

## CAPÍTULO 3

# 3. Metodología para la evaluación de rendimiento de estimadores no lineales basados en el filtro de Kalman

**D**urante el desarrollo de los capítulos preliminares de este libro, se ha expuesto y detallado la manera en la cual están contruidos algunos de los principales tipos de filtros de Kalman, y así mismo las implicaciones teóricas que puede traer la implementación de uno u otro tipo de algoritmo. El siguiente paso, por lo tanto, es establecer cómo se puede utilizar la teoría revisada y llevarla al caso específico de aplicación en señales biomecánicas.

La metodología descrita en este capítulo está dividida por etapas que conforman grupos de trabajo para el desarrollo de la investigación. Dichos paquetes de trabajo contienen actividades y el resultado del proceso. Mediante la suma de las actividades descritas en los paquetes de trabajo propuestos se obtienen los resultados para el desarrollo de la investigación, registrados en el capítulo cuarto.

Se expone a continuación el diseño de los pasos necesarios para efectuar la aplicación de los estimadores no lineales basados en el filtro de Kalman en señales biomecánicas, donde se presentarán las ideas clara y adecuadamente, facilitando la comprensión y asimilación del proceso experimental.

### 3.1 Tipo de Investigación

La metodología considera un tipo de investigación mixta de carácter experimental y correlacional, ya que observando y variando los parámetros implicados en el proceso de filtrado de las señales, así como las variables de medición del sistema y la naturaleza misma de las señales en estudio, se puede comparar el resultado de la aplicación del filtro versus la señal sin un previo tratamiento de los datos.

## 3.2 Método

El desarrollo de la investigación está dado en cuatro etapas, cada una de ellas abarca un tema de interés específico y riguroso para poder cumplir con los objetivos de esta investigación.

### 3.2.1 Identificación de los algoritmos para la estimación no lineal de posición y orientación de objetos en movimiento.

La determinación de los algoritmos de estimación no lineal en aplicaciones de posición y orientación de objetos en movimiento es necesario, ya que provee el fundamento de las técnicas de estimación y el desarrollo de técnicas específicas de filtrado.

---

#### Paquete de Trabajo 1: Identificación y fundamentación teórica

---

- Actividad 1** Consulta y documentación de información que abarque la temática de estimadores lineales y estimadores no lineales.
- Actividad 2** Consulta y documentación de información de referencia, como los términos propios de estadística y cálculo.

#### Resultado

Compendio de información que muestra la fundamentación de los estimadores, sus características y distintos tipos, reflejado en el capítulo uno de este libro.

---

### 3.2.2 Determinación de las características propias de los filtros de Kalman.

El correcto establecimiento de las características principales de los filtros de Kalman asegura su correcta implementación en la plataforma de captura de movimiento.

---

#### Paquete de Trabajo 2: Identificación y fundamentación del filtro de Kalman

---

- Actividad 1** Consulta y documentación de información que abarque la temática de filtros de Kalman.
- Actividad 2** Profundización en la temática concerniente a los filtros de Kalman *Unscented* y *Extendido*.
- Actividad 3** Análisis de las características propias de los filtros de Kalman *Unscented* y *Extendido*.
-

Continuación Paquete de Trabajo 2.

---

**Actividad 4** Recopilación de información acerca de implementaciones de Filtros de Kalman realizadas para otros sistemas o dispositivos.

**Resultado**

Registro detallado y documentado de cada uno de los filtros caso de estudio, reflejado en el capítulo dos de este libro.

---

### 3.2.3 Implementación de un escenario basado en pluralidad de sensores de movimiento.

La creación de un escenario basado en pluralidad de sensores reúne los elementos de tipo electrónico y en sistemas de información necesarios para capturar la información que es objeto de análisis.

---

#### Paquete de Trabajo 3: Implementación del escenario de captura de movimiento

---

**Actividad 1** Documentación de las características de los sensores de movimiento, incluyendo diversas tecnologías.

**Actividad 2** Documentación de las características necesarias de procesamiento para la creación del escenario, escogiendo la alternativa más viable.

**Actividad 3** Evaluación de las características de la MPU Invensense MPU-9150.

**Actividad 4** Interconexión de las MPU para la recolección de datos.

**Actividad 5** Verificación del funcionamiento del sistema con pluralidad de sensores.

**Resultado**

Plataforma de captura de movimiento basado en pluralidad de sensores IMU/MPU de tecnología MEMS.

---

### 3.2.4 Implementación de los filtros y preparación del entorno.

Mediante la aplicación del conocimiento específico de la ingeniería electrónica en procesamiento digital de señales, se elabora e implementa los filtros de acuerdo a las características específicas de cada uno.

Se propone un sistema de referencia basado en una pluralidad de sensores y otro de referencia.

---

#### **Paquete de Trabajo 4: Implementación de los filtros**

---

- Actividad 1** Análisis de algoritmos de Filtro de Kalman implementados digitalmente.
- Actividad 2** Implementación de los filtros de Kalman en un lenguaje acorde al escenario basado en la pluralidad de sensores.
- Actividad 3** Verificación del funcionamiento preliminar de los filtros de Kalman.

#### **Resultado**

Implementación algorítmica de los filtros de Kalman de manera adecuada, coherente y funcional con el sistema de captura de movimiento basado en pluralidad de sensores.

---

### **3.2.5 Implementación de un escenario de referencia.**

La creación de un escenario de referencia brinda la posibilidad de crear simulaciones que reflejan comportamientos característicos de las señales a estudiar, y sustentan los análisis desarrollados a partir de los datos generados por medio de ésta.

---

#### **Paquete de Trabajo 5: Escenario de Referencia**

---

- Actividad 1** Recopilación de información acerca de los movimientos de flexión y extensión en los miembros superiores del cuerpo humano y sus características básicas.
- Actividad 2** Documentación de las características de diversos servomotores para proporcionar el movimiento.
- Actividad 3** Determinación de los materiales necesarios para la construcción del escenario.
- Actividad 4** Verificación del funcionamiento del sistema de referencia.

#### **Resultado**

Escenario de referencia que permite realizar la comparación de los filtros frente al sistema basado en la pluralidad de sensores.

---

### **3.2.6 Análisis de los datos a través de la raíz cuadrada del error cuadrático medio.**

Los datos generados a partir de los protocolos de pruebas son procesados para determinar la eficiencia de cada filtro aplicado, por lo cual se adopta la medición del RMSE como parámetro indicador de eficiencia.

---

**Paquete de Trabajo 6: Análisis de los datos a través del RMSE**

---

- Actividad 1** Selección de las técnicas de correlación apropiadas para el análisis de los datos obtenidos.
- Actividad 2** Análisis de cada muestra de datos recolectada por medio del escenario basado en pluralidad de sensores para determinar el RMSE versus el escenario de referencia propuesto.

**Resultado**

Conclusión acerca de la efectividad de los filtros de Kalman implementados en el sistema de captura de datos.

---

**3.2.7 Análisis de la complejidad computacional de los filtros.**

Se analizan los algoritmos con base a las estructuras de programación para determinar el valor de complejidad computacional.

---

**Paquete de Trabajo 7: Análisis de complejidad computacional**

---

- Actividad 1** Documentación y recopilación acerca de las técnicas de análisis de algoritmos computacionales.
- Actividad 2** Utilización de un software para el análisis del código fuente escrito en C++.
- Actividad 3** Análisis de resultados derivados del código fuente.

**Resultado**

Determinación de la complejidad computacional promedio para el EKF y el UKF.

---

**3.2.8 Recopilación y presentación de resultados.**

Una vez generada la documentación de la experimentación y el cumplimiento de los objetivos, se expone la compilación de todos los resultados y conclusiones finales de la investigación.

---

**Paquete de Trabajo 8: Conclusión**

---

- Actividad 1** Organización, documentación y presentación de resultados.

**Resultado**

Consolidación del libro que evidencia el origen, objeto y certeza de la investigación realizada.

---

### 3.3 Criterios de Validez y Confiabilidad

Para analizar el rendimiento de los filtros en las pruebas definidas, es necesario tener una medida estándar del error producido. El valor de RMSE es un indicador de validez experimental ya que permitirá evaluar el rendimiento del filtro a partir de la comparación directa con las señales de origen sin procesar. La repetitividad de los resultados permitirá comprobar que el comportamiento de los filtros es estable conservando las características básicas del escenario de prueba, sin importar el momento o lugar de la captura de la señal, lo que provee una sólida prueba de la veracidad de la información.

Adicionalmente, la confiabilidad estará dada en la medida de la exigencia de una respuesta óptima de los filtros en escenarios o situaciones de comprobación en donde se exageran o acentúan experimentalmente los problemas para crear entornos que en la cotidianidad no sucederá. Llevar las pruebas a un límite para el peor caso posible supone una estabilidad del filtro necesaria para afrontar cualquier situación desfavorable.

### 3.4 Variables e Indicadores

Se debe tener en consideración todas aquellas variables que influyen en el desarrollo metodológico y en los resultados de las pruebas, así como los indicadores que resaltan la evidencia concluyente sobre el análisis de los datos recolectados. Se presenta a continuación las variables e indicadores que hacen parte de esta investigación.

#### 3.4.1 Velocidad angular del movimiento

Rapidez con la cual el brazo realiza los movimientos determinados en el protocolo de procedimientos. Su unidad de medida está dada en radianes por segundo [rad/s].

#### 3.4.2 Frecuencia de Muestreo

Tasa a la cual son capturados los datos provenientes de los sensores. Su unidad de medida está dada en Hertz [Hz].

### 3.4.3 Tiempo de captura

Duración temporal de la señal capturada. Su unidad de medida está dada en Segundos [s].

### 3.4. Tipo de movimiento

Forma de onda descrita que se ajusta a los datos de tipo biomecánico que se generan en el proceso de captura.

### 3.4.5 Amplitud de los movimientos

Valores límite de Flexión y Extensión en los que está dado el movimiento. Se usa como medida de valores pico (máximos y mínimos). Su unidad de medida está dada en Grados Sexagesimales [°].

### 3.4.6 Desfase u *Offset*

Valor de desplazamiento constante de la forma de onda con respecto del cero de la señal. Está medido en las mismas unidades de la amplitud de los movimientos. En una forma de onda senoidal, un valor *offset* de cero indica que los valores máximos y mínimos de la señal estará dado por el valor de la amplitud de la onda.

### 3.4.7 Valores específicos de los parámetros del filtro

Son aquellos parámetros que permiten la inicialización del filtro, como son los valores de desviación estándar en la medida ( $r$ ) y la desviación estándar en el proceso ( $q$ ). Otros parámetros como son la ganancia del filtro de Kalman, las matrices de varianza y covarianza, entre otros, son calculados de forma automática por el filtro. (Véase Capítulo 2: Filtro de Kalman)

### 3.4.8 RMSE

Indicador de la cantidad de error presente en las señales recolectadas, teniendo como referencia una señal de entrada del sistema o una señal confiable recolectada junto a los datos. Para la definición matemática del RMSE, véase Capítulo 1: Fundamentación Teórica para la Implementación de Técnicas de Procesamiento de Señales.

## 3.5 Protocolos de Prueba

La experimentación por medio de la cual se obtienen los datos de prueba debe estar guiada por un diseño lógico que evidencie la correcta aplicación de los filtros, teniendo en cuenta las variables e indicadores propuestas en el diseño metodológico. En el desarrollo de los protocolos de prueba, se usan movimientos de tipo senoidal, ya que reflejan el movimiento de flexión y extensión realizado en las extremidades superiores generado por la articulación del codo, las velocidades angulares del movimiento están comprendidas entre 1 y 15 rad/s, teniendo en cuenta que dentro de ese rango se producen los movimientos del cuerpo humano, y finalmente se adopta una amplitud de  $20^\circ$ , un valor que puede ser cambiado en cualquier momento, ya que para la articulación del codo los rangos de abertura entre el antebrazo y el brazo van desde los  $0^\circ$  hasta aproximadamente los  $165^\circ$  en total.

### 3.5.1 Protocolo 1. Variación de los parámetros de desviación estándar

Se realizan cinco tomas de movimiento para cada velocidad angular de 1, 5, 10 y 15 rad/s, representando la característica de flexión y extensión, de amplitud  $A=20^\circ$ ,  $Offset=0^\circ$ , frecuencia de muestreo  $F_s=35$  Hz, forma de onda senoidal y tiempo de captura  $T_c=20$  s. En cada toma se realiza la variación de los parámetros de desviación estándar en la medida ( $r$ ) y desviación estándar en el proceso ( $q$ ) para EKF y UKF con el fin de establecer los valores de  $r$  y  $q$  que sintonizan de manera óptima los filtros para las velocidades angulares específicas.

### 3.5.2 Protocolo 2. Determinación de la desviación estándar promediada

A partir de los valores óptimos de ambos filtros de Kalman para cada velocidad angular específica propuesta en el protocolo 1, se halla un valor de desviación estándar promediada para la medida ( $r$ ) y desviación estándar promediada para el proceso ( $q$ ) que permita la utilización de los filtros UKF y EKF para un movimiento en el cual la velocidad angular varíe en el rango de 0 a 15 rad/s.

### 3.5.3 Protocolo 3. Verificación de la eficiencia de los valores de desviación estándar promediada

Se realiza una toma de movimiento para cada velocidad angular de 1, 5, 10 y 15 rad/s en dos escenarios diferentes:

**Escenario 1:** se escogen los parámetros de desviación estándar en la medida ( $r$ ) y desviación estándar en el proceso ( $q$ ) óptimos para cada valor específico de velocidad angular hallados en el protocolo 1 para EKF y UKF.

**Escenario 2:** se escogen los parámetros de desviación estándar promediados para la medida ( $\sigma_r$ ) y desviación estándar promediados para el proceso ( $\sigma_q$ ).

Las características que comparten ambos escenarios son los siguientes:

Movimiento de flexión y extensión simulado, de amplitud  $A=20^\circ$ ,  $offset=0^\circ$ , frecuencia de muestreo  $F_s=35$  Hz, forma de onda senoidal y tiempo de captura  $T_c=30$  s.

El propósito de este protocolo es comprobar si los valores de desviación estándar promediados para la medida ( $\sigma_r$ ) y desviación estándar promediados para el proceso ( $\sigma_q$ ) obtenidos en el protocolo 2 son óptimos para cualquier velocidad angular en el rango propuesto.

#### **3.5.4 Protocolo 4. Obtención de los datos en periodos de tiempo específicos**

Se realiza una toma de movimiento para cada tiempo de captura  $T_c$  de 10, 60, 600 y 3600 segundos, simulando un movimiento de flexión y extensión, con una amplitud  $A=20^\circ$ ,  $Offset=0^\circ$ , frecuencia de muestreo  $F_s=35$  Hz, forma de onda senoidal. Lo anterior se realiza en velocidades angulares de 1 y 15 rad/s.

El propósito de este protocolo es mostrar el valor del RMSE para cada filtro cuando se exponen a diferentes tiempos de uso.

