

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Multiscanning-EMG con una aguja



Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación

Trabajo Fin de Máster

Adrián Eciolaza Ferrando

Javier Navallas Irujo

Pamplona, 28 de septiembre de 2018



Resumen

Este proyecto trata del estudio de la viabilidad de una nueva técnica para realizar procedimientos de scanning-EMG, denominada multiscanning-EMG con una sola aguja. Al igual que en la técnica de multiscanning-EMG tradicional, mediante un solo registro será posible obtener múltiples señales de scanning-MUP de unidades motoras cuyos territorios están repartidos a través del corredor de scanning a diferentes profundidades del músculo. Cada scanning-MUP representará la actividad eléctrica espacial y temporal de una unidad motora, al igual que en el scanning-EMG tradicional. Además, esta técnica permitirá registros de multiscanning-EMG utilizando una sola aguja, prescindiendo del uso de agujas de trigger adicionales. En este proyecto se presentan los algoritmos necesarios para la obtención de los scanning-MUPs a partir de la señal EMG en bruto y el diseño de un sistema de evaluación que permitirá analizar el rendimiento de la técnica bajo diferentes condiciones, estableciendo sus ventajas y sus limitaciones.

Palabras clave

Unidad Motora, Electromiografía, Scanning-EMG, Potencial de unidad motora, Trenes de disparo.

Abstract

This project aims to prove the viability of a new technique to perform scanning-EMG, the single-needle multiscanning-EMG. As in conventional multiscanning-EMG, it will be possible to obtain, by means of a single recording, multiple scanning-MUP signals from motor units whose territories are traversed along the scanning corridor at different depths of the muscle. Each of these scanning-MUPs represents the spatial and temporal electrical activity of one motor unit, as obtained with conventional scanning-EMG. Additionally, this technique will allow to achieve multiscanning-EMG recordings by using a single needle electrode, avoiding the use of additional trigger electrode needles. The present project presents the development of the algorithms to obtain the scanning-MUPs from the raw scanning-EMG signal, and the design of an evaluation framework. This framework is used to study the performance of the different parts of the system under varying conditions, and allows to objectively establish its advantages and limitations.

Keywords

Motor Unit, Electromyography, Scanning-EMG, Motor Unit Potential, Firing pattern.

Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1 Contexto.....	8
1.2 Objetivo del proyecto.....	8
1.3 Organización de la memoria.....	8
Capítulo 2. Estado del arte.....	9
Capítulo 3. Simulación de señales de multiscanning-EMG.....	25
Capítulo 4. Descomposición de señales EMG en registros cortos.....	31
4.1 Objetivos.....	31
4.2 Sistema de descomposición PHC.....	31
4.2.1 Segmentación.....	32
4.2.2 Extracción de características.....	33
4.2.3 Clasificación.....	33
4.2.4 Purga de los trenes de disparos.....	37
4.2.5 Extracción de los prototipos finales.....	38
4.2.6 Otros aspectos de diseño.....	39
4.3 Sistema de descomposición CTU.....	40
4.3.1 Clustering jerárquico.....	40
4.3.2 Algoritmo de unión de trenes.....	42
4.3 Evaluación del sistema de descomposición.....	43
4.3.1 Creación de trenes de referencia.....	43
4.3.2 Asociación de trenes descompuestos y de referencia.....	44
4.3.3 Figuras de mérito.....	45
4.4 Experimentos.....	48
4.4.1 Evaluación del sistema de descomposición.....	48
4.4.2 Evaluación de la purga.....	48
4.4.3 Evaluación de la ventana de exclusión.....	49
4.4.4 Evaluación de la ventana de registro.....	49
4.4.5 Evaluación de la influencia de la MVC.....	49
4.5 Resultados.....	50
4.5.1 Evaluación del sistema de descomposición.....	50
4.5.2 Evaluación de la purga.....	52
4.5.3 Evaluación de la ventana de exclusión.....	53
4.5.4 Evaluación de la ventana de registro.....	56
4.5.5 Evaluación de la influencia del MVC.....	56
4.6 Conclusiones.....	58

Capítulo 5. Síntesis del scanning-MUP por enlazado de MUPs	59
5.1 Objetivos	59
5.2 Algoritmo greedy-exchange de enlazado de MUPs	59
5.2.1 Algoritmo greedy de una sola pasada	60
5.2.2 Análisis de distancias entre MUPs.....	64
5.2.3 Análisis del alineamiento	66
5.2.4 Análisis de la fragmentación de resultados y purga.....	67
5.3 Evaluación	72
5.3.1 Asociación de scanning-MUPs enlazados y de referencia	72
5.3.2 Figuras de mérito	73
5.4 Experimentos	77
5.4.1 Evaluación de la influencia del MVC	77
5.4.2 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}	77
5.4.3 Evaluación del alineamiento	77
5.4.4 Evaluación de la purga	77
5.5 Resultados	77
5.5.1 Evaluación de la influencia del MVC	78
5.5.2 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}	80
5.5.3 Evaluación del alineamiento	80
5.5.4 Evaluación de la purga	81
Capítulo 6. Evaluación del sistema de multiscanning-EMG	84
6.1 Objetivos	84
6.2 Análisis de los factores de error	84
6.3 Experimentos	86
6.3.1 Evaluación de la influencia de los métodos de descomposición	86
6.3.2 Evaluación del alineamiento	86
6.3.3 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}	87
6.3.4 Evaluación de los componentes de error en la forma de onda	87
6.3.5 Evaluación de la purga	87
6.3.6 Evaluación de la ventana de registro	87
6.3.7 Evaluación de la influencia del MVC	87
6.4 Resultados	88
6.4.1 Evaluación de la influencia de los métodos de descomposición	89
6.4.2 Evaluación del alineamiento	89
6.4.3 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}	91
6.4.4 Evaluación de los componentes de error en la forma de onda	93

6.4.5 Evaluación de la purga	93
6.4.6 Evaluación de la ventana de registro	95
6.4.7 Evaluación de la influencia del MVC	96
6.5 Determinación de parámetros óptimos y gold standard	98
7. Conclusiones y líneas futuras.....	103
7.1 Conclusiones.....	103
7.2 Líneas futuras	103
8. Bibliografía	105

Capítulo 1. Introducción

1.1 Contexto

Este trabajo fin de máster se ha desarrollado en la Universidad Pública de Navarra, concretamente en el área de Teoría de la Señal y Comunicaciones, dentro del Grupo de Investigación de Ingeniería Biomédica.

1.2 Objetivo del proyecto

La finalidad de este proyecto es demostrar la viabilidad de una nueva técnica para el estudio de la actividad de las unidades motoras mediante registros de scanning-EMG. Además de los algoritmos necesarios para llevar a cabo la técnica, se desarrollará también un sistema de evaluación con el objetivo de poder analizar y optimizar el rendimiento del sistema. Se estudiará también el efecto de variar diversos parámetros a la hora de realizar la técnica y la influencia de éstos en el resultado final. Para la realización de estos estudios se utilizará un toolbox en el entorno Matlab proporcionado por el grupo de investigación de ingeniería biomédica.

1.3 Organización de la memoria

En el capítulo 2 se realizará una introducción a las señales electromiográficas, su generación, registro y descomposición. Además se repasará el estado del arte de las técnicas de scanning-EMG actuales y se realizará una introducción teórica a la nueva técnica a desarrollar. El capítulo 3 trata de introducir los modelos utilizados en el proyecto para la simulación de señales EMG, tales como el modelo del músculo, del electrodo y de reclutamiento y disparo de las unidades motoras. En el capítulo 4 se explicará el sistema de descomposición utilizado en el proyecto y se evaluará su rendimiento. Los capítulos 5 y 6 tratan de explicar el algoritmo de enlazado desarrollado para la formación de señales de scanning y su rendimiento bajo diferentes escenarios. Finalmente, el capítulo 8 se utilizará para presentar las conclusiones e introducir posibles líneas futuras.

Capítulo 2. Estado del arte

Este capítulo trata de explicar la formación de las señales eléctricas en las unidades motoras y su proceso de registro, explicando las técnicas utilizadas actualmente y la propuesta de una nueva técnica que será desarrollada en el resto del trabajo. Este capítulo se encuentra incluido en el documento adjunto a este trabajo, el complemento al trabajo de fin de master.

Capítulo 3. Simulación de señales de multiscanning-EMG

Este capítulo trata de la descripción de los modelos de simulación utilizados para la generación de los músculos y las señales EMG utilizadas para la realización del proyecto. Éste capítulo se encuentra en el documento adjunto a este trabajo, el complemento al trabajo de Fin de Master.

Capítulo 4. Descomposición de señales EMG en registros cortos

En este capítulo se explicarán los dos sistemas de descomposición utilizados en este proyecto. Se definirá también el sistema de evaluación de estos para señales simuladas y los experimentos realizados y sus resultados, permitiendo evaluar la descomposición bajo diferentes condiciones y facilitando la elección de los parámetros óptimos del sistema con los que obtener la mejor descomposición posible.

4.1 Objetivos

Como se ha explicado anteriormente, la descomposición de una señal EMG es el proceso por el cual se obtienen los trenes de disparo y los potenciales de las unidades motoras presentes a partir del análisis de la señal EMG en bruto.

Aunque se han desarrollado numerosos sistemas de descomposición para señales EMG a lo largo del tiempo, éstos han sido desarrollados para su aplicación en registros de larga duración (mayores de 10 segundos). Por ello, su rendimiento en registros cortos (necesario para el funcionamiento de la técnica de multiscanning EMG con una sola aguja) disminuye mucho y no podrán ser utilizados para la realización del proyecto. La duración de estos registros supone una dificultad adicional en el diseño del sistema respecto a otros sistemas de descomposición, ya que los MUPs de las unidades motoras aparecerán en la señal EMG en un número menor de ocasiones. Esto supone la necesidad de desarrollar un nuevo sistema de descomposición que esté preparado para funcionar con registros cortos de la señal EMG.

En otros sistemas de descomposición, uno de los objetivos es obtener los trenes de disparo completos de las unidades motoras que participan en la señal EMG, con el objetivo de poder estimar sus frecuencias de disparo. Sin embargo, en este trabajo, el objetivo no es conocer la frecuencia de disparo de las unidades motoras si no obtener múltiples señales de scanning que representen la forma del potencial de las unidades motoras lo mejor posible. Por ello, los sistemas de descomposición utilizados tendrán como objetivo principal el obtener prototipos que se asemejen lo máximo posible a los potenciales de la unidad motora originales, tanto en la forma como en el número de potenciales que aparecen. Por ello, se tomarán decisiones para optimizar la calidad de estos prototipos sin intentar obtener la descomposición completa de los trenes de disparo.

La descomposición de cada fragmento de la señal EMG en cada posición se realizará por separado y será totalmente independiente del resto. En este trabajo, se utilizarán dos sistemas de descomposición diferentes, denominados PHC y CTU. A continuación, se describirá cada uno de ellos.

4.2 Sistema de descomposición PHC

El sistema de descomposición PHC (penalized hierarchical clustering) estará compuesto de 4 procesos (Fig. 1): la segmentación, una clasificación jerárquica penalizada, un sistema de purga de los trenes de disparo y la obtención de prototipos final. A continuación se describirá cada uno de los procesos.

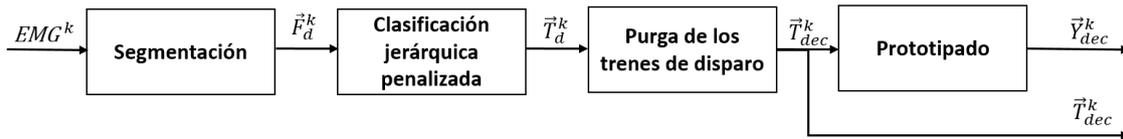


Fig. 1: Esquema del sistema de descomposición PHC

4.2.1 Segmentación

La segmentación es la división de la señal EMG en segmentos que puedan corresponder con potenciales de unidades motoras. Para la realización de ésta, se siguen los siguientes pasos:

- Primero, cada fragmento de EMG es filtrado mediante un filtro Butterworth paso banda de orden 4, con $fL=3$ Hz y $fH=5$ kHz. El objetivo de este filtro será eliminar el ruido de línea de base, caracterizado por aparecer a muy bajas frecuencias.
- Sobre la señal filtrada, se calcula el umbral de segmentación mediante el método de Quiroga [19].

$$x_{thr}^k = 4 \cdot median\left(\frac{|x_k|}{0.6745}\right) \quad (11)$$

- Se detectan los cruces del umbral de segmentación con el valor absoluto de la señal EMG filtrada cuando ésta tiene una pendiente positiva, obteniendo un conjunto de puntos.
- Para cada intervalo delimitado por un par de estos puntos consecutivos, se calcula el máximo local. Estos máximos serán puntos candidatos a ser el centro de los segmentos obtenidos, y deberían corresponderse con el pico (ya sea positivo o negativo) del potencial de una unidad motora.
- Se aplica una ventana de exclusión a cada uno de los puntos detectados, ésta se extenderá 3,5 ms después del punto correspondiente. Si en la extensión de la ventana aparecen otros puntos candidatos, se escogerá punto de mayor amplitud (contando también el punto sobre el que se realiza la ventana) y los demás serán descartados, De esta forma, se evita que puedan aparecer segmentos que representen al mismo potencial pero centrados en instantes de tiempo ligeramente diferentes.
- Con los puntos supervivientes (Fig. 2) se extraen los segmentos finales a partir de la señal EMG original. Estos tendrán una duración de 4,5 ms y estarán centrados en cada uno de los puntos supervivientes, extendiéndose 2,5 ms después de éste y 2 ms antes.

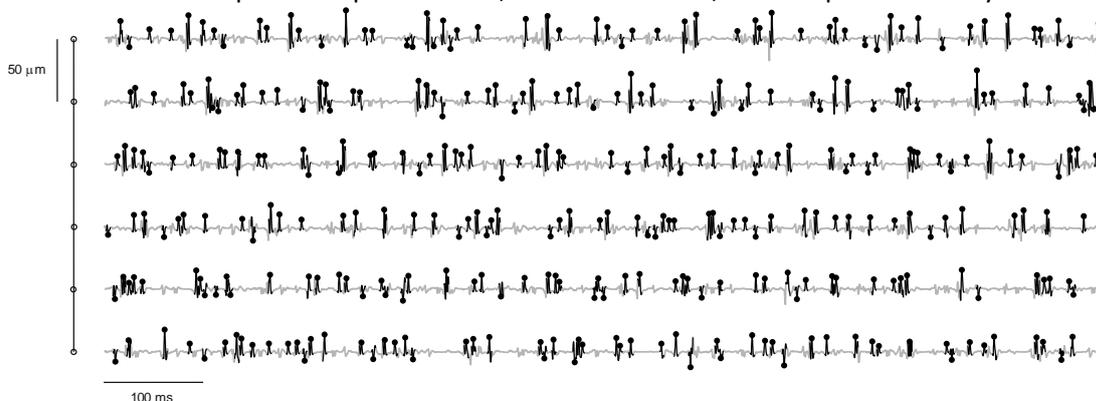


Fig. 2: Detección de puntos sobre los que se realizará la extracción de segmentos de una señal de registro multiscanning-EMG con una sola aguja en varias posiciones.

Por tanto, el umbral de segmentación depende de la propia actividad de la señal EMG, lo cual implica que este umbral variará para los diferentes registros de la señal EMG en diferentes posiciones. En concreto, para las últimas posiciones del corredor, en las que la mayor parte de la cánula del electrodo está fuera de la piel, la aportación de esta a la señal EMG es muy pequeña, reduciendo la actividad ésta y obteniendo un umbral de segmentación mucho menor en estas posiciones que en el resto.

Una vez obtenidos los segmentos en cada posición de registro se procederá a la extracción de características sobre éstos.

4.2.2 Extracción de características

Existen numerosas aproximaciones a la hora de desarrollar un sistema de clasificación. Muchas de ellas se basan en la extracción de características a partir de las formas de onda de los fragmentos obtenidos en segmentación, tales como la duración del MUP, o la amplitud y situación temporal de los máximos y mínimos locales del potencial [10]. La selección de las características a utilizar puede ser un proceso complicado, ya que algunas de estas pueden llegar a ser redundantes o poco significativas. Para el diseño de un buen sistema de clasificación es preciso la elección de un buen conjunto de características, que aumente la separabilidad entre los diferentes potenciales a clasificar.

Para los dos sistemas de descomposición utilizados en este proyecto se trabajará con la forma de onda de los segmentos a clasificar, de forma que cada muestra de estos segmentos será una característica diferente del segmento, formando el conjunto total de muestras de un segmento un vector de características que lo represente. Además, se utilizará la información de los trenes de disparo como un factor que penalice la unión de dos prototipos. A continuación, se explicará el proceso de clasificación de cada uno de los sistemas utilizados a partir de estas características.

4.2.3 Clasificación

La clasificación es la agrupación de los segmentos obtenidos en diferentes grupos de forma que los segmentos de cada grupo sean representativos del potencial de una unidad motora. Las señales EMG están formadas por la aportación de varias unidades motoras en las que se desconoce la forma de los potenciales éstas, los instantes de disparo en las que disparan y su localización espacial en el músculo. Debido a esto, la clasificación de señales EMG se trata de un proceso no supervisado, donde la forma y el número de los potenciales que deben obtenerse son desconocidos.

Los dos sistemas de descomposición utilizados en el proyecto solo se diferenciarán en la forma en la que realizan la clasificación. A continuación se explicará la clasificación de cada uno de los dos sistemas.

4.2.3.1 Clustering jerárquico penalizado

En este sistema de descomposición, los segmentos serán clasificados mediante la implementación de un algoritmo de clustering jerárquico. Éstos permiten la clasificación de una serie de observaciones agrupándolas según criterios de distancia. En este caso la agrupación se realizará de forma aglomerativa, en el que cada segmento comienza en su propio grupo, de forma que se vayan uniendo pares de grupos formando nuevos grupos.

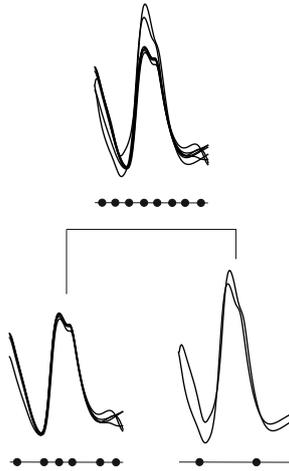


Fig. 3: Unión de dos clústeres. Formación del nuevo tren de disparos y cálculo del nuevo representante.

Los resultados de un clustering jerárquico suelen ser representados en un dendrograma, en el que se observan las uniones de los grupos de un nivel con el siguiente, generando un árbol que contiene todos los grupos y sus uniones, separados en una jerarquía multinivel.

Inicialmente, se crean tantas ramas del árbol como segmentos hayan sido obtenidos en la segmentación. Cada una de estas ramas está formada por la propia forma de onda del MUP del segmento y el tiempo de su disparo. Para cada rama, se calcula la distancia con el resto y se unen aquellas dos ramas que tienen menor distancia. Cuando se unen dos ramas, se forma un nuevo tren de disparos que contiene a los disparos de las dos ramas y se calcula un nuevo MUP que las represente (Fig. 3).

El MUP representante de la unión de dos ramas onda será un promedio de los MUPs de los segmentos de ambas ramas. Para ello, primero se realiza un alineamiento de todos los MUPs de la nueva rama respecto al primero de todos (Fig. 4). Este alineamiento se realizará en la posición en la que las distancias de los MUPs a alinear sea menor, y se realizará mediante un remuestreo no entero de la señal mediante el algoritmo de McGill [18]. Una vez alineados todos los segmentos, se obtiene un representante de cada rama promediando los MUPs del grupo mediante el método de Malanda [20].

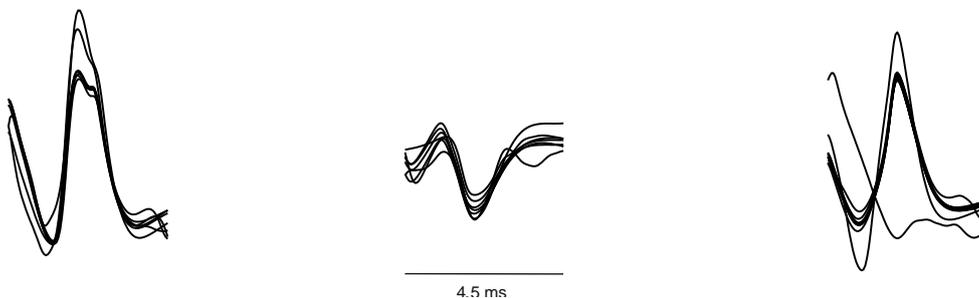


Fig. 4: Alineamiento de todos los segmentos respecto al primero y obtención del representante del clúster mediante promediado.

La distancia entre ramas es calculada a partir de dos términos, uno proviene de la información de la forma de onda de los MUPs representantes de estas y el otro de la información temporal de los disparos. El primer término, d_{MUP}^i cuantifica cuánto se parecen las formas de onda de los MUPs, y se calcula a partir de la distancia definida por Nikolic en [21].

$$d_{ijMUP} = \text{var}(y_{ki}[n] - y_{kj}[n-nij]) / \sqrt{\text{mean}(y_{ki}[n]2) + \text{mean}(y_{kj}[n-nij]2)} \quad (12)$$

donde y_{ki} e y_{jk} son los representantes sobre los que calcular la distancia. n_{ij} es el retraso de y_{jk} respecto a y_{ki} , calculado mediante el algoritmo de McGill. $y_{kj}[n-nij]$ es la versión remuestreada de y_{jk} y alineada con y_{ki} .

El segundo término es calculado a partir de los intervalos entre los disparos (IDI: inter-discharge intervals) del tren formado por la unión de dos ramas. Este tiempo se define como la diferencia temporal entre un disparo y el siguiente:

$$\tau_i = t_{i+1} - t_i \quad (13)$$

A partir de los valores calculados de los IDIs del nuevo tren de disparos se calculará un factor que penalice la unión de dos trenes cuando ésta ha sido errónea. Esta penalización estará basada en que los trenes de disparo formados por la unión de disparos pertenecientes a diferentes unidades motoras tendrán valores de IDIs menores [22],[15].

Este factor de penalización tendrá dos componentes, la primera es similar al LIDI_R (lower inter-discharge intervals ratio) definido por Parsaei en [22], que mide el número de disparos que tienen un valor del IDI menor que un valor fijado, τ_{THR} . Cuanto mayor sea el número de disparos por debajo de este umbral, mayor será la penalización:

$$\rho_{LIDI} = n(\{\tau_i < \tau_{THR}\}) / n(\tau_i) \quad (14)$$

donde $n(\cdot)$ es el cardinal del conjunto.

La segunda penalización estará basada en el menor intervalo entre dos disparos del tren y será denominada SIDI (shortest inter-discharge intervals). Ésta será definida como:

$$\rho_{SIDI} = \begin{cases} (\tau_{THR} - \min(\tau_i)) / \tau_{THR} & , \min(\tau_i) < \tau_{THR} \\ 0 & , \min(\tau_i) > \tau_{THR} \end{cases} \quad (15)$$

Por tanto, el valor de esta penalización dependerá del valor del umbral (τ_{THR}) y el menor valor de los IDIs, de forma que cuanto menor sea éste, mayor será la penalización (Fig. 5). Si el valor mínimo de los IDIs es superior al umbral no se aplicará penalización ninguna mediante este término.

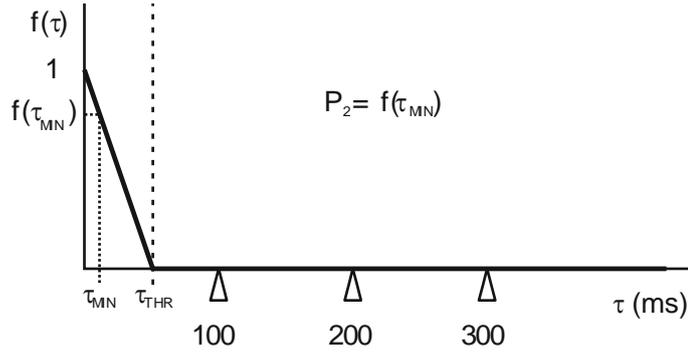


Fig. 5: Penalización basada en el intervalo entre disparo más corto (SID). Cuanto menor sea este mayor será la penalización. Si este supera cierto umbral la penalización será 0.

Para este trabajo, el umbral del mínimo IDI a partir del cual se dejará de penalizar a los trenes de disparo será de 50 ms. Éste se basa en que la estimación de la frecuencia de disparo de las unidades motoras simuladas es de 10 disparos por segundo, por lo que el tiempo medio entre dos disparos consecutivos será de aproximadamente 100 ms. Asumiendo que los trenes de disparo son procesos puntuales de renovación con un factor de varianza reducido, los IDIs de los disparos correctos podrán variar respecto a este valor de 100 ms, pero nunca deberían estar por debajo de 50 ms (Fig. 6).

A partir del SID y el LIDI_R, la penalización total a partir de información temporal será calculada como:

$$d_{MUF P}^{ij} = d_{P50}(\rho_{LIDI} + \rho_{SID}) \quad (16)$$

donde d_{P50} , es el percentil 50 de todas las distancias calculadas entre los segmentos detectados inicialmente. Utilizando las ecuaciones (10) y (14) se define la distancia total entre dos ramas del árbol como:

$$d^{ij} = (1 - \lambda)d_{MUP}^{ij} + \lambda d_{MUF P}^{ij} \quad (17)$$

donde λ regula el peso de cada uno de los parámetros. Éste será fijado a un valor de 0.4, de forma que la distancia proveniente de la forma de onda sea ligeramente más relevante que la de la información temporal.

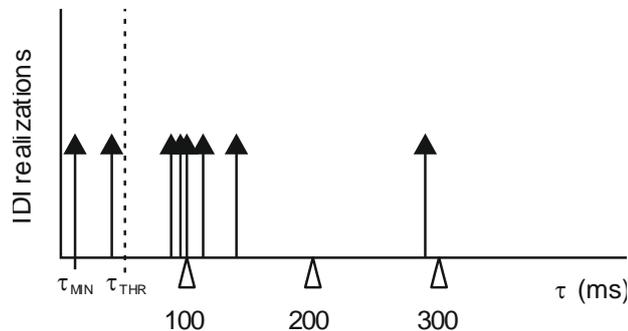


Fig. 6: IDIs obtenidos en la unión de los trenes de disparo de dos clústeres. Para esta realización la penalización LIDIR vendrá determinada por los dos IDIs por debajo del umbral (τ_{THR}). La penalización SID será calculada a partir de la diferencia entre el menor valor de los IDIs (τ_{MIN}) y el del umbral (τ_{THR}).

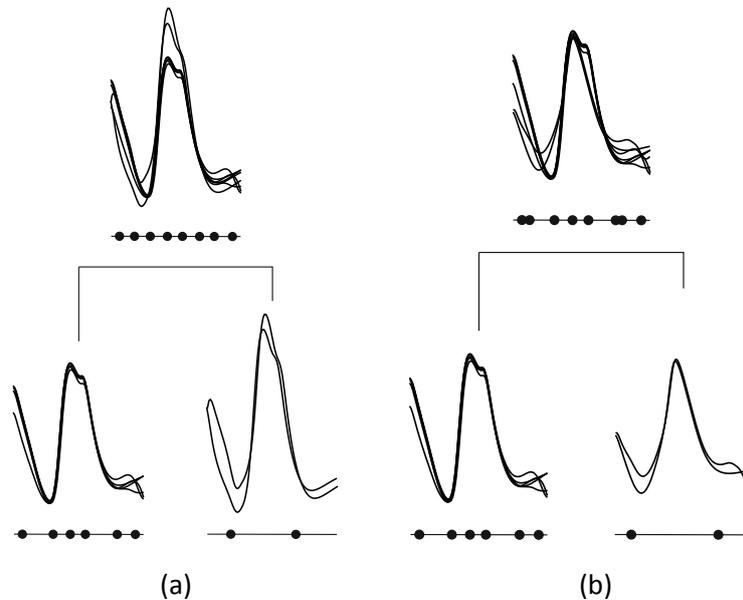


Fig. 7: Unión entre dos trenes de disparo de la misma unidad motora (a) y diferente (b). Se observa como en la unión errónea los disparos ocurren en tiempos prácticamente solapados entre sí.

Tanto el valor que regula la penalización proveniente de los trenes de disparo (d_{P50}) como el valor que regula el peso de la información temporal y la de forma de onda han sido obtenidos experimentalmente para optimizar el rendimiento del algoritmo. Si fuese necesario, y trabajando en condiciones distintas, estos parámetros podrían volver a recalcularse y modificarse si fuese necesario.

De esta forma, observando tanto la forma de onda como la información temporal se conseguirá unir aquellos trenes de disparo que pertenezcan a la misma unidad motora (Fig. 7 (a)), se observa cómo los tiempos entre disparos consecutivos de éstos son muy regulares, los cuales se corresponden con procesos de renovación gaussianos. De esta forma, también se podrá identificar y evitar las uniones entre trenes de disparos correspondientes a diferentes unidades motoras, en las que los tiempos entre disparos consecutivos son muy irregulares (Fig. 7 (b)).

Las uniones entre clústeres se realizarán iterativamente hasta que la distancia entre las ramas sea superior a un umbral determinado (Fig. 8). Este umbral será fijado como el percentil 25 de las distancias iniciales entre los clústeres. Se ha comprobado experimentalmente cómo a partir de este valor las distancias entre ramas aumentan considerablemente, ya que suelen corresponder con uniones entre clústeres con potenciales de diferentes unidades motoras. Este valor umbral podrá modificarse si se considera necesario.

4.2.4 Purga de los trenes de disparos

A la hora de diseñar un sistema de descomposición, es importante no solo obtener lo mejor posible las formas de onda de los MUPs, sino también obtener la descomposición de tantas unidades motoras como las que aparezcan en la señal EMG. Subestimar este número significaría dejar de identificar algunas unidades motoras, mientras que sobreestimarlo implicaría que se están detectando como potenciales de unidades motoras formas de onda que no lo son o que se está detectando el mismo potencial en dos trenes de disparo diferentes (duplicidades).

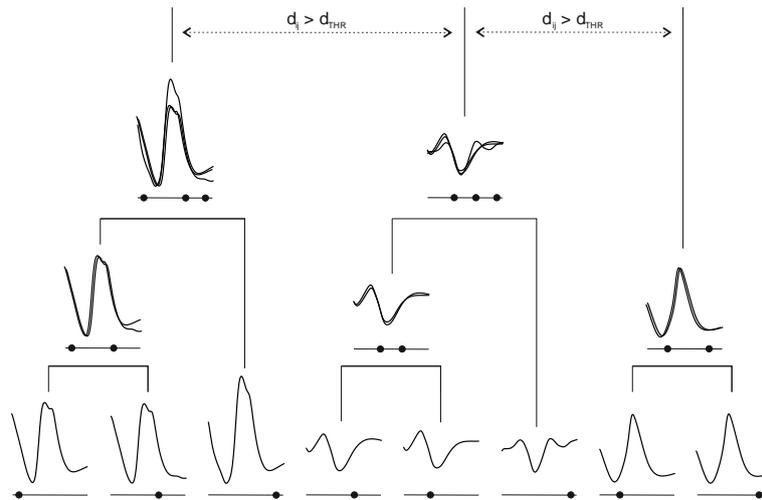


Fig. 8: Esquema de clustering jerárquico. Cada clúster está formado por los instantes de disparo y los MUPs correspondientes a ellos. La unión entre los clústeres de bajo nivel es posible debido a que no superan la distancia fijada como umbral. La unión entre los 3 clústeres finales no es posible debido a que la distancia entre cualquiera de ellos es superior a la definida como umbral.

Debido a la naturaleza de los algoritmos de clustering jerárquicos, el número de clústeres resultantes de la clasificación puede llegar a ser muy elevado, siendo muy superior al número de unidades motoras presentes en la señal EMG. Por tanto, es necesario un sistema de purga que permita eliminar del conjunto de trenes de disparo aquellos que no sean representativos de unidades motoras para obtener un conjunto de soluciones con tantas como unidades motoras haya.

Algunos de estos clústeres corresponden a trenes de disparo completos o semi-completos, que se corresponderán con los de una unidad motora, sin embargo, otros clústeres solo contienen uno o dos disparos ya que no ha sido posible agruparlos con ningún otro. Ya que estos pueden corresponder a potenciales muy ruidosos o a superposiciones, será de interés eliminarlos de la solución final.

La purga de estos trenes de disparo será realizada a partir del número de disparos que éstos contengan. La determinación del umbral óptimo a partir del cual se realizará la purga se calculará experimentalmente y se explicará en apartados posteriores.

4.2.5 Extracción de los prototipos finales

Como último paso de la descomposición, se obtienen los prototipos finales. Para la formación de éstos, se vuelven a extraer los segmentos de la señal EMG respecto a los trenes de disparo pero en esta ocasión éstos tendrán una longitud de 100 ms, a diferencia de los 45 ms utilizados en procesos anteriores.

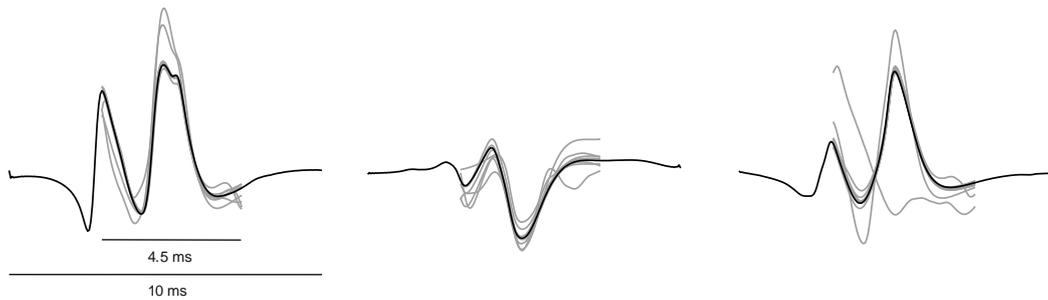


Fig. 9: Extracción de los prototipos finales. Alineamiento de todos los segmentos (de duración 10 ms) respecto al primero y promediado.

Estos prototipos serán obtenidos alineando los segmentos extraídos de cada grupo con respecto al primero que aparezca en el tren. Para ello se utiliza una ventana de alineamiento de 5 ms alrededor del instante de disparo (Fig. 9). El alineamiento solo podrá ocurrir en las muestras de esta ventana. Una vez alineados los segmentos, se realiza un promediado de cada uno de ellos para obtener el MUP representante de cada unidad motora. Para ello se utilizará el algoritmo de promediado de Malanda [20].

Estos prototipos serán utilizados como entrada del algoritmo de enlazado. El resultado final de una descomposición de una señal EMG, con los trenes de disparo y prototipos obtenidos se observa en la Fig. 10.

4.2.6 Otros aspectos de diseño

Como se ha comentado anteriormente, en otros sistemas de descomposición, uno de los objetivos es descomponer los trenes de disparo completos para estimar la frecuencia de disparo de las unidades motoras que participan en la señal EMG. Para ello, se implementan algoritmos capaces de resolver superposiciones, esto es, potenciales formados por la suma de 2 o más potenciales de unidades motora. Resolver superposiciones implica determinar el instante de disparo de las unidades motoras cuando sus potenciales se superponen en una forma de onda determinada.

Sin embargo, en el sistema de descomposición diseñado para este trabajo no se realizará una resolución de superposiciones. El objetivo principal de este sistema será obtener los prototipos que asemejen lo máximo posible a los MUPs de las unidades motoras originales. Para ello, se considera que las superposiciones serán señales que estarán altamente contaminadas por artefactos y será más beneficioso no tenerlas en cuenta a la hora de obtener los prototipos.

Respecto a la métrica de distancia utilizada, aunque se realizaron pruebas utilizando otras distancias como la Euclídea o la de Minkowski, con la distancia de Nikolic fue con la que mejores resultados de clasificación se obtuvo y con la que se obtenía mayor separabilidad entre aquellos prototipos que pertenecen a diferentes unidades motoras. Esta distancia está normalizada respecto a la amplitud de los MUPs, obteniendo un criterio de distancia que depende únicamente de las formas de onda de los segmentos y no de sus amplitudes. Esta distancia ha sido utilizada en otros procesos de descomposición de señales EMG con clusterings jerárquicos [21], [22].

También se realizaron pruebas modificando el umbral de segmentación, reduciéndolo hasta un valor de hasta la mitad del definido por Quiroga. De esta forma, el número de segmentos obtenidos se incrementaba pero se cometían más errores en la clasificación de estos, reduciendo la eficacia global del sistema.

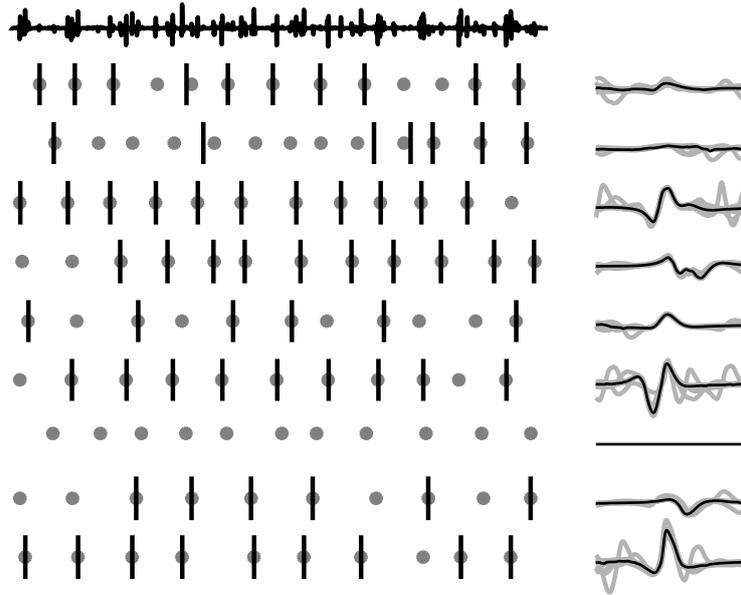


Fig. 10: Prototipos obtenidos (derecha) a partir de los segmentos obtenidos a partir de los disparos de cada uno de los trenes de disparos. Las líneas verticales representan los disparos descompuestos de la señal EMG (arriba) mientras que los círculos representan los instantes de disparo de cada una de las unidades motora.

4.3 Sistema de descomposición CTU

El segundo sistema de descomposición utilizado será denominado CTU (cluster train union). En este método, tanto la segmentación, como la purga de los trenes de disparo y el prototipado serán realizadas de igual forma que en el método de descomposición anterior, mientras que la clasificación se realizará de manera diferente.

Esta clasificación estará dividida en dos procesos, primero se realizará una clasificación preliminar mediante un algoritmo de clustering jerárquico y posteriormente se realizará la clasificación final mediante un algoritmo de unión de trenes de disparo (Fig. 11).

4.3.1 Clustering jerárquico

Para este primer clustering, solo se utilizará una característica para realizar la clasificación, esta será la propia forma de la señal de los segmentos. Por tanto, se realizarán agrupaciones en función de la distancia entre los diferentes MUPs obtenidos en la segmentación en función de las formas de onda de los segmentos. El objetivo de este clustering será realizar una agrupación preliminar y estricta entre aquellos segmentos que sean muy parecidos.

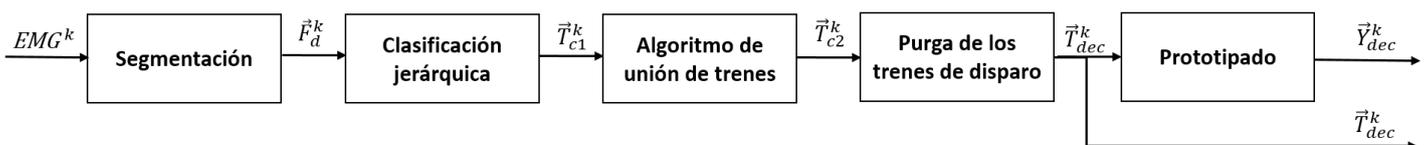


Fig. 11: Esquema de funcionamiento del sistema de descomposición CTU.

Para la inicialización del clustering se forman tantos grupos como segmentos hayan sido obtenidos en la segmentación. El clustering será realizado de manera jerárquica, uniendo de manera iterativa aquellos grupos que sean más similares. Para ello, se seguirán los siguientes pasos:

Primero, se crea una matriz de similitud en la que se recogen las distancias entre cada uno de los grupos. Como se ha comentado anteriormente, la métrica que separará la distancia entre grupos de observaciones será la distancia entre las formas de onda de los potenciales que los representan.

Para calcular la distancia entre dos segmentos se sigue el mismo procedimiento que en el método anterior. Primero se realiza un alineamiento no entero de ambas formas de onda y posteriormente se calcula la distancia mediante la métrica de Nikolic, como se describe en la ecuación (10).

Una vez calculada la distancia entre todas las formas de onda, se realizarán uniones entre las ramas del árbol mediante el método de Ward. El objetivo de este método es realizar aquellas uniones entre clústeres que, a cada paso, minimicen la varianza intracluster del nuevo clúster formado. La distancia entre distintas ramas se definirá como:

$$d(A, B) = \sqrt{\frac{2n_A n_B}{(n_A + n_B)}} d_{nikolic}(A, B) \quad (18)$$

donde n_A y n_B son los números de observaciones de los clústeres A y B. $d_{nikolic}(A, B)$ es la distancia de Nikolic entre los centroides representantes de las ramas.

Mediante el método de Ward se buscan los 2 grupos que tienen menor distancia (y por tanto, mayor similitud) y se unen. Una vez hecho, se recalcula la matriz de similitud, volviendo a calcular las distancias entre observaciones y sustituyendo los dos grupos unidos por uno nuevo que los represente. Este proceso será iterativo, uniendo los clústeres de menor distancia y volviendo a calcular las distancias entre ellos.

Se utiliza la inconsistencia como forma de delimitar hasta cuando se deben realizar uniones de diferentes clústeres, de forma que no acaben todas las observaciones en el mismo clúster final. Cuando se realiza una posible unión, su inconsistencia se define como la diferencia entre la distancia de esta unión y la media de las distancias de las uniones que se han realizado en ese clúster. Si la inconsistencia es muy alta, significará que los clústeres unidos no son muy similares y que no se deberá realizar esa unión. El valor de la inconsistencia fijado para este sistema es de 0.6.

De esta forma, los clústeres generados mediante este método son muy estrictos en sus uniones, haciendo que las observaciones que contienen sean muy similares y por tanto, casi con toda seguridad pertenecerán a la misma unidad motora. A su vez, que el número de uniones realizadas no sea alto implica que el número de clústeres generados mediante este método sea muy elevado, existiendo gran parte de ellos que no han sido unidos con ningún otro clúster y que solo estén formados por un disparo. Para obtener los trenes de disparo finales, se necesitará otro método que forme trenes de disparo más completos y que reduzca el número total de clústeres, como se explicara a continuación.

4.3.2 Algoritmo de unión de trenes

Con las clústeres generados previamente en el clústering jerárquico, se realiza un algoritmo de unión de trenes, que combina la propia información de forma de onda de los MUPs con la información temporal de los trenes de disparo. El objetivo de este algoritmo es unir los trenes obtenidos en el clustering jerárquico anterior, que son formados por uniones estrictas y contienen pocos disparos, con otros trenes de forma que se obtengan unos trenes de disparos definitivos y más completos.

Para ello, inicialmente se alinean los MUPs de cada grupo y se recalculan los instantes de disparo correspondientes al alineamiento. Para este alineamiento, se toma como referencia el primero de los MUPs encontrados en cada tren y los demás son alineados respecto a este. A partir los trenes de disparo recalculados se obtienen los MUPs representantes de cada clúster. Para ello se promedian los segmentos correspondientes a cada disparo (ya alineados) mediante el método de Malanda [20].

Para realizar la clasificación mediante este algoritmo, además de las formas de onda de los prototipos se utilizará la información temporal extraída de los trenes de disparo. Respecto a las formas de onda, se calculan todas las distancias entre los prototipos obtenidos utilizando la distancia de Nikolic y el alineamiento mediante el método de McGill, de la misma forma que se ha descrito anteriormente en la ecuación 10.

La información temporal se utilizará como un factor de penalización que se añade a las distancias calculadas en función de los trenes de disparo. Para ello, se calculan los IDIs de los trenes de disparos que se formarían uniendo dos clusters. En función del valor de los IDIs se añadirá un valor de penalización que se sumará al de la distancia entre los prototipos de los clústeres. De esta forma, si en la unión de los trenes de disparo hay IDIs menores de lo que sería fisiológicamente correcto, la penalización aumentará. La relación entre la penalización aplicada y el tiempo de los IDIs será la misma que en la ecuación (13). Ésta será lineal, de forma que cuanto menor sea el intervalo, mayor será la penalización.

En el disparo de una unidad motora puede ocurrir un fenómeno en el que la unidad motora vuelve a disparar en un tiempo mucho menor del que su frecuencia de disparo sugiere, este fenómeno se denomina doblete. Para no penalizar las uniones de cada clúster que contenga dos de estos disparos seguidos, la penalización añadida no es la del tren resultante, si no la diferencia entre la penalización del tren resultante y la suma de las penalizaciones de ambos trenes por separado:

$$d_{train}^{ij} = d_{train\ penalty\ (i+j)} - (d_{train\ penalty\ (i)} + d_{train\ penalty\ (j)}) \quad (19)$$

De esta forma, la unión de dos grupos en los que el intervalo entre dos disparos sea muy corto solo se penalizará una vez, permitiendo la posterior unión con otros clústeres.

Por tanto, la distancia entre dos clústeres es la suma entre la distancia de la forma de onda de los prototipos que la representan y la penalización calculada a partir de sus trenes de disparo:

$$d^{ij} = d_{MUP}^{ij} + d_{train}^{ij} \quad (20)$$

Sería posible aportar distinto peso a cada una de estas dos variables, pero mediante distintas pruebas se ha comprobado que mientras ambas variables tengan un peso significativo, la eficiencia de la descomposición será similar.

Para la agrupación de clústeres, se unirán los 2 grupos cuya distancia sea menor, formando un nuevo clúster que contenga los disparos de ambos y reduciendo en uno el número de grupos. Una vez realizada la unión, se volverá a calcular las distancias y a realizar uniones. Este proceso se repetirá hasta que la menor de las distancias entre 2 clústeres sea mayor que un valor fijado, d_{max} . Dicho valor es fijado como el percentil 25 de las distancias de los prototipos al inicio del algoritmo de trenes (antes de realizar cualquier unión), ya que se ha comprobado experimentalmente que a partir de este valor se encuentra un salto considerable en las distancias obtenidas. Esto es debido a que los trenes comienzan a solaparse incorrectamente unos con otros debido a que no hay más uniones de trenes correctas que realizar.

4.3 Evaluación del sistema de descomposición

A la hora de diseñar un sistema de descomposición, es fundamental el diseño de un sistema de evaluación con el que poder analizar el funcionamiento de la descomposición. Un buen sistema de evaluación, aparte de analizar el funcionamiento del sistema, será una herramienta capaz de detectar los aspectos en los que el sistema no funciona correctamente y dónde podrían aplicarse mejoras.

Debido al proceso de formación de señales EMG, no es posible la implementación de un sistema de evaluación con señales reales completamente objetivo, ya que los instantes de disparo de cada unidad motora y las formas de onda de éstas son imposibles de conocer. Mediante una descomposición manual supervisada por un experto se podrían llegar a obtener las formas de onda representativas de las unidades motoras, pero se introduciría inevitablemente un factor subjetivo en la obtención de éstas. Trabajando en simulación esto no resultará un impedimento, ya que se conocerán exactamente los trenes de disparo y las formas de onda de los MUPs en cada posición de las señales EMG registradas.

El sistema de evaluación será utilizado posteriormente para comprobar la robustez de los dos sistemas de descomposición a la variación de diferentes parámetros, así como para la elección del sistema más adecuado para este proyecto. A continuación se describirán los procesos realizados para el diseño de este sistema de evaluación.

4.3.1 Creación de trenes de referencia

A partir de la misma señal EMG con la que se realiza la descomposición se crearán los trenes de referencia ideales de las unidades motoras. El objetivo será obtener los trenes de disparo de aquellas unidades motoras cuya descomposición sea posible. En realidad, la señal EMG está formada por la aportación de todas las unidades motoras activas, pero muchas de ellas no estarán cerca de la aguja cuando se realice el registro, por lo que su aportación a la señal serán potenciales de muy poca amplitud, de forma que no es realista exigir su descomposición.

El criterio para afirmar que la descomposición de una unidad motora sea posible estará relacionado con el umbral utilizado en la segmentación: si el MUP de una unidad motora no es mayor que el umbral en una posición determinada, su descomposición no será exigida ya que en la segmentación no se obtendrán ninguno de sus potenciales. Para ello, en cada posición, a partir de los MUPs originales de las unidades motoras activas, se sigue un procedimiento similar al utilizado en la segmentación. Cada uno de estos MUPs es filtrado mediante el mismo paso banda utilizado anteriormente y umbralizado mediante el umbral que se aplicó en la señal EMG de la posición correspondiente. El tren de referencia estará formado por los trenes de disparo de aquellas unidades motoras cuyo valor absoluto del potencial supere el umbral.

Los instantes de tiempo de los trenes simulados están referidos al momento de disparo de las unidades motoras, mientras que los de descomposición son los instantes de disparo de cuando los potenciales llegan al electrodo, tras propagarse por las fibras. Para la evaluación, es necesario que los trenes de referencia y descomposición estén sincronizados, por ello, para cada tren de referencia se aplica un retardo correspondiente al tiempo que transcurre desde que la unidad motora dispara y el potencial llega al electrodo. Este tiempo será estimado a partir de la zona de inervación media y la velocidad de conducción media de las fibras musculares de cada unidad motora.

4.3.2 Asociación de trenes descompuestos y de referencia

Para la evaluación de los trenes de disparos y los MUPs correspondientes a ellos será necesario la comparación de estos con los trenes originales de las unidades motoras (obtenidos en simulación). Por ello, se intenta asociar cada uno de los trenes descompuestos con aquel simulado que le corresponde. Esta asociación se realizará solo con la información temporal de los trenes de disparo y no con la forma de onda de los MUPs.

Cada tren de disparo detectado se compara con cada uno de los trenes de referencia y se calcula la precisión entre estos. La precisión define qué porcentaje de disparos del tren de referencia ha sido correctamente descompuesto en el tren de descomposición. Para que un disparo descompuesto sea considerado correcto, su diferencia con el de referencia debe ser menor que un margen determinado. Este margen será fijado como 5ms.

En esta evaluación se realizarán dos tipos de asociaciones, única y no única, que serán explicadas a continuación.

4.3.2.1 Asociación única

Para la evaluación de la descomposición será necesario realizar una asociación en la que cada tren de referencia solo pueda ser asociado con un tren de descomposición, ya que se debe penalizar si dos o más trenes de disparo están representando a la misma unidad motora. De esta forma, cada tren de referencia será asociado únicamente con aquel tren de descomposición que más se le parezca (Fig. 12).

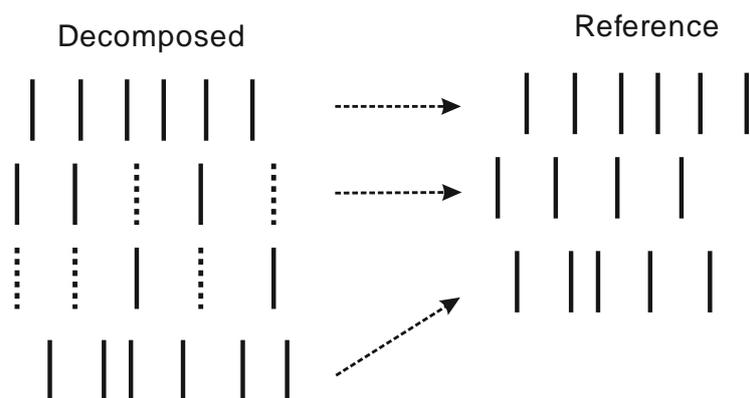


Fig. 12: Asociación única entre trenes descompuestos y de referencia, cada tren de referencia solo podrá asociarse a un tren de descomposición.

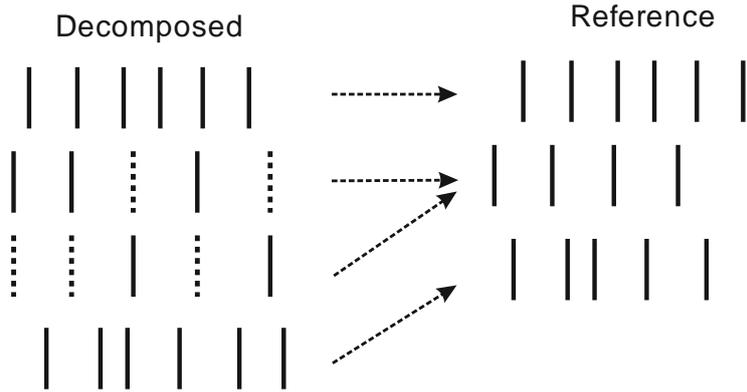


Fig. 13: Asociación no única entre trenes descompuestos y de referencia, cada tren de referencia solo podrá asociarse a varios trenes de descomposición.

4.3.2.2 Asociación no única

En esta asociación, varios trenes de descomposición podrán asociarse al mismo tren de referencia (Fig. 13). Para ello, se obtienen unos nuevos trenes de referencia obtenidos de la misma manera que en el apartado anterior pero con un valor del umbral de segmentación de la mitad. De esta forma, es seguro que cada tren de disparos descompuesto tenga una asociación con al menos alguno de los trenes de referencia. Esta asociación será utilizada para etiquetar los prototipos finales que serán introducidos al algoritmo de enlazado. Ésta es necesaria ya que si dos trenes de disparo representan a la misma unidad motora deben ser etiquetadas a la misma unidad motora para poder evaluar cada uno de ellos.

Como resultado de esta asociación, cada unidad motora descompuesta estará identificada con una etiqueta con el número de la unidad motora de referencia a la que ha sido asociado. En caso de que una unidad motora no corresponda con ninguna de las del conjunto de referencia será etiquetada con un 0.

Para permitir una asociación entre un tren de disparo descompuesto y uno de referencia, la precisión de los disparos entre ellos debe ser superior al 25%, de esta forma no se unirá un tren descompuesto a cualquier tren de referencia si coinciden en un solo disparo.

4.3.3 Figuras de mérito

En este apartado se explicarán las figuras de mérito calculadas para la evaluación del sistema de descomposición. Estas figuras de mérito tendrán como objetivo evaluar 3 aspectos: la precisión con la que se han descompuesto los trenes de disparo, la forma de onda de los prototipos obtenidos y el número de unidades motoras descompuestas.

Para las figuras de mérito del error en la descomposición de los trenes de disparo y el error en la forma de onda de los prototipos se hará una distinción en función de si las unidades motoras a las que hayan sido asociadas sean atravesadas en algún momento por el electrodo de scanning. Esto es posible ya que en simulación se conoce la localización espacial de las unidades motoras y sus áreas, además de la posición del corredor que atraviesa el electrodo. Por tanto, los potenciales presentes en cada posición serán etiquetados como fuera o dentro en función de si la unidad motora a la que pertenecen es atravesada por la parte del electrodo en la que se realiza el registro (la punta) en esa determinada posición. Las versiones dentro o fuera de las figuras de mérito serán calculadas a partir de los potenciales dentro o fuera correspondientes (Fig. 14).

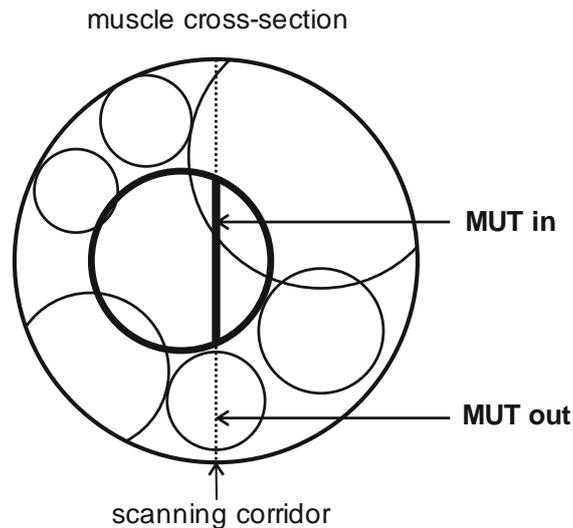


Fig. 14: División de los potenciales de una unidad motora en diferentes posiciones según ésta sea atravesada o no por el electrodo (en su zona activa) en esas posiciones.

4.3.3.1 Precisión (en la descomposición) del tren de disparos

Los trenes de disparo descompuestos son comparados con aquellos con aquellos trenes de disparo simulados con los que han sido asociados (de forma única). A partir de esta comparación se calculan los siguientes parámetros:

- Verdaderos positivos (TP: true positives): número de disparos de un tren que han ocurrido y el sistema ha identificado correctamente.
- Falsos positivos (FP: false positives): número de disparos que el sistema ha identificado como que la unidad motora ha disparado pero en realidad no lo han hecho (Fig. 15). Estos errores podrán ser muy perjudiciales para el sistema, ya que a la hora de obtener el prototipo final se realizará el promediado sobre un segmento que no pertenece a la unidad motora correspondiente, proporcionando únicamente artefactos al prototipo final.
- Falsos negativos (FN: false negatives): número de disparos en los que la unidad motora ha disparado y el sistema no lo ha identificado (Fig. 15). En un sistema de descomposición para segmentos largos este tipo de errores pueden ser menos significativos ya que lo único que implican que el prototipo final será obtenido mediante un número menor de segmentos promediados. Sin embargo, para registros cortos como los utilizados en este trabajo será importante que no haya demasiados falsos negativos, ya que el número de disparos de una unidad motora en la señal EMG es de por sí bajo.

Para cada tren de disparos obtenido en cada posición se calculará un valor de precisión, que representa el porcentaje de disparos que ha sido descompuesto correctamente y que será definido como:

$$A = TP / (TP + FN + FP) \quad (21)$$

Por tanto, cuanto más completos y menos errores tengan los trenes de disparo, mayor será el valor de su precisión. Un valor de precisión de 1 significará que el tren ha sido descompuesto perfectamente.

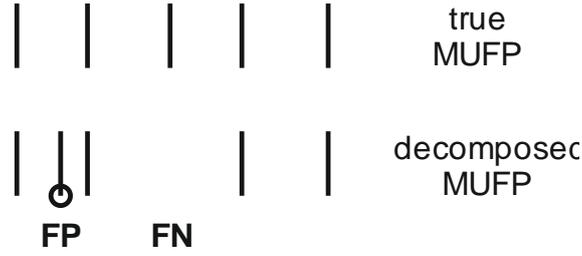


Fig. 15: Comparación entre un tren descompuesto y su correspondiente de referencia, falsos positivos y falsos negativos.

4.3.3.2 Error (de forma de onda) del prototipo

Este error evaluará la similitud entre el prototipo obtenido y la forma de onda del MUP original, y será calculado para cada prototipo obtenido en descomposición. Para ello primero se realiza un alineamiento no entero entre el prototipo y el MUP asociado mediante el algoritmo de McGill. Una vez hecho se calcula la figura de mérito como:

$$E = \sum |y_{km}[n] - \hat{y}_{km}[n]|^2 / \sum |y_{km}[n]|^2 \quad (22)$$

Esta figura se trata de un error cuadrático medio normalizado a la potencia del MUP descompuesto. Cuando no sea posible la asociación de un MUP obtenido en descomposición con alguno de los de referencia, el error será de 1, considerando toda la potencia del MUP original como potencia de error.

4.3.3.3 Precisión en el número de unidades motoras descompuestas

Esta figura de mérito mide la eficacia en el número de unidades motora descompuestas, y si estas se corresponden al conjunto de unidades motoras que deberían haber sido descompuestas (las del tren de referencia). Se define como:

$$N_{ACC} = N_{FIT} / (N_{DEC} + N_{REF} - N_{FIT}) \quad (23)$$

Donde N_{DEC} es el número de unidades motoras descompuestas, N_{FIT} es el número de MUPs asociados únicamente entre los de referencia y los descompuestos y N_{REF} es el número de unidades motoras en el tren de referencia. De esta forma, se penaliza de igual forma descomponer un MUP con una forma de onda que no pertenece a ninguna unidad motora que dejar de descomponer un MUP de una unidad motora presente en la señal EMG. El valor máximo de esta figura de mérito será de 1, y se dará cuando el número de unidades motoras descompuestas sea igual a las del tren de referencia y todas ellas estén identificadas únicamente con cada una de éstas.

4.3.3.4 Porcentaje de segmentos clasificado

Esta figura de mérito indica el porcentaje de segmentos que serán clasificados en los prototipos finales, será definida como:

$$S = S_{class} / S_{total} \quad (24)$$

Donde S_{class} es el número de segmentos clasificados y S_{total} es el número total de segmentos detectados en la segmentación. El SCR no es una figura de mérito en sí, ya que un mayor valor de ésta no asegura que el rendimiento de la descomposición mejore. Sin embargo, podrá utilizarse para analizar si se está siendo demasiado estricto a la hora de realizar uniones en la

clasificación, dado que refleja el porcentaje de segmentos empleados en la obtención de los prototipos, y por tanto, el porcentaje de segmentos descartados.

4.4 Experimentos

A continuación se detallarán los experimentos realizadas con el algoritmo de descomposición para evaluar su rendimiento y poder determinar algunos de los parámetros óptimos para su mejor funcionamiento.

Para cada uno de los experimentos, se realizarán 50 realizaciones correspondientes a 50 músculos simulados, cada una de estas realizaciones se evaluará mediante las figuras de mérito descritas anteriormente.

4.4.1 Evaluación del sistema de descomposición

Con los dos sistemas de descomposición explicados anteriormente (PHC y CTU) se realiza un experimento para poder determinar cuál de los dos ofrece un mejor rendimiento. Además, se probarán también los mismos sistemas de descomposición filtrados (fPHC y fCTU) mediante un filtro paso banda Butterworth de orden 4, con una frecuencia de corte inferior de 1000 Hz y una superior de 5000 Hz de acuerdo a las utilizadas en [ref emglab].

Con este filtrado se consigue acortar la duración de los MUPs que intervienen en la señal EMG de forma que aumenta la separación temporal entre ellos. De esta forma, aunque dos potenciales estuviesen superpuestos en la señal original, en la señal filtrada podrán ser segmentados por separado.

Para el experimento se descomponen las mismas señales EMG mediante los dos métodos (y sus variantes filtradas). El umbral de la purga será fijado a 3 disparos, la ventana de exclusión a 3.5 ms, la duración de cada registro de EMG a 1 segundo y el MVC a un 3%.

4.4.2 Evaluación de la purga

Para optimizar el rendimiento del sistema, se realizará un experimento probando diferentes tipos de purga para ver con cuál de ellas se obtiene un mejor rendimiento del sistema. Las purgas realizadas estarán basadas en el número de disparos de los trenes o en la correlación entre dos de ellos. Para este experimento, se utiliza el método de descomposición PHC, con una MVC del 3%, una ventana de exclusión de 3,5 ms y una ventana de registro de 1 segundo.

4.4.2.1 Purga por número de disparos

Mediante este método, se eliminarán aquellos trenes de disparo que no contengan un número mínimo de disparos. El número de disparos sobre el que realizar la purga dependerá de la duración del registro. Para este experimento se ha fijado ésta duración a 1 segundo. A partir de una frecuencia de disparo estimada de 10 disparos por segundo (a partir del trabajo de De Luca [13]), se fija el umbral de purga para que el número de disparos que tenga un tren para no ser purgado deba ser mayor que 2 o 3, y se comparan los resultados obtenidos.

4.4.2.2 Purga por correlación de trenes de disparo

Mediante este método de purga, se busca eliminar aquellos trenes que contengan disparos repetidos en otros trenes, debido a problemas en la segmentación de la señal en la que un mismo potencial es segmentado en dos ocasiones. Para ello, se realiza una correlación entre todos los trenes de disparo, sustituyendo los instantes de disparo por pulsos gaussianos de

anchura reducida. Aquellos trenes que contengan disparos repetidos tendrán un valor de correlación alto, y si superan un umbral determinado serán eliminados.

4.4.3 Evaluación de la ventana de exclusión

Como se ha comentado anteriormente, la ventana de exclusión determina la distancia a la que podrán estar separados dos puntos candidatos a partir de los cuales se segmentará la señal. Si los dos puntos están en la misma ventana de exclusión solo uno de ellos será utilizado.

Con una ventana de exclusión demasiado corta, se corre el riesgo de que un mismo potencial pueda ser segmentado en dos segmentos diferentes, centrados en tiempos diferentes. Con una ventana demasiado larga, podrá ser posible que dos puntos de diferentes potenciales caigan en la misma ventana, eliminando uno de ellos. Para determinar la mejor ventana se realizan experimentos fijando los valores de ésta a 3.5 y 5 ms.

4.4.4 Evaluación de la ventana de registro

La ventana de registro es el tiempo que el electrodo está fijo realizando un registro en cada posición. El objetivo de estos experimentos será delimitar el tiempo mínimo de esta ventana de registro para el que el multiscanning funcionará correctamente. Interesa reducir este tiempo todo lo posible ya que el tiempo de registro total de la técnica depende directamente de él. Este tiempo será:

$$t_{registro} = N (L + M) \quad (25)$$

Donde L es el tiempo de registro en cada posición, M el tiempo de espera correspondiente al movimiento del electrodo por el motor y N el número de posiciones de registro del corredor que atraviesa el electrodo. Por tanto, el tiempo de registro total depende directamente del tiempo de registro en cada posición, ya que este es mucho mayor que la duración del movimiento del motor (unos 30 ms).

Para el experimento se realizarán pruebas con una duración del tiempo de registro de 500, 750 y 1000 ms. Cuanto menor sea este tiempo, más se dificultará el funcionamiento del sistema de descomposición, ya que el número de veces que aparecerá cada potencial en la señal se disminuirá. Además, los prototipos estarán calculados respecto a un número menor de disparos, disminuyendo su calidad.

Para este experimento se utilizará el método de descomposición PHC, con una purga de aquellos trenes de disparo que no contengan mínimo 2 disparos y con una ventana de exclusión de 3.5 ms.

4.4.5 Evaluación de la influencia de la MVC

Una vez fijados el resto de parámetros, se realizará un experimento descomponiendo las señales de cada uno de los 50 músculos a 3 niveles distintos de MVC: al 2, 3 y 4%. El resto de parámetros serán fijados como: umbral de la purga a 3 disparos, con una ventana de exclusión de 3.5 ms y utilizando el método PHC de descomposición. Un buen sistema de descomposición deberá ser capaz de funcionar correctamente independientemente del nivel de contracción al que se trabaje (siempre que este no sea demasiado alto de forma que el nivel de artefactos contamine en exceso la señal).

Conforme aumenta este nivel de contracción voluntaria del músculo, tanto el número de unidades motoras reclutadas como la frecuencia de disparo de estas serán mayores. Por tanto,

el nivel de actividad de las señales EMG aumentará exponencialmente, aumentando el nivel de artefactos generados por las unidades motoras y el número de superposiciones. Además, las consecuencias de este efecto se incrementan para señales de tan corta duración como las que se utilizan en este proyecto, ya que se reduciría aún más el número de veces que un potencial aparece sin artefactos en la señal. Cuanto menor sea el número de disparos que se utilizan para obtener el prototipo, más ruidoso será éste, disminuyendo su similitud con la forma de onda del MUP original.

4.5 Resultados

A continuación se analizan los resultados obtenidos para los experimentos presentados en el apartado anterior. La forma de presentar estos resultados será mediante funciones de probabilidad acumulada que recojan las figuras de mérito individuales de todas las realizaciones del experimento. De esta forma se pueden observar que porcentaje de las unidades motoras están por debajo o por encima de cada valor de las figuras de mérito. Así, la comparación entre diferentes métodos será más intuitiva y completa que mediante otras formas de representación como los boxplots.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, las figuras de mérito de la precisión del tren de disparos y el error en la forma de onda serán divididas en las versiones in/out de acuerdo a si las unidades motoras son atravesadas o no en su territorio por el electrodo de scanning en su parte activa.

4.5.1 Evaluación del sistema de descomposición

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el experimento explicado en el apartado 4.4.1 (Fig. 16), para cada uno de los métodos de descomposición se representan las figuras de mérito definidas anteriormente.

Por lo general, con el método PHC se obtiene una menor precisión dentro del territorio que con el método CTU. Esto se observa debido a que la curva representativa del método CTU está siempre por debajo del PHC (Fig. 16(a)), lo cual significa que para cualquier valor de precisión, el porcentaje de realizaciones del método CTU que están por encima de éste serán mayores que el del método PHC. Se puede observar cómo el porcentaje de unidades motoras que fueron descompuestas perfectamente es el siguiente: un 50% para el método fCTU, un 40% para los métodos CTU y fPHC y un 25% para el método PHC.

Respecto a la precisión de las unidades motoras fuera del territorio (Fig. 16(b)), se invierten los resultados respecto a las de dentro, ofreciendo un mejor rendimiento el método PHC que el CTU. Además, cabe destacar que los valores de precisión obtenidos en las unidades motoras fuera es mucho menor que en las de dentro. Esto es debido a que las unidades motoras fuera del territorio están a una mayor distancia del electrodo, por lo que su potencial se atenúa hasta que llega al punto de captación, siendo estos potenciales de menor amplitud en la señal EMG y con formas de onda más parecidas entre sí, y por tanto más difíciles de diferenciar y descomponer.

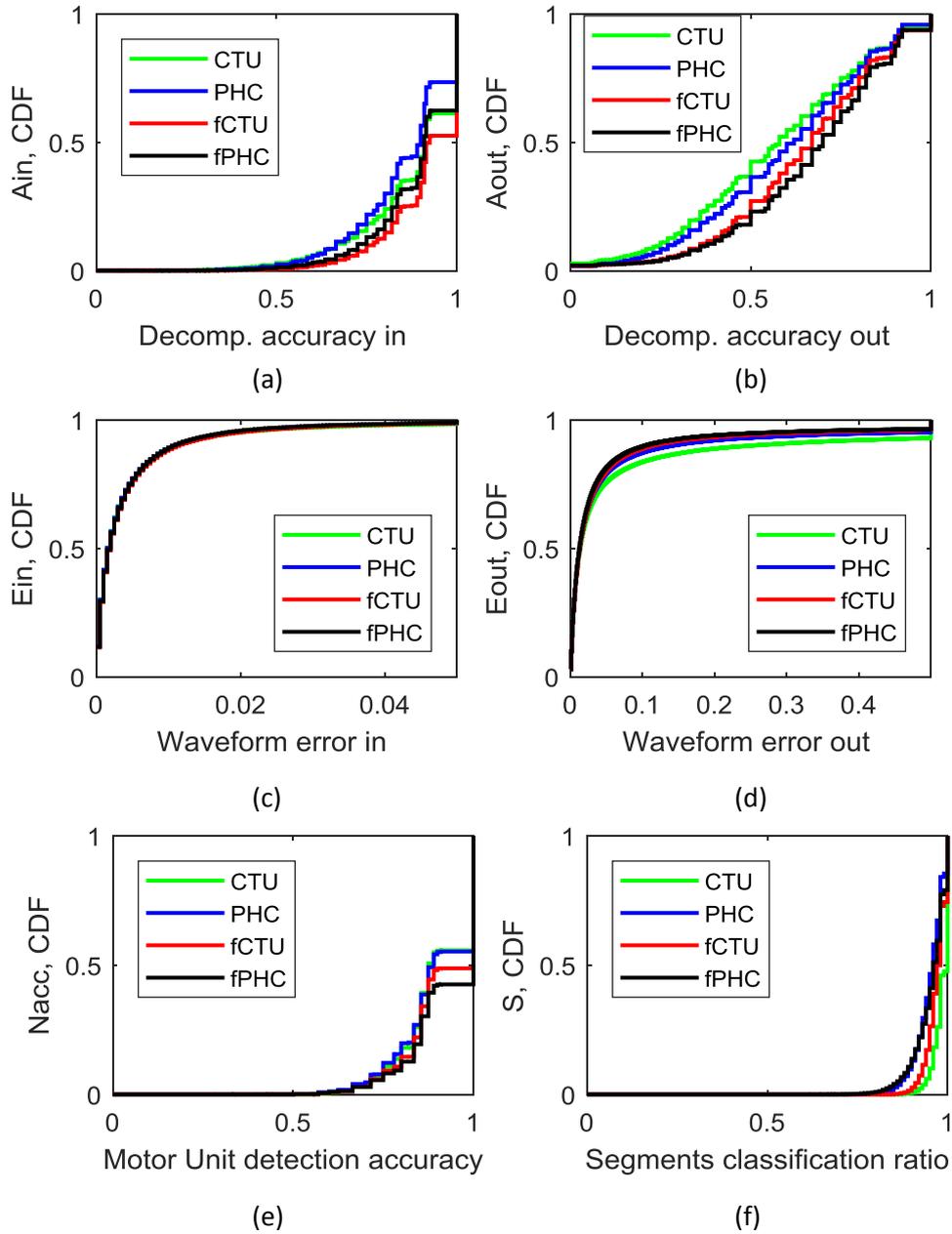


Fig. 16: Resultados del experimento realizado para los diferentes métodos de descomposición: CTU, PHC, CTU filtrado y PHC filtrado. Se representan las figuras de mérito de: precisión en la descomposición de los trenes dentro (a) y fuera (b) del territorio, error en la forma de onda dentro (c) y fuera (d) del territorio, la precisión en el número de unidades motoras descompuestas (e) y el porcentaje de segmentos clasificados (f).

Respecto al error en la forma de onda, para las unidades motoras que están dentro del territorio (Fig. 16(c)), se obtienen errores de muy bajo valor para cualquier método de descomposición. El error en las unidades motoras captadas desde fuera del territorio (Fig. 16(d)) aumenta considerablemente, del orden de 10 veces más que las unidades motoras captadas desde dentro. Esto es debido a que los potenciales fuera del territorio son atenuados durante su propagación al punto de registro, apareciendo con mucha menos amplitud en la señal EMG y siendo más afectados por los artefactos. Para éstas, el método CTU ofrece un mejor rendimiento

que el PHC. Observando las curvas de cada uno, se observa cómo para cualquier valor de error, habrá un mayor porcentaje de realizaciones con el método PHC con un error mayor que para el método CTU. Cabe destacar también que las opciones filtradas de los métodos obtendrán un rendimiento ligeramente superior que las no filtradas.

Respecto a la precisión en el número de unidades motoras detectadas (Fig. 16(e)), con todos los métodos se obtienen buenos resultados. Con todos los sistemas de descomposición se obtiene un porcentaje de descomposiciones con una precisión de 1 (es decir, se han detectado todas las unidades motoras presentes sin fallo) en más del 50% de las realizaciones, mientras que el 80% tienen una precisión mayor que 0.8. Teniendo en cuenta que el número de unidades motoras que aparecen en el tren de referencia suelen ser de 7 o 8, este porcentaje significa que se ha cometido un único fallo (puede ser una unidad motora detectada de más o de menos).

El porcentaje de segmentos clasificados es cercano al 90% para todos los métodos (Fig. 16(f)). Se observa cómo el método PHC tiene un número mayor de porcentaje de segmentos clasificados que el método CTU, lo cual significa que el segundo es más estricto a la hora de unir diferentes grupos durante el clustering, ya que ambos utilizan la misma segmentación. Esta diferencia puede explicar las diferencias en los valores de precisión explicados anteriormente.

De acuerdo con estos resultados, la elección del método óptimo resulta complicada. Aunque parece que las versiones filtradas de los métodos funcionan mejor que las no filtradas, no es posible determinar con total seguridad cual es el método con el que se obtendrán mejores resultados tras efectuar la fase de enlazado. Por ello, la elección del método de descomposición a utilizar se realizará posteriormente en el trabajo cuando se evalúen los experimentos realizados en el enlazado.

4.5.2 Evaluación de la purga

Los resultados obtenidos en el experimento explicado en el apartado 4.4.2 son representados en la Fig. 17. Se observa cómo los valores de precisión y error de forma de onda son casi idénticos para todos los métodos, tanto en las versiones dentro como fuera (Fig. 17 (a) (b) (c) (d)).

El mayor cambio se observa en la figura de mérito la precisión en las unidades motoras descompuestas (Fig. 17(e)), para la cual se observa una mejora clara con la purga manteniendo aquellos trenes que contengan un número de disparos mayor que 3, de esta manera se es más estricto con la purga y se eliminan gran parte de los trenes de disparo que no corresponden a unidades motoras del tren de referencia. Esta eliminación de más trenes de disparo para este método está directamente relacionada con la disminución del porcentaje de segmentos clasificados (Fig. 17(f)), ya que un número mayor de segmentos serán purgados y por tanto no serán clasificados.

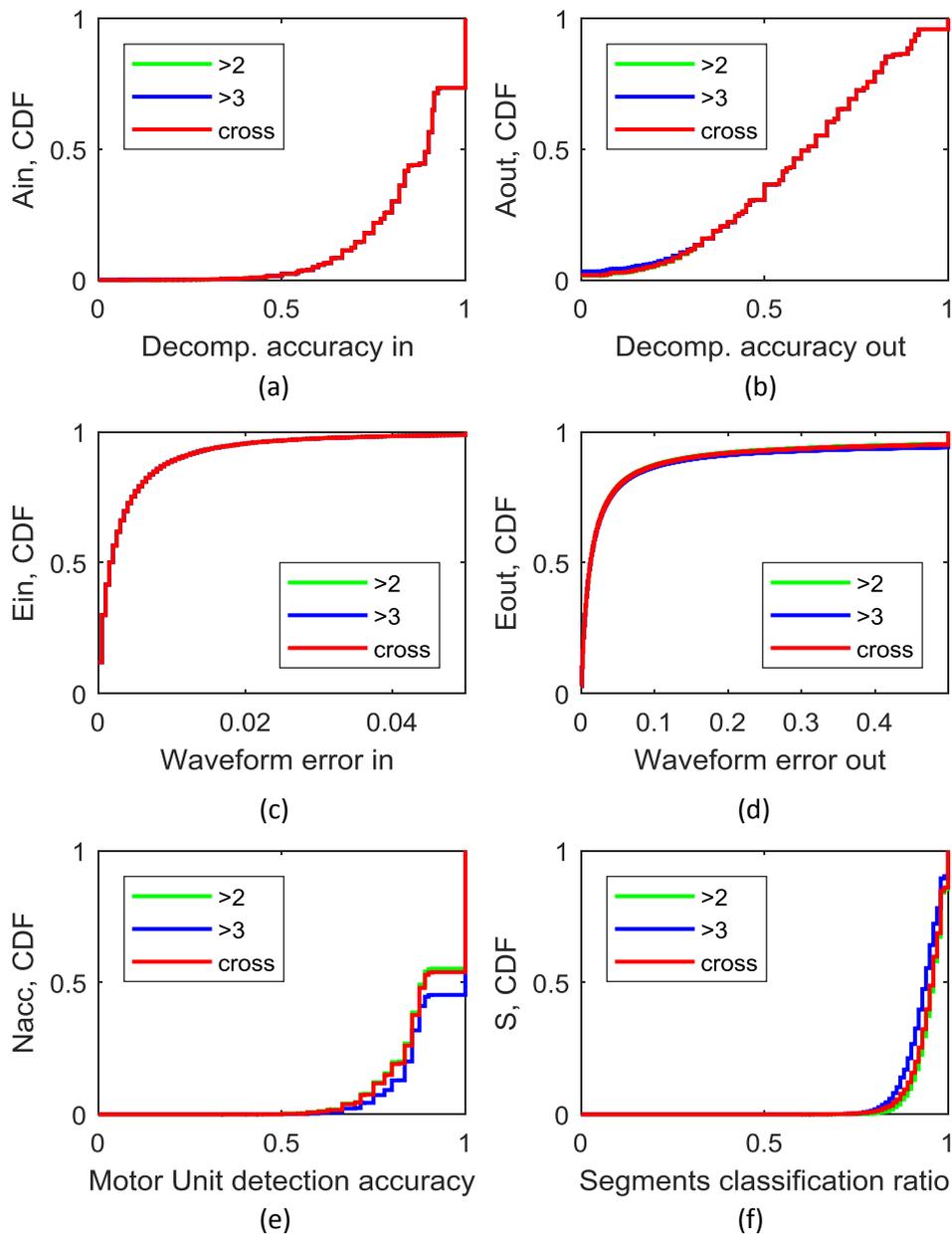


Fig. 17: Resultados del experimento de descomposición para diferentes tipos de purga: mayor que 2 disparos, mayor que 3 disparos y purga por correlación. Se representan las figuras de mérito de: precisión en la descomposición de los trenes dentro (a) y fuera (b) del territorio, error en la forma de onda dentro (c) y fuera (d) del territorio, la precisión en el número de unidades motoras descompuestas (e) y el porcentaje de segmentos clasificados (f).

4.5.3 Evaluación de la ventana de exclusión

Los resultados obtenidos para el experimento descrito en el apartado 4.4.3 se adjuntan en la Fig. 18, en los que se representan las descomposiciones de las mismas señales con dos ventanas de exclusión diferentes: 3,5 y 5 ms

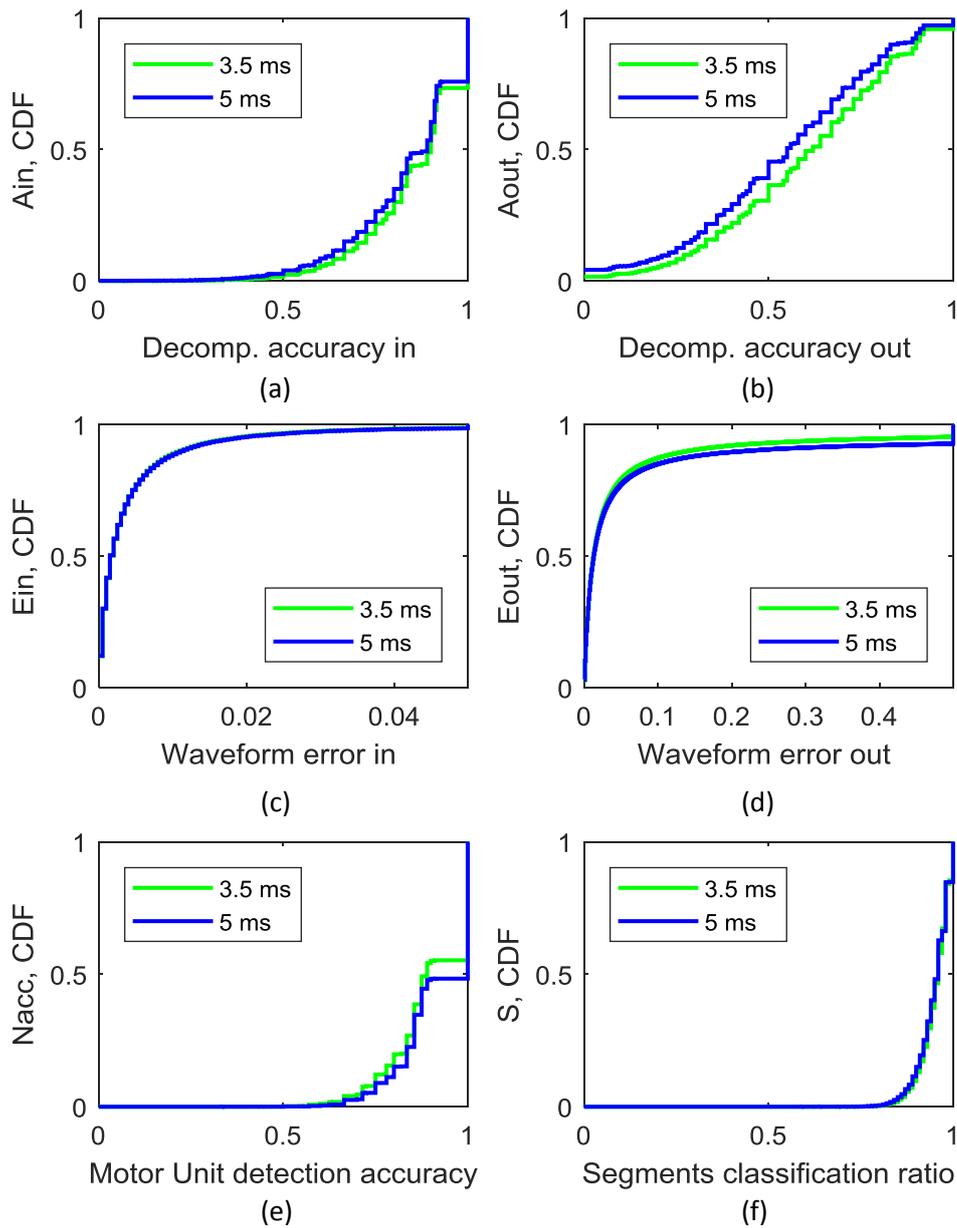


Fig. 18: Resultados del experimento de descomposición para una ventana de exclusión de 3,5 y 5 ms. Se representan las figuras de mérito de: precisión en la descomposición de los trenes dentro (a) y fuera (b) del territorio, error en la forma de onda dentro (c) y fuera (d) del territorio, la precisión en el número de unidades motoras descompuestas (e) y el porcentaje de segmentos clasificados (f).

Respecto a la precisión en la descomposición de los disparos (Fig. 18(a) (b)), se obtiene un mejor rendimiento para una ventana de exclusión de duración 3,5 ms, tanto en las unidades motoras dentro como fuera del territorio. Esto puede deberse a que 5 ms es un valor demasiado elevado, haciendo que se excluyan disparos de diferentes unidades motoras que han ocurrido en tiempos cercanos.

Esta degradación en la precisión se traduce en aumento del error en la forma de onda para las unidades motoras fuera del territorio para la ventana de exclusión de 5 ms (Fig. 18(d)).

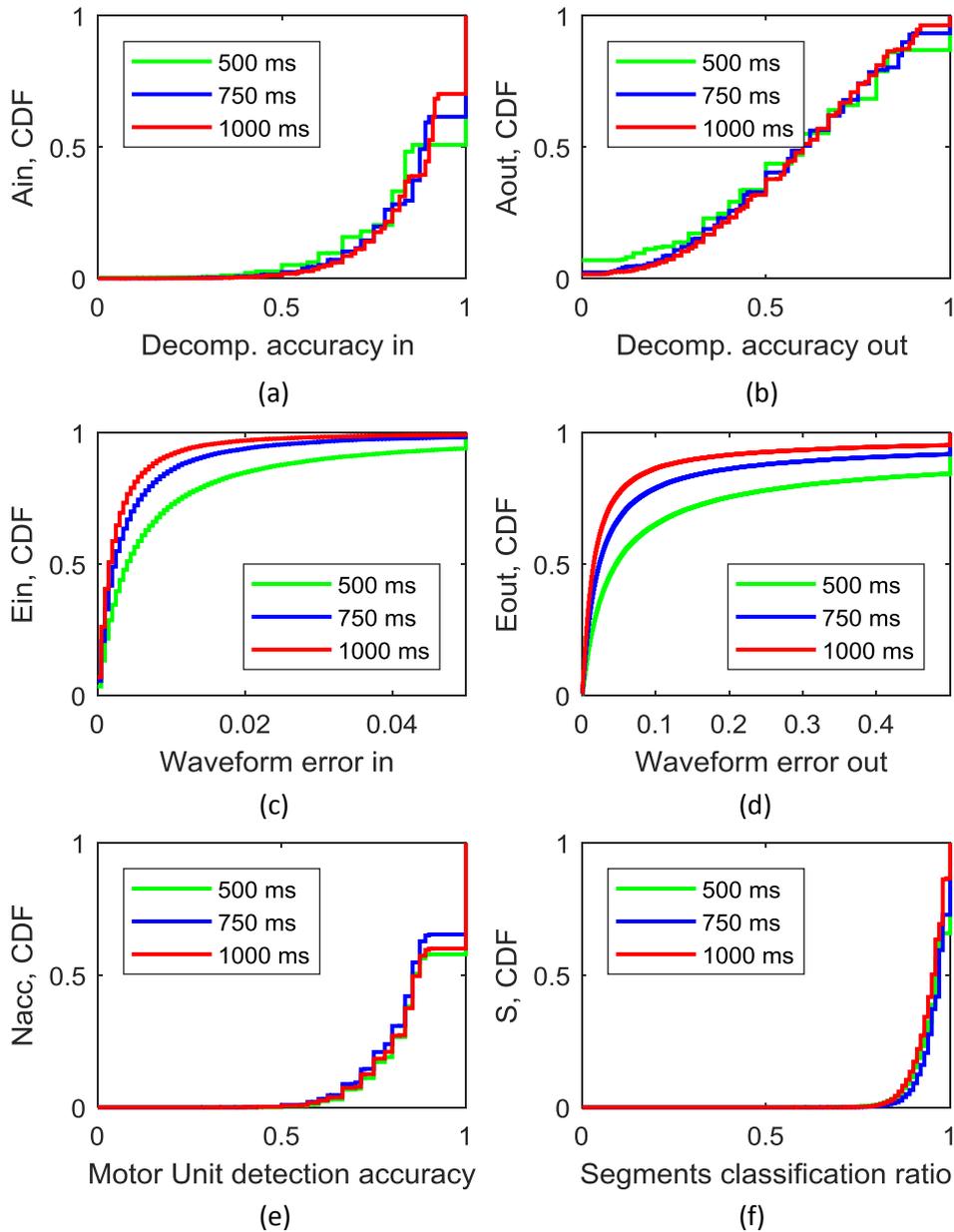


Fig. 19: Resultados del experimento de descomposición para una ventana de registro de duración 500, 750 y 1000 ms. Se representan las figuras de mérito de: precisión en la descomposición de los trenes dentro (a) y fuera (b) del territorio, error en la forma de onda dentro (c) y fuera (d) del territorio, la precisión en el número de unidades motoras descompuestas (e) y el porcentaje de segmentos clasificados (f).

Sin embargo, la ventana de 5 ms obtiene un mejor rendimiento en la precisión en las unidades motoras descompuestas (Fig. 18(e)). Esto es debido a que con la ventana de 3,5 ms, para potenciales que sean extremadamente largos, en la segmentación se detectarían dos puntos de estos potenciales sobre los que extraer segmentos. Por tanto, se segmentaría el mismo potencial dos veces, dando lugar a repeticiones que pueden aparecer como distintos trenes de disparo al final de la clasificación. Esto es debido a que los instantes de disparo de ambos segmentos serán muy cercanos, y como se ha explicado anteriormente, cuando esto ocurra la penalización

temporal en la clasificación será muy elevada, haciendo que estos segmentos no se unan en el mismo tren y aparezcan repeticiones de éstos.

Como el objetivo esta descomposición es obtener los mejores prototipos posibles para posteriormente introducirlos en el algoritmo de enlazado, y teniendo en cuenta que las repeticiones de disparos no son muy frecuentes, se prioriza el minimizar el error en la forma de onda sobre el de la precisión en la descomposición de las unidades motoras, y se elegirá como óptima la ventana de 3,5 ms.

4.5.4 Evaluación de la ventana de registro

En la Fig. 19 se recogen los resultados del experimento explicado en el apartado 4.4.4, en el que se evalúa el rendimiento de la descomposición para valores de la ventana de registro de 500, 750 y 1000 ms.

Los valores de precisión para la descomposición de los disparos en las unidades motoras fuera del territorio varían de forma muy reducida con la longitud de la ventana de registro (Fig. 19 (b)). Sin embargo, para las unidades motoras dentro del territorio se observa cómo se obtiene la descomposición completa de un porcentaje mayor de éstas cuanto más corta sea la ventana de registro (Fig. 19 (a)), debido a que en registros más cortos es más probable que no aparezca ningún disparo contaminado por artefactos. En concreto, para una ventana de 500 ms se observa como el porcentaje de trenes de disparos que son descompuestos completamente es de el 50%, con una ventana de 1000ms este porcentaje se reduce hasta el 25%.

Aunque los valores de precisión no varíen demasiado con la ventana de registro, los valores del error en la forma de onda se ven claramente afectadas por ésta. Cuanto más larga sea la ventana de registro mayor será la calidad del prototipo obtenido (Fig. 19(c) (d)), y más se parecerá éste al prototipo original. Esto es debido a que para un mismo valor de precisión de los trenes para diferentes ventanas de registro, cuanto mayor sea la ventana de registro mayor será el número de promediados sobre los que se realiza el prototipo, y por tanto mejor será éste.

Los valores tanto de la precisión en la descomposición de unidades motoras como el porcentaje de disparos clasificados son independientes respecto a la longitud de la ventana de registro (Fig. 19 (e) (f)).

Con estos resultados, se observa cómo la descomposición funciona correctamente aunque se recorte tiempo de duración de los registros en cada posición a 750 ms. Con un tiempo de 1000 ms se obtienen mejores resultados, pero el beneficio de poder acortar el tiempo total de la técnica es superior. Con 500 ms, aunque la precisión en la detección de los disparos sigue siendo buena, se observa una degradación clara en la calidad de los prototipos obtenidos respecto a las otras dos alternativas.

4.5.5 Evaluación de la influencia del MVC

En la Fig. 20 se presentan los resultados del experimento explicado en 4.4.5, comparando los resultados de la descomposición realizados para 3 niveles distintos de MVC: al 2, 3 y 4%.

La precisión en la detección de disparos de la descomposición se reduce conforme aumenta el MVC (Fig. 20(a) (b)), debido al aumento del nivel de los artefactos conforme éste aumenta. Esta degradación afecta de manera similar tanto a las unidades motoras dentro tanto como las de fuera. Aun así, el sistema de descomposición funciona satisfactoriamente para todos los niveles de contracción simulados.

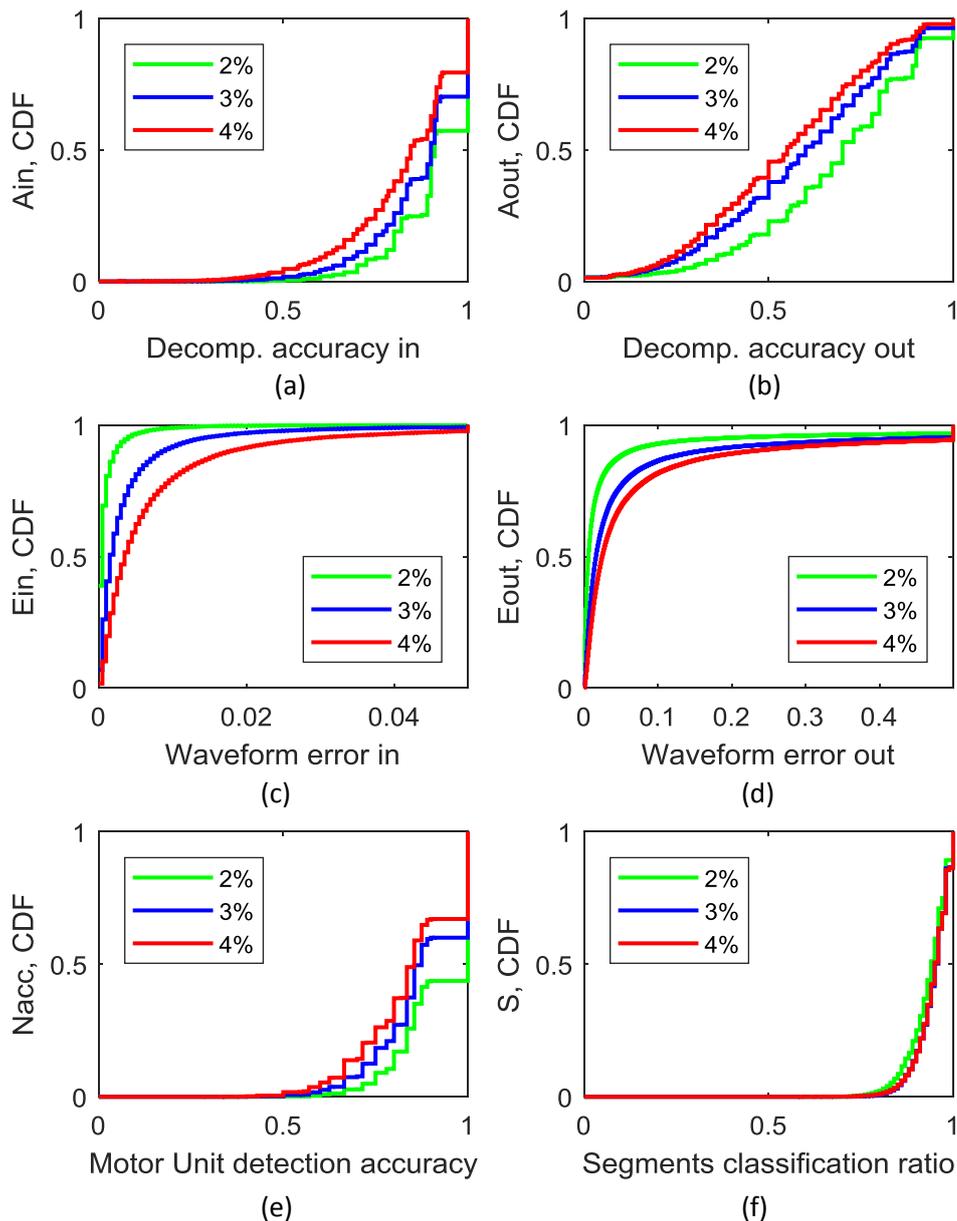


Fig. 20: Resultados de la descomposición para niveles de contracción voluntarios (MVC) para valores del 2, 3, y 4%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en la descomposición de los trenes dentro (a) y fuera (b) del territorio, error en la forma de onda dentro (c) y fuera (d) del territorio, la precisión en el número de unidades motoras descompuestas (e) y el porcentaje de segmentos clasificados (f).

El descenso de la precisión conforme aumenta el MVC está relacionado con el aumento del error de la forma de onda (Fig. 20(c) (d)). Al realizar el prototipado respecto a un número menor de disparos o a disparos de otra unidad motora (falsos positivos) la calidad de éste disminuirá. Además, aunque un disparo sea detectado correctamente, el segmento que se extraerá desde éste estará más contaminado por artefactos conforme aumente el MVC, aumentando el error de los prototipos finales.

Respecto a la precisión en el número de unidades motoras descompuestas, también se observa una degradación de éste conforme aumenta el MVC (Fig. 20(e)). Esto puede ser debido a que

conforme aumenta el nivel de contracción, los potenciales de unidades motoras pequeñas o lejanas al electrodo son enmascarados por el creciente nivel de artefactos de otras unidades motoras.

Respecto al porcentaje de segmentos clasificados (Fig. 20(f)), se observa cómo éste es independiente del nivel de contracción voluntario al que se trabaje.

Entre estos, se puede concluir que el MVC óptimo con el que realizar descomposiciones (y por ello, con el que mejor puede funcionar toda la técnica del multiscanning) es el 2%, para el cual se obtiene la mayor precisión en la descomposición de los disparos y los prototipos con menor error en la forma de onda.

4.6 Conclusiones

Se ha explicado el fundamento teórico y demostrado el rendimiento de dos sistemas de descomposición para registros cortos (PHC y CTU), de duración entre 500 ms y 1 s. Además, se ha desarrollado un marco de evaluación para sistemas de descomposición totalmente objetivo, que permita observar la calidad de los trenes de disparo obtenidos y de sus prototipos correspondientes. Mediante este sistema se ha analizado el rendimiento de los sistemas de descomposición explicados, así como las versiones filtradas de éstos.

Con los resultados obtenidos en el apartado anterior se determinan los parámetros para los cuales se optimiza el rendimiento del sistema de descomposición:

- El valor óptimo de la ventana de exclusión se fija a 3.5 ms, para valores mayores de ésta el número de disparos que son incorrectamente eliminados aumenta, mientras que para valores menores aumenta el número de dobletes.
- Se obtiene un rendimiento óptimo de la descomposición cuando se purgan aquellos trenes con un número menor de disparos a 4, debido a que estos suelen ser repeticiones de otros trenes de disparo ya descompuestos.
- Conforme mayor sea la ventana de registro aumentará la calidad de los prototipos obtenidos. Aunque la precisión en la descomposición sea parecida, la mayor duración de los registros implica que el promediado del prototipo se realizará sobre un número mayor de disparos, mejorando el resultado final.
- Cuanto menor sea el nivel de MVC al que se realicen las descomposiciones mayor será la precisión en la obtención de los disparos, traduciéndose en un promediado realizado sobre más segmentos y obteniendo unos prototipos mejores y con un nivel de artefactos menor.

Capítulo 5. Síntesis del scanning-MUP por enlazado de MUPs

En este capítulo se explicará el fundamento teórico del algoritmo de enlazado de prototipos para la formación de señales de scanning-MUP, comentando las decisiones de diseño realizadas y las limitaciones que éstas puedan suponer. Por último, se explicará el sistema de evaluación diseñado para este algoritmo y los experimentos que permitan analizar el rendimiento de éste.

5.1 Objetivos

Como se ha explicado anteriormente, la técnica de multiscanning-EMG con una sola aguja estará dividida en dos procedimientos: la descomposición de los segmentos cortos de la señal EMG y el enlazado de los MUPs obtenidos en la descomposición.

El objetivo del algoritmo de enlazado es el de la obtención de múltiples señales de scanning-MUP a partir de los prototipos obtenidos en la descomposición (Fig. 21). Para ello, este algoritmo unirá estos prototipos (de los cuales se desconoce la unidad motora a la que pertenecen) obtenidos en cada posición del corredor del electrodo de scanning con aquellos prototipos de posiciones consecutivas que pertenezcan a su misma unidad motora.

Para poder analizar el rendimiento de este algoritmo, se separará la evaluación del funcionamiento de este del sistema de descomposición. En este capítulo se explicará el funcionamiento del algoritmo de enlazado y el rendimiento de este con los potenciales originales (ideales) de las unidades motoras. En el siguiente capítulo se comprobará el funcionamiento del sistema completo, obteniendo los prototipos en la descomposición y enlazándolos mediante este algoritmo.

Para el enlazado de los prototipos se utilizará una implementación del algoritmo denominado como greedy-exchange [24], éstos se basan en encontrar una solución a un problema mediante un proceso secuencial en el que a cada paso encuentran una solución óptima.

5.2 Algoritmo greedy-exchange de enlazado de MUPs

El algoritmo greedy-exchange a utilizar en este proyecto será una implementación del algoritmo definido por Sethi en [24], introduciendo algunas variaciones. En su aplicación, Sethi utilizaba este algoritmo para realizar el seguimiento de un punto de una imagen en imágenes consecutivas, conforme estas se iban moviendo y el punto se desplazaba, formando así una trayectoria que contenga el desplazamiento que sufre el punto en cada imagen (point-tracking).

En el marco de este trabajo, el algoritmo realizará una función parecida, en vez de puntos se realizará el seguimiento de la forma de onda de las unidades motoras conforme ésta varía en posiciones consecutivas, formando una trayectoria para cada unidad motora que darán lugar a la formación de señales de scanning-MUP. A continuación, se explicará el funcionamiento de este algoritmo.

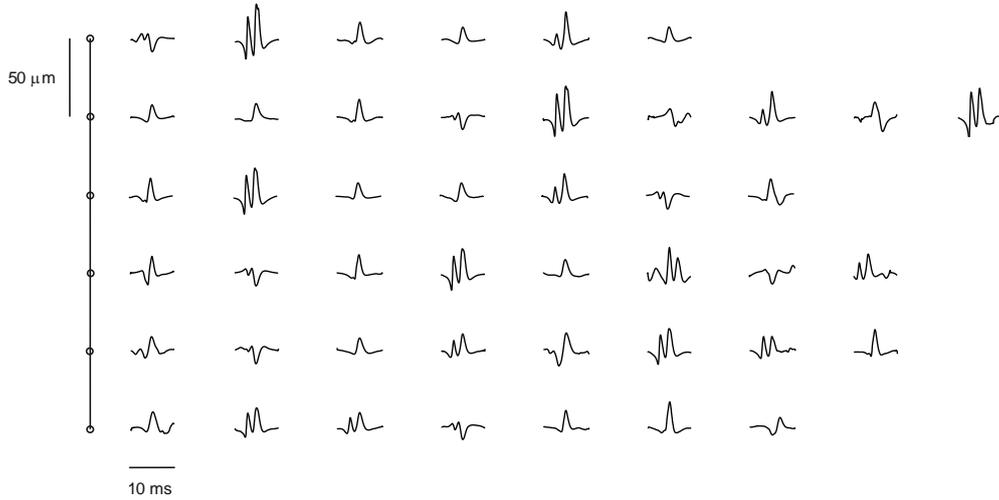


Fig. 21: Prototipos descompuestos en seis posiciones del corredor del electrodo de scanning distintas.

5.2.1 Algoritmo greedy de una sola pasada

5.2.1.1 Inicialización

Para cada posición se añaden tantas trazas vacías de forma que en cada una de ellas haya tantos potenciales como el doble de potenciales descompuestos en la posición en la que se hayan descompuesto el máximo número de potenciales. Estas trazas en la que todas sus muestras tienen un valor de 0 se denominarán trazas fantasma [25]. De esta forma, se posibilita que en cada posición, cada potencial real pueda ir unido a una traza fantasma. Las trazas fantasmas son necesarias ya que indicarán el inicio y el fin de las señales scanning-MUP obtenidas, cuando se alcance una posición en la que el potencial tenga una amplitud tan reducida de forma que no sea posible su descomposición, el algoritmo lo deberá unir con una traza fantasma y no con aquel potencial con el que más se le parezca.

Para reducir el posterior número de permutaciones que se tendrán que realizar en el siguiente procedimiento del algoritmo, se ordenan los potenciales de cada posición respecto a su amplitud de manera descendente, formando trayectorias ordenadas por la amplitud de los potenciales. Esto reducirá el número de intercambios que se deberán realizar en el algoritmo en el siguiente paso, ya que el potencial de mayor amplitud de una determinada unidad motora en una posición es probable que también siga siendo el mayor en la posición siguiente (ya que es poco probable cambios bruscos de amplitud tanto en los potenciales grandes como los pequeños).

5.2.1.2 Bucle de intercambio

Empezando desde la primera posición, se calcula la ganancia resultante entre realizar una permutación entre dos de los potenciales de la siguiente posición, realizando permutaciones de 2 en 2. Para una posición k , la ganancia que se obtiene mediante la permutación de dos potenciales en la siguiente posición ($k+1$), se define como la diferencia de la distancia entre los prototipos antes y después de realizar la permutación, de la siguiente manera:

$$G^{i(k),j(k)} = d_p^{I(k),j(k+1)} + d_p^{j(k),i(k+1)} - d_p^{i(k),i(k+1)} - d_p^{j(k),j(k+1)} \quad (26)$$

donde d_p es la distancia de un prototipo con el de la siguiente posición que marca su trayectoria. De esta forma, una ganancia negativa implica que las nuevas trayectorias formadas por las permutaciones realizadas tienen mayor distancia entre ellas que antes de realizar el cambio, mientras que una ganancia positiva implica que las nuevas distancias son menores que antes de realizar el cambio.

La distancia entre dos prototipos variará dependerá de si los prototipos provienen de la descomposición o de si alguno de ellos se trata de trazas fantasmas incluidas en la inicialización. Se define de la siguiente manera:

$$d_p = \begin{cases} 0, & y_i = y_j = 0 \\ d_{mup}, & y_i, y_j \neq 0 \\ d_{max}, & y_i \text{ o } y_j = 0 \end{cases} \quad (27)$$

Si ninguno de los dos prototipos son trazas fantasma, la distancia entre un prototipo en una posición y el de la posición siguiente, d_{mup} se define de la misma manera que en apartados anteriores, mediante la métrica de Nikolic y alineando previamente las formas de onda mediante el método de McGill (ecuación (10)).

Si uno solo de los prototipos es una traza fantasma, la distancia entre ambos será fijada al valor de una distancia umbral, denominada d_{max} . Esta distancia será esencial para el correcto funcionamiento del algoritmo, ya que determinará la capacidad de éste para detener la unión de potenciales y delimitar el scanning-MUP ya enlazado. Cuando la distancia entre un prototipo y el de la posición siguiente (ambos prototipos reales) sea mayor que d_{max} , el algoritmo unirá el prototipo de la posición actual con una traza fantasma en la siguiente posición.

Si los dos prototipos son trazas fantasmas, la distancia entre ellos será de 0, de forma que los prototipos fantasmas siempre se unan a otro prototipo fantasma en la posición siguiente, ya que cualquier intercambio entre ellos y un prototipo no fantasma producirá ganancia negativa.

Se calculan todos los intercambios posibles en una posición, y aquel con el que se obtenga la mayor ganancia será el que se realice. En una misma posición, se realizarán cambios iterativamente permutando los potenciales con los que se obtenga mayor ganancia hasta que se alcance un punto en el que con ninguna de las permutaciones se obtenga una ganancia positiva, en ese momento se dejará de realizar intercambios en esa posición y se pasará a la siguiente posición de registro.

Computacionalmente, se guardan las trayectorias formadas en una matriz bidimensional, con las filas correspondientes a los índices de los prototipos y las columnas con cada posición del registro en el corredor de scanning. Además, se guardan los alineamientos óptimos obtenidos en los cálculos de distancias entre los prototipos finalmente enlazados, para ser usados posteriormente.

En otras implementaciones del algoritmo [25] se realizan intercambios en ambas direcciones, hasta que la solución obtenida al final de cada pasada converja en una independientemente de hacia donde se realizan los intercambios. Para este algoritmo no será necesario ya que solo se realizan intercambios en la posición inmediatamente posterior, por lo que realizando intercambios en una dirección se llegará a una solución definitiva.

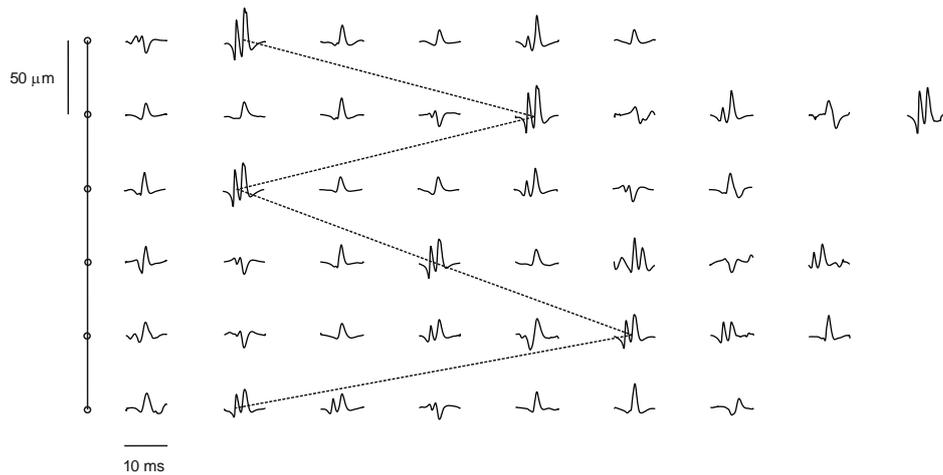


Fig. 22: Formación de una trayectoria entre aquellos prototipos identificados con el mismo índice en la matriz de permutaciones.

5.2.1.3 Formación de señales de scanning-MUP

Llegados a este punto, se tiene un conjunto de potenciales descompuestos en cada posición (Fig. 21) y una matriz de permutaciones que los relaciona. Con la combinación de ambas se procederá a la formación de las señales de scanning-MUP. Para ello, se unirán aquellos prototipos que tengan el mismo índice en la matriz de permutaciones, formando trayectorias (Fig. 22).

Aquellos prototipos que estén representados por un 0 en la matriz de permutaciones corresponderán con los prototipos fantasmas. Cuando un prototipo sea unido a una traza fantasma, se rellenará la señal de scanning-MUPs de trazas fantasma en el resto de posiciones (Fig. 23).

Con la matriz de desalineamientos calculada durante la fase de intercambios, se alinea cada uno de los prototipos mediante el algoritmo de McGill (Fig. 24). El alineamiento se realizará comenzando desde la posición en la que se encuentra el prototipo con mayor amplitud dentro de la señal de scanning-MUP, y luego alineando las posiciones consecutivas a ésta en ambas direcciones, hasta que acabe la señal de scanning-MUP. De esta forma, la señal final estará centrada respecto a su máximo total.

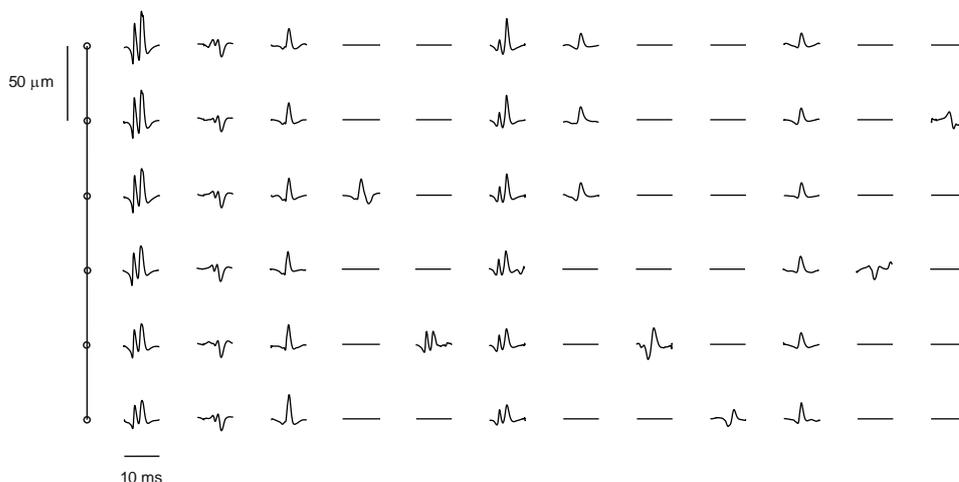


Fig. 23: Ordenación de los prototipos de acuerdo a las trayectorias formadas. Unión de varios de los prototipos con trazas fantasmas.

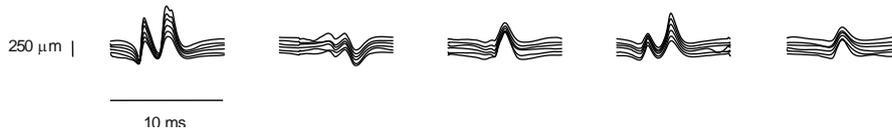


Fig. 24: Alineamiento de los prototipos enlazados en 6 posiciones concretas

En la Fig. 25 se observa la obtención de varias señales de scanning-MUP mediante este algoritmo. Cuando en una serie de prototipos enlazados se une el último a una traza fantasma, se rellena el resto de la señal (tanto antes del primer prototipo enlazado como después del último) con posiciones con trazas nulas. De esta forma, todas las señales obtenidas en el algoritmo tienen las mismas dimensiones, y se conserva la información espacial de los prototipos enlazados.

En la técnica de multiscanning EMG con dos agujas, se obtienen varias señales de scanning-MUP, pero éstas se obtendrán siempre a profundidades parecidas, en concreto, se obtendrán en posiciones cercanas a la posición de registro del electrodo de trigger. Con la técnica de multiscanning-EMG con una sola aguja, las señales obtenidas estarán repartidas a profundidades diferentes a lo largo del corredor del electrodo de scanning, ya que la descomposición se realiza a partir de los registros EMG registrados por este electrodo, que puede llegar a recorrer todo el músculo.

Sin embargo, en la técnica de multiscanning con varias agujas, las señales obtenidas son completas, delimitando claramente el territorio de estas e incluyendo unidades motoras que poseen fracciones. Para la técnica con una sola aguja, sin embargo, la mayoría de las soluciones estarán delimitadas, ya que conforme el electrodo de scanning se aleje de una unidad motora el sistema será incapaz de descomponerla, y por tanto, de enlazarla. Además, las unidades motoras compuestas por fracciones podrán llegar a separarse en dos soluciones, si estas son muy lejanas entre sí.

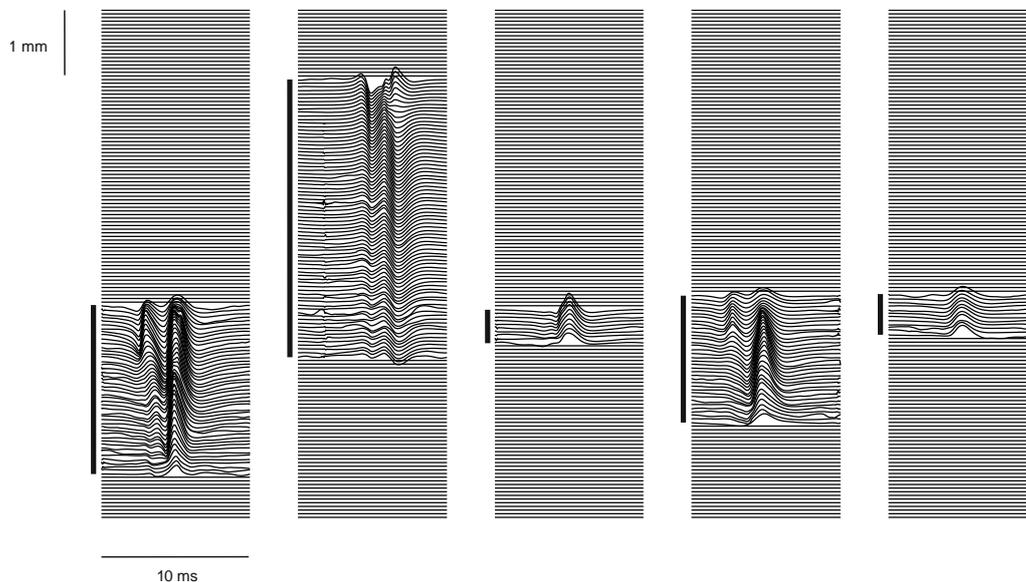


Fig. 25: Señales de scanning-MUP obtenidas mediante el algoritmo de enlazado para todo el corredor de registro

5.2.2 Análisis de distancias entre MUPs

Como se ha explicado anteriormente, para el enlazado de los prototipos en posiciones consecutivas se utilizará la distancia entre las formas de onda para definir la función de coste al realizar un intercambio entre dos de los prototipos. La métrica que se utilizará para medir la distancia entre dos prototipos será la distancia de Nikolic [21], ya que al igual que en la descomposición, se busca que la distancia entre dos prototipos de unidades motoras distintas sea lo más grande posible.

Para determinar si un sistema que realice uniones mediante criterios de distancia es correcto, se realiza un análisis de la distancia entre los prototipos de una posición con los de la siguiente. Para ello, se calculan las distancias entre cada uno de los prototipos de una posición y todos los prototipos de la siguiente. Trabajando en simulación, se conoce la pertenencia de cada prototipo a su unidad motora correspondiente, por lo que será posible obtener la relación entre la distancia de un prototipo al de su misma unidad motora y la distancia con el resto de los prototipos. Para que el enlazado sea posible, la gran mayoría de los prototipos deben tener como aquel prototipo al que poseen menor distancia al de su misma unidad motora. Si no ocurriese esto, el algoritmo de enlazado formaría trayectorias compuestas por prototipos de unidades motoras diferentes, formando señales de scanning-MUP que no representen el potencial de una unidad motora.

En la Fig. 26(a) se representan las distancias entre prototipos para una realización concreta del músculo, comparando las distancias de todos los prototipos al correspondiente suyo en la siguiente posición, al que más se le parezca del resto y a la media de las distancias de todos. Se observa que, independientemente de la energía del prototipo, tendrá como aquel al que tiene una menor distancia el suyo propio. Esto se observa también en la Fig. 26(b), en la que se representa la diferencia entre el potencial en la siguiente posición y el que menor distancia tiene del resto, de forma en los casos en los que esta distancia fuese negativa, un potencial de una unidad motora se parecería más al de otra unidad motora que al suyo propio en la siguiente posición. Esto supone que a la hora de hacer permutaciones en el enlazado, los intercambios se realizarán de tal forma que las trayectorias formadas corresponderán casi siempre con prototipos de la misma unidad motora.

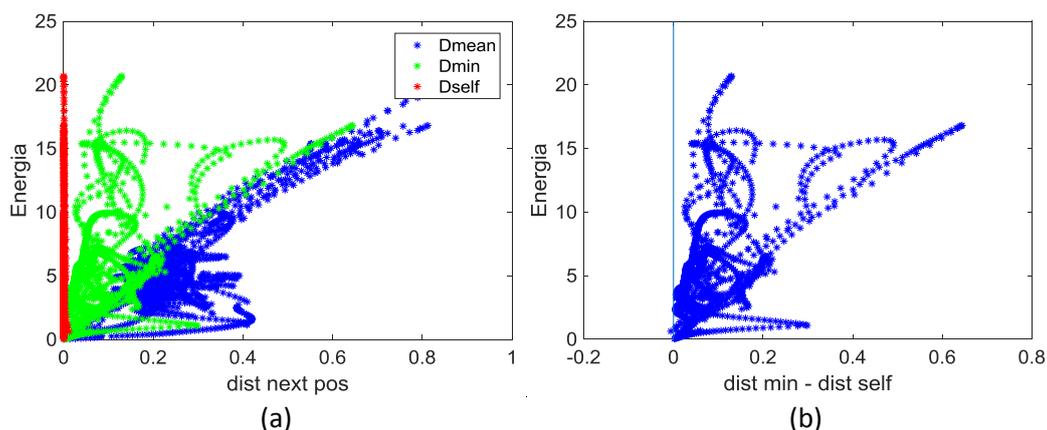


Fig. 26: Distancias de cada potencial de una unidad motora con su propio potencial en la posición siguiente (rojo), la media de todos los potenciales en la posición siguiente (azul), y el potencial con el que tiene menor distancia que no es el suyo propio (verde) (a). Diferencia entre la distancia al suyo propio y aquel con el que posee menor distancia del resto (b).

En realidad, al trabajar en primera instancia con los prototipos ideales, la distancia entre un prototipo y el de la siguiente posición proviene completamente de la variación espacial de los MUPs de las unidades motoras. Como se explicará en el capítulo siguiente, trabajando con señales reales, el ruido y artefactos presente en los prototipos hará que se reduzca la distancia entre prototipos de unidades motoras diferentes, incrementando el número de veces que un prototipo tendrá como aquel de distancia mínima el de otra unidad motora.

Por ello, aunque trabajando con los prototipos ideales no sea necesario, cuando se trabaje con prototipos reales obtenidos en descomposición será necesario la unión de los prototipos con trazas fantasma para reducir el número de errores en los enlaces. Esto será fijado con el parámetro d_{max} , a partir del cual se realizará el enlazado de un prototipo a una traza fantasma cuando la distancia mínima de un prototipo a otro sea mayor que el valor de este parámetro.

Una distancia umbral demasiado elevada supondrá que el algoritmo es muy permisivo a la hora de realizar uniones con otros prototipos, por lo que intentará unir realizar uniones siempre que pueda y llegando a enlazar prototipos de diferentes unidades motoras frecuentemente. De esta forma, si se acaba enlazando el final de una unidad motora con el principio de otra, se podrían llegar a unir varias unidades motoras en una sola señal de scanning-MUP (Fig. 27).

Sin embargo, reducir demasiado este umbral implicará que se dejarán de realizar uniones antes de lo que sería apropiado. De esta forma, un mismo potencial de una unidad motora puede ser dividido en varias soluciones diferentes (Fig. 28). Esto también implicará que las soluciones tendrán un número menor de enlazados con prototipos de otras unidades motoras diferentes, ya que en vez de realizar la unión con otro prototipo intentará realiza la unión con una traza fantasma.

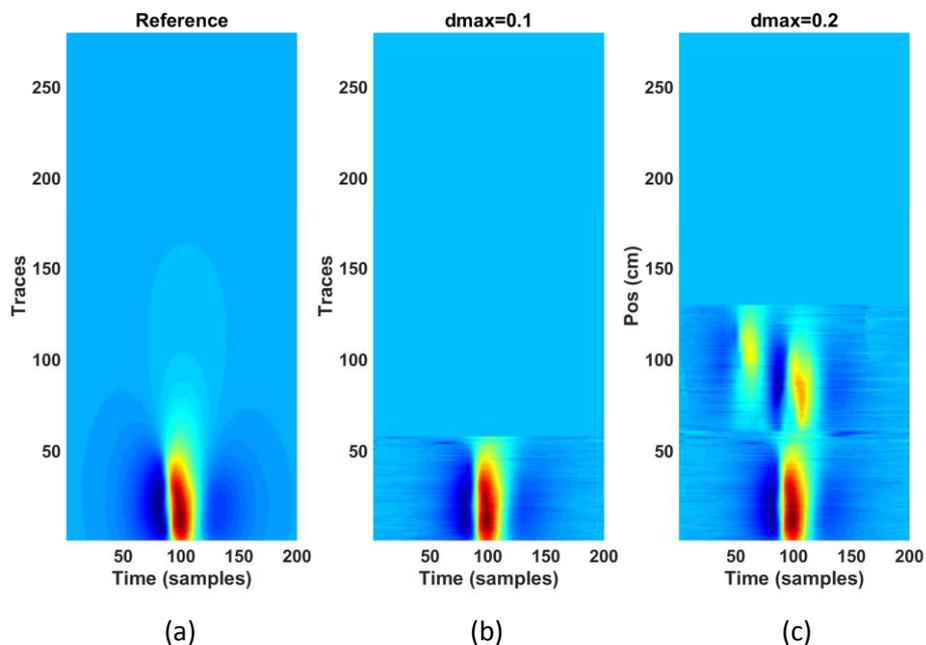


Fig. 27: Influencia del parámetro d_{max} en la obtención de una unidad motora de referencia (a). Una distancia demasiado elevada (c), implica que se podrán unir diferentes unidades motoras en una misma señal de scanning-MUP. Con una distancia correcta (b), el algoritmo delimitará las unidades motoras correctamente.

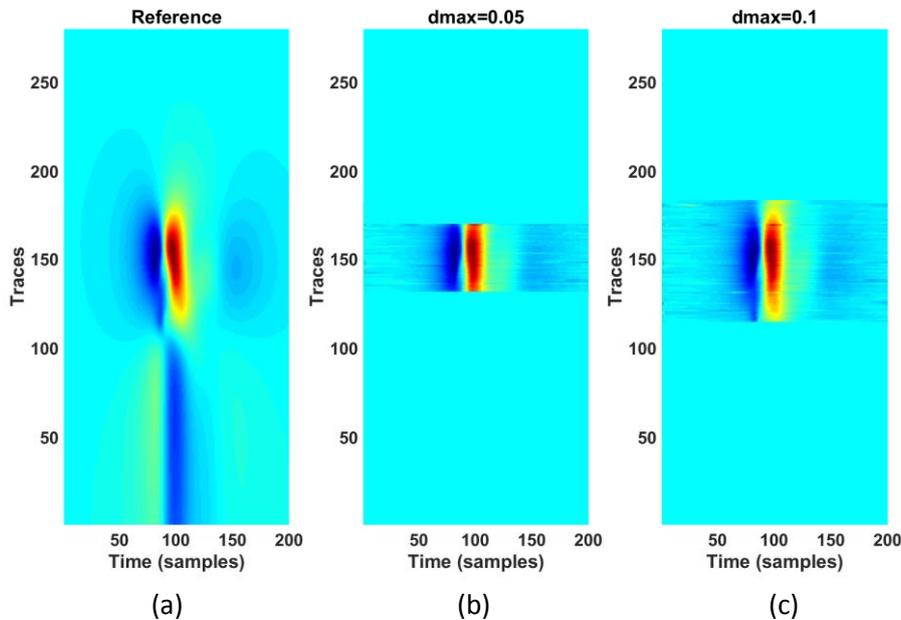


Fig. 28: Influencia del parámetro d_{max} en la obtención de una unidad motora de referencia (a). Con una distancia apropiada (c), el enlazado se detendrá en la posición correcta. Con una distancia demasiado corta, el enlazado se detendrá antes de tiempo, obteniendo un MUP recortado (b).

Por tanto, la determinación de un umbral óptimo será necesaria para que el sistema pueda delimitar las unidades motoras de forma correcta y que no se produzcan mezclas entre ellas. Ésta determinación será realizada mediante un experimento que se explicará en el siguiente capítulo, cuando se trabaje con los prototipos reales obtenidos en descomposición.

5.2.3 Análisis del alineamiento

En el resto de técnicas de scanning, se utilizaba como referencia temporal un electrodo de trigger, que permitía que los registros realizados en diferentes posiciones estuviesen sincronizados respecto al momento de disparo de la unidad motora. Sin embargo, debido a que en esta técnica no se utiliza el electrodo de trigger, no habrá ninguna referencia temporal sobre la que sincronizar los registros, obteniendo señales de scanning-MUP en la que los prototipos estarán desalineados respecto a los de sus posiciones consecutivas. Cada uno de los prototipos obtenidos en descomposición estará centrado sobre su máximo, pero éste no tiene por qué representar el instante en el que la unidad motora dispara.

En la mayoría de los casos, este desalineamiento será acumulativo. Además, éste será notable en aquellas unidades motoras que posean fracciones, donde el potencial de cada una de ellas llega al electrodo en instantes temporales diferentes debido a la diferencia en la posición de sus zonas de inervación.

Para ello, en la reconstrucción de la señal, se realiza un alineamiento en el que los prototipos consecutivos de una trayectoria estarán alineados en aquellos puntos en los que se produzca la menor distancia entre ellos (Fig. 29). Esta forma de alinear no asegura que el alineamiento final sea el de la señal original, pero consigue reducir el desalineamiento global obteniendo una forma de onda más parecida a la original que sin utilizar ningún alineamiento.

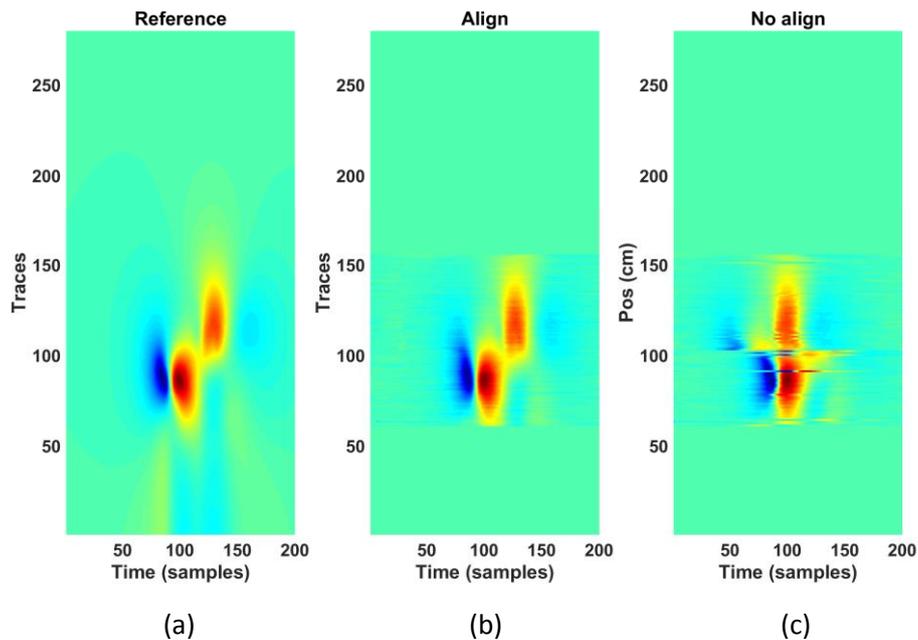


Fig. 29: Alineamiento de los prototipos en aquellos puntos en los que se obtiene menor distancia con el de su siguiente posición (b). Comparación con no realizar ningún tipo de alineamiento (c) y el potencial de la unidad motora original (a).

El alineamiento se realiza comenzando por la posición de la señal en la que se encuentra el prototipo con mayor amplitud, de esta forma la señal quedará centrada respecto a su máximo global.

5.2.4 Análisis de la fragmentación de resultados y purga

Un inconveniente de la técnica de multiscanning-EMG con una sola aguja es que un mismo potencial de una unidad motora puede estar dividido en varias soluciones de scanning-MUP distintas, cada una conteniendo parte del potencial a diferentes profundidades del registro. En realidad, de todo el potencial de la unidad motora, el objetivo del algoritmo será obtener el núcleo de la unidad motora. Esto es, obtener el potencial en las posiciones de registro en las que se sitúan las fibras de la unidad motora, normalmente asociadas a las posiciones en las que el electrodo está dentro del territorio de la unidad motora. Mientras este núcleo sea devuelto en una misma solución de scanning-MUP no habrá problema, sin embargo, si este se divide en varias soluciones será problemático, ya que se podrá dar como solución del algoritmo una solución que no representa a la unidad motora entera.

Debido a la naturaleza del algoritmo de greedy-exchange se obtienen numerosas señales de scanning-MUP como solución, estas pueden llegar a ser del orden de cientos. De todas las soluciones, el objetivo de la técnica será obtener las señales scanning-MUP de las unidades motoras por las que se ha atravesado su territorio, ya que son las de mayor interés a nivel fisiológico. Para ello, se implementa un sistema de purga cuyo objetivo será eliminar el resto de señales que no sean éstas del conjunto final.

La purga se diseñará como si fuese un problema de clasificación, extrayendo características de las soluciones y buscando aquellas que aumenten la separabilidad entre las unidades motoras cuyo territorio es atravesado y las que no. Aquellas soluciones que no superen un determinado umbral para una de las características serán eliminadas del conjunto final.

En procesos reales, la purga será un proceso no supervisado, en el que se desconoce el número de soluciones que se deberían obtener como salida de ésta. Trabajando en simulación, será posible etiquetar a las soluciones con la unidad motora a la que pertenecen (a partir del etiquetado de los prototipos en descomposición), y a la parte de éstas que lo hacen (ya que se conoce el tamaño de las unidades motoras y dónde están centradas). Para evaluar la purga, éstas se etiquetarán de 3 maneras diferentes:

- Soluciones que representan unidades motoras que son atravesadas por el electrodo y que contienen la parte de éstas en la que son atravesadas (el territorio de la unidad motora). Obtener estas soluciones es el objetivo de la técnica de multiscanning por lo que la purga no deberá eliminar ninguna de éstas.
- Las mejores soluciones que representen a unidades motoras cuyo territorio no es atravesado pero que superan el umbral de Quiroga y podrían llegar a recuperarse. El objetivo será eliminarlas del conjunto final pero si aparece alguna en éste no supondrá un problema mayor.
- El resto de soluciones. Podrán ser soluciones repetidas que representen parte de una unidad motora que aparece más completa en otra solución, o una solución formada solo por potenciales de cánula o por uniones de potenciales de diferentes unidades motoras. El objetivo de la purga será eliminar todas estas soluciones.

Una vez etiquetadas las soluciones se procederá a extraer características sobre éstas para observar con cuales de las características se consigue separar las soluciones objetivo de la purga y el resto.

5.2.4.1 Extracción de características

En un principio se valoró la posibilidad de utilizar dos parámetros para realizar la purga: el rango de la señal, definido como la diferencia entre el valor máximo y mínimo en la posición en la que la señal tiene más amplitud y la longitud de la señal, siendo el número de posiciones en las que el algoritmo ha realizado enlaces para esa solución.

Existe una correlación entre estos dos parámetros y la pertenencia de la solución al conjunto de unidades motoras cuyo territorio es atravesado por el electrodo. Al atravesar el territorio, el potencial captado por el electrodo será mayor ya que la distancia de este a las fibras será menor que al no atravesar el territorio, por tanto la amplitud las soluciones que pertenezcan a unidades motoras atravesadas por el electrodo será mayor. Respecto a la longitud, las soluciones pertenecientes a estas unidades motoras suelen tener mayor longitud debido a que el núcleo suele ser enlazado completamente, mientras que las soluciones erróneas suelen estar compuestas de pocos potenciales ya que tienen mayor tendencia a ser enlazadas con una traza fantasma y cortarse el enlazado.

Observando las distribuciones de estos parámetros de amplitud y longitud de las señales (Fig. 30), se observa cómo las unidades motoras atravesadas por el territorio tienden a tener mayores valores tanto de amplitud como de longitud.

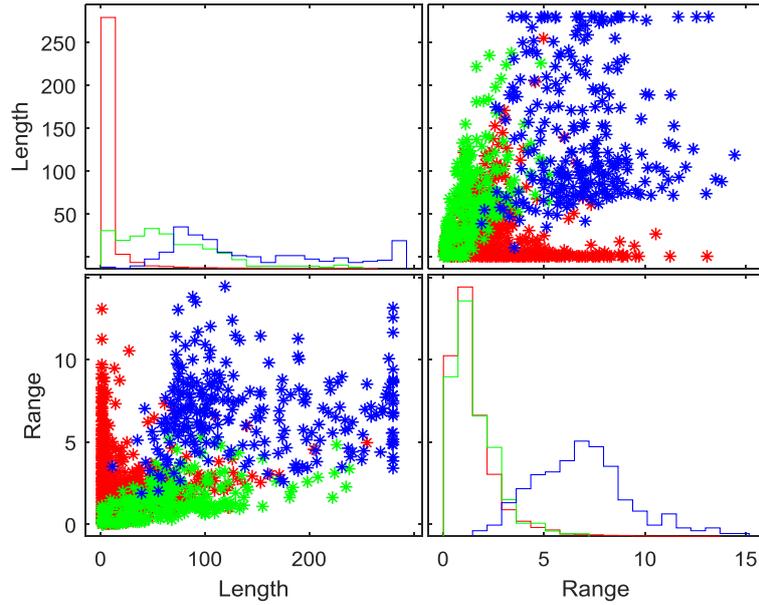


Fig. 30: Histogramas y diagramas de dispersión para la longitud y rango de las soluciones obtenidas. Las distribuciones azules representan a las soluciones de unidades motoras que son atravesadas por el electrodo, las verdes representan a las mejores soluciones de aquellas unidades que superan el umbral de descomposición y las rojas al resto de soluciones.

Sin embargo, existen otras soluciones que no son atravesadas por el electrodo pero su longitud es muy elevada. Estas pueden estar formadas únicamente por potenciales correspondientes a la cánula del electrodo o podrán ser soluciones en las que se están realizando enlaces con más potenciales de los que debería y será de interés eliminarlas. Por tanto, no es necesario utilizar toda la solución para la extracción de características ya que las posiciones en las que la señal es de cánula o potenciales que no forman parte del núcleo y tienen una amplitud muy reducida no serán de igual importancia que aquellas posiciones del núcleo de la unidad motora.

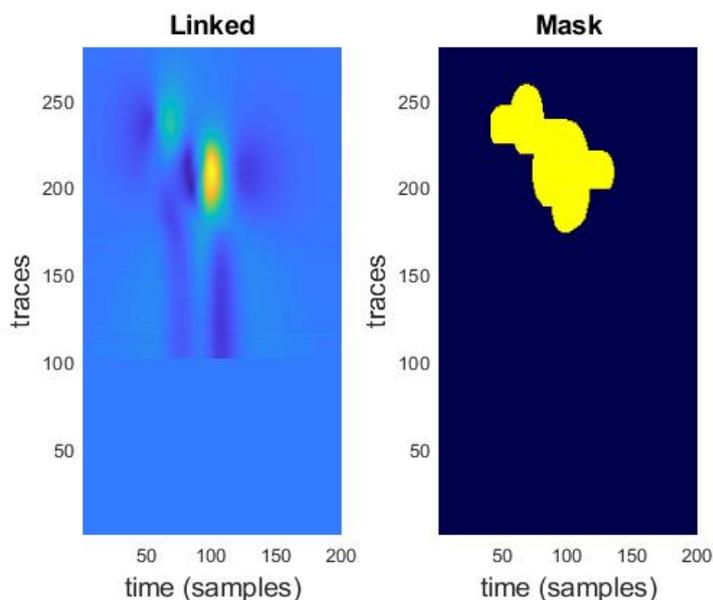


Fig. 31: Obtención de la máscara únicamente sobre el núcleo de la señal enlazada.

Por ello se utilizará un algoritmo que detecte la zona de señal de las soluciones desarrollado por el grupo de investigación de ingeniería biomédica. Este algoritmo devuelve una máscara sobre la zona en la que el potencial es relevante (Fig. 31), de forma que la extracción de características pueda realizarse sobre la zona relevante de las señales y no sobre todas ellas. El cálculo de la zona de la señal se basa en la obtención de dos máscaras diferentes sobre la señal.

Para la primera máscara se aplica sobre la señal un filtrado paso banda a la señal en la dimensión temporal (con $f_L=133$ Hz y $f_H=5$ KHz) con el objetivo de eliminar posibles artefactos que contenga ésta. A continuación, se umbraliza sobre el valor absoluto de la señal obtenida (con un valor del umbral del 2% del máximo de la señal), obteniendo una máscara que representa la zona de la señal en la con potenciales de amplitud relevante. Posteriormente se aplica una operación de dilatación sobre la imagen binarizada para compensar el efecto de la umbralización, utilizando como elemento estructural un disco.

La segunda máscara se utilizará para detectar zonas donde la señal pueda tener una amplitud lo suficientemente alta pero no ser parte de la zona relevante de la señal, como por ejemplo las cánulas. Por ello, esta segunda máscara es calculada sobre la derivada de la señal en la dimensión espacial, ya que los potenciales registrados por la cánula se caracterizarán por ser similares en todas sus posiciones. Sobre la derivada, se realizará una umbralización y posterior dilatación similar a la de la primera máscara. Sobre esta máscara se calculan las posiciones superior e inferior en las que ésta contiene al menos alguna de sus muestras a 1. La máscara final se tratará de la primera máscara acotada por los valores límites calculados de la segunda máscara.

Una vez se han enmascarado las señales se volverán a extraer los parámetros de rango y longitud de la solución sobre la solución enmascarada. Observando estos parámetros tras enmascarar las señales (Fig. 32), se observa cómo prácticamente todas las soluciones que representan unidades motoras que son atravesadas por el electrodo tienen una máscara que se extiende en varias posiciones de registro, mientras que del resto de soluciones o son eliminadas una gran parte (longitud de la solución enmascarada 0) o la duración espacial de la máscara en estas es muy reducida. De igual forma, observando el rango de las señales enmascaradas se observa cómo han eliminado gran parte de las soluciones cuyo territorio no es atravesado por el electrodo. Por tanto, extrayendo los parámetros de las soluciones enmascaradas se obtiene una mayor separabilidad entre las soluciones de las unidades motoras atravesadas por el electrodo y el resto.

También se estudia la posibilidad de realizar la purga con otros parámetros, el rise time y la pendiente. El rise time se define como el tiempo que tarda el potencial entre ascender entre el mínimo local anterior a su máximo y éste. Para cada solución, se obtendrá el rise time en aquella posición en la que éste sea mínimo. Cuanto más cerca estén las fibras generadoras del potencial del electrodo más rápido se observará el incremento de su potencial y por tanto menor será su rise time. De esta forma, el rise time podrá ser utilizado para identificar aquellas unidades motoras cuyo territorio es atravesado por el electrodo, ya que sus valores de rise time serán menores.

Sobre el mismo par de puntos de los potenciales sobre los que se calcula el rise time se calcula su pendiente. En este caso se obtiene la pendiente máxima entre la calculada en todas las posiciones de la solución. Las unidades motoras que sean atravesadas por el electrodo tendrán una pendiente mayor, ya que además de tener un rise time menor, la amplitud de estos potenciales será mayor ya que su atenuación hasta llegar al electrodo habrá sido menor.

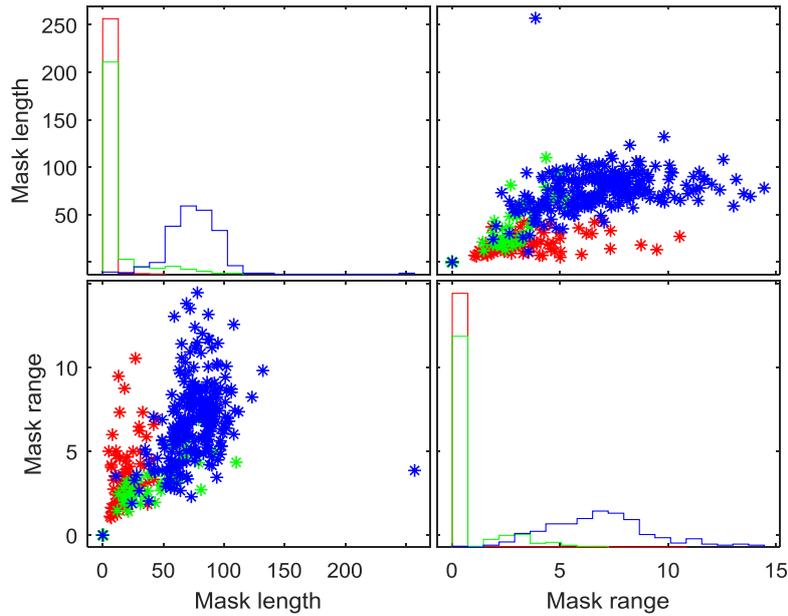


Fig. 32: Histogramas y diagramas de dispersión para la longitud y rango de las soluciones enmascaradas obtenidas. Las distribuciones azules representan a las soluciones de unidades motoras que son atravesadas por el electrodo, las verdes representan a las mejores soluciones de aquellas unidades que superan el umbral de descomposición y las rojas al resto de soluciones.

Aquellas soluciones en las que no ha sido posible obtener el rise time y la pendiente (ya que no ha sido posible localizar un mínimo local anterior a su máximo) se les adjudican un valor arbitrario de estos para separarlos del resto de soluciones. Mediante estos parámetros también se observa una correlación entre éstos y el hecho de que el electrodo atravesase la unidad motora a la que pertenecen las soluciones, en concreto, en estos casos se observa un rise time menor y una pendiente mayor (Fig. 33). Aunque la separabilidad de estas soluciones respecto a estos parámetros parece menor que las obtenidas con el rango y la longitud de las soluciones enmascaradas.

Observando las distribuciones de los parámetros estudiados, se establece que las características con las que se obtiene mayor separabilidad entre soluciones son la longitud y el rango de las señales enmascaradas, por tanto, la purga será realizada con éstas. A continuación se establecerán los umbrales a partir de los cuales se eliminarán las soluciones que no los sobrepasen.

El umbral de la longitud se establece como 20 posiciones, debido a que posiciones consecutivas del corredor del electrodo de scanning están separadas $50 \mu\text{m}$ entre sí, este umbral equivale a una distancia de 1 mm. En las distribuciones de la Fig. 32, se observa cómo purgando mediante este valor se conseguirían eliminar gran parte de las soluciones que no contienen el núcleo, mientras que de las que sí lo contienen, el número de ellas que serían eliminadas sería muy reducido. Debido a las dimensiones de la superficie elíptica del electrodo simulado ($150 \times 580 \mu\text{m}$) [26], se asume que la aportación de ninguna fibra tendrá una anchura espacial de más de 1 mm. Las soluciones que no sobrepasen este umbral se asumirán soluciones incompletas y serán purgadas.

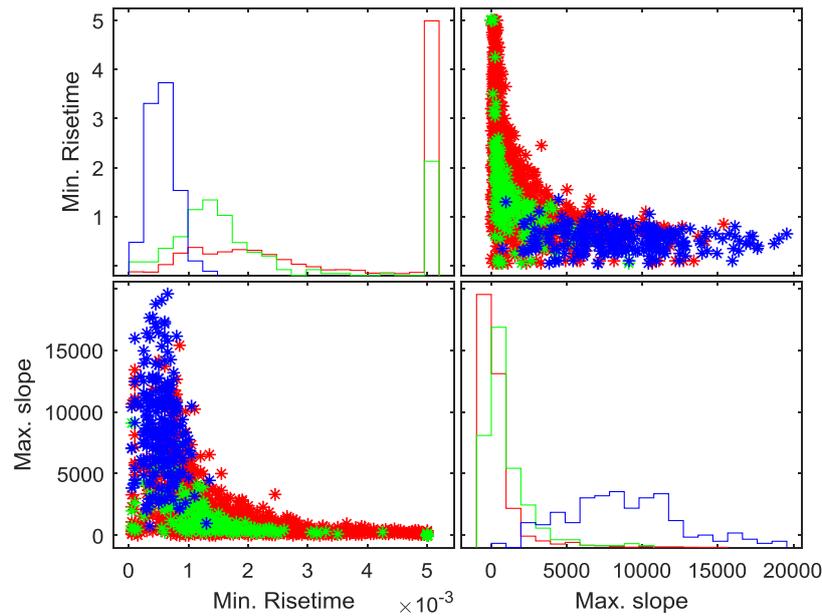


Fig. 33: Histogramas y diagramas de dispersión para el rise time y la pendiente de las soluciones obtenidas. Las distribuciones azules representan a las soluciones de unidades motoras que son atravesadas por el electrodo, las verdes representan a las mejores soluciones de aquellas unidades que superan el umbral de descomposición y las rojas al resto de soluciones.

Respecto a la amplitud, se establece un umbral de 2.5, obtenido experimentalmente. Observando las distribuciones de la Fig. 32, se deduce que de esta forma se conseguirán eliminar gran parte de las soluciones que no contienen el núcleo de ninguna unidad motora. Las soluciones que no superen este umbral serán soluciones que contienen potenciales que pertenecen a unidades motoras lejanas al espacio que atraviesa el electrodo de scanning.

Los umbrales han sido elegidos de tal forma que no sean muy restrictivos a la hora de eliminar las soluciones correctas (las unidades motoras que atraviesa el electrodo), intentado conservar todas éstas sin importar obtener en el conjunto final alguna solución que no pase por el territorio pero que sea lo suficientemente cercana.

5.3 Evaluación

Al igual que en la descomposición, es necesario un sistema de evaluación para el algoritmo de enlazado para analizar el rendimiento de éste, que evalúe la calidad de las señales obtenidas. Trabajando en simulación, se conocerán las unidades motoras que componen los potenciales de cada una de las posiciones de las señales de scanning-MUP obtenidas, por lo que será posible la implementación de un sistema que pueda evaluar el funcionamiento del enlazado.

5.3.1 Asociación de scanning-MUPs enlazados y de referencia

Para las señales de scanning-MUP simuladas, se crea un conjunto de referencia que contiene a todas aquellas señales que podrían llegar a ser obtenidas. Para que una señal sea considerada como obtenible, los potenciales de la unidad motora a la que pertenece deben superar en al menos una posición el umbral utilizado en la segmentación. Además, en el conjunto de referencia se etiquetan aquellas unidades motoras que en algún momento son atravesadas por el electrodo de scanning (Fig. 34).

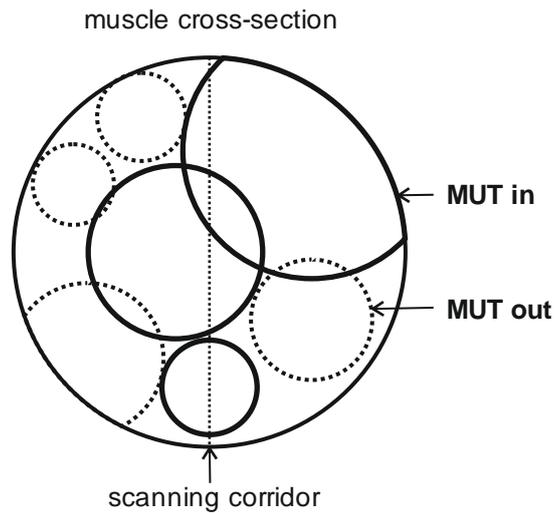


Fig. 34: División de las unidades motoras en fuera o dentro del territorio según sean atravesadas por el electrodo o no.

Una vez obtenido el conjunto de referencia, se realiza la correspondencia de éste con el conjunto de soluciones del algoritmo. Una solución del conjunto final se asignará a aquella del conjunto de referencia que corresponda con la unidad motora que aparezca un mayor número de veces en sus prototipos enlazados. Para las unidades motoras cuyo territorio es atravesado por el electrodo, este número de prototipos se contará solo para aquellas posiciones del núcleo. Para las que no, se contará el número de prototipos sobre todas las posiciones enlazadas de la solución.

5.3.2 Figuras de mérito

Una vez obtenida la correspondencia entre cada solución obtenida del algoritmo con las señales de scanning-MUP originales de las unidades motoras, se pasará a evaluar cada una de estas.

5.3.2.1 Precisión, completitud y unicidad

A la hora de comparar una posición de una solución del algoritmo de enlazado con la correspondiente de su referencia, se obtienen 3 tipos de resultados:

- Verdaderos positivos (TP: true positives): el prototipo de la solución corresponde al de la unidad motora de referencia
- Falsos negativos (FN: false negatives): el prototipo de la solución corresponde a otra unidad motora distinta de la de referencia.
- Falsos positivos (FP: false positives): cuando en una posición no se ha realizado la unión un prototipo con el correspondiente en la siguiente posición pero debería haberse realizado.

A continuación, se explican 3 figuras de mérito (precisión, completitud y unicidad) para la evaluación de la calidad de cada una de las soluciones del algoritmo de enlazado.

La precisión mide el porcentaje de segmentos dentro del núcleo que han sido enlazados correctamente, de la siguiente manera:

$$A = TP / (TP + FP + FN) \quad (\text{sobre el núcleo de la unidad motora}) \quad (28)$$

Lógicamente, la precisión se calculará solo en aquellas unidades motoras cuyo territorio es atravesado por el electrodo, y en éstas, en aquellas posiciones en las que lo hace (Fig. 35 (c)).

La completitud mide el porcentaje de segmentos que ha sido enlazados correctamente en una solución del algoritmo de enlazado. A diferencia de la precisión, está evaluación se realizará sobre el conjunto de posiciones que se podrían haber enlazado si el proceso fuese perfecto, es decir, sobre el número de posiciones en las que el potencial de la unidad motora original supera el umbral de segmentación.

$$C = TP / (TP + FP + FN) \quad (\text{sobre } MUP^k > Uthr^k) \quad (29)$$

La completitud servirá para evaluar la calidad de la señal en todas las posiciones en las que el umbral se sobrepasa, no solo en el núcleo de éstas (Fig. 35 (d)).

La unicidad es el porcentaje de la solución que pertenece a la unidad motora de correspondencia (Fig. 35 (e)). Este parámetro se calculará para todas las soluciones teniendo en cuenta todas sus posiciones.

$$U = TP / (TP + FP) \quad (\text{sobre toda la solución}) \quad (30)$$

Mediante estas figuras de mérito se permitirán identificar diferentes errores en el enlazado de los prototipos, tales como la unión de varias unidades motoras en una sola solución o la obtención de soluciones que representen una unidad motora incompleta.

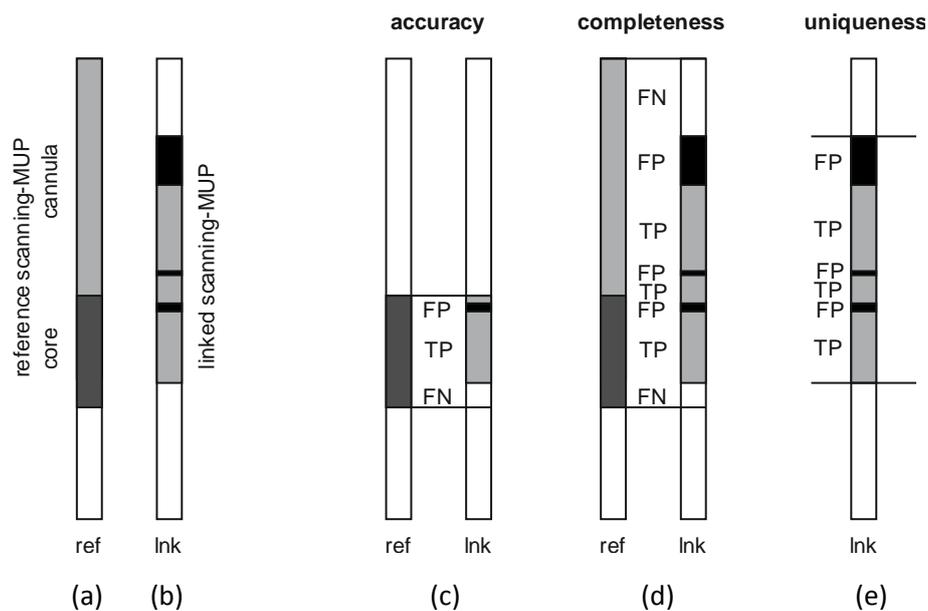


Fig. 35: Figuras de mérito para la evaluación del multiscanning. Señal de referencia (a) y su territorio dividido en núcleo y cánula. Señal obtenida en el enlazado (b), con potenciales de dos unidades motoras distintas. Evaluación de la precisión de la solución obtenida con el núcleo delimitado por la de referencia (c). Evaluación de la completitud en todas aquellas posiciones en las que se supera el umbral de descomposición (d). Evaluación de la unicidad para toda la solución obtenida (e).

5.3.2.2 Desalineamiento

A continuación, se definen dos figuras de mérito para la evaluación del desalineamiento de la solución obtenida respecto al potencial de la unidad motora original, como se ha explicado en apartados anteriores, este desalineamiento es producido por la ausencia de una referencia temporal al realizar el registro (función realizada por el electrodo de trigger en otras técnicas de scanning-EMG).

La primera de ellas evaluará el desalineamiento medio entre posiciones consecutivas de la solución obtenida y el potencial de la unidad motora original. Para ello, se evalúa el desalineamiento posición a posición entre una solución obtenida y su correspondiente en el conjunto de referencia, únicamente en aquellas posiciones que han sido correctamente enlazadas. Se define cómo:

$$M = \sum_{k=correct} |D_{fit}(k) - D_{fit}(k + 1)| / L_{correct} \quad (33)$$

donde D_{fit} es el desalineamiento de cada posición de la solución con su correspondiente del potencial original y $L_{correct}$ el número de enlazados realizados correctos para esa solución.

La segunda figura de mérito evaluará el desalineamiento global de toda la solución obtenida respecto a la original, permitiendo observar la influencia total del desalineamiento acumulativo entre posiciones. Para ello se realiza la diferencia entre el desalineamiento en aquellas dos posiciones que están más desalineadas respecto al potencial original de la unidad motora, una con el mayor desalineamiento positivo y la otra con el mayor desalineamiento negativo:

$$MD = \max(D_{fit}) - \min(D_{fit}) \quad (34)$$

De esta manera, se obtienen dos figuras de mérito que evalúan el desalineamiento de la técnica de multiscanning-EMG con una sola aguja (el cual es uno de los mayores inconvenientes de ésta) independientemente del rendimiento del algoritmo de enlazado, ya que solo se evaluará en aquellas posiciones en las que el enlazado ha sido correcto.

5.3.2.3 Error en la forma de onda

Esta figura de mérito evaluará el error en la forma de onda de las soluciones obtenidas con la técnica de multiscanning-EMG con una sola aguja respecto a los potenciales de unidad motora originales. Se define como un error cuadrático medio entre la solución obtenida, Z , y su correspondiente señal de referencia, Z_{ref} , normalizado a la potencia total de la señal original:

$$E = \sum_n \sum_k |Z[n, k] - Z_{ref}[k, n]|^2 / \sum_n \sum_k |Z_{ref}[k, n]|^2 \quad (35)$$

Cuando se trabaje con el sistema completo (capítulo 6), se analizarán los diferentes componentes que contribuyen al error en la forma de onda de la solución obtenida respecto a la solución de referencia. Por ello se calcularán diferentes versiones de esta figura de mérito que permitan identificar en qué medida afecta cada componente de error al error total. Las principales componentes de error serán las siguientes:

- Errores en el enlazado. Éstos podrán ser tanto recortes en la señal de scanning-MUP por enlazado prematuro con una traza fantasma o posiciones en las que se ha enlazado con prototipos de unidades motoras diferentes a la que corresponde.
- Errores provenientes de los prototipos de descomposición, debido a artefactos presentes en la señal EMG o a posibles errores en la detección de los disparos (falsos negativos y falsos positivos).

- Errores provocados por el desalineamiento de los prototipos enlazados en diferentes posiciones al no existir ninguna referencia temporal.

Para analizar la contribución de cada uno de éstos, el error podrá ser calculado variando dos parámetros: la zona sobre la que se calcula y el alineamiento respecto a la señal scanning-MUP de referencia.

La zona de cálculo del error podrá estar determinada por la intersección de la máscara del potencial original y la máscara de la solución obtenida o sobre la unión de estas. Realizando el cálculo sobre la intersección de las máscaras, se conseguirá reducir el error provocado por errores en el enlazado, ya que zonas de la solución en las que no se han realizado enlazados no serán evaluadas. Calculando el error sobre la unión de las máscaras, zonas que deberían haber sido enlazadas y no lo han sido serán evaluadas, contribuyendo al error en la forma de onda.

Para la evaluación de la influencia del alineamiento se podrá realizar el alineamiento entre los scanning-MUPs obtenidos como solución del algoritmo y sus correspondientes scanning-MUPs de referencia de dos formas. En la primera de ellas se realizará un alineamiento global del scanning-MUP solución con la referencia, mediante el cálculo de una correlación entre ambas señales únicamente en la dimensión temporal. Al realizar el alineamiento de la solución entera en bloque, el desalineamiento de ésta con el potencial de la unidad motora original se conservará.

En la segunda forma se realizará un alineamiento posición a posición del scanning-MUP solución con su referencia correspondiente, de forma que se reduzca drásticamente el desalineamiento respecto a la señal de referencia en cada una de las posiciones. De esta forma se podrá observar el valor de otras fuentes de error distintas al desalineamiento.

En la tabla 1 se recogen las diferentes versiones de esta figura de mérito y las componentes de error dominantes que representan cada una de ellas.

Zona de cálculo \ Alineamiento	Alineamiento posición a posición	Alineamiento global
Intersección máscaras	E_{noise} , error de los artefactos obtenidos en descomposición	E_{align} , error provocado por desalineamientos respecto al potencial original
Unión máscaras	E_{link} , error provocado por fallos en el algoritmo de enlazado	E_{total}

Tabla1. Diferentes versiones de la figura de mérito E, que evalúa el error en la forma de onda de la solución obtenida.

5.3.2.4 Número de unidades motoras obtenidas

Al igual que en la descomposición, esta figura de mérito evalúa cómo de exacto es el número de soluciones finales del algoritmo, comparadas con las que contiene el conjunto de referencia. Se define de la siguiente manera:

$$N = N_{TP} / (N_{TP} + N_{FP} + N_{FN}) \quad (36)$$

donde N_{TP} son el número de soluciones que corresponden con una unidad motora que aparece en el conjunto de referencia. N_{FP} es el número de soluciones que aparecen en el conjunto final

pero no aparecen en el conjunto de referencia y N_{FN} es el número de soluciones que aparecen en el conjunto de referencia pero no en el conjunto de soluciones final del algoritmo.

5.4 Experimentos

En este apartado se explicarán los experimentos a realizar para analizar el rendimiento de este algoritmo. Para no mezclar el rendimiento de este con el de la descomposición, se introducen como entrada del algoritmo los prototipos ideales de las unidades motoras. Para cada experimento, se realizarán 50 realizaciones correspondientes a 50 músculos simulados.

Primero se realizarán experimentos para comprobar el rendimiento del algoritmo de enlazado en las señales scanning-MUPs obtenidas, sin realizar ningún tipo de purga y evaluando los parámetros explicados anteriormente. En estos experimentos (del apartado 5.4.1 al 5.4.3), no se prestará atención al parámetro del Nacc, ya que éste evalúa el conjunto de soluciones final y se evaluará posteriormente cuando se realice el purgado de las soluciones.

5.4.1 Evaluación de la influencia del MVC

Con este experimento, se comprobará el decremento del rendimiento del algoritmo de enlazado al aumentar el MVC con el que se realiza la técnica del multiscanning. Esta degradación podrá ocurrir por el aumento del número de prototipos obtenidos conforme aumenta el MVC, de tal forma que aumentará el número de enlazados que deberá realizar el algoritmo y aumentará la probabilidad de que ocurra un error en estos. Para este experimento se realizarán 50 realizaciones de los enlazados para distintos niveles de MVC: al 2, 3 y al 4%.

5.4.2 Evaluación de la influencia del parámetro Dmax

Para este experimento, se realizará el enlazado de los mismos prototipos fijando la distancia umbral para diferentes valores de la distancia de Nikolic, en un intervalo entre 0.05 y 0.2, para observar el efecto de este parámetro.

5.4.3 Evaluación del alineamiento

Se realizará el enlazado de los mismos prototipos, reconstruyendo la señal posteriormente aplicando el alineamiento calculado durante el enlazado o sin hacerlo. Al estar los prototipos originales ya alineados, con este experimento se comprobará el desalineamiento generado por utilizar una sola aguja en esta técnica.

5.4.4 Evaluación de la purga

Se compararán los resultados de realizar o no la purga sobre el conjunto de soluciones del algoritmo de enlazado. Para este experimento, se incluirán los resultados del número de falsos positivos, falsos negativos y verdaderos positivos, para poder observar qué soluciones se están eliminando del conjunto final, y si estas corresponden con las unidades motoras cuyo territorio es atravesado por el electrodo.

5.5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los experimentos planteados en el apartado anterior. Al igual que en la descomposición, la forma de presentar estos resultados será mediante funciones de probabilidad acumulada que recojan las figuras de mérito individuales de cada realización del experimento.

5.5.1 Evaluación de la influencia del MVC

En la Fig. 36 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 5.4.4, en el que se realiza el enlazado de prototipos ideales a tres niveles de contracción voluntaria diferentes.

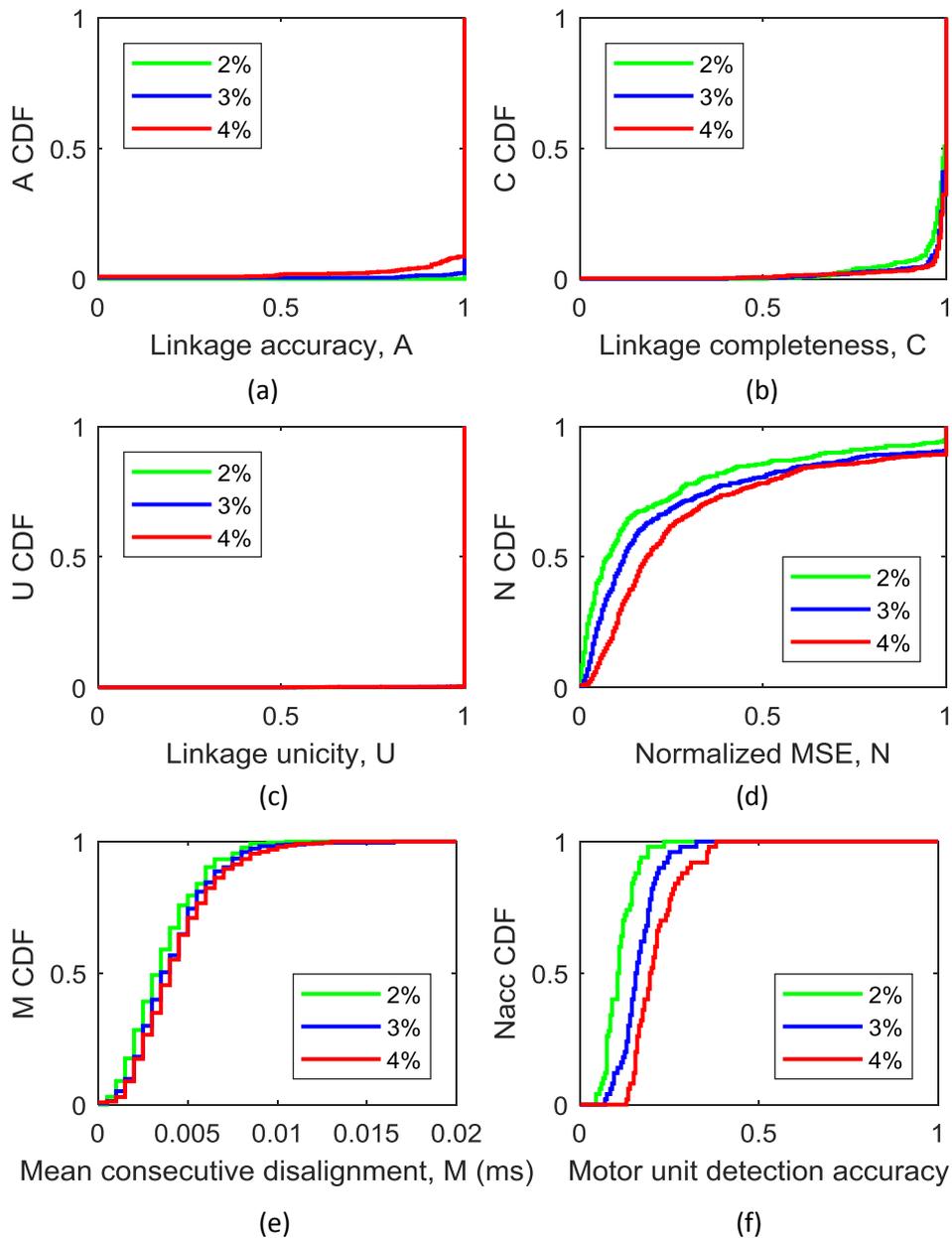


Fig. 36: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos ideales para 3 niveles de MVC diferentes: al 2, al 3 y al 4%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Con los prototipos ideales, se obtienen valores de precisión, completitud y unicidad muy altos. Se observa cómo un aumento del MVC supone una ligera degradación en el rendimiento del enlazado, observado en la precisión y la completitud. Para un MVC del 4%, en el 90% de las soluciones dentro del territorio se obtiene este de forma completa (Fig. 36 (a)). Para MVCs de 2 y 3% se recuperarían prácticamente todos los territorios que atraviesa el electrodo. La unicidad es perfecta para todas las soluciones (Fig. 36 (c)), lo que significa que no se ha enlazado nunca un prototipo de una unidad motora con otro de otra unidad motora diferente.

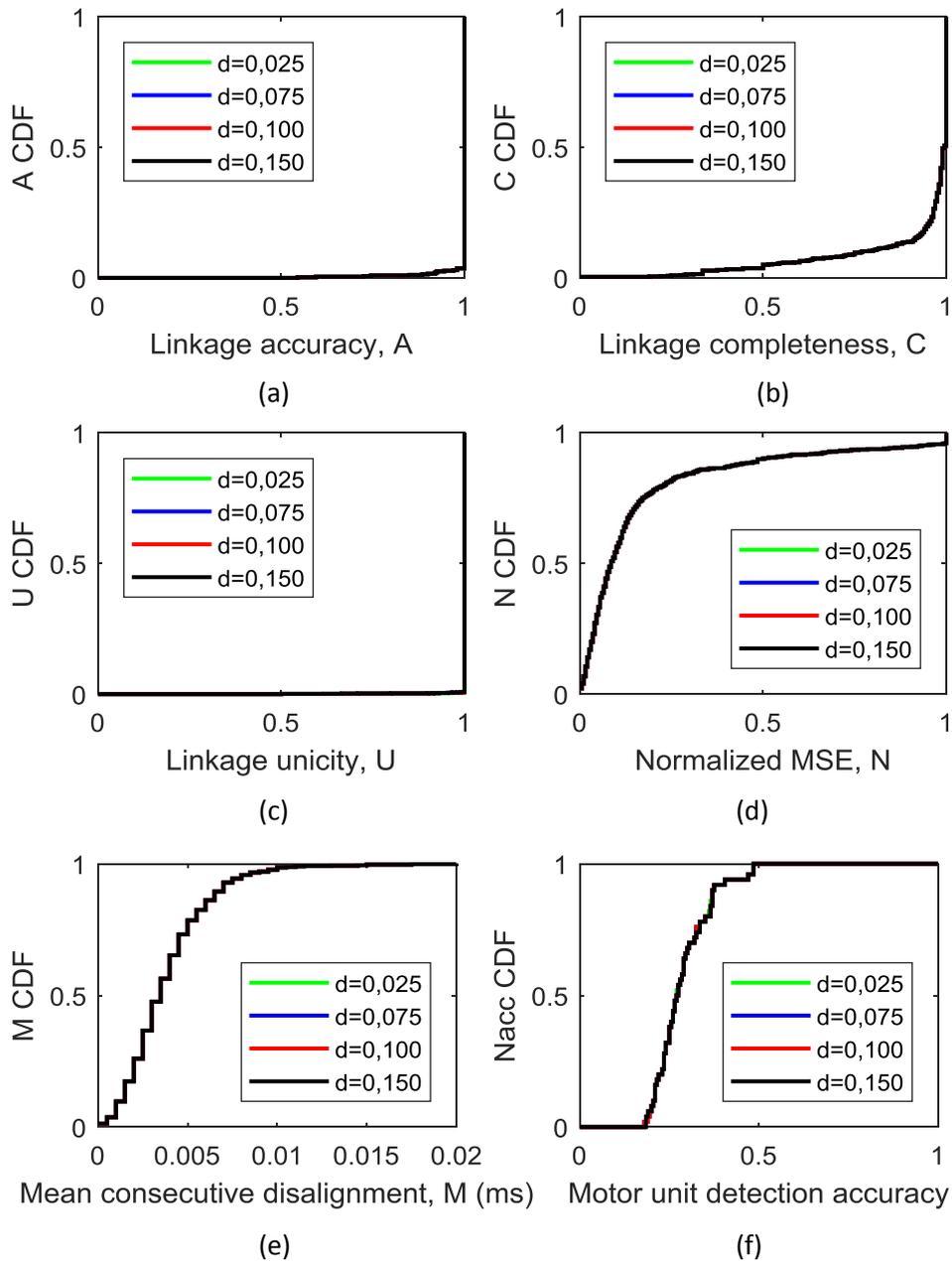


Fig. 37: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos ideales, realizándolo con diferentes valores de la distancia umbral. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Esta degradación en la precisión y completitud conforme aumenta el MVC se traduce en un aumento en el error de la forma de onda (Fig. 36 (e)). Se observa también cómo el desalineamiento medio entre posiciones es independiente del nivel de contracción del músculo (Fig. 36 (f)).

5.5.2 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}

En la Fig. 37 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 5.4.2, en el que se realiza el enlazado de prototipos ideales a tres niveles de contracción voluntaria diferentes.

Como se ha comentado anteriormente durante el análisis de distancias entre prototipos, trabajando con prototipos ideales la distancia de unión con las trazas fantasma (d_{max}) no será relevante. Esto es debido a que las distancias entre prototipos consecutivos será mucho menor al no estar contaminados por ningún artefacto, y el algoritmo de enlazado unirá siempre prototipos consecutivos de la misma unidad motora. Esto se observa en la Fig. 37, en la que se obtienen las mismas figuras de mérito para cualquier distancia umbral.

En el capítulo posterior, se observará cómo trabajando con prototipos obtenidos en descomposición este parámetro sí será relevante, y servirá para determinar correctamente cuando el algoritmo debe unir un prototipo con una traza fantasma en la siguiente posición, delimitando cuando termina el potencial de una unidad motora.

5.5.3 Evaluación del alineamiento

En la Fig. 38 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 5.4.3, en el que se realiza el mismo enlazado de prototipos ideales, realizando el enlazado o no la hora de reconstruir las señales de scanning-MUP.

Cómo se observa en los resultados, el alineamiento realizado introduciría pérdidas si se trabajase con los prototipos ideales (Fig. 38(e)), ya que estos ya estarían perfectamente alineados (tienen un valor de MMCD de 0 siempre). Este aumento en el desalineamiento se traduce en un aumento del error en la forma de onda (Fig. 38 (d)). Aunque el desalineamiento entre posiciones consecutivas (Fig. 38 (e)) sea leve (0.003 ms de mediana), este podrá acumularse y podrá llegar a suponer una diferencia notable entre las posiciones más desalineadas de la solución (Fig. 38 (f)), teniendo la mediana de esta figura de mérito un valor de 0.35 ms.

Como se explicará en el siguiente capítulo, trabajando con prototipos descompuestos el alineamiento realizado introducirá mejoras tanto en el desalineamiento medio como en el error de forma de onda respecto a si no se realizase ningún tipo de alineamiento.

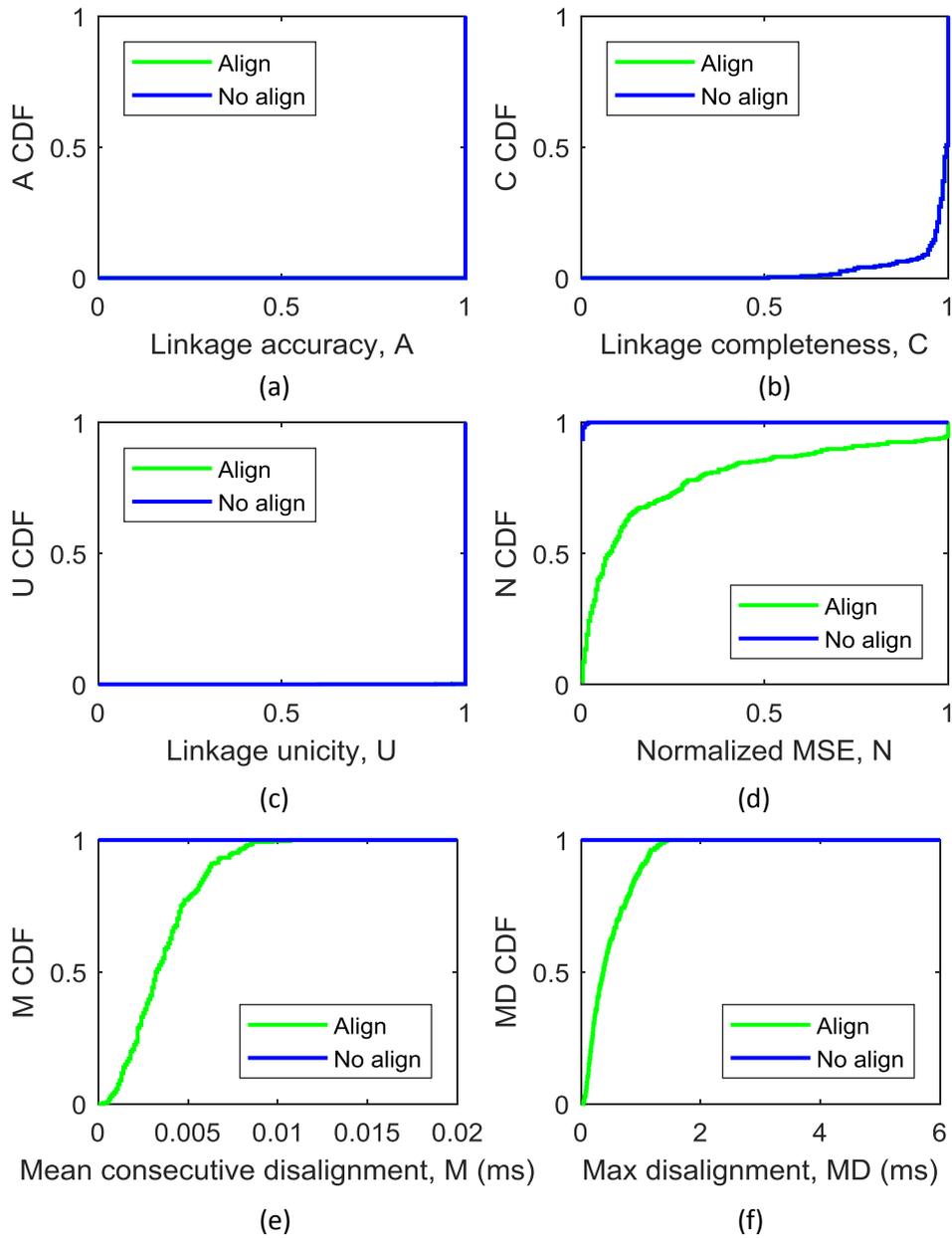


Fig. 38: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos ideales realizando un alineamiento mediante distancias y sin realizar ningún alineamiento. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) máximo desalineamiento entre dos posiciones de la solución (f).

5.5.4 Evaluación de la purga

En la Fig. 39 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 5.5.4, en el que se realiza la evaluación del conjunto restante de soluciones antes y después de realizar la purga.

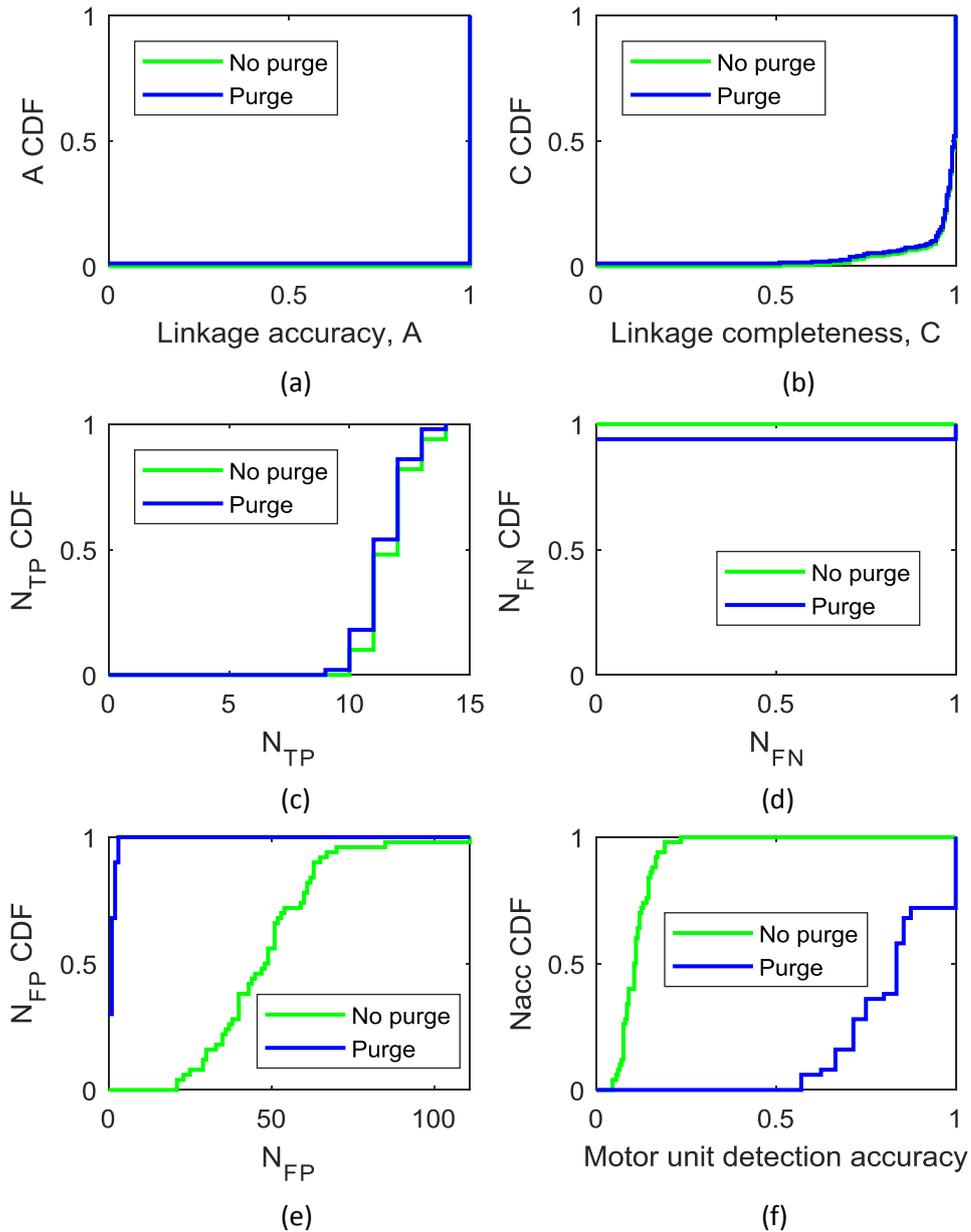


Fig. 39: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos ideales antes y después de realizar la purga. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), número de unidades motoras correctas en el conjunto final (c), número de unidades motoras que han sido purgadas y no deberían haberlo sido (d), número de unidades motoras que no han sido purgadas y deberían haberlo sido (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Se observa cómo, para la precisión y la completitud, el rendimiento de no realizar la purga es ligeramente mejor (Fig. 39 (a) (b)), debido a que se están eliminando algunas de las soluciones que deberían aparecer en el conjunto final y no lo hacen. Esto es observable también en los falsos negativos (Fig. 39 (c)), en el que se observa cómo sólo en un 5% de los casos se elimina una única solución que no debería purgarse. En los falsos positivos (Fig. 39 (e)), se observa cómo con la purga se eliminan una gran cantidad de señales que si deberían ser eliminadas del

conjunto final, lo cual implica la gran mejora que se observa en el número de unidades motoras obtenidas tras realizar la purga (Fig. 39 (f)).

Las figuras de la unicidad, el error en la forma de onda y el desalineamiento medio no se incluyen al ser iguales antes y después de la purga.

Capítulo 6. Evaluación del sistema de multiscanning-EMG

En este capítulo se realizará el análisis del sistema de multiscanning-EMG con una sola aguja al completo, utilizando los sistemas de descomposición explicados en el capítulo 4 para la extracción de los prototipos en diferentes posiciones y el algoritmo de enlazado explicado en el capítulo 5 para unirlos y determinar su pertenencia a las distintas unidades motoras. Para ello, se realizarán experimentos para evaluar el funcionamiento de éste, y comprobar su robustez a la variación de diferentes parámetros durante el registro.

6.1 Objetivos

Aunque trabajando con los prototipos ideales se ha demostrado el funcionamiento de la técnica y la obtención de múltiples señales de scanning-MUP, queda por demostrar si el sistema funcionaría obteniendo los prototipos mediante la descomposición de registros cortos, que es como se realizará la técnica cuando se aplique en un contexto real.

Debido al corto tiempo de los registros EMG sobre los que se realizará la descomposición, el número de descargas sobre los que se realizará el prototipado será reducido, obteniendo en el proceso formas de onda más artefactadas que las obtenidas habitualmente en descomposiciones con registros de mucha mayor duración.

La efectividad del sistema de descomposición estará muy correlada con el rendimiento del algoritmo de unión de enlazado; cuanto mejores sean los prototipos obtenidos en descomposición mejor será el enlazado de estos y por tanto el rendimiento de la técnica del multiscanning mejorará.

6.2 Análisis de los factores de error

Trabajando con los prototipos obtenidos en descomposición, se obtendrán dos fuentes de error principales respecto a los prototipos ideales: los artefactos provenientes de la señal EMG y posibles errores en el número de unidades motoras descompuestas.

Los artefactos que contaminan los prototipos adquiridos en descomposición suponen una distorsión en la forma de onda de éstos. Esto implica que la distancia entre prototipos de las mismas unidades motoras en diferentes posiciones aumentará, ya que cada prototipo podrá estar contaminado por diferentes artefactos en distintos instantes temporales. Además, la distancia entre dos prototipos de unidades motoras diferentes podrá llegar a reducirse en algunos casos, ya que si dos prototipos contienen artefactos similares el alineamiento se podrá realizar respecto a éstos.

Calculando las distancias entre todos los prototipos se repite el mismo análisis de distancias que en el capítulo anterior. Comparando las distancias entre los prototipos reales y los descompuestos, se comprueba como las distancias entre un prototipo y el suyo en la posición siguiente aumentan en la descomposición debido a los artefactos (Fig. 40). Aumentando el número de ocasiones que un prototipo tendrá como aquel de menor distancia uno que no sea el suyo propio y aumentando el número de errores en el enlazado (casos con valores negativos en la Fig. 40(b)).

Se observa también que estos errores ocurren más frecuentemente en aquellos prototipos con menor energía, mientras que en aquellos de mayor energía (normalmente los correspondientes a los núcleos) no se producirán errores de enlazado. Por esta razón, en ocasiones se podrán

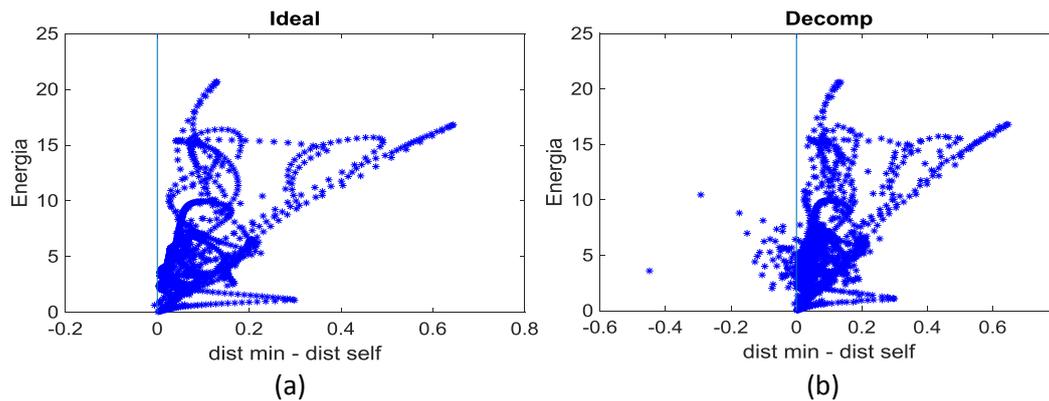


Fig. 40: Diferencia entre las distancias de un prototipo al suyo en la siguiente posición y al no suyo al que menor distancia posee para todos los prototipos, realizado con los prototipos ideales (a) y con prototipos extraídos en descomposición (b).

enlazar dos núcleos en una misma solución, ya que en los extremos de los núcleos los potenciales tienen menos energía y tendrán más tendencia a enlazarse erróneamente.

Aparte de los artefactos, que el número de potenciales descompuestos no sea exactamente el número de potenciales presentes en la señal EMG supone una fuente de error importante para el algoritmo de enlazado. Tanto la descomposición del mismo potencial en dos prototipos diferentes como la no descomposición de un potencial son perjudiciales para el algoritmo.

La falta de un potencial que debería haber sido descompuesto en una posición podrá significar que el algoritmo no pueda enlazar con ningún otro potencial, acotando la solución de la unidad motora antes de lo adecuado. Aunque el potencial de esa unidad motora vuelva a ser descompuesto en posiciones posteriores y pueda ser enlazado de nuevo, el scanning-MUP aparecerá dividido en soluciones distintas (Fig. 41 (c)).

Un potencial descompuesto repetido podrá ocasionar la división de un potencial de una unidad motora en dos soluciones diferentes, si el prototipo que ha sido enlazado con el resto de la señal se une posteriormente a una traza fantasma y el otro prototipo que no había sido enlazado anteriormente se enlaza al resto de la señal (Fig. 41 (b)). De la misma forma, el prototipo podrá enlazarse con aquel potencial que se enlace correctamente con el resto de la señal (Fig. 41 (d)), en estos casos la repetición en la descomposición de los potenciales no supondrá ningún problema.

Por ello, aunque tanto la repetición en la descomposición de un potencial como la no descomposición de éstos son posibles fuentes de error que dificultan el enlazado, la no descomposición de éstos será más perjudicial para el sistema, ya que es más probable que la solución quede acotada por este tipo de errores. Sin embargo, este tipo de errores serán muy poco frecuentes en los núcleos de las unidades motoras, ya que los potenciales suelen ser de mayor amplitud, facilitando su distinción del resto de potenciales y obteniendo una descomposición muy precisa de estos, como se observó en los resultados del capítulo 4.

Debido a estos factores de error, el parámetro de la distancia umbral será mucho más relevante que trabajando con prototipos ideales, ya que la probabilidad de error al realizar un enlazado será mayor y será necesario la correcta unión con las trazas fantasma para delimitar de forma correcta los potenciales de las unidades motoras.

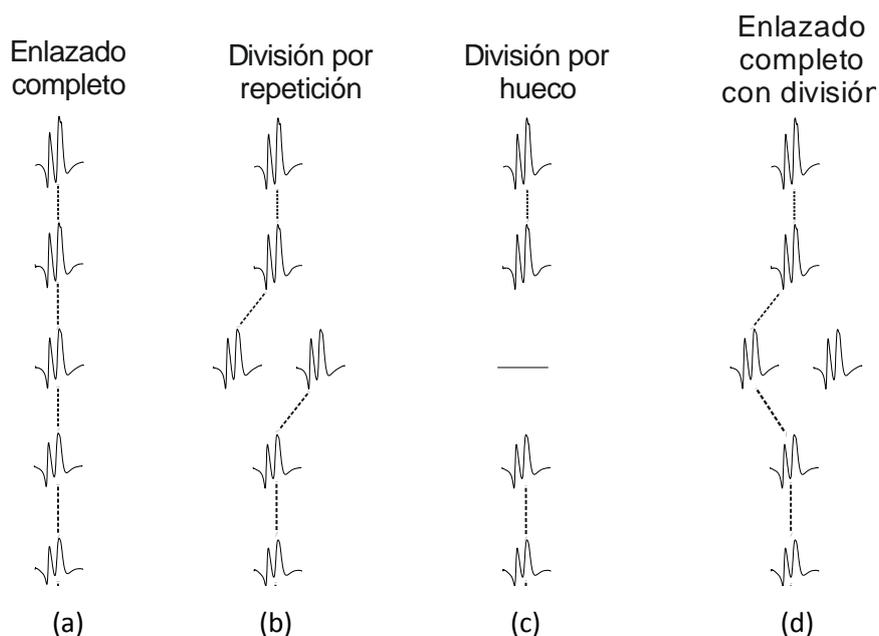


Fig. 41: Posibles resultados del enlazado de prototipos en posiciones consecutivas: enlazado completo de todos los potenciales de una unidad motora (a), división del potencial de una unidad motora en dos soluciones diferentes debido a un mismo potencial descompuesto varias veces (doblete) (b), división del potencial de una unidad motora en dos soluciones diferentes debido a un potencial no descompuesto en una posición (c), enlazado completo pese a repeticiones en la descomposición (d).

6.3 Experimentos

Para determinar el rendimiento final del sistema, su robustez a determinados parámetros y determinar el valor de algunos de estos se realiza una serie de experimentos finales. En ellos se utilizará en conjunto algunos de los sistemas de descomposición 4 y el algoritmo de enlazado del capítulo 5. Para su evaluación, se utilizarán las mismas figuras de mérito del algoritmo de enlazado descritas en el capítulo anterior.

6.3.1 Evaluación de la influencia de los métodos de descomposición

En este experimento se realizará el enlazado de los prototipos con los obtenidos mediante 4 tipos diferentes de descomposición: los métodos PHC y CTU explicados en el capítulo 4 y las versiones de estos con un filtrado de la señal EMG previo al clustering (fPHC y fCTU). De esta forma se determinará qué sistema de descomposición será el más apropiado para utilizar en esta técnica.

6.3.2 Evaluación del alineamiento

En el anterior capítulo se ha comprobado la pérdida en el alineamiento y el aumento en el error de la señal al utilizar un alineamiento basado en la distancia mínima entre prototipos ideales consecutivos. Esta vez se vuelve a realizar el mismo alineamiento pero con los prototipos obtenidos en descomposición. Estos no estarán alineados entre ellos y estarán centrados respecto a su máximo. En este experimento se realizará el enlazado de los prototipos descompuestos en 50 realizaciones de músculo diferentes, realizando el alineamiento a la hora

de reconstruir la señal y no haciéndolo. De esta manera se comprobará si el alineamiento introducido ofrece mejoras o no respecto a no hacerlo.

Para este experimento se utilizará el sistema de descomposición PHC, con una duración de los registros de 1 s, simulando las señales a un nivel de MVC del 3% y fijando la distancia umbral a 0,1.

6.3.3 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}

En este experimento se realizará el enlazado de los prototipos descompuestos en 50 realizaciones de músculos diferentes, variando la distancia umbral a 4 valores diferentes: 0.025, 0.75, 0.1 y 0.15. De esta forma se podrá observar la incidencia de este parámetro en el sistema y se obtendrá un valor óptimo de éste que maximice el rendimiento de la técnica

Para este experimento se ha utilizado el sistema de descomposición PHC, con una duración de los registros de 1 s y simulando las señales a un nivel de MVC del 3%.

6.3.4 Evaluación de los componentes de error en la forma de onda

En este experimento se analizarán las soluciones obtenidas de 50 procesos simulados de multiscanning-EMG con una sola aguja, evaluando las distintas versiones del error en la forma de onda descritas en el apartado 5.3.2.5. De esta forma se identificarán aquellas componentes de error que son más significantes en el error total de forma de onda de las soluciones obtenidas.

Para este experimento se ha utilizado el sistema de descomposición PHC, con una duración de los registros de 1 s, un valor del parámetro D_{max} fijado a 0,1 y simulando las señales a dos niveles diferentes de MVC, al 2% y al 4%.

6.3.5 Evaluación de la purga

Se compararán los resultados de realizar o no la purga sobre el conjunto de soluciones del algoritmo de enlazado. Al igual que en el capítulo anterior, se incluirán los resultados del número de falsos positivos, falsos negativos y verdaderos positivos de las soluciones restantes, para analizar si la purga es demasiado restrictiva o no.

El sistema de descomposición utilizado será el PHC, con una duración de los registros de 1 s y con señales simuladas a un nivel de MVC del 3%.

6.3.6 Evaluación de la ventana de registro

Para este experimento se realizará el enlazado de los prototipos obtenidos a partir de señales EMG con ventanas de registro de 500 ms, 750 ms y 1 s. Mediante los resultados obtenidos se comprobará hasta qué punto puede reducirse esta ventana de registro mientras la técnica siga funcionando correctamente.

6.3.7 Evaluación de la influencia del MVC

Una vez definidos el resto de parámetros se realiza este experimento para determinar el rendimiento final del algoritmo y la robustez de éste al trabajar a distintos niveles de MVC. De esta forma se comprueba que nivel de MVC es el óptimo para realizar la técnica y hasta cuanto podría aumentarse este mientras la técnica siga funcionando.

El sistema de descomposición utilizado será el PHC, con una duración de los registros de 1 s y fijando una distancia umbral de 0.1.

6.4 Resultados

A continuación, se incluyen los resultados obtenidos para los experimentos planteados en el apartado anterior, presentando estos mediante funciones de probabilidad acumulada que recojan las figuras de mérito individuales de cada solución del experimento.

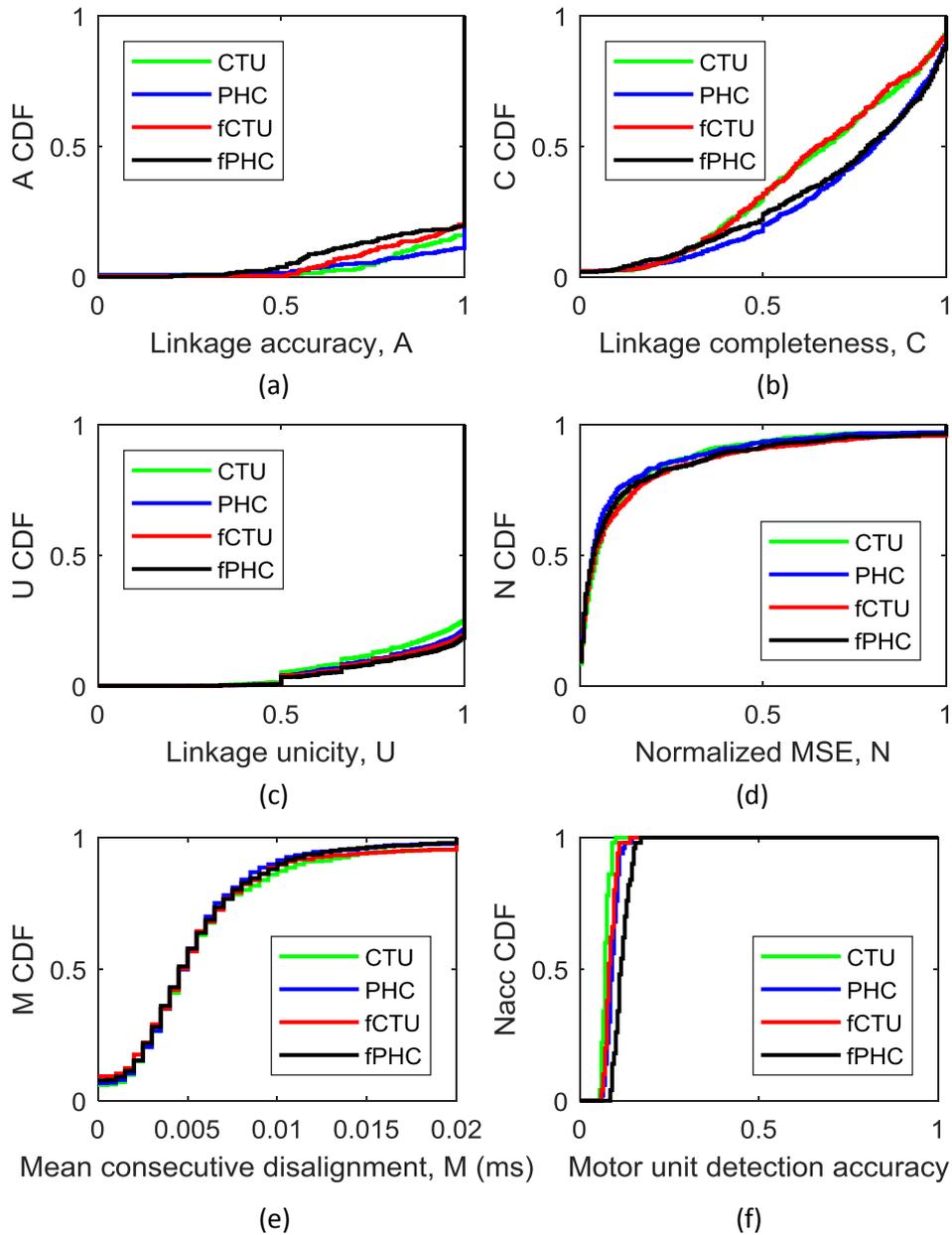


Fig. 42: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos descompuestos por 4 métodos diferentes: CTU, PHC, CTU filtrado y PHC filtrado. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

6.4.1 Evaluación de la influencia de los métodos de descomposición

En la Fig. 42 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.1, en el que se realiza el enlazado de los prototipos obtenidos de las mismas señales EMG, siendo estos prototipos obtenidos mediante diferentes sistemas de descomposición.

Comparando estos resultados con los del capítulo anterior, se observa cómo las figuras de mérito de la precisión, la completitud, la unicidad y el error en la forma de onda sufren claras degradaciones al trabajar con prototipos descompuestos.

Respecto a la precisión (Fig. 42 (a)), se obtienen los mejores resultados con el método de descomposición PHC (casi un 90% de los territorios recuperados al completo), seguido del método CTU (un 85% de los territorios completos) y obteniendo los peores resultados con las versiones filtradas de éstos (alrededor del 80% de los territorios recuperados al completo). Para la completitud (Fig. 42 (b)) se observa cómo con los métodos PHC se obtienen mejores resultados que con los métodos CTU. Para la unicidad (Fig. 42 (c)) se obtienen resultados parecidos para los 4 métodos, en los que aproximadamente el 80% de las soluciones tienen una unicidad de 1, es decir, todos los potenciales en diferentes posiciones que forman las soluciones pertenecen a la misma unidad motora.

Respecto al error en las señales (Fig. 42 (d)), con los métodos sin filtrar se obtiene un error menor con respecto a los métodos filtrados. El desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (Fig. 42 (e)) será similar sea cual sea el método usado.

Realizando este mismo análisis a otros niveles de MVC se comprueba que el sistema de descomposición más robusto y con el que posteriormente se obtendrán los mejores resultados en el enlazado será el PHC.

6.4.2 Evaluación del alineamiento

En la Fig. 43 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.1, en el que se realiza la evaluación del conjunto de soluciones aplicándole el alineamiento basado en distancias o no haciéndolo.

Las figuras de la precisión, completitud y unicidad (Fig. 43 (a)(b)(c)) no variarán ya que el alineamiento se efectúa una vez realizado el enlazado, cuando se reconstruye la señal.

Como se ha explicado anteriormente, el alineamiento aplicado no es perfecto e introduce error tanto en el desalineamiento entre posiciones consecutivas (Fig. 43 (e)) y el máximo desalineamiento entre dos posiciones de la solución (Fig. 43 (f)). Sin embargo, para ambas figuras de mérito se obtienen valores de desalineamiento muy bajos, obteniendo un valor de la mediana del desalineamiento medio de 0.005 ms y una mediana del desalineamiento máximo de 0.35 ms.

La mejora en ambas facetas respecto a no realizar alineamiento alguno es clara, además, se reduce el error total en la forma de onda (Fig. 43 (d)) consiguiendo una forma de onda mucho más parecida a la original.

Para comprobar los valores obtenidos en las figuras de mérito de la Fig. 43 se incluye un ejemplo donde se observa el desalineamiento entre la solución obtenida (Fig. 44 (a)) y la señal scanning-MUP original (Fig. 44 (b)). Observando el desalineamiento de cada posición de la señal scanning-MUP obtenida con la original (Fig. 44 (c)) se observa cómo éste puede ser tanto positivo como negativo, y que puede acumularse de forma que los máximos del desalineamiento tiendan a

darse en los extremos de la solución. Realizando la diferencia entre el máximo y el mínimo valor se obtiene el desalineamiento máximo entre dos posiciones de la solución, siendo este aproximadamente 7 muestras para este caso (0,35 ms a una frecuencia de muestreo de 20 khz), que coincide con el valor de la mediana de la figura de mérito observada en la Fig. 43 (f). A su vez, se observa como el desalineamiento entre posiciones consecutivas (Fig. 44 (d)) no es muy elevado, siendo la media 0.08 muestras (0.04 ms), cercana a la mediana de la figura observada en la Fig. 43 (e).

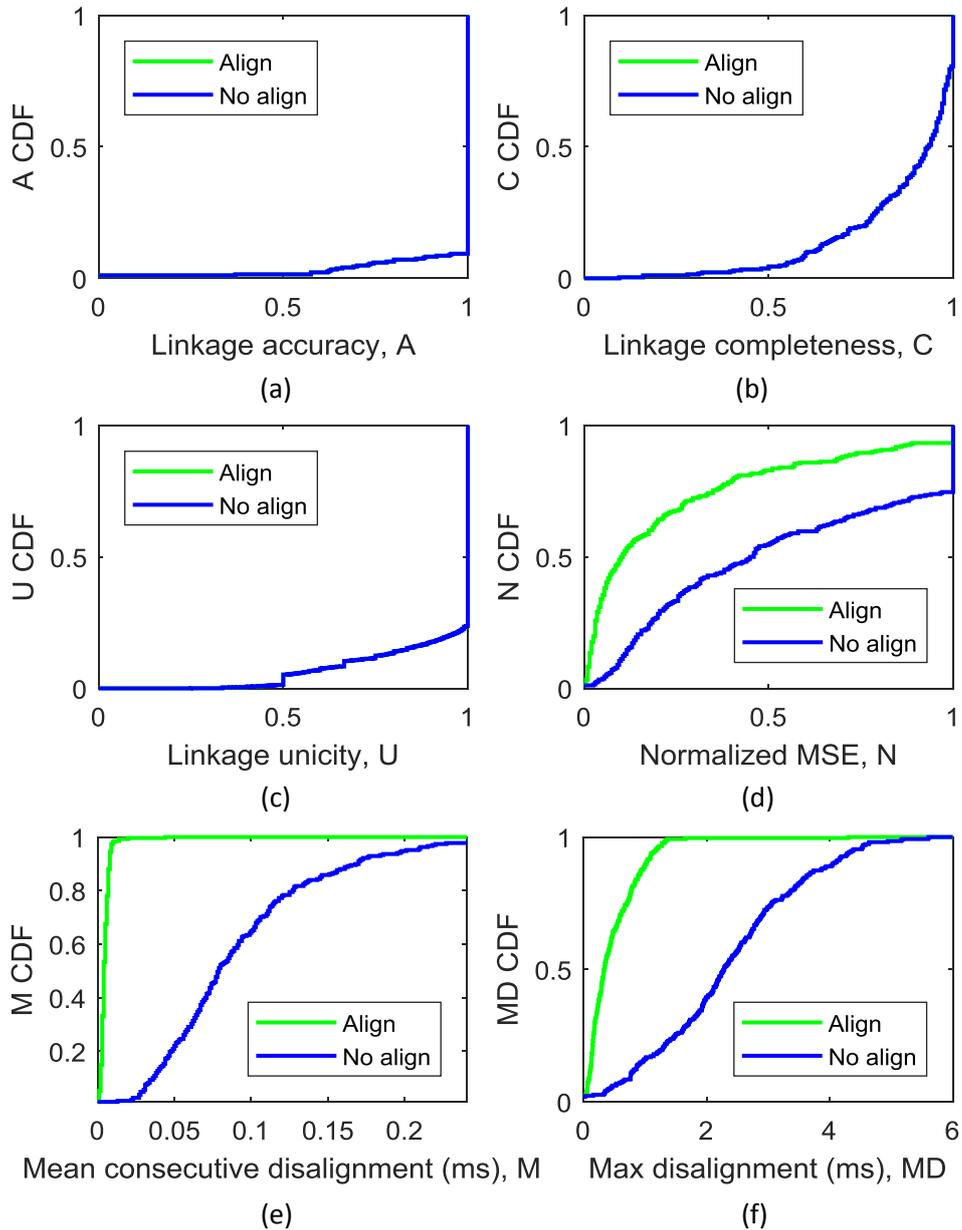


Fig. 43: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos ideales realizando un alineamiento en la reconstrucción de la señal mediante distancias y sin realizar ningún alineamiento. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y máximo desalineamiento entre dos posiciones de la solución enlazada (f).

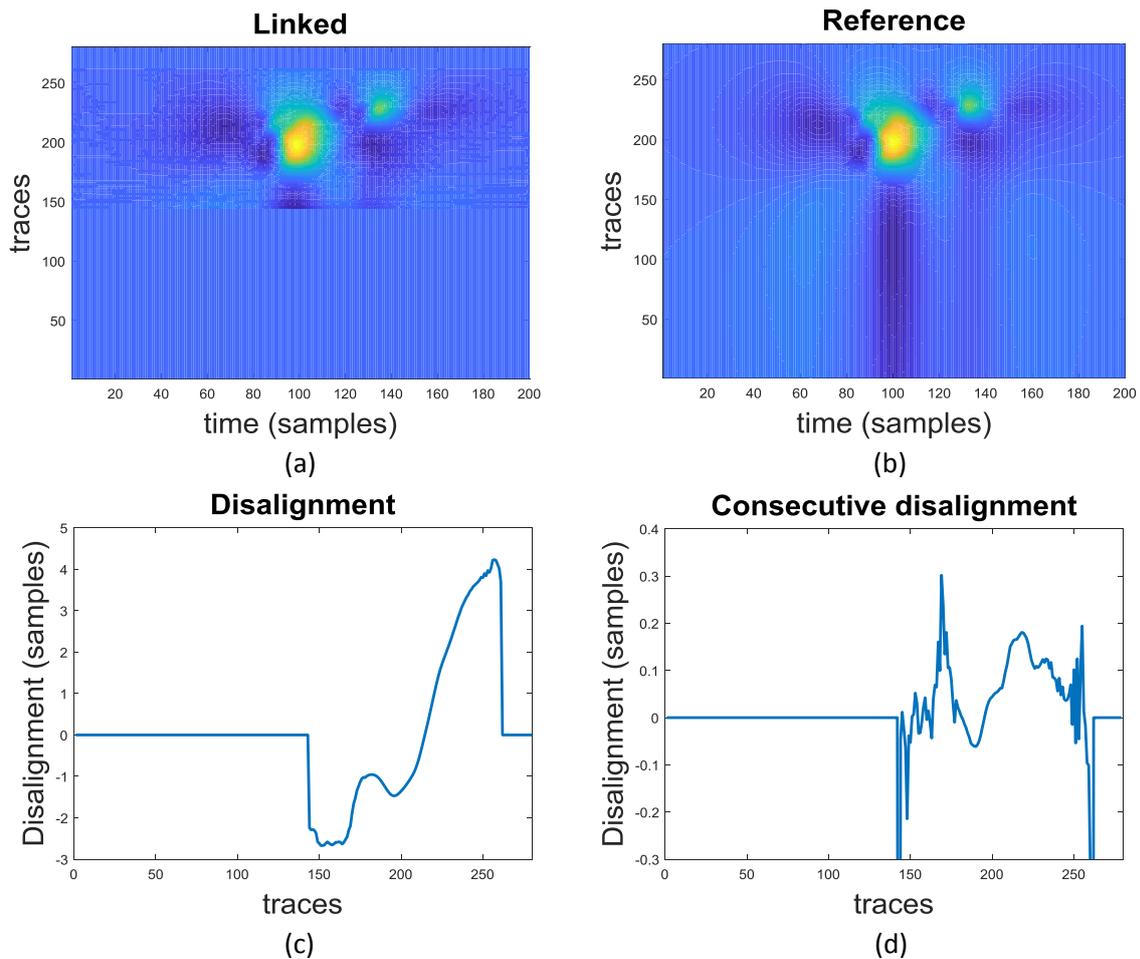


Fig. 44: Ejemplo de desalineamiento de una solución obtenida mediante el enlazado (a) con el potencial de la unidad motora original (b), desalineamiento de cada posición de la solución obtenida con la original (c) y desalineamiento consecutivo entre posiciones (d).

6.4.3 Evaluación de la influencia del parámetro D_{max}

En la Fig. 45 se incluyen los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.3, en el que se realiza el enlazado de los mismos prototipos fijando diferentes valores de la distancia umbral D_{max} , que fija cuando se debe realizar la unión con un prototipo fantasma. En el capítulo anterior se observó cómo este parámetro tenía escasa relevancia trabajando con prototipos ideales. Sin embargo, cómo se observa en los resultados de la Fig. 45, con los prototipos descompuestos este parámetro influirá en el rendimiento global del sistema.

Se observa como para la precisión y la completitud se obtiene un mejor rendimiento con la distancia umbral fijada a un valor de 0.1, y un peor rendimiento con una distancia 0.25 (Fig. 45 (a)(b)). Respecto a la unicidad (Fig. 45 (c)), se observa que cuanto mayor es la distancia umbral más disminuye ésta. Esto es debido a que cuanto mayor distancia, más permisivo se es realizando enlaces, obteniendo soluciones con un mayor número de enlaces pero con peor unicidad, debido a que los enlaces han podido ser incorrectos. Al contrario, una distancia pequeña asegurará que los prototipos de una solución pertenezcan a la misma unidad motora, pero la solución podrá ser incompleta.

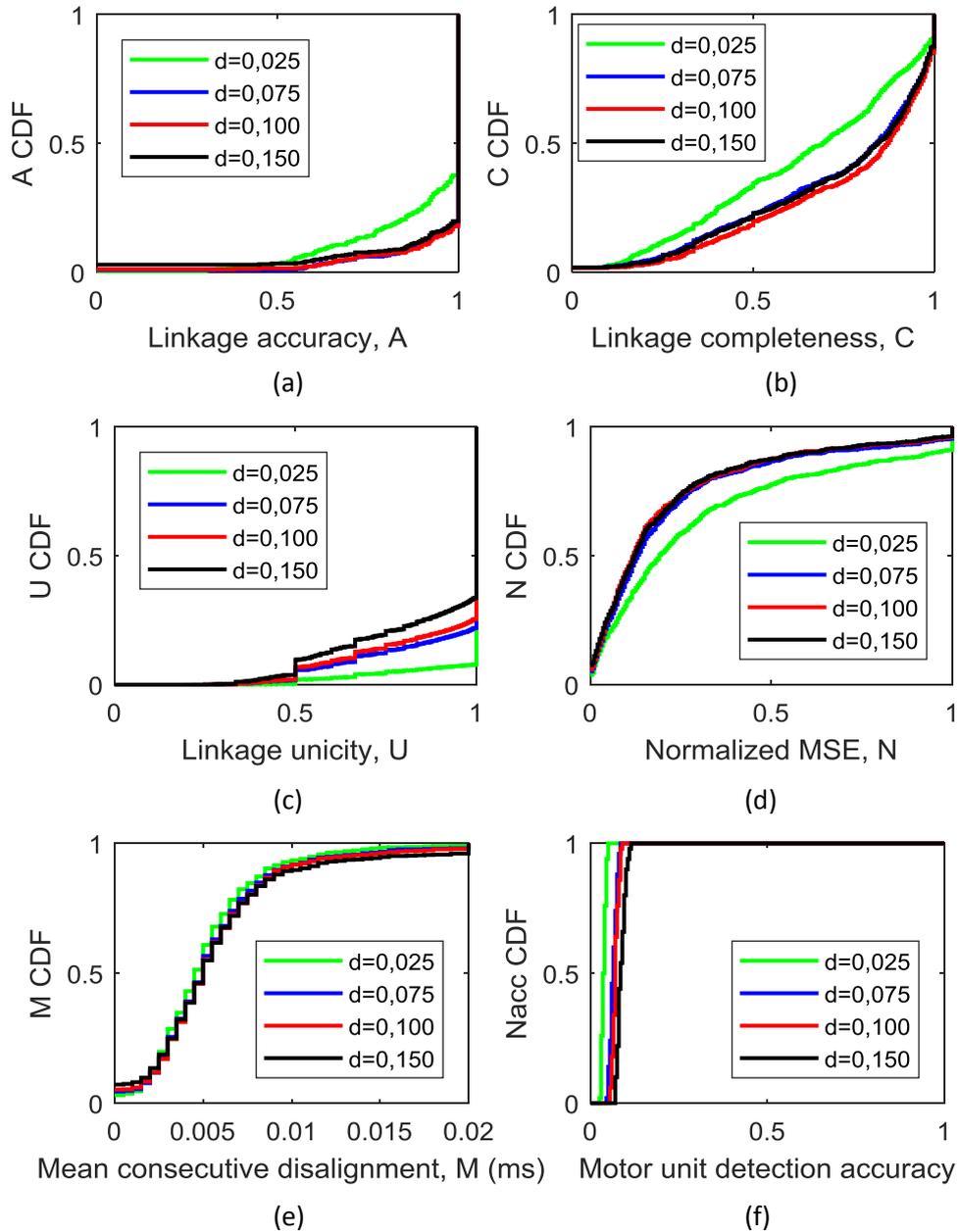


Fig. 45: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos descompuestos, realizándolo con diferentes valores de la distancia umbral. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Se observa una relación directa entre los valores de precisión y completitud de cada método con el error en la forma de onda (Fig. 45 (e)). Para los valores de d_{\max} para los que se obtiene mejor rendimiento de éstos (0.075 y 0.1) se obtiene un error en la forma de onda menor.

También se observa cómo la precisión en el número de soluciones obtenidas aumenta conforme aumenta el parámetro d_{\max} (Fig. 45 (f)). Esto es debido a que cuanto mayor sea este parámetro el algoritmo será menos estricto respecto a cuándo realizar la unión con una traza fantasma, obteniendo por tanto un número final de soluciones menor.

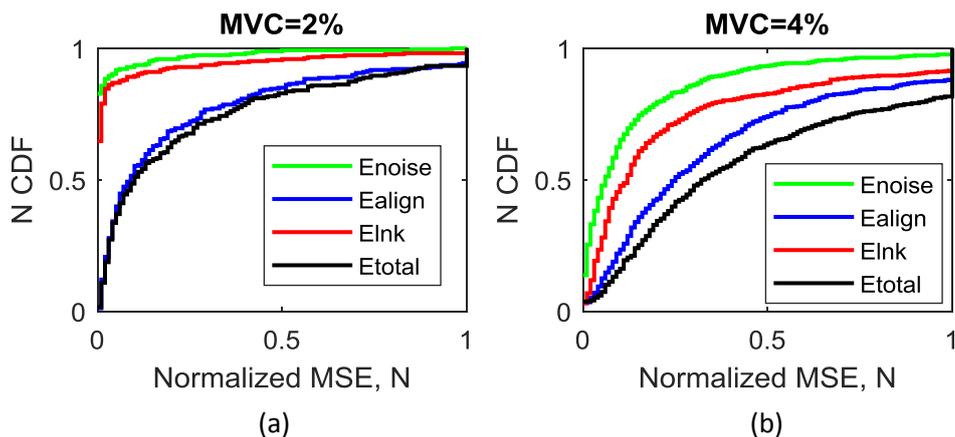


Fig. 46: Errores en la forma de onda para las soluciones obtenidas en el algoritmo de enlazado. Se representan las figuras de mérito de: error de forma de onda causado por artefactos, error de forma de onda causado por desalineamientos, error de forma de onda causado por errores en el enlazado y error de forma de onda total.

6.4.4 Evaluación de los componentes de error en la forma de onda

En la Fig. 46 se incluyen los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.4, en el que se evalúan las mismas soluciones del algoritmo de enlazado bajo diferentes versiones de la figura de mérito del error de la forma de onda. En concreto se observarán las aportaciones al error de: los artefactos que contaminan los prototipos obtenidos en descomposición (E_{noise}), el error proveniente de fallos en el enlazado (E_{lnk}) y el error generado por los desalineamientos entre la solución obtenida y el potencial original (E_{align}).

Se observa cómo el desalineamiento producido al no tener la referencia del electrodo de trigger supone prácticamente la totalidad del error en la forma de onda, sobre todo si se trabaja a niveles de contracción bajos (Fig. 46 (a)). Para estos niveles, los artefactos de los prototipos obtenidos en descomposición serán de poca amplitud, por lo que la componente de ruido proveniente de estos artefactos será de bajo nivel. A su vez, la mejor calidad de los prototipos a estos niveles de contracción facilita la labor del algoritmo de enlazado, mejorando su rendimiento, por lo que la componente de ruido debido a estos errores tampoco será elevada.

Observando los resultados a un nivel mayor de MVC (Fig. 46 (b)), se aprecia un aumento del error proveniente de los prototipos obtenidos en descomposición, debido al mayor nivel de artefactos generados por un mayor número de unidades motoras activas y una mayor frecuencia de disparo de éstas. El error provocado por errores en el enlazado también sufre un aumento considerable, provocado por el decremento en la completitud de las soluciones conforme aumenta el MVC. El error causado por el desalineamiento sufre un aumento menor, pero sigue siendo la componente de error más influyente en el error total.

6.4.5 Evaluación de la purga

En la Fig. 47 se observan los resultados del experimento descrito en el apartado 6.5.5, en el que se realiza la evaluación del conjunto restante de soluciones antes y después de realizar la purga.

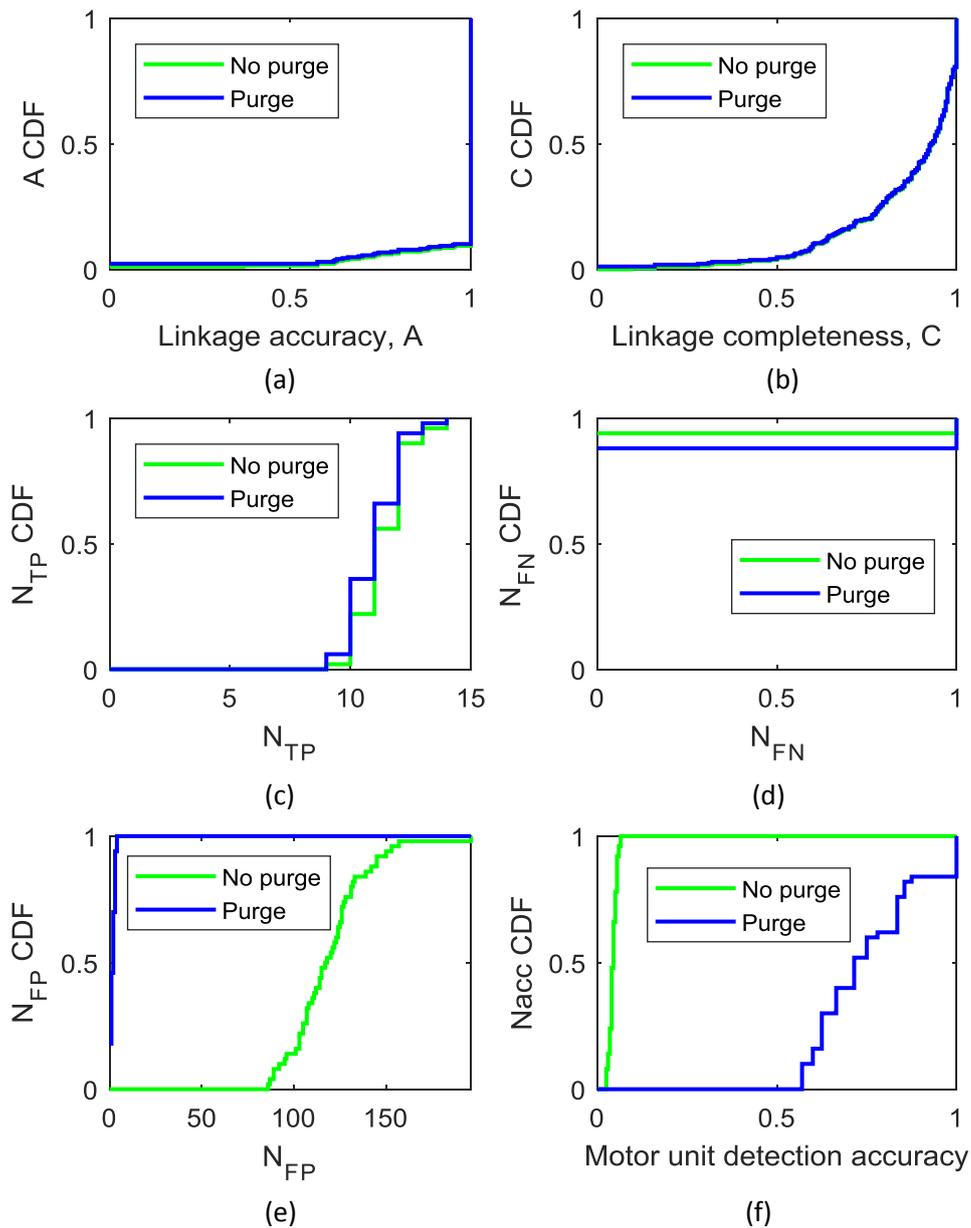


Fig. 47: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos descompuestos antes y después de realizar la purga. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), número de unidades motoras correctas en el conjunto final (c), número de unidades motoras que han sido purgadas y no deberían haberlo sido (d), número de unidades motoras que no han sido purgadas y deberían haberlo sido (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Se observa cómo la purga con los prototipos descompuestos funciona de manera similar a la purga con prototipos ideales del capítulo anterior. En los falsos negativos (Fig. 47 (d)) se observa como el número de soluciones que no deberían haber sido eliminadas y no lo han sido es muy bajo, solo en el 10% de las ocasiones se elimina una solución que no debería haber sido eliminada. En los falsos positivos (Fig. 47(e)) se observa que se eliminan un gran número de soluciones que si deben ser eliminadas.

Previamente a la purga, en el 100% de los enlazados se obtiene un valor de precisión en las unidades motoras finales menor al 10% (Fig. 47 (f)). Con la purga, estos resultados mejoran substancialmente, obteniendo un 50% de los enlazados con un valor de precisión mayor que el 70% y 15% en el que se obtienen un valor perfecto, en el que todas las soluciones representan a una unidad motora que ha sido atravesada por el electrodo.

Las pérdidas en la precisión de las unidades motoras finales son debidas en mayor parte a los falsos positivos, aunque los resultados sugieren que se podría ser más estricto a la hora de diseñar el valor de los umbrales en la purga, estos falsos positivos podrían ser de unidades motoras que pueden pasar muy cerca del territorio por lo que su obtención en el conjunto final no resulta inconveniente.

6.4.6 Evaluación de la ventana de registro

En la Fig. 48 se incluyen los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.6, en el que se realiza el enlazado de los prototipos obtenidos a partir de la descomposición de registros de duración 500 ms, 750 ms y 1 s.

Se observa cómo cuanto mayor es la longitud de la ventana de registro mejores son los prototipos obtenidos en descomposición y por tanto mejor es el rendimiento del enlazado final. Como se ha comentado anteriormente, cuanto menor es este tiempo los potenciales de las unidades motoras aparecen en un número menor de ocasiones en la señal EMG, dificultando su descomposición.

Para unas ventanas de 1 s y 750 ms, se observa cómo los resultados para la mayoría de figuras de mérito son muy parecidos. La mayor diferencia aparece en la completitud (Fig. 38 (b)), esto puede ser debido a que los potenciales pequeños son los que más dificultad tienen para descomponerse, ya que cualquier artefacto alterará gravemente su forma inicial. Por tanto, la precisión (Fig. 38 (a)), que evalúa el enlazado de los prototipos en el núcleo (y por tanto de gran tamaño) no se ve muy degradada, mientras que la completitud que evalúa el enlazado de todos los prototipos posibles sí.

La pérdida en la completitud se traduce en un aumento claro del error en la forma de onda cuando se utiliza una ventana de 500 ms (Fig. 38 (d)). Otras figuras de mérito como la unicidad (Fig. 38 (c)), el desalineamiento medio (Fig. 38 (e)) no sufren cambios relevantes con la variación de la ventana de registro.

Se observa cómo una ventana de 500 ms resulta demasiado corta para obtener una buena descomposición y por tanto para obtener un buen rendimiento en el enlazado final. Por tanto, mediante este análisis se determina que la ventana de registro se podrá reducir hasta 750 ms para seguir obteniendo un buen rendimiento en el multiscanning.

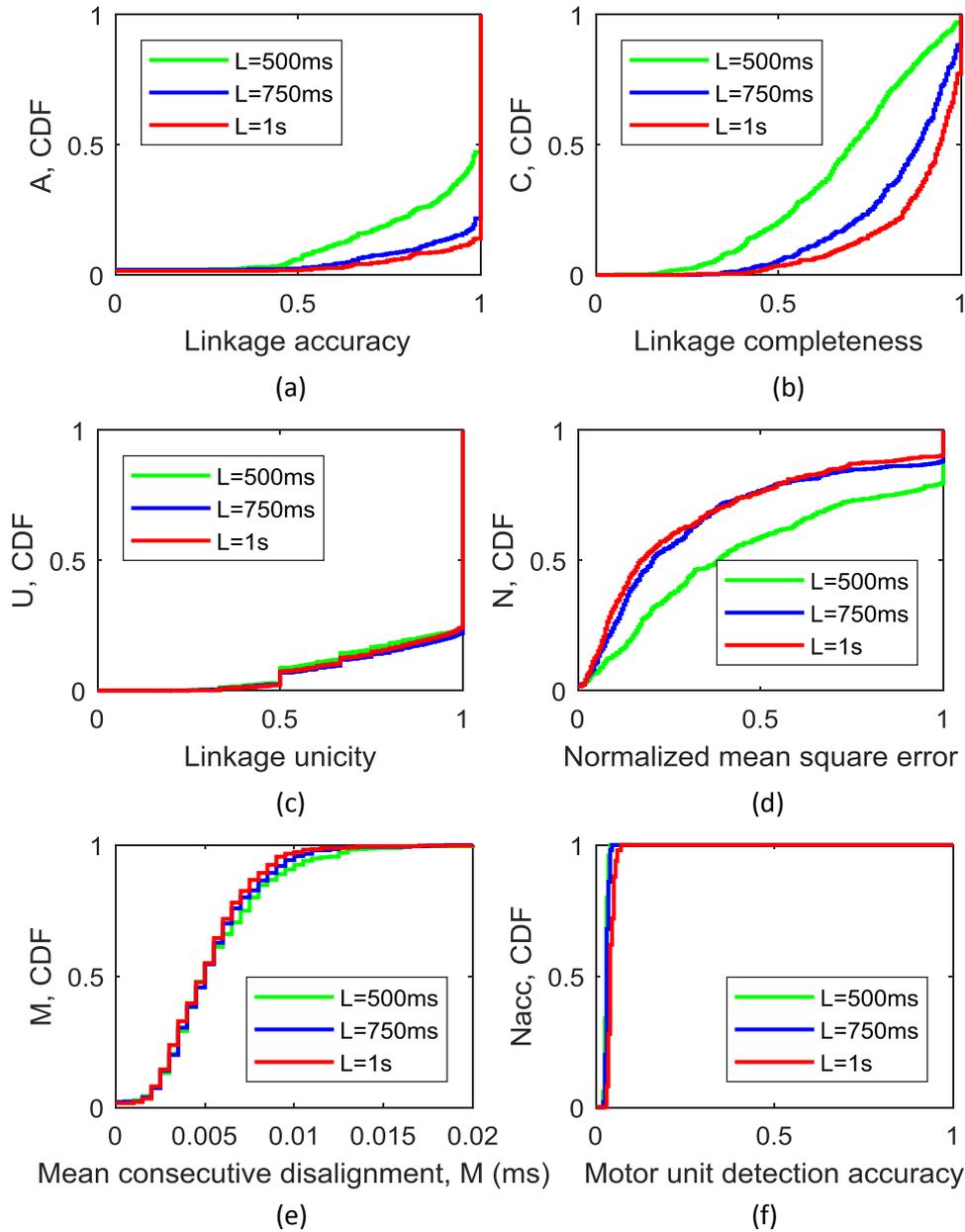


Fig. 48: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos descompuestos para registros de duración 500 ms, 750 ms y 1 s. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

6.4.7 Evaluación de la influencia del MVC

A continuación se incluyen en la Fig. 49 los resultados del experimento descrito en el apartado 6.3.7, en el que se realiza el enlazado de los prototipos obtenidos para señales de los mismos músculos pero registradas a diferentes niveles de MVC.

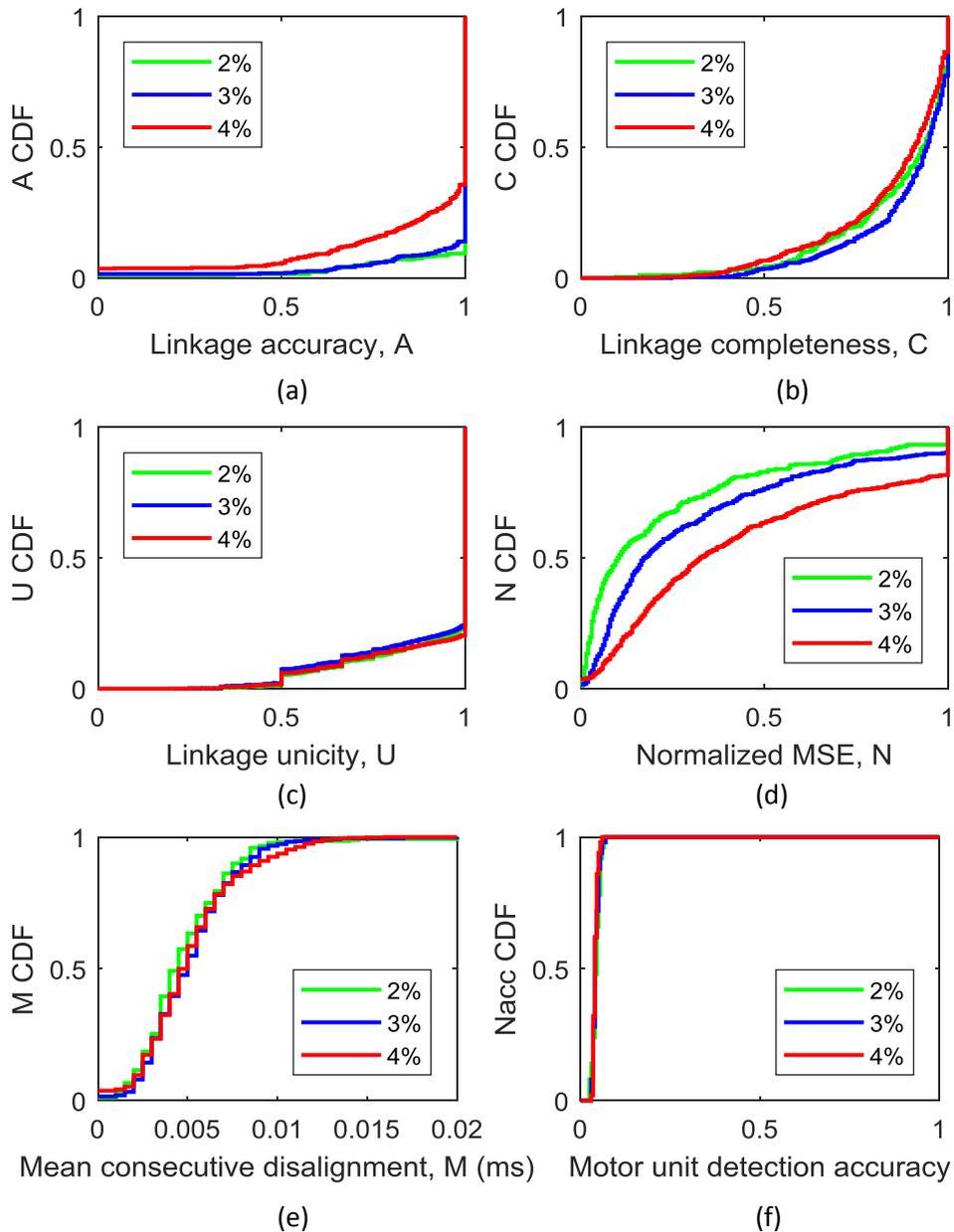


Fig. 49: Resultado del algoritmo de enlazado con prototipos descompuestos para 3 niveles de MVC diferentes: al 2, al 3 y al 4%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Como se ha observado en otros experimentos a lo largo del trabajo, el aumento del nivel de artefactos conforme aumenta el MVC se traduce en una degradación del rendimiento del sistema de multiscanning conforme aumenta éste. Esta degradación proviene tanto del sistema de descomposición como del algoritmo de enlazado.

La figura de mérito en la que más repercute el MVC es en la precisión en la obtención de los núcleos (Fig. 49 (a)), disminuyendo ésta conforme aumenta el MVC. Para la completitud (Fig. 49

(a)), se observa cómo se obtiene el peor rendimiento a un MVC del 4%, sin embargo se obtiene un mejor rendimiento al 3% que al 2%.

Se observa un gran aumento en el error de la forma de onda conforme aumenta el MVC (Fig. 49 (d)), éste se deberá en mayor medida a la incompletitud en el enlazado de las soluciones que a los artefactos que distorsionan la forma de onda de los potenciales. Otras figuras como la unicidad (Fig. 49 (c)) o el desalineamiento medio (Fig. 49 (e)) no sufren cambios relevantes con la variación del MVC.

6.5 Determinación de parámetros óptimos y gold standard

Después de comprobar los resultados de los experimentos, se establecen los parámetros óptimos con los que se obtiene un mejor rendimiento de la técnica (para las señales simuladas utilizadas en este proyecto), siendo éstos los siguientes:

- El sistema de descomposición con el que se obtienen mejores resultados será el PHC.
- La distancia umbral será fijada a un valor de 0.1 de la métrica de distancias entre dos prototipos definida por Nikolic en [21].
- El MVC deberá ser lo más bajo posible.
- Cuanto mayor sea la ventana de registro mejor será el rendimiento de la descomposición y posteriormente del enlazado, pudiéndose reducir esta hasta una longitud de 750 ms.
- Las características de las señales con las que se obtiene un mejor rendimiento de la purga son la longitud y el rango de las soluciones enmascaradas.

Una vez fijados los parámetros y el método de descomposición con los que se obtiene un mejor rendimiento en el enlazado, se obtiene un gold standard con el que poder comparar los resultados obtenidos con la solución diseñada y el resultado óptimo que se podría llegar a obtener mediante esta técnica.

Para la obtención del gold standard, se realiza el enlazado de los prototipos a partir de los obtenidos en una descomposición “perfecta”, en la que se habrían descompuesto todas las unidades motoras que deberían descomponerse, y en cada una de ellas se habrían identificado todos sus disparos.

A continuación se reproducen estos resultados para niveles de MVC del 2%, 3% y 4%, comparándolos también con los obtenidos mediante los prototipos totalmente ideales. De esta forma se podrá diferenciar que porcentaje del empeoramiento de los resultados pertenece a los artefactos provocados por las propias unidades motoras y que parte proviene del propio enlazado y de la descomposición.

En la Fig. 50 se incluyen los resultados para un nivel de MVC del 2%. Para este nivel los artefactos generados por otras unidades motoras son de muy bajo nivel, ya que el número de unidades motoras activas y la frecuencia de disparo de éstas es muy baja. Esto se observa en que la diferencia entre los resultados para el gold standard y el enlazado con los prototipos totalmente ideales es mínima para todas las figuras de mérito.

Comparando el mejor resultado obtenido con el gold standard, se observa que aún existe margen de mejora en la obtención de los resultados. Se observa cómo la diferencia con el gold standard es mucho mayor en la completitud (Fig. 50(b)) que en la precisión (Fig. 50(a)), esto se debe a que la precisión evalúa el enlazado de los prototipos en el núcleo, que suelen ser de mayor amplitud y por tanto se obtiene unos mejores prototipos de ellos. La completitud evalúa

toda la solución donde la unidad motora supera el umbral de segmentación, los potenciales que superen el umbral ligeramente estarán afectados en mayor medida por el ruido, obteniendo peores prototipos que incremente la posibilidad de ser enlazados erróneamente, lo cual explica también la degradación de la figura de mérito de la unicidad.

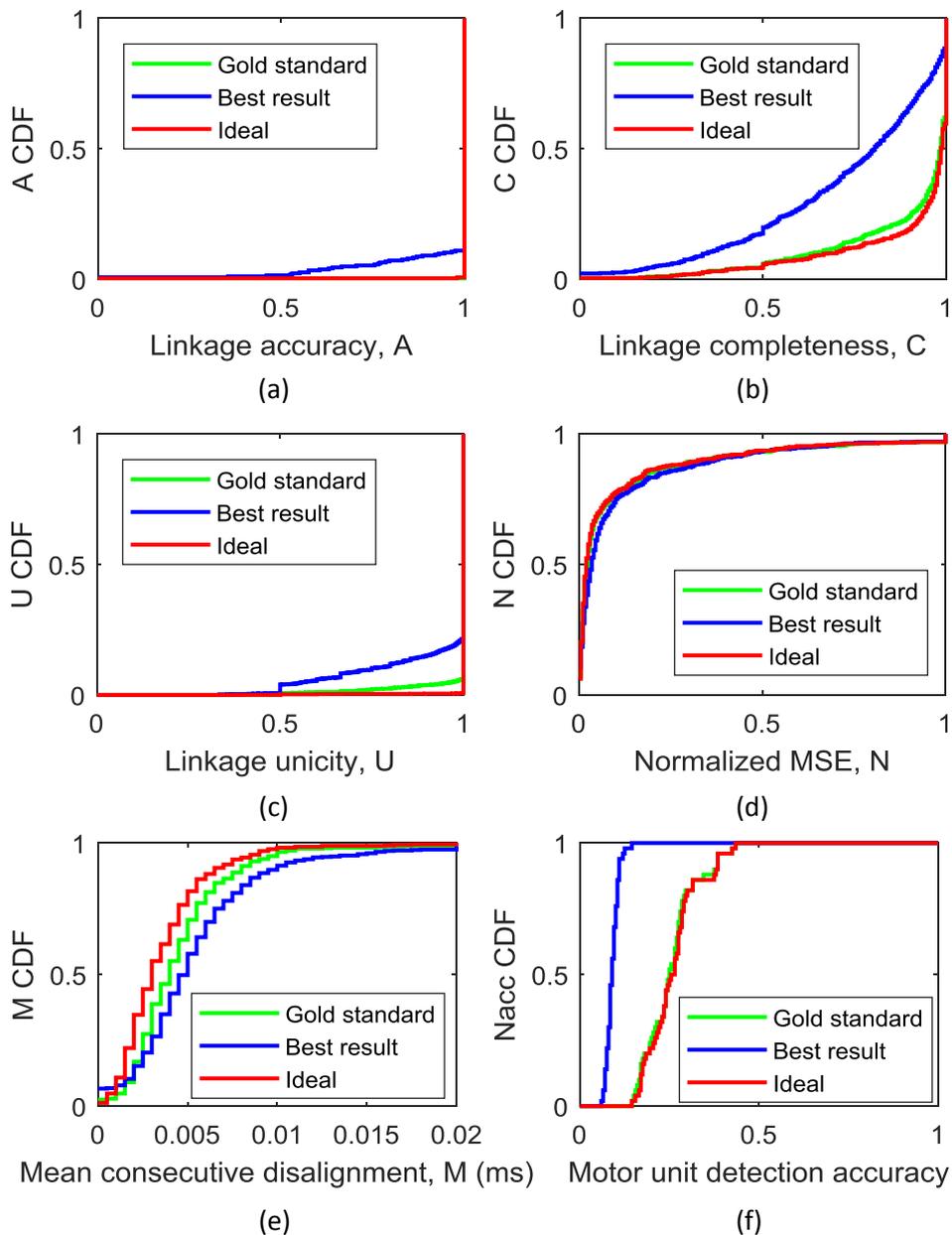


Fig. 50: Comparación de resultados entre el enlazado ideal, el gold standard y el mejor resultado obtenido en el proyecto para un MVC del 2%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Se observa cómo el error en la forma de onda (Fig. 50(d)) aumenta muy poco respecto al gold standard y los potenciales ideales. Esto significa que el la gran mayoría del error introducido es por el alineamiento, mientras que la incompletitud y los artefactos aportan un error mucho menor. También significa que las partes de la solución en las que no se ha realizado el enlazado tienen una potencia mucho menor que las partes en las que se ha enlazado.

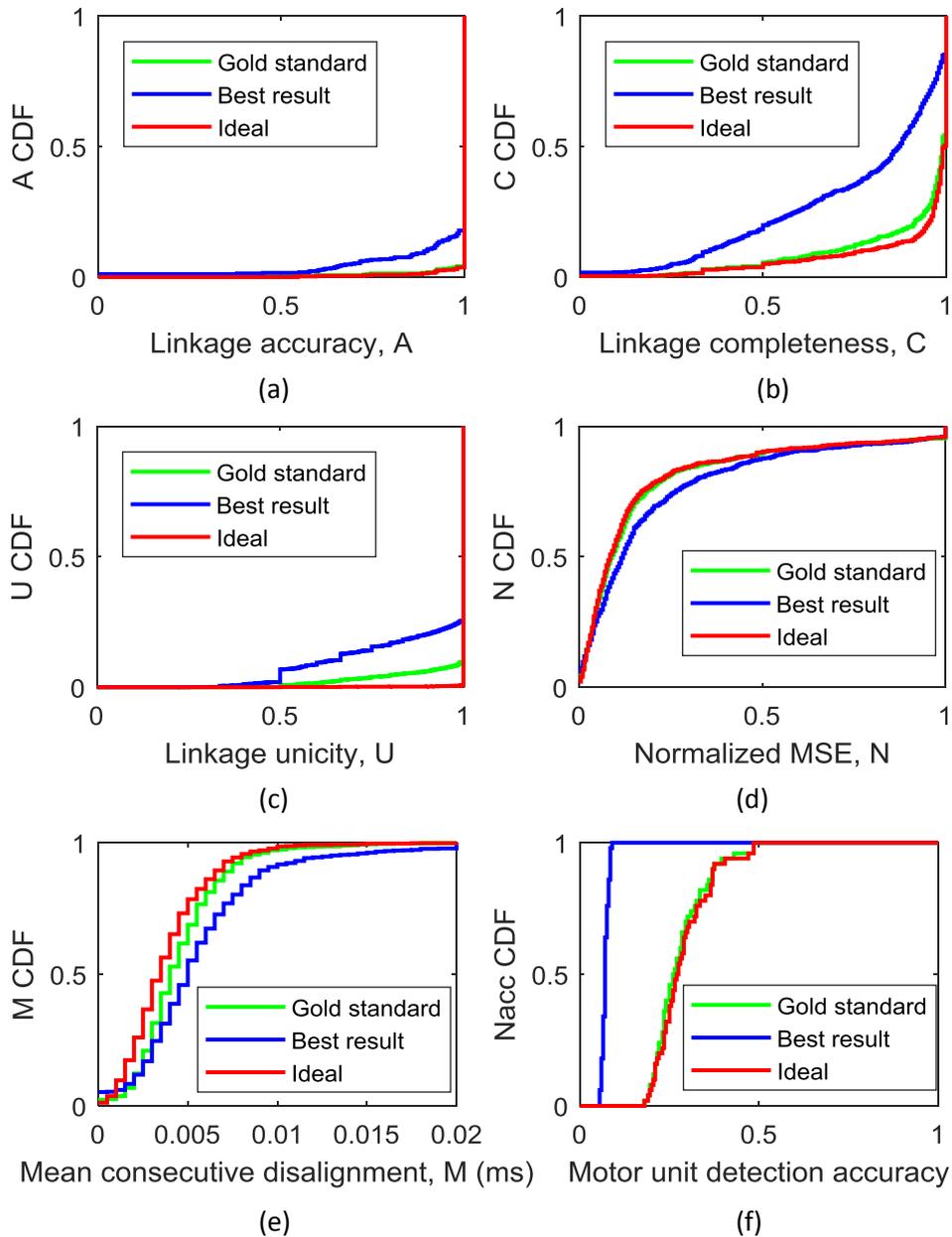


Fig. 51: Comparación de resultados entre el enlazado ideal, el gold standard y el mejor resultado obtenido en el proyecto para un MVC del 3%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

Los valores diferentes de precisión en el conjunto de unidades motoras obtenidas (Fig. 50(f)) significan que el número de soluciones obtenidas con el gold standard y los prototipos ideales son mucho menores que el mejor resultado obtenido. Esto puede deberse a que en la descomposición hayan aparecido potenciales repetidos, esto es, descompuestos más de una vez para una posición. Estos potenciales tienden a quedarse sueltos o ser enlazados en muy pocas posiciones, pero forman nuevas soluciones.

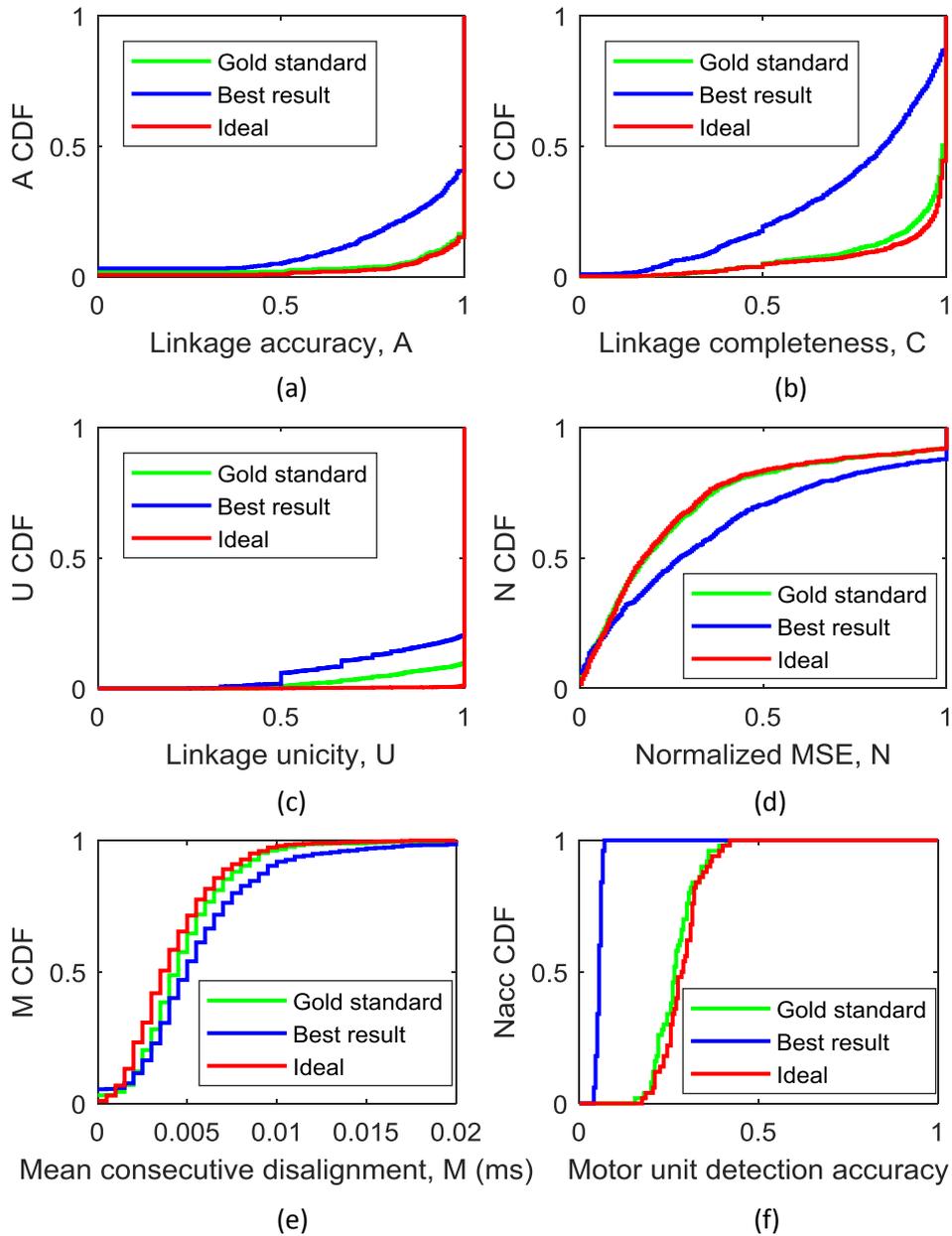


Fig. 52: Comparación de resultados entre el enlazado ideal, el gold standard y el mejor resultado obtenido en el proyecto para un MVC del 4%. Se representan las figuras de mérito de: precisión en los enlazados en el núcleo (a), completitud de las soluciones obtenidas (b), unicidad de las soluciones (c), error en la forma de onda de las señales scanning-MUP (d), desalineamiento medio entre posiciones consecutivas (e) y precisión en la obtención de las soluciones finales (f).

En la Fig. 51 se incluyen los mismos resultados realizados para un MVC del 3%. Se observa cómo para el gold standard y el enlazado ideal la precisión (Fig. 51(a)) sufre una ligera degradación, dejando de ser perfecta. Esto también se observa para el mejor resultado obtenido. Los valores de completitud (Fig. 51(b)) resultan similares a los obtenidos con un MVC del 2% para cada uno de los casos.

Para el error en la forma de onda (Fig. 51(e)) se observa cómo se distancia los mejores resultados obtenidos del gold standard y del enlazado ideal. Esto puede explicarse debido a los peores resultados en la precisión, en la que los potenciales de los núcleos tienen una mayor potencia y el no enlazado de estos repercute directamente en el error de forma de onda global.

En la Fig. 52 se incluyen los resultados para un nivel de MVC del 4%. Se observa cómo los resultados siguen la tendencia que se ha observado en la figura anterior, en el que empeoran todas las figuras de mérito relacionadas con la efectividad del enlazado (precisión (Fig. 52(a)), completitud (Fig. 52(b)) y unicidad (Fig. 52(c))). El empeoramiento de éstas se traduce en un claro aumento en el error de la forma de onda (Fig. 52(e)).

El gold standard sigue teniendo unos resultados muy similares al de los potenciales ideales, por tanto, se puede deducir que mientras la descomposición sea perfecta, los resultados del gold standard serán muy cercanos a los obtenidos idealmente, independientemente del nivel de MVC al que se trabaje (para los niveles de MVC con los que se ha trabajado en el proyecto). Es por ello que la descomposición supone una parte fundamental del sistema y se deberá optimizar lo máximo posible para el mejor rendimiento del sistema.

7. Conclusiones y líneas futuras

7.1 Conclusiones

Uno de los objetivos del proyecto trataba de demostrar la viabilidad de una nueva técnica de scanning-EMG en la que solo es necesario el uso de una aguja para su funcionamiento. Esto ha sido realizado satisfactoriamente ya se ha comprobado como mediante la técnica del multiscanning-EMG con una sola aguja es posible obtener varias señales de scanning-MUP que representen la actividad de varias unidades motoras presentes en el músculo, distribuidas a diferentes profundidades de éste. Mediante esta técnica se podrá reducir la dificultad y la invasividad a la hora de realizar un scanning-EMG (al necesitarse únicamente una aguja). En cambio, se perderá la completitud de las soluciones en todas las posiciones y la referencia temporal exacta de éstas.

Se ha desarrollado un sistema de enlazado de prototipos en diferentes posiciones basado en el algoritmo greedy-exchange y se han presentado dos sistemas de descomposición de registros cortos diferentes. Además, para analizar el rendimiento de estos se ha diseñado un sistema de evaluación tanto para la descomposición como para el enlazado.

Se ha realizado un estudio del rendimiento de los sistemas de descomposición utilizados bajo diferentes condiciones, determinando bajo que niveles de contracción voluntaria del músculo y con qué tiempos de registro el funcionamiento de este será adecuado. Se han obtenido resultados positivos con los que se demuestra la viabilidad de un sistema de descomposición para registros cortos (entre 500 ms y 1 s).

De la misma manera, se ha comprobado el rendimiento del algoritmo de enlazado desarrollado en diferentes condiciones. Se ha comprobado cómo mediante criterios de distancia es posible unir los potenciales de las unidades motoras obtenidos a diferentes profundidades obteniendo señales de scanning-MUP que representen a las unidades motoras.

Finalmente, se comprueba el correcto funcionamiento de la técnica, enlazando los prototipos obtenidos por el sistema de descomposición. Se obtienen unos resultados satisfactorios, pudiendo recuperar una gran cantidad de unidades motoras en el proceso. Además, se observa una correlación importante entre el rendimiento de la descomposición y el rendimiento del enlazado, cuanto mejores sean los prototipos obtenidos en la descomposición, mejor será el rendimiento del enlazado.

Los resultados se han presentado en forma de comunicación oral [27] en el congreso internacional de la ISEK (International Society of Electrophysiology and Kinesiology) celebrado en Dublín en junio de 2018.

7.2 Líneas futuras

Una vez demostrado el correcto rendimiento de la técnica en simulación, el siguiente paso será comprobar su funcionamiento en condiciones reales, comprobando si los resultados son parecidos a los obtenidos en simulación o si existen efectos no contemplados en los modelos de simulación.

Observando los resultados obtenidos en el capítulo 6 con el gold standard, esto es, con una descomposición perfecta, sugiere que optimizando el rendimiento del sistema de descomposición utilizado existe un gran margen en el que los resultados podrían ser mejorados.

Se podría llegar también a mejorar el rendimiento del algoritmo de enlazado si se diseña de forma que tuviese en cuenta 3 posiciones en vez de 2 a la hora de realizar el enlazado. De esta forma, el algoritmo sería más robusto a casos en los que en una posición determinada por alguna razón no se haya descompuesto un potencial que si debería haberse hecho, evitando que se corte el algoritmo en esa posición y pudiendo continuar en posiciones posteriores.

Además, podría llegarse a tomar otra estrategia diferente para la obtención de estas señales. En vez de dividir el proceso en dos partes (descomposición y enlazado), podría realizarse todo en uno solo, concatenando los registros de unas pocas posiciones consecutivas y realizando la descomposición de todo ello. De esta forma se aprovecharía la poca variación espacial de los potenciales en saltos de 50 μm . Descomponiendo como iguales los potenciales de posiciones consecutivas se estará realizando simultáneamente el enlazado en un solo proceso.

La posibilidad de usar un multielectrodo (esto es, un electrodo con dos o más posiciones de registro) podría mejorar el rendimiento de la técnica de forma considerable. De esta forma, se obtendría una mejora en la descomposición obtenida por la información redundante que aporte el hecho de obtener registros en más posiciones. Además, se solucionaría el problema del alineamiento, ya que al realizar la descomposición de la señal EMG en una de las posiciones de registro ya se obtendría el instante de tiempo en el que disparan esas unidades motoras en las demás posiciones de registro.

8. Bibliografía

- [1] Rodríguez-Falces, Javier; Malanda, Armando; Navallas, Javier. EMG Modeling. Intech Open Access Publisher, 2012.
- [2] Enoka, Roger and J. Fuglevand, Andrew. (2001). Motor unit physiology: Some unresolved issues. *Muscle & nerve*. 24. 4-17.
- [3] Navallas, J., & Sta, E. (2009). Studying motor end-plate topography by means of scanning-electromyography. *Clinical Neurophysiology*, 120(7), 1335-1341.
- [4] Henneman, E. (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science*, 126(3287), 1345-1347.
- [5] Rodríguez, Javier; Navallas, Javier; Malanda, Armando. Teaching a master student how to model the electrical potentials produced by the muscle. *International Journal of Engineering Education*, 2010, vol. 26, no 6, p. 1391.
- [6] Minetto, M. A., Rainoldi, A., & Jabre, J. F. (2007). The clinical use of macro and surface electromyography in diagnosis and follow-up of endocrine and drug-induced myopathies. *Journal of endocrinological investigation*, 30(9), 791-796.
- [7] Navallas, J., Rodríguez, J., & Stålberg, E. (2012). Scanning electromyography. In *EMG Methods for Evaluating Muscle and Nerve Function*. InTech.
- [8] Corera, Í., Eciolaza, A., Rubio, O., Malanda, A., Rodríguez-Falces, J., & Navallas, J. (2018). A masked least-squares smoothing procedure for artifact reduction in scanning-EMG recordings. *Medical & biological engineering & computing*, 1-12
- [9] Van Dijk, J. P., Eiglsperger, U., Hellmann, D., Giannakopoulos, N. N., McGill, K. C., Schindler, H. J., & Lapatki, B. G. (2016). Motor unit activity within the depth of the masseter characterized by an adapted scanning EMG technique. *Clinical Neurophysiology*, 127(9), 3198-3204.
- [10] Florestal, J. R., Mathieu, P. A., & Malanda, A. (2006). Automated decomposition of intramuscular electromyographic signals. *IEEE Trans. Biomed. Engineering*, 53(5), 832-839.
- [11] Adrián Eciolaza Ferrando; TFG – Técnicas avanzadas de scanning-EMG
- [12] Fuglevand AJ, Winter DA, Patla AE (1993) Models of recruitment and rate coding organization in motor-unit pools. *J Neurophysiology* (6):2470–2488
- [13] De Luca, C. J., & Hostage, E. C. (2010). Relationship between firing rate and recruitment threshold of motoneurons in voluntary isometric contractions. *Journal of neurophysiology*, 104(2), 1034-1046.
- [14] De Luca, C. J., & Contessa, P. (2011). Hierarchical control of motor units in voluntary contractions. *Journal of neurophysiology*, 107(1), 178-195.
- [15] Navallas, J., Malanda, A., & Rodríguez-Falces, J. (2014). Maximum likelihood estimation of motor unit firing pattern statistics. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(3), 460-469.
- [16] J. R. Falces, A. M. Trigueros, L. G. Useros, I. R. Carreno and J. N. Irujo, Modeling fibrillation Potentials—a new analytical description for the muscle intracellular action potential, in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 581-592, April 2006.

- [17] Dimitrov, G. V., & Dimitrova, N. A. (1998). Precise and fast calculation of the motor unit potentials detected by a point and rectangular plate electrode. *Medical engineering & physics*, 20(5), 374-381.
- [18] K. C. McGill and L. J. Dorfman, High-Resolution Alignment of Sampled Waveforms, in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-31, no. 6, pp. 462-468, June 1984.
- [19] Quiroga, R. Q., Nadasdy, Z., & Ben-Shaul, Y. (2004). Unsupervised spike detection and sorting with wavelets and superparamagnetic clustering. *Neural computation*, 16(8), 1661-1687.
- [20] Malanda-Trigueros, A., Navallas, J., Rodriguez-Falces, J., Rodriguez-Carreño, I., Porta, S., Fernández-Martínez, M., & Gila, L. (2018). Sliding window averaging in normal and pathological motor unit action potential trains. *Clinical Neurophysiology*, 129(6), 1170-1181.
- [21] M. Nikolic, J. A. Sorensen, K. Dahl and C. Krarup, Detailed analysis of motor unit activity, *Engineering in Medicine and Biology Society*, 1997. Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE, Chicago, IL, 1997, pp. 1257-1260
- [22] H. Parsaei, F.J. Nezhad, D.W Stashuk. Validating motor unit firing patterns extracted by EMG signal decomposition. *Med Biol Eng Comput* (2011) 49: 649.
- [23] Ren, X., Zhang, C., Li, X., Yang, G., Potter, T., & Zhang, Y. (2018). Intramuscular EMG Decomposition Basing on Motor Unit action Potentials Detection and superposition resolution. *Frontiers in neurology*, 9, 2.
- [24] I. K. Sethi and R. Jain, Finding Trajectories of Feature Points in a Monocular Image Sequence, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, no. 1, pp. 56-73, Jan. 1987.
- [25] V. Salari and I. K. Sethi, Feature point correspondence in the presence of occlusion, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 1, pp. 87-91, Jan 1990.
- [26] Nandedkar, S. D., Sanders, D. B., Stålberg, E. V. and Andreassen, S. (1988), Simulation of concentric needle EMG motor unit action potentials. *Muscle Nerve*, 11: 151-159
- [27] Navallas, J., Eciolaza, A., Rubio, O., Corera, I., Rodríguez, J., Malanda, A., Single-needle multiscanning-EMG. Trabajo presentado en el congreso internacional de electrofisiología y kinesiología (ISEK), 2018 Dublín.