

Alcance máximo y normal en el plano horizontal

*Maximum and normal reach in the horizontal plane
La portée maximale et normale dans le plan horizontal*

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)

Elaborado por:

Alfredo Álvarez
CENTRO NACIONAL DE
CONDICIONES DE TRABAJO. INSHT

Se desarrolla un modelo para la estimación de los alcances en el plano horizontal para calcular y definir las zonas de alcance máximo y normal, en función tanto de las dimensiones antropométricas como del percentil de la población que se quiera abarcar.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

Los trastornos musculoesqueléticos de las extremidades superiores de asociados a las posturas forzadas y al uso repetido de dichas extremidades a lo largo del tiempo, constituyen uno de los principales problemas de salud de mayor prevalencia entre los trabajadores europeos.

Se acepta comúnmente que los trastornos musculoesqueléticos tienen un origen multifactorial. De entre ellos, las posturas forzadas en el trabajo son uno de los factores más relevantes en este tipo de trastornos. Por lo tanto, los lugares de trabajo deberían diseñarse de forma tal que las tareas se pudiesen llevar a cabo de forma segura y, para ello, deberían tenerse en cuenta factores como: alcances, el tamaño de los miembros corporales, la fuerza muscular, las capacidades visuales, etc.

Desde hace muchos años, se considera que, como criterio general, la disposición y el diseño de los puestos de trabajo deberían minimizar las zonas de trabajo; de forma que los movimientos realizados por los trabajadores sean pequeños y los esfuerzos necesarios para llevar a cabo las tareas también se vean minimizados.

Los conceptos de área de trabajo normal y área máxima de trabajo tienen su origen en el ámbito del diseño industrial de los puestos de trabajo, con la finalidad de proporcionar criterios para la ubicación de las herramientas y los componentes necesarios para la realización de las tareas. El trabajo, las herramientas, los controles, así como cualesquiera otros elementos que tengan que utilizarse frecuentemente, deberían estar ubicados dentro del área normal de trabajo, mientras que aquellos otros elementos de uso ocasional deberían ubicarse no más allá del área máxima de trabajo.

Farley (1955) fue la primera persona en proporcionar dimensiones para las áreas de trabajo antes mencionadas. Por una parte, el área máxima corresponde a la superficie barrida por el movimiento del brazo completamente extendido, que gira alrededor del hombro. Por otra parte, su propuesta para el área normal de trabajo conlleva un movimiento del antebrazo alrededor del eje definido por el brazo en posición vertical y relajada a lo

largo del cuerpo. El codo actúa de pivote del antebrazo que, en su movimiento, genera un arco de circunferencia.

Más tarde, Squires (1956) sugirió que el arco de circunferencia anterior para definir el área normal podía causar la aparición de calambres y agarrotamientos cuando el brazo se aproximaba a los extremos del semicírculo, de forma que el movimiento resultante era rígido, tenso y antinatural. Para evitar estos aspectos relativos al alcance normal, supuso que, si bien el brazo seguía estando en posición vertical y relajada a lo largo del cuerpo, el codo no permanecía estacionario como en la propuesta de Farley, sino que describía un arco de circunferencia cuyo radio era de 17,78 cm. Así mismo, limitó la rotación externa del brazo a 65°. De esta forma, las ecuaciones resultantes eran más complejas que las propuestas por Farley.

En esta nota técnica de prevención (NTP) se desarrollan las ecuaciones necesarias para el cálculo de las curvas de alcance máximo y las curvas de alcance normal siguiendo los criterios de Farley y Squires. A diferencia de las ecuaciones originales, las que aquí se presentan incluyen la altura del plano de trabajo, ya que estas curvas se ven afectadas en función de esta variable. Así mismo, se calculan dichas curvas para la población masculina y la femenina utilizando los datos antropométricos de la población laboral española.

El punto de partida para el desarrollo de las curvas de alcance es el modelo cinemático expuesto en la NTP 991 "Modelo cinemático y análisis postural de la extremidad superior".

2. VARIABLES Y DIMENSIONES

Carmona (2001) midió las dimensiones antropométricas de la población laboral española. Los valores correspondientes a las dimensiones que se utilizan en los cálculos de las diferentes curvas de alcance se muestran en la tabla 1. Dicha tabla contiene la referencia a la descripción de cada dimensión en la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010, así como la variable utilizada en las curvas de alcance.

Referencia UNE-EN ISO 7250-1	Variable	Descripción	Hombres		Mujeres	
			Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
4.1.10	B _d	Espesor del cuerpo, de pie	241.66	36.16	207.88	36.98
4.2.6	L ₁	Longitud hombro-codo	365.05	21.78	335.06	36.98
4.2.8	S _b	Anchura de hombros (biacromial)	381.37	37.00	347.15	33.92
4.4.5	L ₂	Longitud antebrazo-punta de los dedos	460.73	24.37	421.53	22.78

Tabla 1. Dimensiones antropométricas, en milímetros, de la población laboral española.

r _{i,j} hombres	B _d (4.1.10)	L ₁ (4.2.6)	S _b (4.2.8)	L ₂ (4.4.5)	r _{i,j} mujeres	B _d (4.1.10)	L ₁ (4.2.6)	S _b (4.2.8)	L ₂ (4.4.5)
B _d (4.1.10)	1				B _d (4.1.10)	1			
L ₁ (4.2.6)	0,071	1			L ₁ (4.2.6)	-0,008	1		
S _b (4.2.8)	0,122	0,36	1		S _b (4.2.8)	0,299	0,282	1	
L ₂ (4.4.5)	-0,038	0,564	0,328	1	L ₂ (4.4.5)	0,053	0,565	0,285	1

Tabla 2. Coeficiente de correlación entre las dimensiones antropométricas utilizadas.

También es necesario para el cálculo de los alcances el coeficiente de correlación $r_{i,j}$ entre dos dimensiones antropométricas. Este coeficiente es una medida de la relación lineal y de la proporcionalidad entre dos variables i y j . Los valores calculados por Carmona (2003) para la población laboral española se muestran en la tabla 2 para las dimensiones utilizadas en este texto (entre paréntesis se indica la referencia de la dimensión en la norma UNE-EN ISO 7250-1:2010).

Con la finalidad de limitar y de fijar los movimientos a una superficie horizontal, se utilizan dos dimensiones, h y m , que corresponden a la altura del hombro en posición de sentado y a la altura de la mesa respectivamente. Debe destacarse que estas variables no son dimensiones antropométricas, si bien los valores que toman dependen de la configuración del puesto de trabajo (alturas de la silla y de la mesa) y de la persona que lo ocupa (altura de los hombros).

3. ALCANCE MÁXIMO

En el alcance máximo, el brazo está completamente extendido, de tal forma que el extremo de la mano está en contacto con la superficie horizontal. La ecuación 1 muestra las componentes cartesianas de dicho alcance para la extremidad superior derecha, siendo estas componentes función del ángulo θ de rotación del hombro, que toma valores comprendidos en el rango $[-90^\circ, 90^\circ]$.

$$A_x = S_b / 2 - (L_1 + L_2) \operatorname{sen} \theta \cos \phi \quad [1]$$

$$A_y = -B_d / 2 + (L_1 + L_2) \cos \theta \cos \phi$$

La expresión 1 coincide con la ecuación paramétrica de un círculo cuyo radio es $(L_1 + L_2) \cos \phi$. La condición para que la mano esté en contacto con la superficie de la mesa se establece mediante el valor del ángulo ϕ , calculándose este mediante la expresión 2.

$$\operatorname{sen} \phi = \frac{h - m}{L_1 + L_2} \quad [2]$$

La varianza (s^2) de las componentes correspondientes al alcance máximo se muestra en la ecuación 3. Las variables $\sigma_{L_1}^2$, $\sigma_{L_2}^2$, $\sigma_{S_b}^2$ y $\sigma_{B_d}^2$ son las varianzas de las dimensiones antropométricas de la tabla 1 y se calculan elevando al cuadrado las desviaciones típicas que allí se muestran. En cambio, los términos σ_{L_1, L_2} , σ_{L_1, S_b} y σ_{L_2, S_b} corresponden a las covarianzas entre dos dimensiones, y se calculan multiplicando el coeficiente de correlación entre ellas (valores de la tabla 2) por la desviación estándar de cada una; es decir, para calcular la covarianza entre las dimensiones i y j se utiliza la siguiente equivalencia $\sigma_{i,j} = r_{i,j} \sigma_i \sigma_j$.

Estos valores de varianza de los alcances son necesarios para poder calcular las curvas de alcance para un determinado percentil poblacional. Como las dimensiones antropométricas siguen una distribución normal (Carmona 2003), este valor de percentil se puede calcular a través de la expresión 4 (Kroemer et al. 2010). El valor de z depende del percentil que se desea abarcar, de acuerdo con la distribución normal estandarizada. Algunos de los valores más habituales de z se muestran en la tabla 3.

$$p = A_i + z S_{A_i} \quad [4]$$

$$S_{A_x}^2 = \operatorname{sen}^2 \theta \cos^2 \phi (\sigma_{L_1}^2 + 2\sigma_{L_1, L_2} + \sigma_{L_2}^2) - \operatorname{sen} \theta \cos \phi (\sigma_{L_1, S_b} + \sigma_{L_2, S_b}) + \frac{\sigma_{S_b}^2}{4} \quad [3]$$

$$S_{A_y}^2 = \cos^2 \theta \cos^2 \phi (\sigma_{L_1}^2 + 2\sigma_{L_1, L_2} + \sigma_{L_2}^2) - \cos \theta \cos \phi (\sigma_{L_1, B_d} + \sigma_{L_2, B_d}) + \frac{\sigma_{B_d}^2}{4}$$

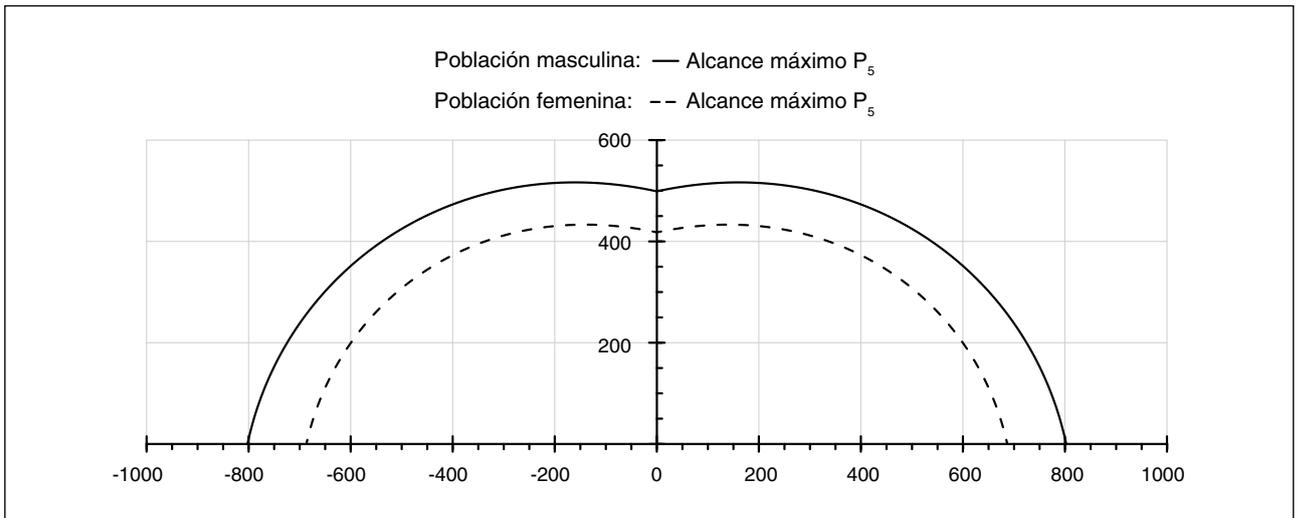


Figura 1. Alcance máximo, en milímetros, para el percentil 5 de la población masculina (línea continua) y de la femenina (línea discontinua).

Percentil	z
1	-2,326
5	-1,645
10	-1,282
50	0,000
90	1,282
95	1,645
99	2,326

Tabla 3. Valores más habituales de la variable normal estandarizada z.

En la figura 1 se representan dos curvas de alcance máximo, una para el percentil 5 de la población masculina y la otra para el percentil 5 de la femenina, fijando la altura de la mesa en 72 cm y la altura del hombro en 114 cm (estos valores de altura se mantendrán constantes en todas las figuras de este texto). A igualdad de percentiles, el área máxima masculina es mayor que la femenina debido a que las dimensiones antropométricas, y por ende el alcance, son menores en el segundo caso.

4. ÁREA NORMAL DE FARLEY

En el caso del área normal, según el criterio de Farley, no existe una rotación de todo el miembro superior, sino que el codo actúa como punto de rotación del antebrazo, con valores comprendidos en el rango $[-90^\circ, 90^\circ]$. Por este motivo, en la curva de alcance (ecuación 5) para la extremidad superior derecha no aparece la longitud del brazo (L_1) pero sí la del antebrazo (L_2).

$$A_x = S_b / 2 - L_2 \sin \theta \sin \phi \quad [5]$$

$$A_y = -B_d / 2 + L_2 \cos \theta \sin \phi$$

De forma similar a lo que sucedía con el alcance máximo (ecuación 1), en este caso la curva resultante también es circular, si bien el radio es $L_2 \sin \phi$. Así mismo, el valor del ángulo ϕ se determina para que la

mano esté siempre en contacto con la superficie de la mesa (ecuación 6).

$$\cos \phi = \frac{h - m - L_1}{L_2} \quad [6]$$

El cálculo de la curva para un determinado percentil poblacional se hace de la misma forma (ecuación 4) que en el caso del área máxima de alcance. Sin embargo, los valores de varianza para cada uno de los componentes del alcance son los de la ecuación (7).

$$S_{A_x}^2 = \sin^2 q_1 \sin^2 q_4 \sigma_{L_2}^2 - \sin q_1 \sin q_4 \sigma_{L_2, S_b} + \frac{\sigma_{S_b}^2}{4} \quad [7]$$

$$S_{A_y}^2 = \cos^2 q_1 \sin^2 q_4 \sigma_{L_2}^2 - \cos q_1 \sin q_4 \sigma_{L_2, B_d} + \frac{\sigma_{B_d}^2}{4}$$

La representación gráfica de este alcance para los dos brazos y para el percentil 5 de las poblaciones masculina y femenina se muestra en la figura 2. En comparación con el caso anterior, la curva normal de Farley abarca un área menor porque el radio del arco de circunferencia también lo es. También hay que destacar que ambas curvas de alcance son concéntricas; es decir, la proyección del centro de la circunferencia en el plano bidimensional de la mesa es el mismo.

5. ÁREA NORMAL DE SQUIRES

El cálculo de la curva de Squires (ecuación 8) resulta más complicado que en las curvas anteriores. Esto se debe a que los criterios de Squires contemplan un modelo más complejo de movimiento de la extremidad superior. Por una parte, el codo realiza un movimiento circular de radio $r=17,78$ cm desde la posición frontal ($\theta=0^\circ$) hasta la posición lateral ($\theta=-90^\circ$). Por otra parte, la rotación externa del hombro se codifica a través del ángulo α entre el antebrazo y el borde de la mesa de tal forma que, cuando el codo está en posición frontal, el ángulo α es tal que la mano está en la mediana corporal y, cuando el codo está en posición lateral, el ángulo α es igual a 65° .

$$A_x = S_b / 2 - r \sin \theta + \sqrt{L_2^2 - \left(-(h - m) + \sqrt{L_1^2 - r^2} \right)^2} \cos \alpha \quad [8]$$

$$A_y = -B_d / 2 + r \cos \theta + \sqrt{L_2^2 - \left(-(h - m) + \sqrt{L_1^2 - r^2} \right)^2} \sin \alpha$$

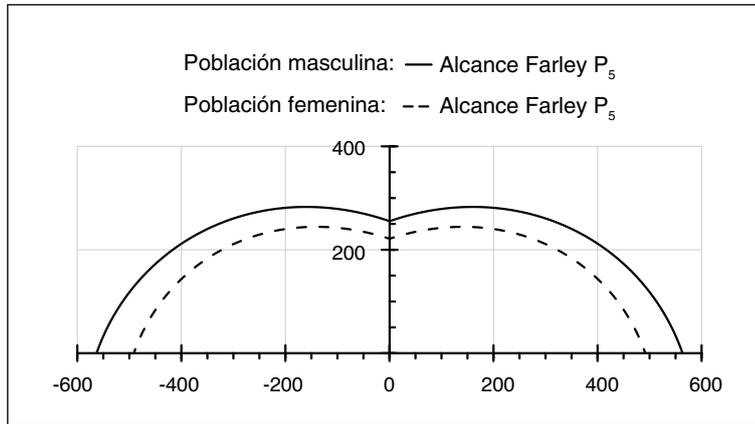


Figura 2. Alcance normal según el criterio de Farley, en milímetros, para el percentil 5 de la población masculina (línea continua) y de la femenina (línea discontinua).

A diferencia de las dos curvas anteriores, la expresión de la curva de Squires corresponde a una cicloide. Este hecho hace que al calcular las derivadas parciales de la curva de Squires para obtener las varianzas, la expresión resultante final (ecuación 9) sea más compleja que en los casos anteriores.

En la figura 3 se representa esta curva para los dos brazos y para el percentil 5 de las poblaciones masculina y femenina. La limitación en la rotación del hombro a un

valor de ángulo plano de 65° se muestra como la característica más llamativa con respecto a las curvas máximas y de Farley; es decir, si bien la distancia de alcance de Squires está comprendida entre el valor máximo y el de Farley, la curva no llega hasta el borde de la mesa. Así mismo, también llama la atención que la curva de Squires no es concéntrica respecto a la curva máxima ni a la de Farley debido a que la primera es una cicloide y las otras dos son arcos de circunferencia.

$$S_{A_x}^2 = \frac{\cos \alpha}{L_1^2 - r^2} \frac{L_1 \sigma_{L_1, B_d} \sqrt{L_1^2 - r^2} \theta - L_2 \sigma_{L_2, S_b} (L_1^2 - r^2)}{\sqrt{L_2^2 - \theta^2}} - \frac{\cos^2 \alpha}{L_1^2 - r^2} \frac{L_1^2 \sigma_{L_1}^2 \theta^2 - 2L_1 L_2 \sigma_{L_1, L_2} \sqrt{L_1^2 - r^2} \theta + L_2^2 \sigma_{L_2}^2 (L_1^2 - r^2)}{L_2^2 - \theta^2} + \frac{\sigma_{S_b}^2}{4} \quad [9]$$

$$S_{A_y}^2 = -\frac{\sin \alpha}{L_1^2 - r^2} \frac{L_1 \sigma_{L_1, S_b} \sqrt{L_1^2 - r^2} \theta - L_2 \sigma_{L_2, B_d} (L_1^2 - r^2)}{\sqrt{L_2^2 - \theta^2}} - \frac{\sin^2 \alpha}{L_1^2 - r^2} \frac{L_1^2 \sigma_{L_1}^2 \theta^2 - 2L_1 L_2 \sigma_{L_1, L_2} \sqrt{L_1^2 - r^2} \theta + L_2^2 \sigma_{L_2}^2 (L_1^2 - r^2)}{L_2^2 - \theta^2} + \frac{\sigma_{B_d}^2}{4}$$

$$\theta = -(h - m) + \sqrt{L_1^2 - r^2}$$

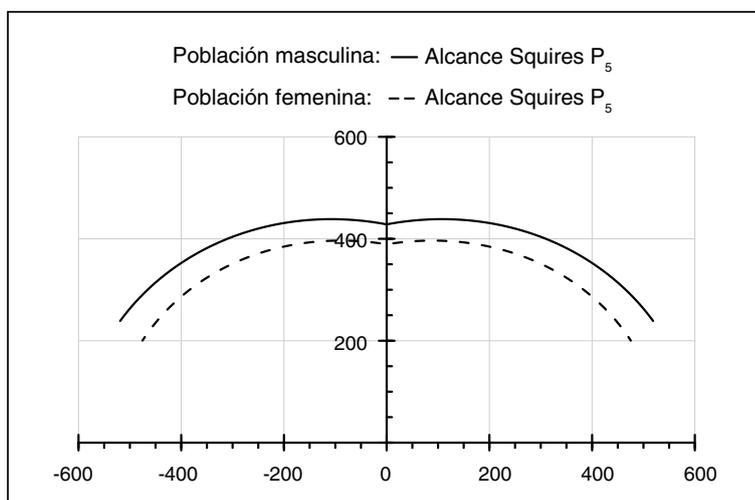


Figura 3. Alcance normal según el criterio de Squires, en milímetros, para el percentil 5 de la población masculina (línea continua) y de la femenina (línea discontinua).

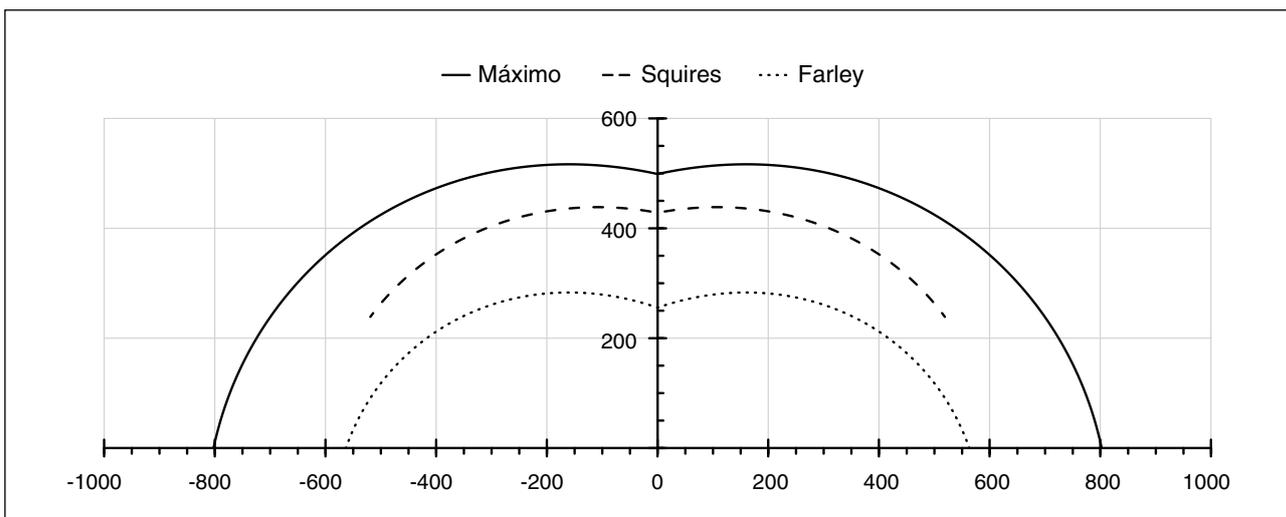


Figura 4. Curvas de alcance máximo (línea continua), de Squires (línea discontinua) y de Farley (línea punteada) en el plano horizontal para el percentil 5 de la población masculina.

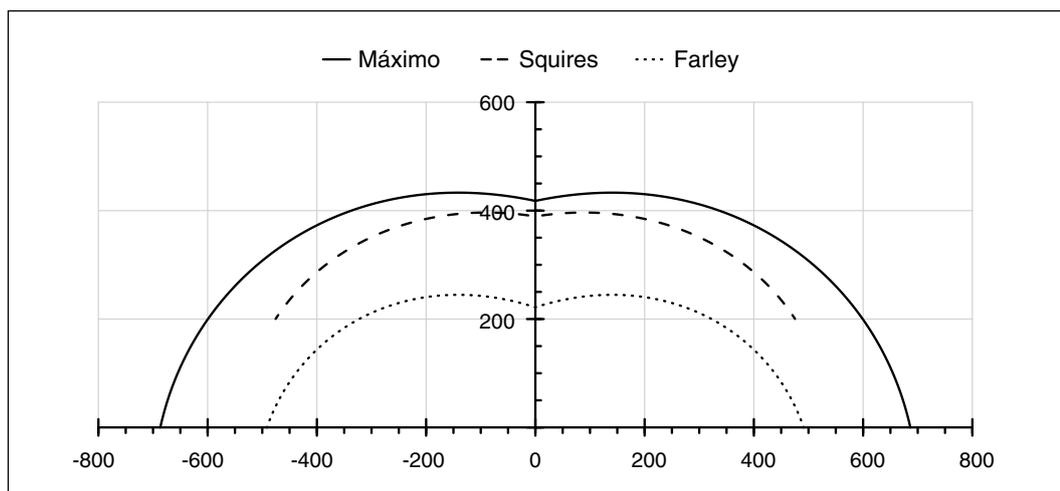


Figura 5. Curvas de alcance máximo (línea continua), de Squires (línea discontinua) y de Farley (línea punteada) en el plano horizontal para el percentil 5 de la población femenina.

6. CONSIDERACIONES FINALES

Las curvas de las figuras 1, 2 y 3 se representan de nuevo en las figuras 4 y 5, esta vez agrupadas por sexo en lugar de por tipo de alcance. De esta forma, resulta más fácil observar la diferencia entre los distintos conceptos de Farley y de Squires en relación con la curva de alcance normal.

Así mismo, también es posible comprobar que, si bien los valores exactos de las curvas dependen de los parámetros y variables utilizados en las ecuaciones, la forma general se mantiene y la relación entre las curvas presenta pocas variaciones.

La mayoría de textos clásicos de ergonomía presentan estas curvas de alcance para que se utilicen en el diseño de los puestos de trabajo. No obstante, dichas curvas están ajustadas a las dimensiones antropométricas particulares de la población utilizada en la elaboración de las

mismas, de forma que su aplicación a otras poblaciones puede acarrear errores en la aproximación hecha. Los modelos y las expresiones presentados en este texto pueden ser aplicados a cualquier tipo de población, siempre que se conozcan (o se midan experimentalmente) las dimensiones antropométricas de la misma. Además, incorporan la altura de la mesa como una variable más, ya que los tres tipos de alcance se ven afectados, no sólo por la antropometría de los individuos, sino también por la configuración del puesto de trabajo (altura de la mesa y altura de la silla).

Finalmente, se ha optado por realizar los cálculos para el percentil 5 de las poblaciones masculina y femenina porque, de forma genérica, corresponde al valor que permite al 95% de la población abarcar las zonas de alcance. De forma similar, podría tomarse un valor diferente de percentil en función de las características del puesto de trabajo, los requerimientos de las tareas y las características de las personas usuarias del puesto de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Carmona, A. 2001. Datos antropométricos de la población laboral española. *Prevención, Trabajo y Salud*, 14, 22-35.

Carmona, A. 2003. Aspectos antropométricos de la población laboral española aplicados al diseño industrial. Madrid: INSHT.

Farley, R. R. 1955. Some principles of methods and motion study as used in development work. *General Motors Engineering Journal* 20-25.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. 2013. NTP 991: Modelo cinemático y análisis postural de la extremidad superior. Madrid: INSHT.

Kroemer, Karl H. E., Kroemer, Hiltrud J., Kroemer-Elbert, Katrin E. *Engineering physiology. Bases of human factors engineering/ergonomics*. 4th edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

Squires, P. C. 1956. The shape of the normal work area. United States naval medical research laboratory report no. 275, Bureau of medicine and surgery, Navy department.

UNE-EN ISO 7250-1:2010. Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias (ISO 7250-1:2008).