

CARLOS DE GONZALO RUPÉREZ  
Ingeniero Industrial (Valencia).

# Sistema de análisis ergonómico mediante modelos biomecánicos tridimensionales

## —SAE—3 (\*)

### SUMARIO

*En el estudio de situaciones de riesgo de lesiones musculoesqueléticas, sobre todo en la zona dorsolumbar, que se producen en el manejo manual de cargas, se están aplicando los modelos biomecánicos como instrumento eficaz.*

*Con este objeto se ha desarrollado un modelo tridimensional que incluye, respecto a los modelos bidimensionales, el concepto de asimetría.*

*Definidas las características antropométricas del modelo, se establecen las condiciones en que se efectúa la tarea en el puesto a analizar: postura adoptada por el trabajador y sistemas de carga aplicados sobre el operario.*

*Con estos datos se obtienen las componentes tridimensionales de las tensiones generadas en cada articulación, el análisis postural utilizando el método OWAS y el análisis del manejo manual de cargas utilizando el método NIOSH 1991.*

### INTRODUCCIÓN

Las lesiones osteomusculares son muy comunes en España, y en general en toda Europa, y, desde el punto de vista de los costes sociales y económicos, sin mencionar los costes humanos, estas lesiones constituyen uno de los problemas más importantes de la salud laboral.

El manejo manual de cargas, definido como el levantamiento, movimiento o transporte de cargas, y las posturas estáticas en el lugar de trabajo son los factores de riesgo más importantes para el sistema músculo-esquelético. Estos riesgos pueden encontrarse en diferentes tipos de puestos de trabajo, desde los más tradicionales, en la agricultura y la industria, hasta los puestos técnicamente más complejos.

**Palabras clave:** Ergonomía, biomecánica, modelos gráficos tridimensionales.

(\*) Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE, como resultado final de la investigación durante el año 1993 a raíz de una beca concedida en su Convocatoria 92-93, sobre "Evaluación de posturas y cargas en el trabajo. Modelo biomecánico tridimensional".

Las lesiones se producen si el esfuerzo requerido para llevar a cabo la tarea no se encuentra dentro de niveles apropiados; es necesario, por tanto, especificar los límites para la fuerza máxima a realizar, las posturas de trabajo y las cargas que las personas pueden ejercer cuando llevan a cabo sus tareas. De hecho, muchos países han regulado los trabajos que conllevan el manejo manual de cargas, o han establecido las bases para una reestructuración ergonómica del puesto de trabajo; todo ello con el fin de reducir las lesiones dorsolumbares. A este respecto cabe destacar la adopción, por parte de la Unión Europea, de la Directiva 90/269/CEE sobre «Disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la manipulación de cargas que entrañe riesgos, en particular dorsolumbares, para los trabajadores» (D.O.C.E. N L 156 21-06-90).

El criterio ergonómico es un punto de vista que puede ser utilizado para definir las bases sobre las que realizar el diseño de tareas que impliquen el manejo manual de cargas, a fin de eliminar o minimizar las lesiones de espalda. Hoy en día, muchos programas informáticos utilizan modelos antropométricos del cuerpo humano para el diseño, visualización y evaluación ergonómica del espacio de

trabajo o de las posturas de trabajo.

La necesidad de considerar simultáneamente algunos aspectos importantes en el movimiento manual de cargas, tales como el levantamiento manual de cargas asimétricas, levantamiento asimétrico de cargas, porcentaje de población trabajadora sobre la que se realiza el estudio o las características particulares del individuo; nos llevó a desarrollar el presente programa de análisis ergonómico tridimensional (SAE-3D) de tareas en las que se involucra el manejo manual de cargas.

Por otra parte, se ha buscado el diseño de un programa capaz de ser interactivo mediante sencillos módulos de intercambio, con distintos sistemas de análisis pertenecientes a una estructura superior de investigación y diseño.

El esquema modular del Sistema de Análisis Ergonómico Tridimensional (SAE-D) se muestra en el cuadro 1.

#### DATOS ANTROPOMÉTRICOS

Para realizar correctamente el análisis del efecto de diferentes sistemas de cargas sobre el cuerpo humano deben tenerse en cuenta las peculiaridades antropométricas de los dife-

*El manejo manual de cargas, definido como el levantamiento, movimiento o transporte de cargas, y las posturas estáticas en el lugar de trabajo son los factores de riesgo más importantes para el sistema músculo-esquelético.*

rentes individuos, con objeto de permitir el estudio biomecánico en grupos de población o de individuos particulares.

A fin de que no fuese necesario que el analista dispusiese de una base de datos antropométricos, la definición antropométrica del modelo biomecánico utilizado en SAE-3D puede realizarse:

CUADRO 1. SAE-3D

MENU PRINCIPAL						
ANTROPOMETRÍA		CONDICIONES DE TRABAJO		ANÁLISIS		ARCHIVOS
COEFICIENTES		POSTURA	Determinación de los límites de movilidad	BIOMECÁNICO	Selección de la articulación de análisis	GRABACIÓN
			Definición del movimiento		Cálculos	
			Cálculo de la nueva postura			
			Opciones de representación			
MEDIDAS DIRECTAS		CARGAS APLICADAS		O.W.A.S.		LECTURA
BASE DE DATOS	Procedimiento de intercambio			N.I.O.S.H.	Lectura posturas	BORRADO
	Características de la población	Sexo			Lectura sistema de carga	
		Edad			Análisis	
		Percentil			Modificación condiciones de trabajo	
Cálculos estadísticos						

a) Partiendo de una base de datos antropométricos.

b) A partir de coeficientes que relacionan la talla del individuo con la longitud de cada segmento antropométrico.

c) Introduciendo directamente las longitudes de los segmentos antropométricos.

La utilización de coeficientes permite la utilización del sistema de análisis SAE-3D, independientemente de la disponibilidad de una base de datos antropométricos, a la vez que representa correctamente a un elevado porcentaje de población.

Los coeficientes utilizados por defecto son los establecidos en los estudios antropométricos de Drillis y Contini (cuadro 2).

CUADRO 2.

Coefficientes de Drillis y Contini	H
Antebrazo	0,188
Brazo	0,062
Ancho hombros	0,259
Largo pie	0,152
Altura tibia	0,285
Largo fémur	0,245
Ancho cadera	0,191
Altura ojos	0,936
Altura cervicales	0,070
Altura hombros	0,818

## CONDICIONES DE TRABAJO

Definidas las características antropométricas del modelo biomecánico a utilizar, deben establecerse las condiciones en las que se realiza la tarea en el puesto de trabajo a analizar.

El Sistema de Análisis Ergonómico Tridimensional (SAE-3D) permite establecer las condiciones de trabajo referidas a:

- Postura adoptada por el operario durante la realización de la tarea, en el puesto de trabajo.
- Sistema de cargas aplicadas sobre el operario.

### Postura de trabajo

Las posturas adoptadas por el modelo humano son establecidas en tres dimensiones por el usuario mediante el uso de las herramientas diseñadas al efecto, partiendo de una postura por defecto establecida en el programa informático.

Para facilitar la máxima información acerca de las posibilidades de movimiento se representa, en un esquema tridimensional, los límites es-

*El criterio ergonómico es un punto de vista que puede ser utilizado para definir las bases sobre las que realizar el diseño de tareas que impliquen el manejo manual de cargas, a fin de eliminar o minimizar las lesiones de espalda.*

paciales del movimiento del punto antropométrico a desplazar. Los límites al movimiento de las articulaciones están definidos en base a los estudios de I. A. Kapandji sobre mecánica articular.

### Definición de las cargas

En el diseño de este módulo se ha buscado dotar al mismo de la máxima flexibilidad en cuanto a la definición de las cargas. El módulo que permite definir las cargas a considerar en el análisis biomecánico no establece limitación alguna a la situación del punto de aplicación de las cargas.

De esta forma puede estudiarse el efecto de cargas, individuales o combinadas, situadas en las extremidades superiores (en una o en ambas), situadas en mochilas, etc.

Las cargas se definen de forma multidireccional mediante descomposición de las mismas, según los tres ejes coordenados de referencia (Fig. 1).

## ANÁLISIS

El programa SAE-3D, mediante los procedimientos de análisis, permite la realización de tres tipos de análisis:

- Análisis biomecánico.
- Análisis postural.
- Análisis del manejo manual de cargas.

### Análisis biomecánico

Para realizar el análisis biomecánico se utilizan datos relativos al peso de cada uno de los segmentos en que se ha considerado dividido el modelo, así como los correspondientes a posición y cargas aplicadas definidas por el analista (Fig. 2).

El peso de cada uno de estos segmentos es calculado como un porcentaje del peso total del modelo. Los porcentajes considerados son los definidos en los estudios de Webb Associates (cuadro 3).

Para la localización de los puntos de gravedad en cada segmento se asume la distribución establecida por los estudios realizados por Dempster (cuadro 4).

FIGURA 1.

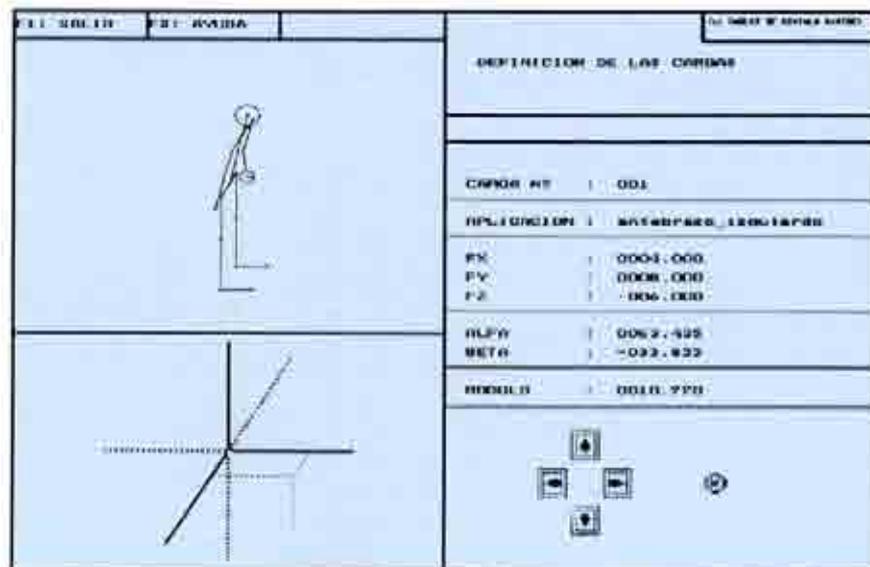


FIGURA 2.

F1: SALIDA				F2: AYUDA				F3: OPCIONES				ANÁLISIS BIOMECÁNICO		ID: USUARIO Y FECHA EJECUCIÓN	
CARGAS APLICADAS												Punto seleccionado: 05 - Brazo, flectando			
PUNTO DE APLICACIÓN	COORD. X	COORD. Y	COORD. Z												
antebrazo, flectando	4.000	0.000	-6.000												
antebrazo, extendido	12.000	-10.000	12.000												
antebrazo, flectando	-6.000	10.000	-6.000												
antebrazo, flectando	15.000	10.000	6.000												
															
		Peso propio		Cargas				Total							
		Fuerzas	Momentos	Fuerzas	Momentos	Fuerzas	Momentos	Fuerzas	Momentos	Fuerzas	Momentos				
Coord. X			-0.409			030.660				030.259					
Coord. Y			0.000			-325.859				-325.859					
Coord. Z			0.000			-40.010				-40.010					
Neckite			0.409			900.629				900.288					

CUADRO 3. Porcentaje de peso de segmentos del cuerpo (Webb Associates 1978)

	%		%
Cabeza y cuello	08,4	Cabeza	73,8
		Cuello	26,2
Tronco	50,0	Torax	43,8
		Zona lumbar	29,4
		Pelvis	26,8
		Total brazo	05,1
		Antebrazo	33,3
		Mano	11,8
Total pierna	15,7	Muslo	63,7
		Pierna	27,4
		Pie	8,9

CUADRO 4. Centros de gravedad (Dempster 1955)

	%	%
Cabeza, cuello y tronco	60,4	—
Mano	50,6	49,4
Antebrazo	57,0	43,0
Brazo	56,4	43,6
Pie	57,1	42,9
Pierna	58,7	43,3
Muslo	56,7	43,3

El estudio biomecánico puede realizarse considerando el modelo con o sin cargas aplicadas. En caso de no definir cargas aplicadas, el estudio expresa el efecto del peso propio del modelo.

Los cálculos biomecánicos proporcionan los esfuerzos osteomusculares a que se ven sometidas diferentes articulaciones.

El análisis biomecánico engloba un estudio de los momentos y fuerzas



resultantes aplicadas sobre la articulación escogida por el usuario. A fin de proporcionar a éste la máxima información posible, se indican los valores de los momentos y fuerzas resultantes desglosadas debidas al propio peso del modelo y a las cargas que maneja, indicándose también los valores totales (cuadro 3).

Este conjunto de datos permite la determinación, y el estudio, de la carga más desfavorable, permitiendo el estudio de diferentes disposiciones de las cargas para encontrar un diseño óptimo del puesto de trabajo.

#### Análisis postural: método O.W.A.S.

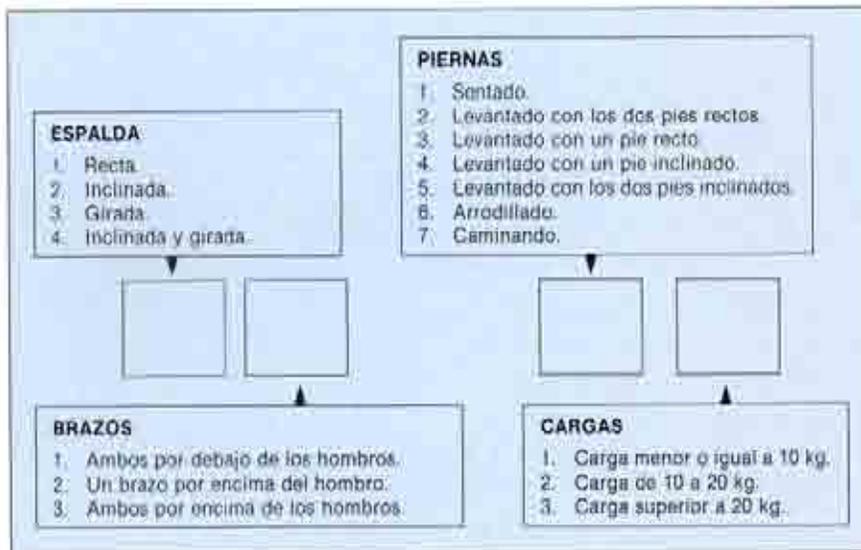
La evaluación de las posturas de trabajo se efectúa siguiendo las pautas marcadas por el método O.W.A.S.

Este método clasifica las posturas de trabajo en función de la posición relativa de la espalda, brazos y piernas, así como de la carga que se está manejando. El código del método O.W.A.S. se determina según se indica en el cuadro 5.

El procedimiento diseñado para el análisis postural se basa en los datos disponibles correspondientes a la postura del modelo, previamente establecida por el usuario del programa, siendo independiente de la definición de cargas aplicadas.

El procedimiento de análisis da al analista la categoría de acción determinada por el método O.W.A.S., y de esta forma el analista puede identificar las posturas consideradas incorrectas y definir la postura de trabajo óptima.

CUADRO 5.



metros considerados en el método N.I.O.S.H. utilizado y que se indican en el cuadro 6.

CUADRO 6. Parámetros del Método NIOSH

Factor constante
Distancia horizontal (H)
Distancia vertical (V)
Desplazamiento vertical (D)
Frecuencia (F)
Ángulo de asimetría (A)
Facilidad de presa (Fp)

El valor de los factores correspondientes a cada uno de estos parámetros es el indicado en el cuadro 7.

**Análisis del manejo manual de cargas: método N.I.O.S.H.**

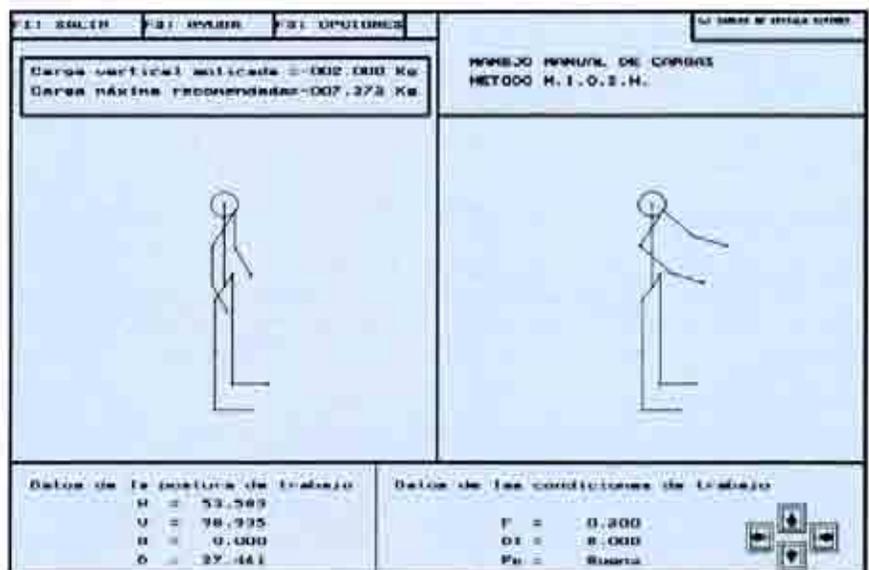
A partir de los datos relativos a la postura de trabajo puede aplicarse el método N.I.O.S.H. (en su versión de 1991) para calcular el máximo peso recomendado a manejar manualmente en esa postura.

Para el correcto funcionamiento de este procedimiento de análisis, el usuario debe definir dos posturas, correspondientes, respectivamente, al inicio y final del movimiento del manejo manual de cargas (Fig. 3).

El procedimiento de análisis calcula la carga máxima recomendada dependiendo del valor de los parámetros.



FIGURA 3.



Las posturas adoptadas por el modelo humano son establecidas en tres dimensiones por el usuario mediante el uso de las herramientas diseñadas al efecto, partiendo de una postura por defecto establecida en el programa informático.

pacidad de definición de las distintas condiciones de trabajo que se presentan en el puesto de trabajo que se pretende analizar; además, la utilización de un sistema tridimensional permite subsanar las limitaciones detectadas en otros programas de análisis.

SAE-3D limita la posibilidad de establecimiento de posturas a los límites naturales del hombre, lo cual, junto a la posibilidad de realizar un diseño más fiable, evita la definición de posturas no reales, hecho que ocurre en algunos programas con los que SAE-3D ha sido comparado.

Finalmente, del análisis de las especificaciones del programa informático SAE-3D, desarrollado con la ayuda de una beca de la Fundación MAPFRE, se desprende que este programa está en la línea del proyecto europeo sobre estructuras y funcionamiento de maniquies informáticos para el diseño y evaluación de espacios de trabajo relacionados con maquinaria.

El programa de análisis diseñado (SAE-3D) presenta una elevada capacidad de definición de las distintas condiciones de trabajo que se presentan en el puesto de trabajo que se pretende analizar.

CUADRO 7. Factores del método NIOSH

Factor constante	23 kg
Distancia horizontal	25/H
Distancia vertical	1-0,003  V-75
Desplazamiento vertical	0,82 + 4,5/D
Frecuencia	Tablas
Ángulo de asimetría	1+0,0032 A
Facilidad de presa	Tablas

El valor de la carga máxima recomendada viene dado por la ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{FML} = & 23 \times \frac{25}{H} \times (1 - 0,003 \times \text{abs}(V - 75)) \times \\
 & \times (0,82 + \frac{4,5}{10 \times D}) \times (1 - \frac{32}{10000 \times A}) \times \\
 & \times F \times F_p
 \end{aligned}$$

## CONCLUSIONES

De la comparación de los resultados obtenidos con la aplicación del programa SAE-3D y los procedentes de distintos programas y métodos de análisis se concluye que el sistema informático SAE-3D ofrece una alta fiabilidad de cálculo, unida a una elevada versatilidad a la hora de definir las condiciones del puesto de trabajo a analizar.

El programa de análisis diseñado (SAE-3D) presenta una elevada ca-

loads, epidemiologic, prevention and normative aspects in European Countries», Milán.

MOLTENI, G. et al.: *Research and prevention of musculo-skeletal disorders in Italy: the EPM research unit activity*. Proceedings of the International Seminar -Physical Strains and manual handling of loads: epidemiologic, prevention and normative aspects in European Countries», Milán.

ÖRTENGREN, R.: *European project on standardization of structures and function of computer manikins for design and evaluation of work space at machinery*. Proceeding of the International Conference on Computer-Aided Ergonomics and Safety - CAES'92 - Tampere, Finland, 1992.

PUTZ-ANDERSON, V. y WATER, T. R.: *Revisions in NIOSH guide to manual lifting*. University of Michigan, 1991.

SCHAUB, K.: *Biomechanical modelling and work evaluation with the man model HEINER*. Proceedings of the International Seminar -Physical Strains and manual handling of loads: epidemiologic, prevention and normative aspects in European Countries», Milán, 1989.

SUURNAKKI, TIMO: *OWAS - A method for the evaluation of postural load during work*. Centre for Occupational Safety, Finland, 1991.

WEBB ASSOCIATES: *Anthrometric Source Book*, Vol. 1, NASA 1024, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C., 1978.

## BIBLIOGRAFIA

AFNOR: *Postures et dimensions pour l'homme au travail sur machines et appareils*, 1983.

CLAUSTER, C. E., McCONVILLE, J. T. y YOUNG, J. W.: *Weight, Volume and Center of Mass of Segments of The Human Body*, AMRL-TR-67-70. Aerospace Medical Research Laboratories, Ohio.

*Arbeitsplatzmaße im Produktionsbereich*, Deutsches Institut für Normung, 1988.

Directive 89/392/EC: «Approximation of the laws of the Member States relating to machinery». O.J., L 183 29-6-89.

Directive 90/269/EC: «Minimum safety and health requirements for handling heavy load where there is a risk of back injury for workers». O.J., L 156 21-6-90.

DRILLIS, R. y CONTINI, R.: «Body segment parameter». BP 174-945; *Tech. Rep.*, 1166.03, School of Engineering and Science, New York University, New York, 1966.

*Ergonomics Workplace analysis*. Ergonomics Section Finnish Institute of Occupational Health, 1989.

GENAIDY, A. M.: «Psycho-physical models for manual lifting tasks». *Applied ergonomics*, 21.4 1990.

JUUL-KRISTENSEN, B.: *How to evaluate and reduce back strain caused by heavy lifting*. Proceedings of the International Seminar -Physical Strains and manual handlings of