

# Prototipo de Silla de Ruedas como Plataforma de Interfaz de Control Gestual

Montiel Cabrera Diana Nadxhielli, Ventura Rios Luis Daniel, Posada Gómez Rubén, Hernández Ojeda Isauro, Martínez Sibaja Albino y Águila Rodríguez Gerardo

División de estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba, Avenida Oriente 9 No. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320, Orizaba, Veracruz, México. Tel. (272) 7 24 40 96, (272) 7 24 45 79 Extensión: 1016, e-mail: [luis\\_daniel\\_27@hotmail.com](mailto:luis_daniel_27@hotmail.com)

## Resumen

*En este artículo se presenta un prototipo de silla de ruedas que será empleado como plataforma para el desarrollo sistemas de control gestual en pacientes con paraplejía y cuadraplejía. El diseño del prototipo es estructural (armadura) de modo que cumpla con la ergonomía y normatividad vigentes, Adicionalmente se hicieron adaptaciones de materiales al asiento, el respaldo, descansa brazos, piernas y pies.*

*La silla de ruedas puede adaptarse a cualquier tipo de control así como ser desplazada de una manera manual, fue realizada con materiales comerciales con bajo costo, de manera que resulta más económica que las sillas de ruedas comerciales, teniendo un diseño adaptado a las necesidades de personas con capacidades diferentes.*

**Palabras clave:** Silla de ruedas, diseño mecánico, interfaz de control.

## 1. Introducción

Hoy en día la mecánica y la mecatrónica se encuentran en diferentes sectores de la industria y el sector médico y de rehabilitación no son la excepción. Uno de los sectores que pueden verse beneficiados con proyectos de esta área es la de personas con alguna discapacidad. Según estadísticas de INEGI del 2004 [1] en México el 45.3% presentan discapacidad motriz del 100% de la población con discapacidad presentándose con mayor incidencia a personas adultas en etapa de envejecimiento como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Estadísticas de INEGI sobre la población y porcentaje de discapacidades.

Esta discapacidad motriz tiene un mayor impacto en los pacientes cuadraplégicos, que dependen por completo de otra persona para realizar actividades cotidianas. Las características que debe tener una silla de ruedas para este tipo de pacientes debe considerar que el control debe darse por medio de una interfaz de control diferente ya que los pacientes con cuádruplejía en muchas ocasiones solo tiene una movilidad limitada en algún dedo, los ojos o intentar hablar, De ahí se deriva la necesidad de contar con sillas de ruedas eléctricas inteligentes que interpreten esta movilidad reducida como un comando de control. Existen actualmente diversos trabajos orientados a interpretar los gestos como una instrucción de control [2,3] pero no hay una plataforma donde estos proyectos puedan ser implementados de manera real.

La silla de ruedas se construyó bajo las normas ergonómicas comerciales, adaptando innovaciones para personas con cuádruplejía, tales como permitir una posición horizontal por completo del respaldo, descansa brazos, piernas y pies, con el confort necesario para este tipo de personas. Todos los materiales utilizados para la fabricación de la armadura de silla de ruedas son comerciales de bajo costo. Este artículo se divide de la siguiente manera: las generalidades y conceptos básicos necesarios para el desarrollo del proyecto, el análisis estático de la armadura seleccionada, así como también se considerarán factores de seguridad definiendo así los valores a la fluencia de los materiales ocupados, obteniendo con ello el momento flector máximo para calcular el esfuerzo que se genera en la armadura al aplicarle cierta carga conociendo así si es segura o no, el torque que se necesita para poder desplazar la silla de ruedas, seleccionando con ello el motor y el eje para la transmisión a la llanta, la simulación hecha por el software de SolidWorks® 2008 en donde se complementará el análisis estático realizado de una manera visual y se detalla los resultados obtenidos especificando la construcción de la silla de ruedas. Finalmente las conclusiones obtenidas en el área de investigación del proyecto.

## **2. Generalidades.**

El prototipo requiere de un diseño universal lo que quiere decir que cualquier persona con capacidades diferentes puedan utilizarla. Está cumple los 7 principios que son: igualdad de uso, uso flexible, uso simple e intuitivo, información fácil de digerir, tolerancia a soportar errores, que se le aplique poco esfuerzo físico y contar con dimensiones adecuadas.

El proyecto se basa en la realización de una silla de ruedas de potencia capaz de adaptarse a un hardware gestual teniendo un diseño novedoso para el mercado mexicano.

### **2.1 Normas y ergonomía para la fabricación de la silla de ruedas.**

Tanto de los materiales, medidas, tipo de baterías y motor, se han tomado todas las especificaciones de sillas comerciales para que el prototipo concuerde con las normas actuales. Las sillas de ruedas tienen como objetivo principal proporcionar al usuario un buen funcionamiento, movilidad, y confort. Una silla de ruedas inapropiada puede provocar una discapacidad extra como artritis o reumatismo. Se tiene que adoptar posturas adecuadas para que una silla de ruedas funcione de manera eficiente, haciendo que si una persona no puede (porque no tiene la capacidad) modificar su postura, hay que mejorar el asiento para intentar ayudarlo en esta limitación [4].

El asiento debe estar estable y bien uniforme para evitar exceso de presión y rozamiento. Cuando se tiene una postura adecuada se tiene un ángulo entre el tronco y los muslos de 90° para garantizar la estabilidad de la pelvis. Para conseguir este ángulo se utiliza un cojín amoldado a la sección del tronco o de los muslos del cuerpo, teniendo en consideración que la silla de ruedas se

encuentra en posición estática, si se encuentra en movimiento por seguridad de la persona se deben de exceder los 90 grados. De acuerdo al estudio ergonómico en las posturas se recomienda que las rodillas también se encuentren a un ángulo de 90° al igual que el tronco y el muslo para mayor comodidad del paciente. El respaldo de la silla es lo suficientemente alto para estabilizar la región lumbar superior permitiendo una mayor comodidad al usuario, debiendo estar éste bien reclinado para que la gravedad recaiga sobre el pecho del usuario y no sobre los hombros pero que no esté demasiado inclinado para reducir el espacio visual del usuario. El buen apoyo de los brazos proporciona un descanso a ellos y también a los músculos del cuello, por lo tanto el antebrazo debe de estar bien colocado en los soportes y el codo a 90°.

### 3. Análisis estático de la armadura.

El diseño de la silla de ruedas está dada para soportar a una persona adulta de 60 a 110 kg con alturas de entre 1.60 a 1.95 metros sabiendo que la silla de ruedas va tener un peso máximo de 80 kg.

#### 3.1 Cálculo de centroides.

Para conocer donde se están aplicando la fuerza de 190 kg debido a peso máximo del usuario y de la silla de ruedas, es necesario calcular el centroide dentro de la misma, para esto se dividió el asiento en formas geométricas y se realizaron las sumatorias de volúmenes para calcular  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  y  $\bar{Z}$  tanto del asiento como del respaldo (en posición vertical y horizontal), dando los siguientes resultados:

El centroide del asiento y el respaldo en posición vertical  $\bar{X} = 25.6150 \text{ cm}$ ,  $\bar{Y} = 34.7055 \text{ cm}$  y  $\bar{Z} = 16.1719 \text{ cm}$  representada en la figura 2a. y el centroide del asiento y el respaldo en posición horizontal  $\bar{X} = 26.5 \text{ cm}$ ,  $\bar{Y} = 6.1042 \text{ cm}$  y  $\bar{Z} = -12.5132 \text{ cm}$  representada en la figura 2b.

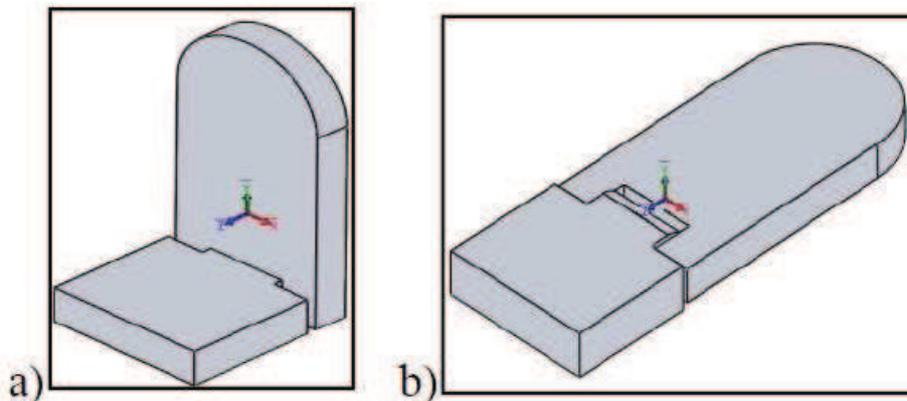


Figura 2 Localización del centroide del asiento y del respaldo en posición a) vertical, y b) horizontal.

#### 3.2 Análisis de esfuerzos.

Para saber si la armadura se encuentra en equilibrio, se realizan sumatoria de fuerza, de momentos y los esfuerzos que se ejercen para cada una de las secciones principales. La armadura de la silla de ruedas (figura 3) se encuentra constituida de perfil rectangular de acero SAE 1006 laminado en caliente, tubo de acero y perfil ángulo del mismo material, todo con un acabado de galvanizado, el análisis se efectuó con acero sin el acabado galvanizado del manual SAE [5] con un esfuerzo a la fluencia de  $1687.3656 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ . Se analiza los perfiles ángulo verticales que unen a la silla con la armadura rectangular, para realizar este análisis estático es necesario especificar que la carga de  $W=190 \text{ Kg}$  se va a descomponer en tres fuerzas, ya que son las que llegan a los perfiles ángulo.

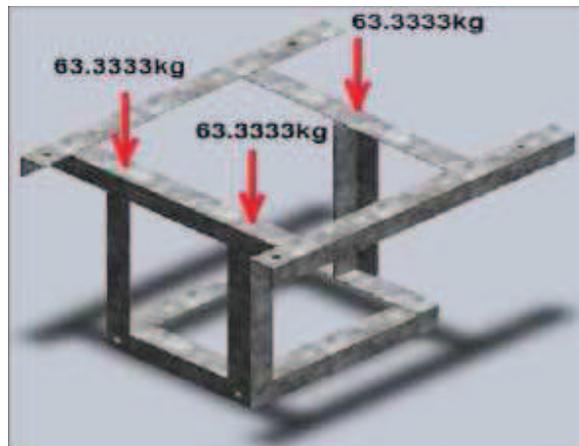


Figura 3 Armadura de la silla de ruedas y representación de fuerzas.

Incluyendo el área del perfil angular de 1 ¼ X 1/8 de pulgada de acero SAE 1006, se utiliza la ecuación (1) para calcular el esfuerzo normal.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde P es la carga que se le está aplicando al perfil ángulo y A es el área de la sección en donde se está ejerciendo esta fuerza para encontrar el esfuerzo normal a compresión. Se tiene un área de sección de 4.47 cm<sup>2</sup>. Calculando el esfuerzo de compresión se tiene un esfuerzo de  $\sigma = 14.1685$  [Kg/cm<sup>2</sup>].

Se analiza la parte posterior de esta armadura estudiando el perfil mostrando la fuerza que se está aplicando en esta sección para conocer sus reacciones (Figura 4).

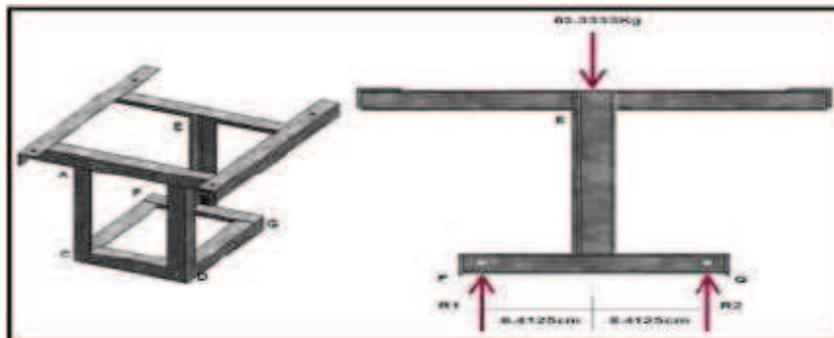


Figura 4 Armadura perfil ángulo y representación de las Fuerzas en el perfil FG.

Se calcularon las reacciones  $R_1$  y  $R_2$  con sumatoria de fuerzas dando como resultado lo siguiente  $R_1 = R_2 = 31.66$  [Kg], calculando con ello una sumatoria de momentos para así conocer el esfuerzo máximo aplicado por la carga (ecuación 2):

$$\sigma = \frac{M_{max} C}{I} \quad (2)$$

Resultando el esfuerzo en esta sección de  $\sigma = 331.902$  [Kg/cm<sup>2</sup>], Calculando el factor de seguridad con la ecuación (3):

$$F_s = \frac{\sigma_{yp}}{\sum \sigma} \quad (3)$$

Donde  $\sigma_{yp}$  es el esfuerzo a la fluencia del material y  $\sum \sigma$  es la sumatoria para este caso de los esfuerzos encontrados por secciones en cada una de las armaduras. Con la ecuación 3 se calcula el factor de seguridad de la armadura perfil ángulo siendo de 4.87 y se encuentra que en esta armadura es segura para el paciente.

Para el análisis de la armadura perfil rectangular se empieza con la sección frontal (figura 5) en donde se muestran las cargas que está llegando al perfil HIJK para analizar sus reacciones  $R_3$  y  $R_4$ .

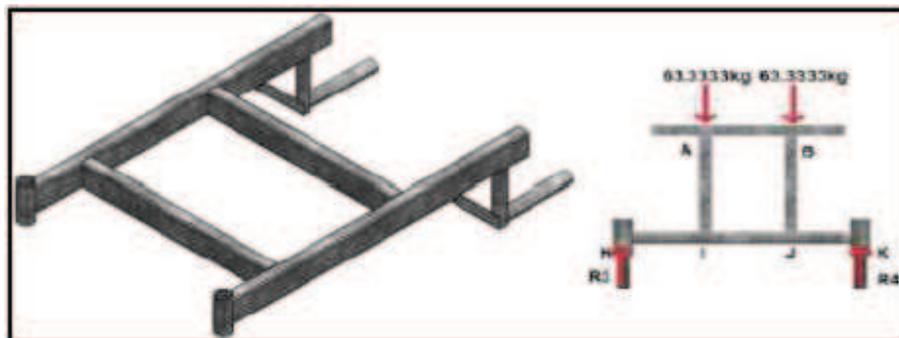


Figura 5 Sección frontal de la armadura perfil rectangular hueca.

El resultado de las reacciones es  $R_3 = R_4 = 63.33$  [kg.]. Calculando lo que es momento flector máximo para sustituir valores en ecuación 2 y así encontrar que tiene un esfuerzo de  $\sigma = 202.3293$  [Kg/cm<sup>2</sup>]. Analizando la parte posterior de la armadura perfil rectangular hueca, en la figura 6 se tiene en perfil LMNO con dos cargas de 31.66 kg antes analizadas e igualmente dos reacciones  $R_5$  y  $R_6$ .

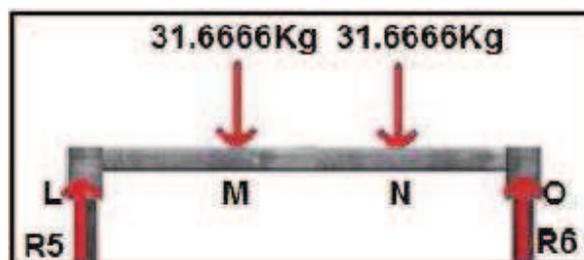


Figura 6 Sección en la que se analiza el perfil LMNO.

Las reacciones son calculadas mediante sumatoria de fuerzas teniendo los siguientes valores  $R_5 = R_6 = 31.66 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ . Calculando con ellas el momento flector máximo y así sustituir el valor en la ecuación 2 para obtener un esfuerzo de  $\sigma = 101.1645 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ .

Finalmente se realiza el análisis de la parte lateral de la armadura de perfil rectangular hueca (figura 9).

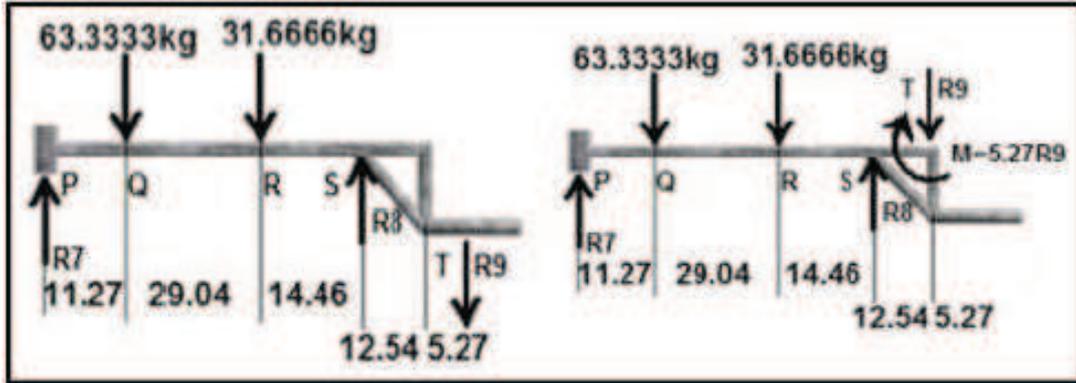


Figura 7 Sección lateral de la armadura con la solución estática del punto T.

Calculando con sumatoria de fuerzas el valor de las reacciones 7, 8 y 9 se tiene que  $R_7 = 58.66 \text{ [kg]}$ , que  $R_8 = 31.66 \text{ [kg]}$  y que  $R_9 = 9.32E-5 \text{ [kg]}$  por lo que el esfuerzo es de  $\sigma = 125.5305 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ , para conocer el factor de seguridad se sustituye el esfuerzo a la fluencia del material SAE 1006 laminado en caliente y se divide entre la sumatoria de los esfuerzos encontrados en cada sección en la ecuación 3 dando como resultado 1.96 (armadura segura).

El esfuerzo cortante aplicado a cada uno de los tornillos de sujeción de la armadura es de  $\tau = 892.4246 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ , si se les está aplicando a cada uno una carga de 63.33 kg, conociendo que es un acero medio al carbono J429 grado 1 con un esfuerzo cortante a la fluencia mínima de  $1564.6 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ , se considera que los tornillos van a soportar esta carga sin deformarse plásticamente. Analizando los bujes se observa que pueden soportar una carga máxima de 1776.304 kg y un factor de seguridad de 1.75 notando que no va a presentar falla en dicho elemento.

#### 4. Fuerzas que se ejercen a la silla de ruedas con respecto a su arrastre.

Conociendo el centro de gravedad de la silla de ruedas se puede determinar las fuerzas que se ejercen respecto a su arrastre así como el torque del motor y así conocer el motor necesario.

##### 4.1 Selección del motor para la silla de ruedas.

Para determinar la potencia requerida para el motor y el arrastre de las sillas de ruedas en la figura 8, tenemos que  $W = 190 \text{ Kg}$ , la rueda motriz  $R_M$  tiene 34.0230 cm, la rueda de diámetro menor  $R_m$  tiene 23.6445 cm, con las siguientes longitudes desde el centro (sección 3.1) hacia la rueda motriz hay una distancia de  $L_1=18.8546 \text{ cm}$  y de la rueda menor al centro hay  $L_2=43.5374 \text{ cm}$ .

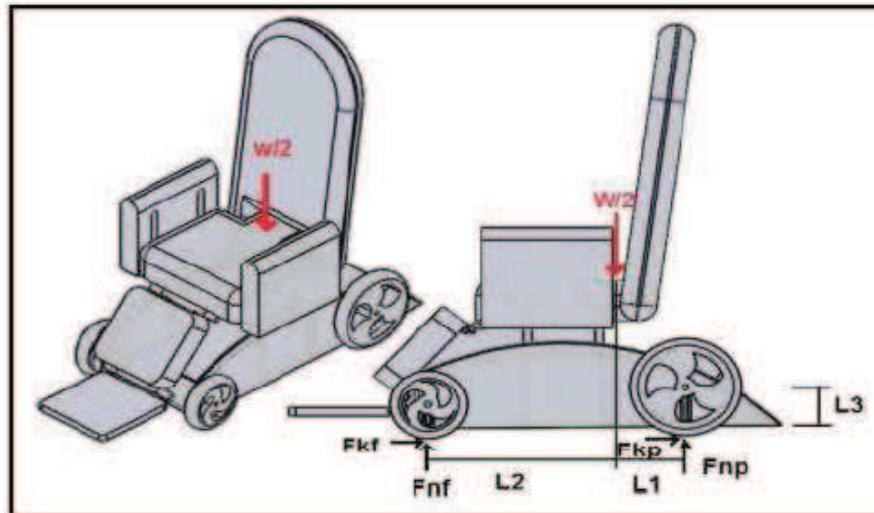


Figura 8 Representación de las fuerzas que se ejercen a la silla de ruedas con respecto a su arrastre.

Para calcular las fuerzas normales tanto frontales como posteriores se utiliza sumatoria de fuerzas dando los siguientes resultados  $F_{Nf} = 28.7086$  [kg.] y  $F_{Np} = 66.2914$  [kg.] calculando las fuerzas de fricción con la ecuación 4:

$$F_k = \mu_k F_N \quad (4)$$

Donde:  $F_k$  es la fuerza de fricción,  $\mu_k$  es el coeficiente de fricción teniendo un valor de 0.90 [6] (hule sobre concreto) y  $F_N$  son las fuerzas normales.

Las fuerzas de fricciones frontales y posteriores son  $F_{kf} = 25.8377$  Kgf. y  $F_{kp} = 59.6622$  Kgf., el torque del motor es por tanto  $T_{motor} = 142.6846$  N · m.

Se seleccionó un motor con 500 Watts un par torsional de 150 Nm con 140 rpm, un diámetro del eje de ½ plg y una potencia de motor de 2.8 HP.

## 5. Simulación Silla de Ruedas.

Para poder complementar el análisis estático se realizó la simulación con el software SolidWorks® 2008 utilizando su asistente llamado COSMOSxpress en donde analiza y simula los diferentes esfuerzos que se pueden presentar en las piezas o en el conjunto de ellas utilizando el estudio de criterio de fallas de Von Mises para mostrarnos la distribución de tensiones en el modelo y el desplazamiento estático de URES.

### 5.1 Simulación de la armadura perfil ángulo.

En el asistente COSMOSxpress se introducen las restricciones en este caso son los barrenos, las cargas en cada una de los perfiles verticales de 63.33 kg y se obtuvo un factor de seguridad de 4.38 (Figura 9) realizándolo el asistente mediante la ecuación 5 y conociendo el valor del factor de seguridad encontrado en el análisis estático de 4.87 siendo ambos muy aproximados, en la figura 10 se presenta la distribución de tensiones nodales obteniéndolo mediante la ecuación 6 y en la figura 11 el desplazamiento estático que presenta la pieza por la carga aplicada.

$$F_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}} \quad (5)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (6)$$

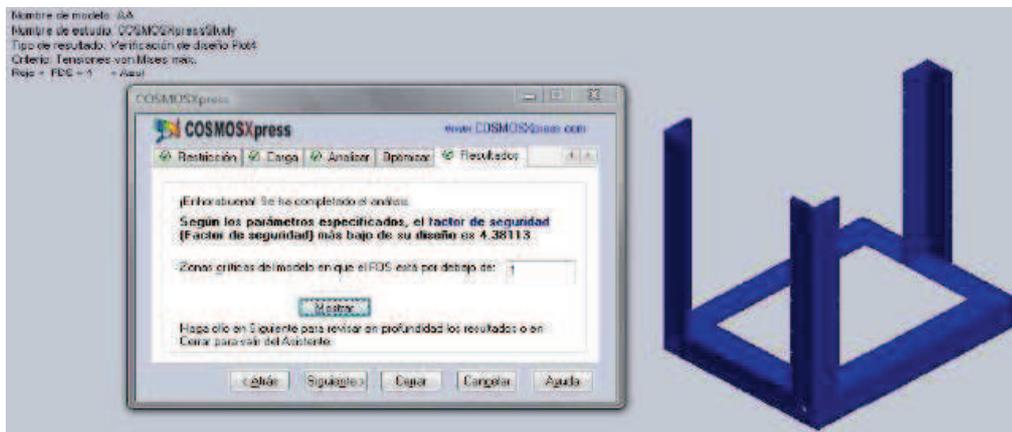


Figura 9 Representación del factor de seguridad en el perfil del ángulo.

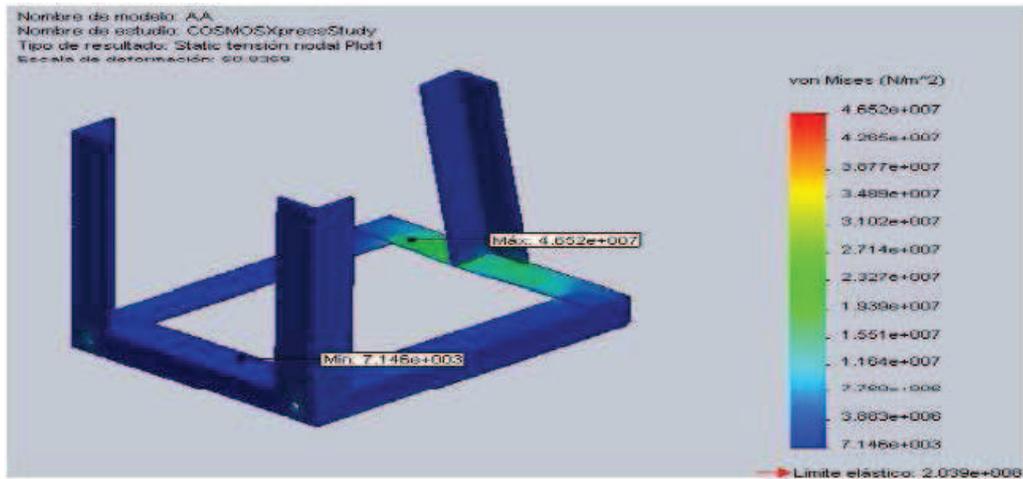


Figura 10 Representación de la distribución de la tensión nodal en el perfil del ángulo.

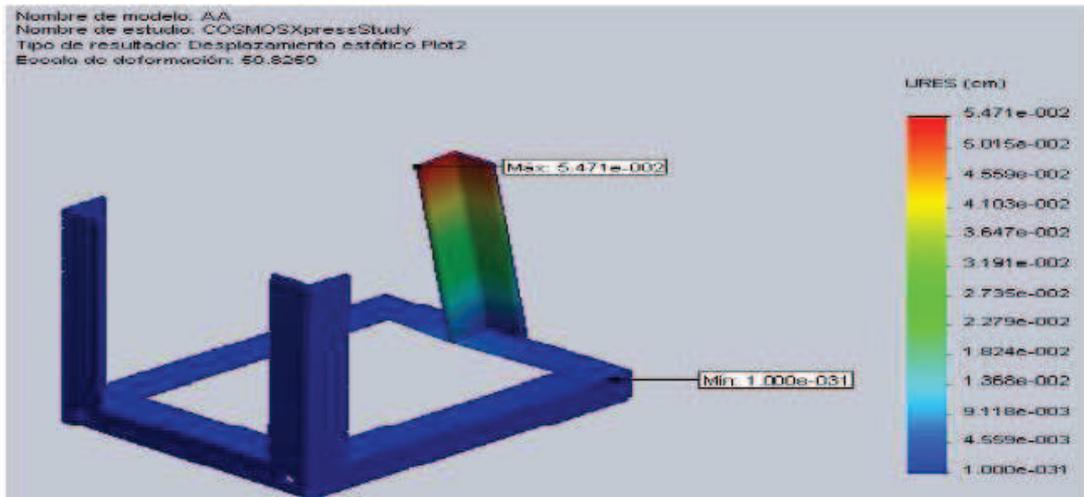


Figura 11 Representación de la distribución del desplazamiento estático en el perfil del ángulo.

### 5.2 Simulación de la armadura perfil rectangular hueca.

Se introducen los datos en el asistente COSMOSxpress y se establecen las restricciones en los bujes y en tubo donde van colocados los motores, las fuerzas se encuentran en los barrenos siendo de 63.33 kg en los frontales y de 31.66 kg en los posteriores analizando esto, se tiene un factor de seguridad de 1.89 sabiendo que en el análisis estático dio de 1.96 esto es porque no se está considerando en la simulación un perfil de 45 grados pero aun así son muy aproximados (figura 12), en la figura 13 se muestra la distribución de tensiones nodales según estudio realizado de Von Mises ecuación 6 y en la figura 14 se muestra el desplazamiento estático.

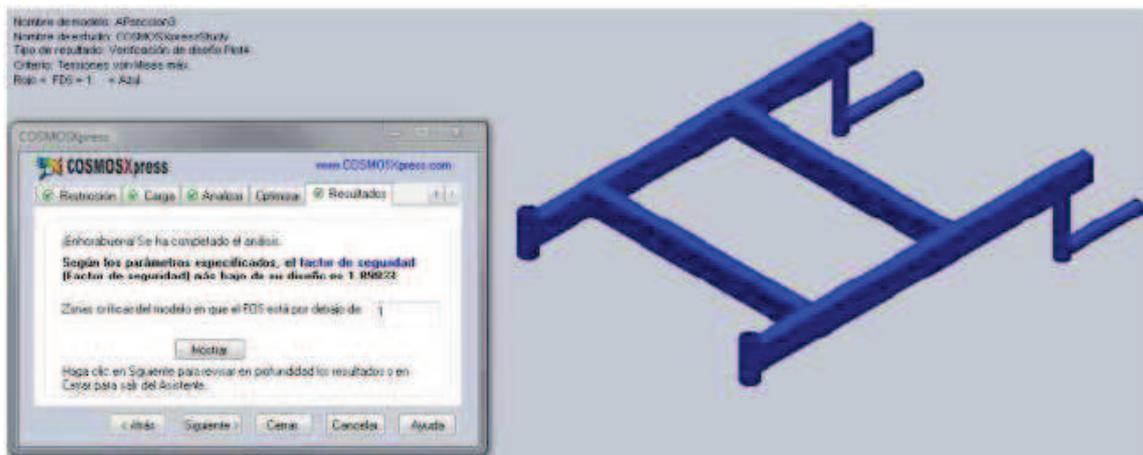


Figura 12 Representación del factor de seguridad en el perfil rectangular hueco.

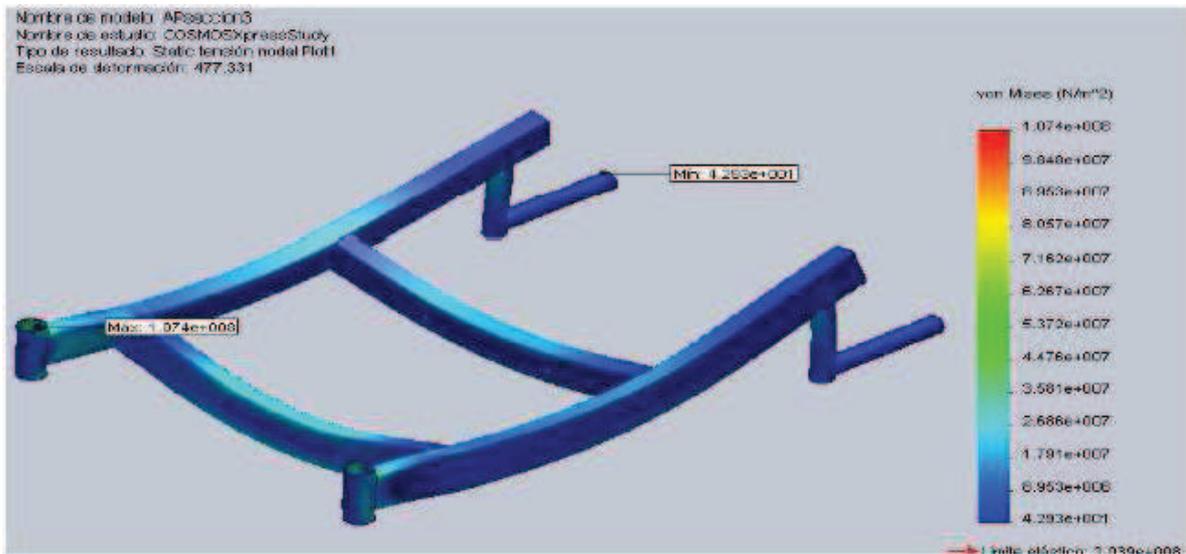


Figura 13 Representación de la distribución de la tensión nodal en el perfil rectangular hueco.

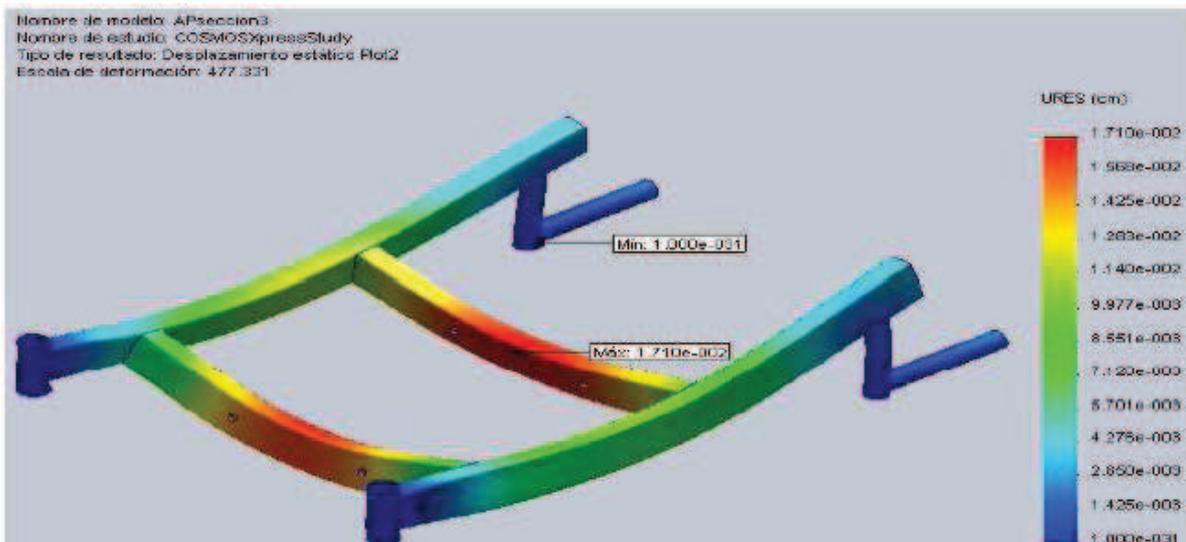


Figura 14 Representación de la distribución del desplazamiento estático en el perfil rectangular hueco.

## 6. Resultados.

Mediante el análisis estático y de simulación siguiendo con la ergonomía y normatividad vigente se realizó un prototipo de silla de ruedas capaz de tomar no solo una posición vertical sino también horizontal permitiendo que el paciente pueda ser trasladado de la silla de ruedas a la cama o viceversa sin que la persona que lo asiste utilice mucho esfuerzo físico, en la figura 15 se muestra la silla de ruedas en su etapa final donde en este momento se encuentra como una silla de ruedas de potencia dirigida por un joystick y en la figura 16 se encuentra la silla de ruedas en posición horizontal.



Figura 15 Prototipo de silla de ruedas para interfaz gestual.



Figura 16 Prototipo de silla de ruedas en posición horizontal.

## 7. Conclusiones.

En este artículo se presenta el diseño mecánico de una ruedas eléctrica de potencia con aplicaciones a un control por interfaz gestual, la cual está construida bajo las normas ergonómicas que el sector comercial maneja, adaptando innovaciones para personas con cuadriplejia, Una de las principales innovaciones del diseño presentado es poder efectuar una posición horizontal por completo del respaldo, descansa brazos, piernas y pies, con el confort necesario para este tipo de personas, Los materiales utilizados para la fabricación de la armadura de silla de ruedas son comerciales y de bajo costo.

Como perspectivas del trabajo se tienen las de adaptar diferentes tecnologías de control, iniciando por los controles gestuales diseñados y presentados anteriormente. Puesto que es una silla de ruedas eléctrica, cuenta con un motor y un joystick, se le puede adaptar un hardware gestual para convertirla en una silla inteligente que “vea” el lugar al cual el paciente se quiere dirigir. Hasta este momento, el prototipo se encuentra operando satisfactoriamente, se seguirán haciendo pruebas con otros materiales para disminuir el peso y facilitar el transporte, así como para aumentar la resistencia de la misma.

## Referencias.

- [1] INEGI. “*Las personas con discapacidad en México: una visión censal*” 2004.  
<http://www.inegi.gob.mx/>
- [2] R. Posada-Gomez, L. H. Sánchez-Medel, G. Alor Hernandez, A. Martínez-Sibaja, A. Aguilar-Laserre, L. Leija-Salas, “A Hands Gesture System Of Control For An Intelligent Wheelchair” In 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering and (ICEEE 2007), Mexico, D.F, 5 – 7 September 2007.
- [3] Research on Autonomous Robotic Wheelchairs in Europe. IEEE Robotics and Automation Magazine. March. 2001.
- [4] Sunrice Medical Co. “*Consideraciones biomecánicas para silla de ruedas*”. 2000.  
<http://www.imagina.org/archivos/biomecanica.htm>
- [5] Society of Automotive Engineers. “*Manual SAE, volumen 1*”. Warrenville, Pa. 1996.
- [6] Beer F. P., Jonhston E. R., Eisenberg E. R. “*Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática*”. McGraw-Hill Interamericana. 7ma. Edición.