of Occupational Safely and Health) el valor máximo recomendable de la fuerza de compresión en las vertebras L5/S1 es de 3500N para los hombres y un 25% menos para las mujeres.

Cálculos estáticos

$$\sum F_x = FRE - FRH_x + FRC_x + Ag_x = 0 \quad (23)$$

$$\sum F_y = W_{torax} + FRC_y - FRH_y + FRL5 + FM1 - FM2 - Ag_y = 0 \quad (24)$$

$$\sum M = a * FRH + b * W_{torax} + c * FRC + d * FM1 + e * FM2 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{FM1}{ASTF1} = \frac{FM2}{ASTF2} \quad (26)$$

Se tiene:

$$FRH_x = FRH \sin \alpha$$

$$FRH_y = FRH \cos \alpha$$

Donde α es el ángulo de la articulación del hombro con respecto al tronco

$$FRC_x = FRC \cos \Theta$$

$$FRC_y = FRC \sin \Theta$$

Donde Θ es el ángulo de la articulación de la cadera con respecto al tronco

$$Ag_x = Ag \cos 50$$

$$Ag_y = Ag \sin 50$$

Donde 50° es el ángulo de curvatura de la columna

Las constantes a,b,c,d y e hace referencia a la distancia de cada una de las fuerzas con respecto a la zona lumbar L5

- a= 0.08m
- b= $\frac{P}{2\pi}$
- c=0,02m
- d=0,05m
- e= $\frac{P}{\pi}$

Donde P es el perímetro del tronco (Ver antropometría ancho tórax)

$$FM1 = \frac{ASTF1}{ASTF2} * FM2$$

$$FMI = \frac{6}{14} FM2$$

$$FM1 = 0.43 FM2$$

Organizando las ecuaciones con las consideraciones anteriormente establecidas y teniendo en cuenta que la variable de interés es FRE se tiene lo siguiente:

$$FRE = FRH \cos \alpha - FRC \sin \Theta - Ag \cos 50 \quad (i)$$

$$-FRH = \frac{W_{torax} + (P * 0.8 * W_{torax} * \sin \Theta) + FM2 * (0.57 + (0.02 + \frac{P}{\pi}) * \sin \Theta) - FRL5 + Ag \sin 50}{\cos \alpha \sin \Theta} \quad (ii)$$

$$-FRC = (P * 0.8 * W_{torax}) + 0.08 FRH + FM2 \left(0.02 + \frac{P}{\pi} \right)$$

(iii)

Ahora con (ii) en (iii), (ii) y (iii) en (i) se tiene:

$$FRE = \frac{W_{torax} + (P * 0.8 * W_{torax} * \sin \Theta) + FM2 * (0.57 + (0.02 + \frac{P}{\pi}) * \sin \Theta) - FRL5 + Ag \sin 50}{\cos \alpha * (\cos \Theta * (P * 0.8 * W_{torax}) + FM2 * (0.02 + \frac{P}{\pi})) - Ag \cos 50} \quad (0.08-)$$

De la ecuación anterior se tiene a FRE en función de FRL5

Reorganizando términos

Donde A es:

$$A = \left[\frac{0.08 - \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \Theta} \right]$$

$$FRE = A$$

$$W_{torax} + A(P * 0.8 * W_{torax} * \sin \Theta) + 150[A * (0.57 + (0.02 + \frac{P}{\pi}) * \sin \Theta) - \cos \Theta * (0.02 + \frac{P}{\pi})] - AFRL5 - \cos \Theta * (P * 0.8 * W_{torax}) + Ag * (\sin 50 - \cos 50)$$

Despejando FRL5

$$FRL5 =$$

$$W_{torax} + (P * 0.8 * W_{torax} * \sin \Theta) + 150[* (0.57 + (0.02 + \frac{P}{\pi}) * \sin \Theta) - \cos \Theta * (0.02 + \frac{P}{\pi})] - AFRE - \cos \Theta * (P * 0.8 * W_{torax}) + A * Ag * (\sin 50 - \cos 50)$$

Percentiles

En la Tabla 20 se encuentran las medidas antropométricas por cada percentil a evaluar, las cuales son necesarias para dar solución a la ecuación de FRE

Tabla 20. Medidas por cada percentil

Medidas	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
Peso	62.5 Kg	76Kg	80Kg
Talla	147 cm	170cm	175cm
W tronco	350N	377N	397N
CM	46,4 cm	48,34cm	52,24cm
Perímetro tórax	82cm	102cm	99cm
α in situ	29°	33°	34°
α simulado	30°	32°	36°
Θ in situ	95°	96°	98°
Θ simulado	96°	111°	99°
Altura hombro codo, codo asiento	47- 19,5	43-21	50-23

Resultados

Tabla 21. Resultados de FRL5 para cada percentil

FUERZAS	PERCENTILES		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
FRL5	838.12N	1031N	1839N
FRE	760N	855.94 N	878.04N

Nótese que en la Tabla 21 se evidencian los resultados de FRL5 para cada percentil, según su máximo FRE. Teniendo en cuenta que los cálculos previos para determinar la fuerza máxima de reacción del espaldar se realizaron en función de la fuerza máxima de compresión en L5, la cual es de 3500N, se puede evidenciar que con la nueva geometría y los materiales propuestos dicha fuerza sobre L5, disminuyó considerablemente para cada percentil. Esta es la validación inicial buscada, la cual indica que se pueden disminuir las afecciones en la zona lumbar al implementar el diseño de silla propuesto.

10. Desarrollo de la herramienta informática para la selección de sillas (Matlab)

Una vez hecha la validación de la función objetivo (diseño y materiales de las sillas), hemos diseñado e implementado la herramienta informática que permite seleccionar la mejor silla, en función de la antropometría, análisis biomecánico y función de los puestos de trabajo. La herramienta se ha desarrollado con Matlab.

10.1. Metodología y resultados para el desarrollo de una herramienta informática para la selección de sillas (Matlab)



Fig. 44. Interface informática en Matlab para la selección de las sillas.

10.2. Ejemplo y resultados de utilización de la herramienta informática para la selección de sillas (Matlab)

```

zlabel('FRE'); function Ashby

clc;
clear all;

Material=['PE medium' 'PE high' 'GFRP' 'PP' 'ABS' 'PVC' 'PS' 'PET' 'PC' 'PEEK' 'PE
low' 'CFRP'];
Gmaterial=[15.5 25.5 79 34 43 70.5 54.5 81 70.5 95 72 345];
dmaterial=[775 1275 2468.75 850 1075 1410 1090 1350 1175 1187.5 900 1725];
Ematerial=[48000 78000 72000 145000 245000 335000 305000 24000 235000 360000
18000 480000];
indice=[0.02 0.02 0.031 0.041 0.041 0.051 0.051 0.061 0.061 0.07 0.08 0.2];
Fmax=900;
FS=1.2;
masa=0.1:0.1:6.1;
[n,m]=size(masa);

for i=1:m%% i representa masa
  for j=1:12%% j representa material
    d(i,j)=1000000*masa(i)*indice(j)/(Fmax*FS);
  end
end

for i=1:5
  subplot(2,3,i)
  plot(indice,d(10*i-9,:))
  xlabel('índice de material');
  ylabel('espesor del espaldar');
  title('Ashby espaldar');
end

d

subplot(2,3,6)
imagen=imread('leyenda.jpg');
image(imagen);
title('Leyenda eje x');
axis off

function espaldar

clear all
clc
clf
close all

s=menu('ANÁLISIS GRÁFICO ESPALDAR','PERCENTIL GRANDE','PERCENTIL
MEDIANO','PERCENTIL POEQUEÑO');
```

```

switch s,
case 1
  Wtorax=397;
  P=0.99;
  alfa=33*pi()/180;
case 2
  Wtorax=377;
  P=1.02;
  alfa=32*pi()/180;
case 3
  Wtorax=350;
  P=0.82;
  alfa=29*pi()/180;
end

x=800:1:3400;
y=pi()/2:0.1:2*pi()/3;
[FRL5,teta] = meshgrid(x,y);
A=((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta))).* Wtorax + ((0.08-sin(alfa))
./(cos(alfa)+sin(teta))).*P.*0.8.* Wtorax.*sin(teta);
B=150.*(((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta))).* (0.57 + (0.02 + P./pi()).* sin(teta))-cos(teta).* (0.02 + P./pi()))- cos(teta).* P .* 0.8 .* Wtorax;
C=((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta)));
FRE1= A + B - C.*FRL5 ;
Fmaximo=max(max(FRE1));

figure(1)
surf(x,y,FRE1)
xlabel('FRL5');
ylabel('teta');
title(['FREmax = ',num2str(Fmaximo)]);

teta=pi()/2:pi()/24:2*pi()/3;

[n,m]=size(teta);
FRE=zeros(n,m);

figure(2)
for i=1:m;
  A=((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta(i)))) .* Wtorax + ((0.08-sin(alfa))
./(cos(alfa)+sin(teta(i)))).*P.*0.8.* Wtorax.*sin(teta(i));
  B=150.*(((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta(i)))) .* (0.57 + (0.02 + P./pi()).* sin(teta(i)))- cos(teta(i)).* (0.02 + P./pi()))- cos(teta(i)).* P .* 0.8 .* Wtorax;
  C=((0.08-sin(alfa))./(cos(alfa)+sin(teta(i)))));
  FRE= A + B - C.*FRL5 ;
  subplot(2,3,i)
  plot(FRL5,FRE)
  xlabel('FRL5');
  ylabel('FRE');
  title(['teta = ',num2str(teta(i)*180/pi())]);
end

```

```

subplot(2,3,6)
plot(FRL5,FRE)
xlabel('FRL5');
ylabel('FRE');
title('TODOS');
hold on
end

```

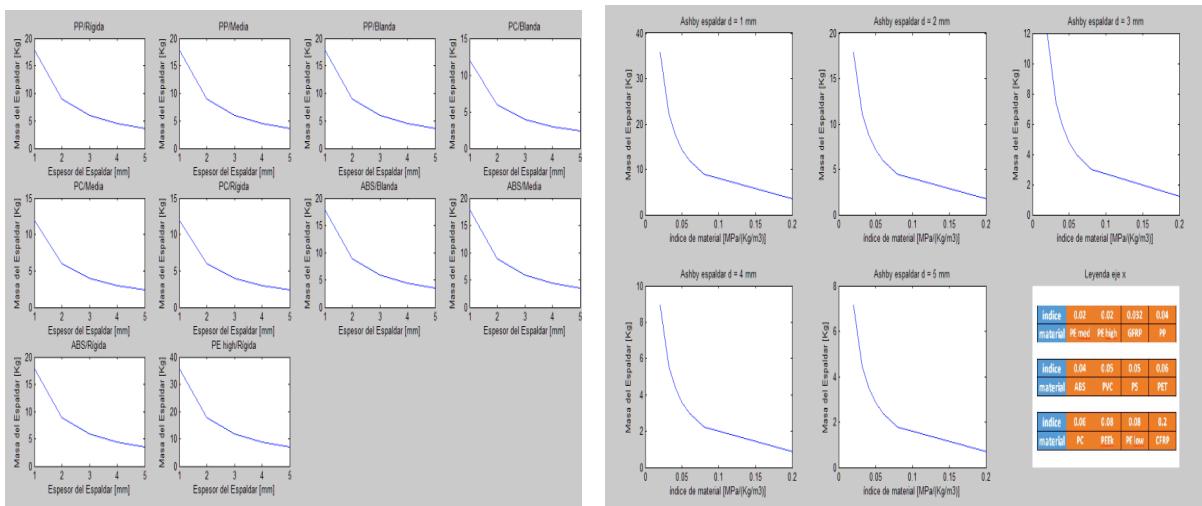


Fig. 45. Lista de resultados de masa en función del espesor del espaldar, para diferentes materiales arrojados por el programa.

Se presenta la masa óptima para un espesor máximo de 5mm

PP/Rígida	$E = 7440 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
PP/Media	$E = 7364 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
PP/Blanda	$E = 7288 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
PC/Blanda	$E = 11788 \text{ MPa/m}^2$	masa = 2.385720 Kg
PC/Media	$E = 11864 \text{ MPa/m}^2$	masa = 2.385720 Kg
PC/Rígida	$E = 11940 \text{ MPa/m}^2$	masa = 2.385720 Kg
ABS/Blanda	$E = 12288 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
ABS/Media	$E = 12364 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
ABS/Rígida	$E = 12440 \text{ MPa/m}^2$	masa = 3.578580 Kg
PE high/Rígida	$E = 4090 \text{ MPa/m}^2$	masa = 7.157160 Kg
>		

Fig. 46. Masa optima del espaldar, para un espesor máximo y los diferentes materiales candidatos.

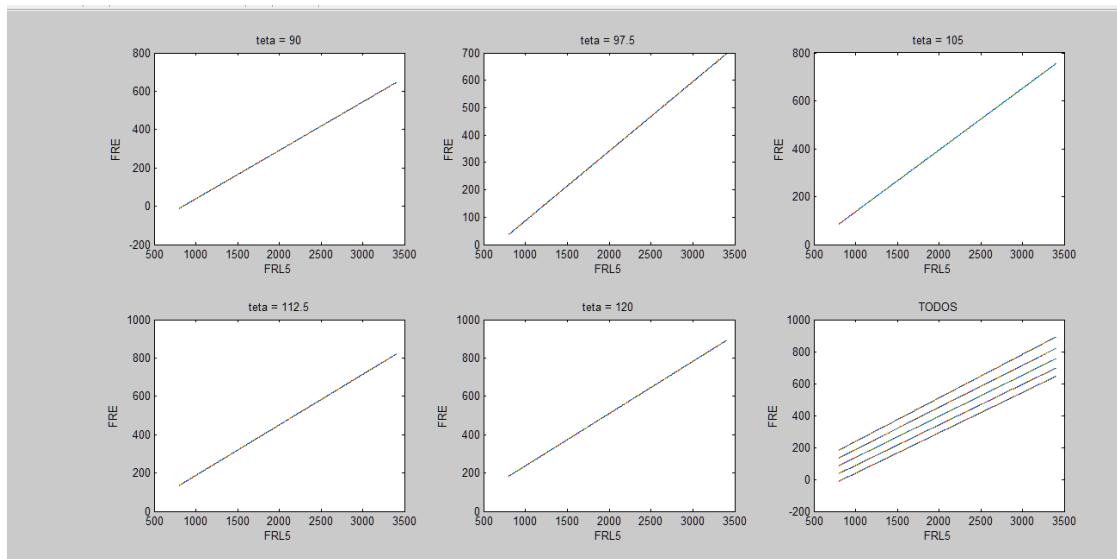


Fig. 46. Fuerza de reacción en el espaldar (FRE) en función de la fuerza de reacción en la L5 (FRL5), calculada por el programa y validada con respecto a la literatura.

11. Herramienta para evaluación económica preliminar de los proveedores

Para la correcta selección de las sillas de la UdeA, se realizó el presente modelo de evaluación preliminar, el cual sólo se presenta como una sugerencia de algunos aspectos que se deberían tener en cuenta en el momento de la selección, sujeto a cambios necesarios. En dicho modelo de evaluación económica se toma como valor máximo de cada variable la unidad; es decir, las sillas que cumplan con el requisito tendrán un puntaje de una unidad, de lo contrario recibirán valores inferiores a esta.

Inicialmente, se evaluarán los aspectos técnicos de las sillas; los ofertantes con mejores características serán quienes reciban mejores puntajes en este ítem, el cual tiene un peso del 50% dentro de la selección. Por último, se evaluarán aspectos económicos, los cuales también tendrán un peso del 50% en la selección:

$$ETot = ETec * 50\% + EE * 50\% \quad (27)$$

En la evaluación técnica para cada una de las partes de la silla (Espaldar, cabecal, asiento, apoyabrazos, cilindro y base) se tendrán en cuenta, de mayor a menor importancia, variables como el material, la geometría y la movilidad de las piezas, cuando aplique.

Los ofertantes que cuenten con alguno de los tres materiales de mejores características para cada parte de la silla y que, además, cumplan con la geometría requerida y la movilidad de las piezas, recibirán un puntaje de una unidad en E_{Tec} . Sí, por el contrario, el ofertante cumple con los materiales, pero las piezas no son móviles, recibirá un puntaje de 0,8. De igual forma, si el ofertante cumple con tener sillas fabricadas con los próximos 3 materiales de la lista, obtendrá una puntuación de 0,6; de lo contrario, tendrá un puntaje de 0,4 (ver Archivo Excel).

Para efectos del ejercicio, realizaremos la valoración de la evaluación económica asignando peso a cada una de las variables implicadas en el proceso, se evaluarán cada uno de los aspectos del ámbito económico y el valor acumulado de las variables seleccionadas serán empleados como un criterio para la selección de la silla que se adecúe al monto destinado para el proyecto.

$$EE = PI * 30\% + CV * 20\% + G * 15\% + D * 10\% + FP * 15\% + TE * 10\% \quad (28)$$

Donde:

PI= Precio inicial.

CV= Ciclo de vida útil.

G= Garantía.

ST= Servicio técnico

D= Descuentos.

FP=Forma de pago

TE= Tiempo de Entrega

Luego describiremos como se realizará la evaluación de tres de los ítems mencionados anteriormente como se solicitó en la actividad.

a. Precio inicial:

$$PI = \frac{Dp}{4}$$

Con:

Dp= diferencia porcentual

Sí la diferencia porcentual, con respecto a las demás ofertas, está entre 0 y 5%, Dp tendrá un valor de 1; si está entre 5 y 10% el valor de Dp será igual a 2; si el valor se encuentra entre 10 y 20 % Dp será igual a 3, y si es mayor al 20 % el valor de Dp será igual a 4.

Vida Útil

Según los fabricantes, la vida útil de una buena silla de oficina debe oscilar entre 5 y 10 años. Para efectos de esta evaluación, se tendrán en cuenta las sillas que cuenten con un tiempo de vida útil mayor a 2 años y recibirán un mejor puntaje aquellas que garanticen un mayor tiempo de vida útil

Garantía

$$G = \frac{\frac{TG}{3} + Rep + ReSi}{3}$$

Con:

TG= Tiempo de garantía

Rep= Inclusión de repuestos

ReSi= Reposición en caso de ser necesario

Sí el tiempo de garantía están entre 0 y 6 meses, TG recibirá un valor de 1. Si están entre 6 y 12 meses, AG será igual a 2 y, por último, si el tiempo de garantía es mayor a 12 meses, esta variable recibirá un valor de 3.

Sí la garantía incluye todos los repuestos, Rep recibirá un valor de 1, de lo contrario se le otorgará un valor de 0.25.

Sí incluye reposición de silla en el caso que cumpla, ReSi recibirá un valor de 1, de lo contrario recibirá un valor de 0.25.

Descuentos

$$D = \frac{Df + Dc}{2}$$

Con:

Df= Descuento financiero.

Dc= Descuento comercial.

Sí aplica descuento financiero, el valor de Df será igual a 1; de lo contrario, dicho valor será de 0.25.

Sí aplica descuento comercial, el valor de Dc será igual a 1, de lo contrario dicho valor será de 0.25.

Forma de pago

En forma de pago, se evaluará el tiempo que se tiene para realizar el pago de las sillas de la siguiente manera: si el pago debe realizarse en un periodo de tiempo entre 0 y 15 días luego de entregado el producto, dicho proveedor recibirá un puntaje de 0,4; si el tiempo para el pago está entre 15 y 30 días, recibirá un puntaje de 0,6, y sí el periodo de tiempo para el pago es mayor a 30 días, su puntaje de ponderación será de 1.

Tiempo de Entrega

De igual forma que en el ítem anterior, sí la entrega del pedido de sillas se realiza dentro de los primeros 15 días luego de firmado el contrato, la empresa ofertante recibirá un puntaje de 1 en la ponderación. Sí ésta se realiza entre 15 y 30 días, recibirá un puntaje de 0,6; Sí el tiempo de entrega es mayor a 30 días recibirá un puntaje de 0,4.

Para facilitar la anterior evaluación se presenta una tabla de Excel donde se pueden seleccionar las diferentes opciones para cada proveedor. Además, se pueden ver los puntajes finales, tanto para la parte técnica como para la parte económica, para poder tomar una decisión más objetiva como se puede ver en Fig. 47.

EVALUACION ECONÓMICA PARA LAS SILLAS DE LA UDEA					
CONSIDERACIONES TECNICAS	Material	Geometría	Pieza móvil	Puntaje	Puntaje ponderado
Espalda	ABS/Rígida	Cumple	SI	0,4	0,06664
Asiento	PP/Rígida	Cumple	SI	1	0,1666
Cabezal	PP/Rígida	Cumple	SI	1	0,1666
Reposabrazos	ABS/Media	Cumple	SI	0,4	0,06664
Cilindro	Acero	Cumple	-----	0,7	0,11662
base	PP/Rígida	Cumple	-----	1	0,1666
CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	Opciones	Puntaje	Puntaje ponderado	TOTAL ECONÓMICA	TOTAL TÉCNICA
Precio Inicial	10-20%	0,75	0,225		
Vida Útil	>7 años	1	0,2		
Garantía	>12 meses	1	0,15		
Descuentos	Comercial	1	0,1		
Forma de pago	15-30 dias	0,75	0,1125		
Tiempo de entrega	0-15 dias	1	0,1		
				44,375	37,485

Fig. 47. Tabla para la evaluación económica y técnica de los proveedores.

13. Agradecimientos

Expresamos los más sinceros agradecimientos al Dr. Ricardo Gutiérrez, Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, Dirección de Desarrollo Institucional - Desarrollo del Talento Humano -Gestión de Riesgos Ocupacionales, Universidad de Antioquia, por su valioso apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto. De igual manera, queremos agradecer a la Dra. Margarita Castro, Directora del Desarrollo

Institucional - Desarrollo del Talento Humano -Gestión de Riesgos Ocupacionales, Universidad de Antioquia, al igual que a Claudia Patricia Jaramillo de la Compañía Positiva, por confiar en el equipo que desarrollo este trabajo. Agradecemos igualmente a la Dra. Fanny Valencia y a la Bioing. Nataly Salcedo, por su ayuda con el LAM de la FUMC.

14. Conclusiones finales.

A partir de la realización de este proyecto, se pueden destacar las siguientes conclusiones principales:

1. En este proyecto, se ha desarrollado un nuevo modelo antropométrico y biomecánico que permite optimizar la selección de sillas de puestos de trabajo administrativo a partir del análisis antropométrico y biomecánico multi-escala. Hemos obtenido la función estática para cada parte de la silla, previamente diseñada geométricamente, con la cual se alimenta posteriormente la metodología de diseño para selección de materiales.
2. Se ha implementado el método Ashby para el mejor diseño de las sillas y la mejor selección de los materiales de las mismas.
3. Las nuevas sillas para la población de empleados administrativos de la UdeA, representados en los tres percentiles, fueron validadas teóricamente a partir del análisis biomecánico estático para verificar que las fuerzas aplicadas en los tejidos efectivamente disminuyen.
4. Se ha desarrollado una plataforma informática en Matlab que servirá a la UdeA como herramienta para la selección sistemática de las mejores sillas disponibles en el mercado, para puestos de trabajo administrativo a partir del análisis antropométrico y biomecánico múlti-escala.

15. Referencias.

- [1] Curso de Biomecánica, Master y Doctorado, UPC, Barcelona, España, 2004.
- [2] Sistema de Tallaje para las Sillas de uso de Administrativos y Docentes de la Universidad de Antioquia (STS), Universidad de Antioquia, Desarrollo del Talento Humano, Programa Gestión de Riesgos Profesionales, Septiembre del 2015.
- [3] Biomechanics and motor control of human movement. David, Winter A. 2005.
- [4] Ashby, M.F. 'Materials Selection and Process in Mechanical Design', Butterworth Heinemann, Oxford, 1999.
- [5] BIFMA INTERNATIONAL. Ergonomics guideline for VDT furniture used in office work spaces. The work chair pag 13.

[6] BIFMA INTERNATIONAL. Ergonomics guideline for VDT furniture used in office work spaces. The work Surfaces. Pag 33.

[7] Nataly Salcedo, Análisis biomecánico en puestos de trabajo para minimizar los riesgos laborales y aumentar el rendimiento, trabajo de grado, Bioingeniería, UdeA, 2011.

CONFIDENCIALIDAD: Este documento (software) y todos sus adjuntos son para el uso confidencial y exclusivo del destinatario. En ningún momento alguien diferente, puede leer, usar, distribuir o tomar acciones a partir de este documento (software) y todos sus adjuntos. Nótese que esta nota de confidencialidad debe ser asumida como un anuncio legal, con implicaciones del mismo tipo. Cualquier caso omiso que se haga de este anuncio legal y de la información confidencial aquí mencionada, servirá como elemento probatorio en caso de violación de la propiedad intelectual aquí establecida. Toda la propiedad intelectual de este documento (software) y todos sus adjuntos, pertenece al Grupo BAMR, UdeA, y al equipo de investigación que desarrollo este trabajo.