

# Postura esquelética de la mano para representar las configuraciones dactilológicas de la lengua de señas mexicana en un entorno virtual

Alejandro Gómez-Terán<sup>1</sup>, Belém Priego-Sánchez<sup>1</sup>, David Pinto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana,  
Departamento de Sistemas,  
México

<sup>2</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,  
Facultad de Ciencias de la Computación,  
México

{alejandrog.teran, belemps}@gmail.com, dpinto@cs.buap.mx

**Resumen.** Entre otras formas de comunicación, existen las de modalidad visogestual; tal es el caso de las lenguas de señas desarrolladas por las personas sordas. En este artículo se presentan distintas descripciones de la postura esquelética de la mano con la finalidad de generar una representación de las 29 configuraciones dactilológicas de la lengua de señas mexicana en un entorno virtual. La descripción de la postura esquelética de la mano depende de sus parámetros antropométricos y de los valores de sus ángulos articulares: sus variables de configuración. Así, en este artículo, las configuraciones dactilológicas de la LSM son descritas por medio de 34 variables de configuración de la mano.

**Palabras clave:** Lengua de señas, configuraciones dactilológicas, planeación de movimiento.

## Skeletal Hand Posture for Signing the dactylogical Configurations of Mexican Sign Language in a Virtual Environment

**Abstract.** Among other forms of communication there are the visual-manual modalities; such is the case of sign languages created by deaf people. In this article some skeletal hand posture descriptions are shown in order to develop a suitable representation of the 29 dactylogy configurations of the Mexican sign language within a virtual environment. Skeletal hand posture description depends on its anthropometric parameters and its articular angular values i.e. the hand's configuration values. On the whole, in this article we describe the dactylogy configurations of the Mexican sign language by means of 34 configuration parameters of the hand.

**Keywords:** Sign language, fingerspelling, motion planning.

## 1. Introducción

Las lenguas de señas son lenguajes de modalidad visogestual que utilizan movimientos de las manos, rostro y cuerpo como forma de comunicación [2]. En México, en el Diario Oficial de la Federación publicado el 10 de junio del 2015, se reconoció a la lengua de señas mexicana (LSM) como la lengua de la comunidad de sordos signantes [5]. La LSM se compone de ideogramas y de dactilología; mientras que los ideogramas representan una palabra con una o varias configuraciones de mano, la dactilología se ocupa de lo que en lengua oral se denomina deletreo y se representa por medio del alfabeto dactilológico de la lengua de señas [15].

El alfabeto dactilológico de la LSM consta de 29 configuraciones; 27 corresponden a las 27 letras del idioma español y dos más se utilizan para representar la ‘R’ doble y la ‘L’ doble. Estas configuraciones se pueden caracterizar por medio de la descripción de la postura esquelética de la mano.

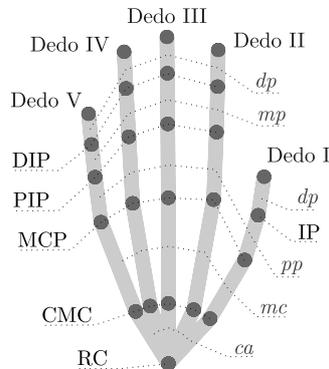
La descripción de la postura esquelética de la mano se puede realizar especificando sus parámetros antropométricos y los valores de sus ángulos articulares: las variables de configuración de la mano. Así, en este trabajo realizamos una descripción de las 29 configuraciones dactilológicas de la LSM a través de los valores de las variables de configuración de la mano. Con esta descripción, posteriormente, se desarrollará un entorno virtual para deletrear texto utilizando tales configuraciones.

### 1.1. Anatomía esquelética descriptiva de la mano

La mano está formada por la muñeca y cinco dedos; en ella hay 27 huesos: ocho carpianos (*ca*) situados en la muñeca, cinco metacarpianos (*mc*) situados en la palma y 14 falanges. Los dedos se identifican enumerándolos del I al V —en alusión al pulgar, índice, medio, anular y al meñique, respectivamente—. El dedo I consta de un *mc* y dos falanges: la proximal (*pp*) y la distal (*dp*). Los dedos II a V poseen, cada uno, un *mc* y tres falanges: una *pp*, una media (*mp*) y una *dp*.

Los huesos de la mano se unen entre sí por medio de articulaciones; 20 en total. La radiocarpiana (RC) une la mano con el antebrazo. Las del dedo I son tres: la carpometacarpiana (CMC), la metacarpofalangiana (MCP) y la interfalangiana (IP). Los dedos II a V poseen cada uno cuatro: la carpometacarpiana (CMC), la metacarpofalangiana (MCP), la interfalangiana proximal (PIP) y la interfalangiana distal (DIP). La ubicación de estas articulaciones se puede apreciar en la Figura 1 que muestra una representación esquelética de la mano derecha y los identificadores que se utilizarán en adelante.

Las articulaciones la mano tienen distinto número de grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés: *degrees of freedom*). El número de DOF de cada articulación corresponde al número de ejes de rotación que posee [16]. Entre las instancias más representativas de modelos de la mano humana el número de DOF considerados varía de 12 a 25 [14].



**Fig. 1.** Identificadores de las articulaciones y los huesos de la mano (vista palmar).

## 1.2. Movimientos de los elementos de la mano

En este artículo, como en [16], consideramos que los dedos de la mano pueden ejecutar cuatro tipos de movimientos: el de flexión, el cual realizan al acercarse a la palma; el de aducción, el cual ejecutan al acercarse al plano que divide la mano entre los dedos II y III (plano sagital de la mano) y, finalmente, el de abducción que es en aquel que realizan al separarse de dicho plano —lo anterior no proscribire que algunas articulaciones de los dedos puedan rotar ligeramente alrededor del eje longitudinal de MC o PP—.

## 2. Modelos cinemáticos de la mano humana

Diseñar un sistema para reproducir la LSM en un entorno virtual no es tarea trivial [18]; entre otras, es necesario resolver la de construir un modelo cinemático de la mano que permita caracterizar adecuadamente los movimientos involucrados en la ejecución de las configuraciones dactilológicas.

Un modelo cinemático describe la postura de un sistema de cuerpos y sus relaciones mecánicas. Tales relaciones las definen las dimensiones de sus elementos y cualquier restricción de movimiento involucrada. En el caso de la mano humana, su esqueleto forma un sistema de cuerpos articulados donde las restricciones de movimiento las imponen las articulaciones y las colisiones que pueden ocurrir entre sus elementos. Es decir, un modelo cinemático de la mano debe dar cuenta tanto de sus parámetros antropométricos como de los articulares.

En lo que refiere a los modelos para representar los movimientos de los elementos de la mano en un entorno virtual, estos varían desde los simplificados como estructuras de alambre [19,20], hasta los volumétricos visualmente ricos [1,6,12,11,17]. A continuación, se describen seis modelos cinemáticos de la mano y las características que resultan aquí relevantes para diseñar un modelo adecuado para reproducir las posturas dactilológicas de la LSM.

El modelo [9] (Figura 2a) toma en cuenta 27 DOF; 6 son de la muñeca (tres para ubicación y tres para orientación) y 21 son de los dedos. Considera que el dedo I tiene 5 DOF: dos en CMC, dos en MCP y uno en IP. Y considera que los dedos II a IV poseen cada uno 4 DOF: cero en CMC, dos de MCP, uno en PIP y otro en DIP.

El modelo [16] (Figura 2b) se basa en la formulación Denavit-Hartenberg y utiliza, inicialmente, 26 DOF; todos pertenecientes a los dedos (no toma en cuenta la articulación RC). Considera que el dedo I posee 6 DOF: tres en CMC, dos en MCP y uno en IP. Asume que los dedos II a V poseen, cada uno, 5 DOF: uno en CMC, dos en MCP, uno en PIP y uno en DIP. Al final, después de aplicar restricciones cinemáticas debidas a interdependencias entre las articulaciones MCP, PIP, DIP en los dedos II a V, los autores del modelo lo redijeron 26 a 18 DOF.

El modelo [7] (Figura 2c) se planteó como objetivo modelar movimientos naturales de la mano. Considera 22 DOF; 3 en la muñeca y 19 en los dedos. En el dedo I hay 3 DOF: cero en CMC, dos en MCP y uno en IP. Los dedos II a V poseen 4 DOF: cero en CMC, dos en MCP, uno en PIP y otro en DIP. Al final sus autores concluyen que este modelo no es suficiente para reproducir gesticulaciones arbitrarias.

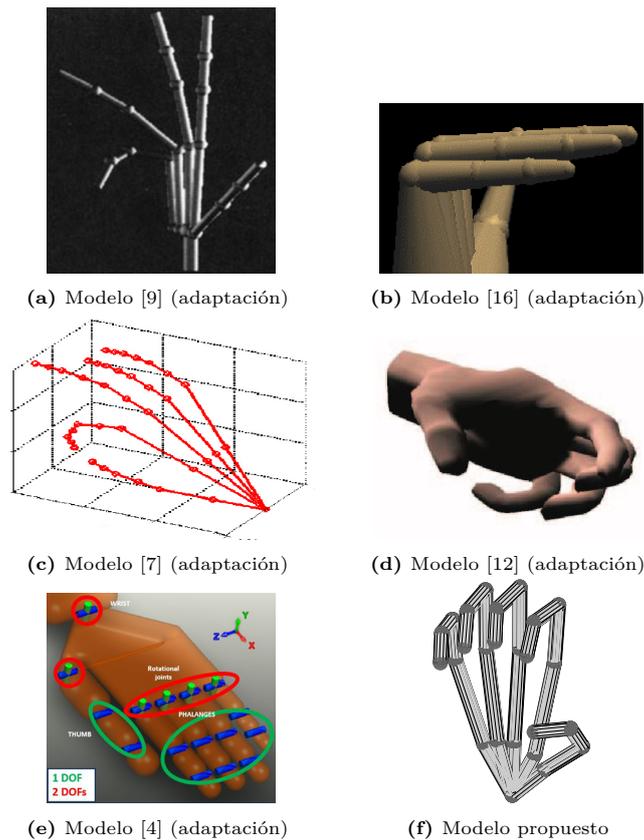
El modelo [13] fue diseñado para imitar lo mejor posible la forma y funciones de la mano. Toma en cuenta 25 DOF; todos pertenecientes a los dedos. El dedo I consta de 5 DOF: dos en CMC, dos en MCP y uno en IP. Los dedos II y III tienen, cada uno, 4 DOF: cero en CMC, dos en MCP, uno en PIP y uno en DIP. Finalmente, el modelo considera que los dedos IV y V constan, cada uno, de 6 DOF: dos en CMC, dos en MCP, uno en PIP y otro más en DIP.

El modelo [12] (Figura 2d) —uno de los que visualmente son más ricos— posee 20 DOF; todos en los dedos. En el dedo I considera que hay 4 DOF: dos en MCP, uno en MCP y otro en IP. En los dedos II a V hay, en cada uno, 4 DOF: cero en CMC, dos en MCP, uno en PIP y otro en DOP. Al final, el modelo utiliza menos variables que el número DOF; lo anterior al que CMC del dedo III carece de movimiento de aducción-abducción y al considerar restricciones cinemáticas de producto de las interdependencias entre las articulaciones PIP y DIP en los dedos II a V.

El último modelo aquí descrito es [4] (Figura 2e); tuvo como propósito de diseño la construcción de un exoesqueleto de mano como ayuda para personas con problemas de apertura de los dedos II a V. Considera 12 DOF; todos en los dedos II a V: cero en CMC y uno en cada articulación MCP. PIP y DIP.

Con lo anterior, tomando como base las descripciones de [4,7,9,12,13,16], el modelo que proponemos en este artículo consta de 34 DOF; 3 en la muñeca y 31 en los dedos. Los tres de la muñeca pertenecen a la articulación RC. El dedo I —el más complejo desde el punto de vista cinemático— posee 7 DOF: tres en CMC, tres en MCP y uno en IP. Los dedos II a V tienen, cada uno, 6 DOF: dos en CMC, dos en MCP, uno en PIP y otro más en DIP. En lo referente a los DOF que asignamos a las articulaciones, adoptamos la estructura que [13] utiliza para los dedos IV y V, pero la usamos también en II y III.

Y respecto al dedo I, el modelo más parecido al que nosotros proponemos es [16] que le adjudica 6 DOF; en el modelo que proponemos, la articulación MCP posee 3 DOF en vez de 2: añadimos un DOF de rotación alrededor del eje longitudinal de MC. Así, la representación gráfica del modelo propuesto es la que muestra la (Figura 2f).

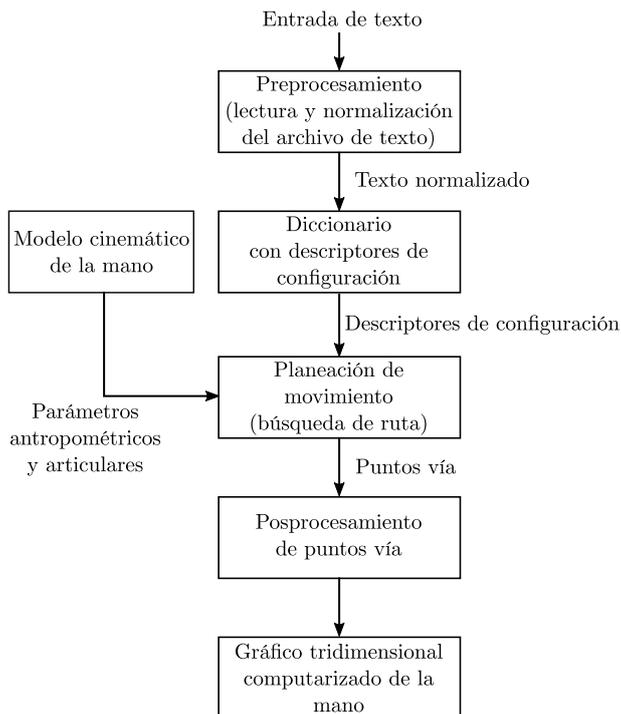


**Fig. 2.** Representación gráfica de los modelos [9,16,7,12,4] y el modelo aquí propuesto.

### 3. Representación de las configuraciones dactilológicas de la LSM

Obtener aquí un modelo cinemático de la mano tiene como propósito servir como base para realizar una descripción de las configuraciones dactilológicas de LSM en el contexto del diseño e implementación de un sistema computacional

que sea capaz de, deletrear texto mediante la representación de tales configuraciones en un entorno virtual. Dicha representación será gobernada por un subsistema de planeación de movimiento basado en un modelo cinemático de la mano.



**Fig. 3.** Diagrama de bloques del sistema computacional de deletreo de texto a través de las configuraciones dactilológicas de la LSM.

Así, el sistema —esquemático en la Figura 3 y cuyos módulos se describen en la tabla 1— recibirá como entrada un archivo de texto sin formato, con codificación UTF-8, escrito en español y libre de imágenes. A la salida producirá un gráfico tridimensional por computadora de la mano capaz de reproducir las configuraciones dactilológicas de LSM.

### 3.1. Descripción cinemática de la mano

Como fue mencionado al final de la sección 2, el modelo que proponemos en este artículo para representar las 29 configuraciones dactilológicas de la LSM considera 20 articulaciones de la mano con un total de 34 DOF; 3 en la muñeca y 31 en los dedos. Los tres de la muñeca pertenecen a la articulación RC. El dedo I posee 7 DOF: tres en CMC, tres en MCP y uno en IP. Los dedos II a V tienen,

**Tabla 1.** Descripción funcional de los módulos del sistema de deletreo de texto a través de las configuraciones dactilológicas de la LSM.

Módulo	Función
Preprocesamiento	Lectura del archivo de entrada y normalización el texto dentro del conjunto de las 27 letras del alfabeto en español y tres marcadores más: los caracteres <i>espacio</i> , <i>punto</i> y <i>salto de línea</i>
Diccionario	Entregar, para cada letra del alfabeto en español, el conjunto de descriptores de la postura esquelética de la mano de la configuración dactilológica correspondiente.
Modelo cinemático	Contiene la descripción de los parámetros antropométricos de una mano y la especificación de las relaciones articulares entre sus elementos.
Planeación de movimiento	Resuelve dos problemas de movimiento: el de búsqueda de espacio para la configuración a ejecutar y el de búsqueda de ruta para generar los movimientos de transición entre la configuración dactilológica inicial y la siguiente. A la salida debe entregar —a modo de ruta entre ambas configuraciones— una secuencia de puntos vía en el espacio generado por los parámetros de configuración de la mano.
Posprocesamiento	Interpretación y adecuación de los puntos vía de la ruta generada en un formato <i>ad hoc</i> para el módulo del gráfico tridimensional computarizado de la mano.
Gáfico computarizado tridimensional	Construcción del gráfico que reproduzca inteligiblemente las gesticulaciones correspondientes a las configuraciones dactilológicas de la LSM acorde con el texto de entrada.

cada uno, 6 DOF: dos en CMC, dos en MCP, uno en PIP y otro más en DIP. Lo anterior y las coordenadas de las articulaciones consideradas se muestran en la tabla 2; tales coordenadas se encuentran definidas en relación a un sistema de coordenadas inercial que no forma parte del modelo y se ubica en la apófisis estiloides radial (en el sitio donde se unen el antebrazo y la mano).

Respecto a los ejes de rotación de las articulaciones, estos corresponden a líneas en  $\mathbb{R}^3$  de las que optamos por describir su orientación a través de un sistema de coordenadas donde, como en [3], la orientación es descrita por medio de una terna de *ángulos de Euler*. La terna seleccionada corresponde a la secuencia de rotaciones denominada *Roll-Pitch-Jaw*; donde *Roll* es al ángulo de rotación ( $\alpha$ ) alrededor del eje  $x$ , *Pitch* el ángulo ( $\beta$ ) alrededor del eje  $x$  y *Yaw* el ángulo ( $\gamma$ ) alrededor del eje  $Z$  — es decir, secuencia 321 o *Zyx*— como en [8]. Así, la tabla 3 muestra las ternas de orientación de los ejes de movimiento de los 34 DOF de las articulaciones de la mano cuando se encuentra en reposo. En dicha tabla, los subíndices  $r$ ,  $p$ ,  $y$  indican, respectivamente, rotación, cabeceo y guiñada de la mano; y los subíndices  $r$ ,  $a$ ,  $f$  indican, respectivamente eje de rotación, eje de aducción-abducción y eje de flexión-extensión del resto de las articulaciones.

Las últimas características de la mano por describir son las ubicaciones de la punta de los dedos. Dichas ubicaciones, cuando la mano se encuentra en postura de reposo, se muestran en la tabla 4.

**Tabla 2.** Cantidad de DOF y coordenadas de las articulaciones del modelo propuesto para describir la postura de la mano.

Grupo	Articulación	DOF	Ubicación [mm]		
			$x$	$y$	$z$
Muñeca					
	RC	3	0	0	0
Dedo I					
	CMC	3	23	-4	25
	MCP	3	40.03	-6.993	58.986
	IP	1	47.204	-13.778	83.828
Dedo II					
	CMC	2	14	1	30
	MCP	2	25.1	5.9	91
	PIP	1	26.606	4.872	128.464
	DIP	1	27.086	1.236	153.564
Dedo III					
	CMC	2	0	2	33.5
	MCP	2	0.01	9	90
	PIP	1	-0.332	6.284	132.957
	DIP	1	-0.579	2.296	160.891
Dedo IV					
	CMC	2	-10	1	32
	MCP	2	-19.619	5.082	89.139
	PIP	1	-21.679	3.582	126.079
	DIP	1	-23.058	0.752	152.823
Dedo V					
	CMC	2	-18	-0.5	29
	MCP	2	-37.143	0.928	78.6
	PIP	1	-40.319	0.133	103.615
	DIP	1	-42.072	-2.581	121.611

Con lo anterior, en el modelo cinemático propuesto, la posición en  $\mathbb{R}^3$  (ubicación y orientación) de cada DOF es aquí expresada mediante un sistema de coordenadas cuyo origen define la ubicación de la articulación y donde el eje de rotación de la articulación es colineal con el eje  $Z$  de tal sistema. Este sistema es codificado utilizando la matriz  ${}^h\mathbf{F}$  de transformación homogénea (1); donde  $(x, y, z)$  corresponden las coordenadas de la articulación y que se muestran en la tabla 2; y donde  $\alpha, \beta, \gamma$  son los ángulos  $RPY$  mostrados en la tabla 3. Es decir, por cada uno de los DOF del modelo, existe una matriz (1) que establece su posición en términos del sistema de referencia inercial cuando la mano se encuentra en la postura de reposo ( $h$ ).

Así, dado que cada dedo puede ser considerado como una cadena cinemática abierta que inicia en RC y termina en la punta del dedo, la posición, en términos del sistema de referencia inercial (sistema 0), de su  $i$ -ésimo elemento en función de los ángulos de articulación  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i)$  está dada por la transformación (2);

**Tabla 3.** Orientación de los 34 ejes de movimiento del modelo propuesto para describir la postura de la mano.

Grupo	Eje de movimiento	Orientación en ángulos RPY [grados sexagesimales]		
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Muñeca	RC <sub>r</sub>	0	0	90
	RC <sub>p</sub>	0	-90	0
	RC <sub>y</sub>	45	-90	45
Dedo I	CMC <sub>r</sub>	25.431734	17.148859	52.139412
	CMC <sub>a</sub>	54.300595	-59.649168	-6.058481
	CMC <sub>f</sub>	-35.699405	-59.649168	-6.058481
	MCP <sub>r</sub>	19.532247	-0.618973	34.98159
	MCP <sub>a</sub>	91.85077	-70.458331	-56.762641
	MCP <sub>f</sub>	1.85077	-70.458331	-56.762641
	IP <sub>f</sub>	30.416905	-68.271632	-87.81352
Dedo II	CMC <sub>a</sub>	81.199843	-64.927192	4.085617
	CMC <sub>f</sub>	-8.800157	-64.927192	4.085617
	MCP <sub>a</sub>	27.704791	-83.78587	57.740348
	MCP <sub>f</sub>	-62.295209	-83.78587	57.740348
	PIP <sub>f</sub>	54.551232	-85.869683	-59.568265
	DIP <sub>f</sub>	78.596457	-80.713926	-83.970312
Dedo III	CMC <sub>a</sub>	-0.163644	-86.583412	90
	CMC <sub>f</sub>	-90.163644	-86.583412	90
	MCP <sub>a</sub>	-4.064264	-83.159258	94.119652
	MCP <sub>f</sub>	-94.064264	-83.159258	94.119652
	PIP <sub>f</sub>	96.796548	-86.17686	-97.173502
	DIP <sub>f</sub>	92.959173	-80.860215	-93.189486
Dedo IV	CMC <sub>a</sub>	-81.620963	-73.031315	177.280555
	CMC <sub>f</sub>	-171.620963	-73.031315	177.280555
	MCP <sub>a</sub>	-44.76741	-83.874907	137.772348
	MCP <sub>f</sub>	-134.76741	-83.874907	137.772348
	PIP <sub>f</sub>	149.342867	-83.798346	-146.530651
	DIP <sub>f</sub>	121.831765	-81.900256	-118.976747
Dedo V	CMC <sub>a</sub>	-80.719227	-67.509726	-175.841279
	CMC <sub>f</sub>	-170.719227	-67.509726	-175.841279
	MCP <sub>a</sub>	-66.901464	-75.482075	167.098877
	MCP <sub>f</sub>	-156.901464	-75.482075	167.098877
	PIP <sub>f</sub>	151.999798	-78.333119	-146.248576
	DIP <sub>f</sub>	134.714313	-76.020383	-130.322515

donde  $\mathbf{R}_Z(\theta)$  es la matriz de transformación homogénea para rotar alrededor del eje Z,  ${}^0\mathbf{F}_0$  es la matriz identidad y  $c\varphi$ ,  $s\varphi$  representan respectivamente, en notación compacta,  $\cos(\varphi)$  y  $\sin(\varphi)$ .

$${}^h\mathbf{F} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma & s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta c\gamma & x \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + c\alpha s\beta s\gamma & y \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$${}^0\mathbf{F}_i(\theta_{1,2,\dots,i}) = {}^0\mathbf{F}_{i-1}(\theta_{1,2,\dots,i-1}) ({}^h\mathbf{F}_{i-1})^{-1} {}^h\mathbf{F}_i \mathbf{R}_Z(\theta_i), \quad (2)$$

**Tabla 4.** Coordenadas de las puntas de los dedos del modelo propuesto para describir la postura de la mano.

Puntas de los dedos	Ubicación [mm]		
	$x$	$y$	$z$
Punta dedo I	47.022	-20.967	104.798
Punta dedo II	27.102	-3.506	173.436
Punta dedo III	-0.76	-1.4	180.773
Punta dedo IV	-23.963	-3.225	172.88
Punta dedo V	-43.378	-6.701	138.255

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

### 3.2. Descriptores de las configuraciones dactilológicas de la LSM

Con el modelo cinemático implementado, las configuraciones dactilológicas de la LSM pueden ser descritas por medio de los ángulos articulares descritos; es decir, por una variable de configuración para cada uno de los 34 DOF del modelo.

En particular, cuando el valor de las 34 variables de articulación es cero, el modelo de la mano luce como en la Figura 1; esta postura será utilizada como postura de reposo y será la postura a mostrar siempre que el modelo virtual no se encuentre ejecutando alguna configuración dactilológica de la LSM.

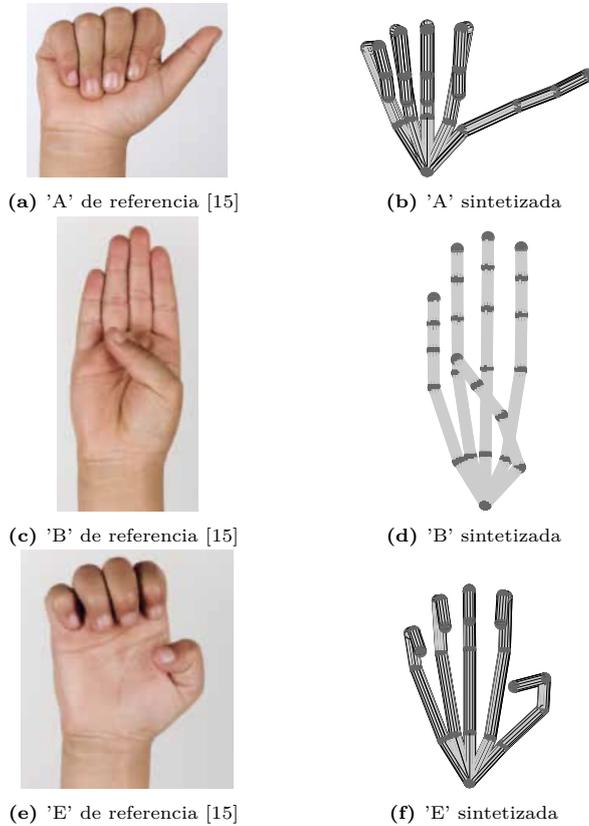
Cuando se analizan las posturas individuales de los dedos en las configuraciones dactilológicas de la LSM, se tiene indicio de que algunas pueden ser utilizadas como base para describir a muchas de las restantes; tal es el caso de las configuraciones ‘A’, ‘B’, ‘C’ y ‘E’. Así, para el modelo que implementamos, los ángulos de las configuraciones ‘A’, ‘B’, y ‘E’ se muestran en la tabla 5; y las representaciones preliminares de tales configuraciones sintetizadas por el modelo —junto con las imágenes de referencia obtenidas de [15]— se muestran en las Figuras 4a, 4b, 4c, 4d, 4e y 4f.

## 4. Conclusiones y perspectivas

Las lenguas de señas son lenguajes utilizados por personas sordas signantes como medio de comunicación. En México la LSM es la lengua reconocida como la de la comunidad de sordos signantes. En la LSM la dactilología se ocupa de lo que en lengua oral se denomina deletreo y consta de 29 configuraciones. En este artículo utilizamos un modelo cinemático para describir la postura esquelética

**Tabla 5.** Ángulos articulares para representar tres de las configuraciones dactilológicas de la LSM con el modelo cinemático propuesto.

Grupo	Variables articulares ( $\theta$ )	Ángulos de configuración [grados sexagesimales]		
		'A'	'B'	'E'
Muñeca				
	$RC_r$	0	0	0
	$RC_p$	0	0	0
	$RC_y$	0	0	0
Dedo I				
	$CMC_r$	-55	25	0
	$CMC_a$	-25	-35	-18
	$CMC_f$	-42	15	10
	$MCP_r$	-30	15	0
	$MCP_a$	-3	-8	0
	$MCP_f$	-4	8	-35
	$IP_f$	5	11	-80
Dedo II				
	$CMC_a$	1	0	1
	$CMC_f$	-2	0	0
	$MCP_a$	0.5	0	0
	$MCP_f$	3	-90	6
	$PIP_f$	4	-90	-86
	$DIP_f$	5	-24	-68
Dedo III				
	$CMC_a$	-1	0	0
	$CMC_f$	-2	0	0
	$MCP_a$	0	0	0
	$MCP_f$	4	-90	5
	$PIP_f$	2	-90	-88
	$DIP_f$	3	-24	-80
Dedo IV				
	$CMC_a$	-1	0	0
	$CMC_f$	0.5	0	0
	$MCP_a$	-2	0	0
	$MCP_f$	2	-90	8
	$PIP_f$	2	-90	-92
	$DIP_f$	3	-24	-60
Dedo V				
	$CMC_a$	-3	1	0
	$CMC_f$	1	0	0
	$MCP_a$	-4	3	0
	$MCP_f$	2	-90	10
	$PIP_f$	5	-90	-90
	$DIP_f$	4	-18	-50



**Fig. 4.** Configuraciones dactilológicas 'A', 'B' y 'E' de la LSM.

de la mano y, con él, caracterizar las configuraciones dactilológicas de la LSM por medio de los ángulos articulares de la mano.

Luego de analizar distintos modelos con diferente número de DOF, decidimos describir la postura esquelética de la mano y sus 20 articulaciones mediante un modelo cinemático con 34 DOF; 3 en la muñeca y 31 en los dedos. Con este modelo fue posible representar inteligiblemente las 29 configuraciones dactilológicas de la LSM.

Como trabajo futuro se plantea probar los valores de las variables de configuración obtenidos en la síntesis de un sistema computacional de deletreo de palabras (como el mostrado en la Figura 3). En dicho sistema, las letras en una palabra serán agrupadas en pares —configuración inicial y configuración objetivo— para que el módulo de planeación de movimiento genere los movimientos de la mano para ir de una configuración a otra sin que los dedos colisionen entre sí: una ruta libre de colisiones para mover un sistema de objetos en el espacio.

## Referencias

1. Albrecht, I., Jörg, H., Hans-Peter, S.: Construction and animation of anatomically based human hand models. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH, pp. 98–109 (2003)
2. Caballero-Morales, S.O., Trujillo-Romero, F.: 3D Modeling of the Mexican sign language for a speech-to-sign language system. *Computación y Sistemas*, 17(4), pp. 593–608 (2013)
3. Caccavale, F., Natale, C., Siciliano, B., Villani, L.: Six-DOF impedance control based on angle/axis representations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(2), pp. 289–300 (1999)
4. Conti, R., Meli, E., Ridolfi, A.: A novel kinematic architecture for portable hand exoskeletons. *Mechatronics*, 35, pp. 192–207 (2016)
5. Cruz-Aldrete, M.: *Manos a la obra: Lengua de señas, comunidad sorda y educación*. Bonilla Artigas Editores, Universidad Autónoma del Estado de México (2014)
6. Efthimiou, E., Fotinea, S.E., Vogler, C., Hanke, T., Glauert, J., Bowden, R., Braf-fort, A., Collet, C., Maragos, P., Segouat, J.: Sign language recognition, generation and modelling: A research Effort with applications in deaf communication. In: Stephanidis, C., (ed.), *Universal access in human-computer interaction. Lecture Notes in Computer Science, Addressing Diversity*, 5614, pp. 21–30 (2009)
7. Fahime, B.E., Haddad, M.Y.E., Radouani, M., Saka, A.: Modeling the natural movements of the human hand. In: International Conference on Bioengineering & Biomaterials: IC2B'09, pp. 10, Meknes, Morocco (2009)
8. Jazar, R.N.: *Theory of applied robotics*. Springer (2010)
9. Lee, J., Kunii, T.: Model-based analysis of hand posture. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(5), pp. 77–86 (1995)
10. Lee, J., Kunii, T.L.: Constraint-based hand animation. In: Thalmann, N.M., Thalmann, D. (eds.), *Models and Techniques in Computer Animation*, pp 110–127, Springer Japan, Tokyo (1993)
11. López-Colino, F., Colás, J.: Hybrid paradigm for spanish sign language synthesis. *Universal Access in the Information Society*, 11(2), pp. 151–168 (2012)
12. Mulatto, S., Formaglio, A., Malvezzi, M., Prattichizzo, D.: Using postural synergies to animate a low-dimensional hand avatar in haptic simulation. *IEEE Transactions on Haptics*, 6(1), pp. 106–116 (2013)
13. Parida, P.K., Biswal, B.B.: Design and analysis of a multifingered robot hand. *IAES International Journal of Robotics and Automation IJRA*, 1(2), pp. 69–77 (2012)
14. Rosell, J., Suarez, R., Rosales, C., Garcia, J.A., Perez, A.: Motion planning for high DOF anthropomorphic hands. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4025–4030 (2009)
15. Serafín, M.E., González, R.: *Manos con voz: Diccionario de lengua de señas mexicana*. Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación. (2011)
16. Vardy, A., Brown, E.: *Computer graphics project report: Articulated human hand model with inter-joint dependency constraints*. (1998)
17. Verschoor, M., Lobo, D., Otaduy, M.A.: Soft hand simulation for smooth and robust natural interaction. In: *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces VR*, pp. 183–190 (2018)
18. Wheatland, N., Wang, Y., Song, H., Neff, M., Zordan, V., Jörg, S.: State of the art in hand and finger modeling and animation. *Computer Graphics Forum*, 34(2), pp. 735–760 (2015)

*Alejandro Gómez-Terán, Belém Priego-Sánchez, David Pinto*

19. You, W.S., Lee, Y.H., Kang, G., Oh, H.S., Seo, J.K., Choi, H.R.: Kinematic design optimization of anthropomorphic robot hand using a new performance index. In: 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence URAI, pp. 20–25 (2017)
20. Zelinka, J., Kanis, J., Salajka, P.: NN-based Czech sign language synthesis. In: Salah, A.A., Karpov, A., Potapova, R. (eds). *Speech and computer*, 11658, pp. 559–568, Cham, Springer International Publishing (2019)