



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**RUIDO VIBROTÁCTIL ESPACIALMENTE COINCIDENTE MEJORA LA
DETECCIÓN DE ESTÍMULOS POR DEBAJO DEL UMBRAL**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA ELÉCTRICA

LUIS TOGO ARREDONDO GAMBOA

PROFESOR GUÍA:

CLAUDIO PÉREZ FLORES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARCOS ORCHARD CONCHA

PABLO ESTEVEZ VALENCIA

MAX CHACON PACHECO

PEDRO MALDONADO ARBOGAST

SANTIAGO DE CHILE

2022

**RUIDO VIBROTÁCTIL ESPACIALMENTE COINCIDENTE MEJORA LA
DETECCIÓN DE ESTÍMULOS POR DEBAJO DEL UMBRAL**

Resumen:

La resonancia estocástica (SR) es un fenómeno presente en los sistemas de detección no lineal, en los que se ha demostrado que la adición de cierta cantidad de ruido óptimo mejora el rendimiento de detección de estímulos sub-umbral. El objetivo de esta tesis es estudiar el efecto de la localización del ruido vibro táctil en la detección de estímulos sub-umbral para un esquema de cuatro puntos de estimulación. Se comparan las tasas de respuesta correcta en condiciones diferentes. Para una condición, todos los estimuladores contienen ruido óptimo; en la segunda condición, sólo en el estimulador con el estímulo contiene ruido óptimo. La SR no predice tasas diferentes de respuesta correcta entre estas condiciones. La señal de estímulo utilizada fue un pulso rectangular de 300 ms en un intervalo de atención de 1,5 s, aplicado a la zona exploratoria del dedo índice de 13 sujetos humanos. Para todos se encontró mejores tasas de detección ($p < 0,00059$) cuando el ruido coincidía espacialmente con el estímulo. De acuerdo con la revisión bibliográfica, este es el primer reporte de SR influenciado por la coincidencia espacial del ruido; por lo que representa un nuevo fenómeno, que llamamos Resonancia Estocástica Mejorada por Coincidencia Espacial.

Dedico este trabajo a mis padres.

Agradecimientos:

*Proyecto FONDECYT No.1080593 y Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad
de Chile.*

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 1 |
| 1.1 Motivación | 1 |
| 1.2 Hipótesis..... | 3 |
| 1.3 Objetivo General | 4 |
| 1.4 Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.5 Estructura del documento..... | 4 |
| Capítulo 2..... | 5 |
| 2.1 Definición del problema..... | 5 |
| 2.1.1 Receptores Táctiles | 5 |
| 2.2 Medición de Umbrales | 7 |
| 2.2.1 Método de la Escalera | 8 |
| 2.2.2 Métodos de Alternativa Forzada | 9 |
| 2.3 Teoría Clásica de Umbral..... | 9 |
| 2.4 Teoría de Detección de señales | 11 |
| 2.5 Factores relevantes en la percepción táctil..... | 14 |
| 2.5.1 Factores Médicos..... | 14 |
| 2.5.2 Factores Ambientales | 15 |
| 2.5.3 Condiciones de Estimulación..... | 15 |
| 2.6 Resonancia estocástica en el sistema táctil humano..... | 16 |
| 2.6.1 Efectos de la RE táctil en el umbral absoluto..... | 16 |
| 2.6.2 Presencia de RE táctil sobre el umbral diferencial de frecuencia..... | 17 |
| 2.6.3 Presencia de RE táctil sobre el umbral diferencial en discriminación de amplitud..... | 17 |
| 2.6.4 Presencia de RE táctil sobre la capacidad de ordenar eventos sensoriales..... | 18 |
| 2.7 Teoría de la Incerteza | 18 |
| 2.8 Comparación entre la TI y la TDS | 19 |
| 2.8.1 Efectos del Ruido sobre la Incerteza | 19 |
| Capítulo 3 | 20 |
| Metodología | 20 |
| 3.1 Sujetos | 20 |
| 3.2 Protocolos experimentales..... | 20 |
| 3.2.1 Determinación del umbral táctil..... | 21 |

| | |
|--|----|
| 3.2.2 Determinación de nivel óptimo de ruido..... | 22 |
| 3.2.2.1 Determinación del nivel óptimo de ruido para sesión 1 | 22 |
| 3.2.2.2 Determinación del nivel óptimo de ruido para sesión 2 | 24 |
| 3.2.3 Evaluación del efecto del ruido sobre la incerteza espacial | 24 |
| 3.3 Equipamiento | 26 |
| 3.3.1 Computador y Software de Control..... | 27 |
| 3.3.1.1 Algoritmo para Medición de Umbrales..... | 27 |
| 3.3.1.2 Algoritmo para Medición de Punto de Resonancia..... | 29 |
| 3.3.1.3 Algoritmo para Determinación del Efecto sobre la Incerteza Espacial..... | 30 |
| 3.3.2 Conversor Digital a Análogo..... | 31 |
| 3.3.3 Filtro y Amplificador | 32 |
| 3.3.4 Micro Estimuladores Piezoeléctricos | 34 |
| 3.3.5 Montaje Mecánico..... | 36 |
| Capítulo 4..... | 38 |
| 4.1 Medición de Umbrales Táctiles..... | 39 |
| 4.2 Medición de Nivel Óptimo de Ruido para sesión 1 y sesión 2 | 43 |
| 4.3 Efecto de la distribución del Ruido sobre la Incerteza Espacial | 45 |
| Capítulo 5..... | 51 |
| Bibliografía | 53 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1: Estructuras anatómicas destinadas a percepción mecánica..... | 6 |
| Tabla 2.2: Muestra la clasificación y descripción de los cuatro canales psicofísicos [27]..... | 6 |
| Tabla 2.3: Matriz de respuesta para un observador..... | 12 |
| Tabla 4.1: Resultados en micrómetros, promedio para un caso por sujeto, de la medición de Umbral Táctil al Pulso Rectangular. | 39 |
| Tabla 4.2: Resultados en micrómetros de la medición de Umbral Táctil a Ruido Gaussiano..... | 41 |
| Tabla 4.3: Nivel Óptimo de ruido para sesión 1 por sujeto..... | 43 |
| Tabla 4.4: Registro de respuestas y cálculo de las tasas de aciertos positivos CS1 y CS2 para las sesiones S1 y S2 respectivamente.. | 46 |
| Tabla 4.5: Registro de respuestas y cálculo de las tasas de aciertos positivos.. | 47 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Tipos de estímulos empleados por Pérez y Cohn | 2 |
| Figura 1.2: Tipos de estímulo..... | 3 |
| Figura 2.1: Modelo de cuatro canales..... | 7 |
| Figura 2.2: Medición de umbral por el método de la Escalera Descendente. | 8 |
| Figura 2.3: Curva psicométrica | 11 |
| Figura 2.4: Funciones de distribución teóricas..... | 12 |
| Figura 2.5: Modelo ROC según TDS..... | 14 |
| Figura 2.6: Porcentaje de aciertos positivos en función del nivel de ruido. | 17 |
| Figura 2.7: Umbrales diferenciales promedio para un grupo de 5 observadores.. | 18 |
| Figura 3.1: Estímulo tipo pulso.. | 22 |
| Figura 3.2: Señales de estímulo para sesión 1..... | 23 |
| Figura 3.3: Señales de estímulo para sesión 2..... | 24 |
| Figura 3.4: Cuatro distintos tipos de estímulo empleados para la evaluación de la incerteza espacial.. | 25 |
| Figura 3.5: Esquema del sistema experimental propuesto. | 26 |
| Figura 3.6: Imagen real del software de control y registro para medición de umbral..... | 28 |
| Figura 3.7: Imagen real del software de control y registro en que se realizó una medición de nivel óptimo de ruido..... | 29 |
| Figura 3.8: Imagen real del software de control y registro para determinar efectos sobre la Incerteza Espacial..... | 31 |
| Figura 3.9: Imagen real del módulo de conversión Análogo Digital NI9263..... | 32 |
| Figura 3.10: Diagrama esquemático del circuito de filtrado y amplificación.. | 33 |
| Figura 3.11: Fotografía del módulo de amplificación y filtrado en su encapsulado.. | 34 |
| Figura 3.12: Características del estimulador piezoeléctrico..... | 34 |
| Figura 3.13: Imagen del actuador piezoeléctrico y el vástago plástico entrando en contacto con el dedo del sujeto..... | 35 |
| Figura 3.14: Imagen de montaje real para la toma experimental de datos.. | 36 |
| Figura3.15: Detalle esquemático del montaje mecánico real de cada transductor piezoeléctrico.. | 37 |
| Figura 4.1: Fotografía real de la escena en que se realizaron los experimentos..... | 38 |
| Figura 4.2: Resultados de la medición de Umbral Táctil al pulso rectangular..... | 40 |
| Figura 4.3: Resultados de la medición de Umbral Táctil al Ruido Gaussiano..... | 42 |
| Figura 4.4: Umbrales de percepción medidos para tres condiciones..... | 42 |
| Figura 4.5: Resultados de la medición de nivel óptimo de ruido.. | 44 |
| Figura 4.6: Comparación de umbrales táctiles.. | 44 |
| Figura 4.7: Porcentaje de respuestas correctas..... | 47 |
| Figura 4.8: Porcentaje de falsos positivos. | 48 |
| Figura 4.9: Porcentaje de respuestas incorrectas..... | 49 |
| Figura 4.10: Porcentaje de respuestas correctas en la tarea 4AFC..... | 50 |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

El estudio de la percepción táctil con métodos psicofísicos, entre varias orientaciones, tiene aplicaciones directas en el desarrollo de interfaces hombre máquina, diseño de sensores que emulen la respuesta del ser humano, desarrollo de prótesis, mejoras en procesos de tratamiento de señales, robótica, cibernética y háptica [45-57, 63-65, 74, 75]. La investigación en esta área desde la perspectiva de la psicofísica, dentro de la disciplina de la ingeniería biomédica que es una de las ramas de la IEEE (EMBS), resulta relevante para expandir el conocimiento científico y dar pie a mejoras de ingeniería sustentadas en estos avances. En este trabajo se realiza el estudio desde el enfoque psicofísico y las predicciones hechas por la Teoría de Resonancia Estocástica (TRE) y Teoría de la Incerteza (TI).

La Resonancia Estocástica (RE) es un fenómeno en el cual cierto nivel de ruido mejora la respuesta de un sistema no lineal ante una señal débil [1, 4, 45]. La TDS establece que si existe suficiente evidencia sensorial tal que supera un cierto umbral, el observador reporta una detección [2], sin embargo, esta no explica por qué una señal sub-umbral que contiene un cierto nivel de ruido puede alcanzar tasas de detecciones positivas mayores que si no las tuviera [1,2,4]. En este sentido, la teoría de RE viene a complementar la TDS para explicar este fenómeno [1, 9]. Se ha encontrado evidencia experimental de la presencia de este fenómeno en los sistemas sensoriales humanos incluyendo el sistema táctil [1, 9, 10, 16], mostrando que cierto nivel de ruido es capaz de mejorar la percepción en particular a dicho sentido. En estos experimentos se utilizó un estímulo mecánico sub-umbral (no perceptible por el sujeto) en forma de pulso y ruido mecánico en forma de vibraciones aleatorias. Se logró determinar que, al presentar un estímulo dentro de un intervalo temporal con ruido, la tasa de detecciones positivas aumentaba respecto de la situación en que el intervalo no contiene ruido. El ruido aplicado es de tipo Gaussiano y se caracteriza mediante su varianza. Los resultados experimentales muestran que existe un valor óptimo de varianza para el cual se maximizan las detecciones positivas, disminuyendo éstas para varianzas mayores o menores de ruido aplicado. En [1] los autores demostraron así la existencia de RE para el sistema táctil humano. La teoría psicofísica de RE establece que la amplitud requerida para alcanzar el umbral sensorial se puede conseguir mediante la adición de ruido al estímulo sub umbral, sirviendo este como una suerte de pedestal para superar el umbral [1, 16, 19]. Si el nivel de ruido es demasiado alto, conlleva a un aumento de los falsos positivos y la consecuente disminución en el desempeño del sujeto.

Desde que la RE fue demostrada para el sistema táctil humano en 1996 [1], ha sido ampliamente corroborada tanto para estímulos de tipo pulso rectangular como para estímulos vibratorios en diversas regiones del cuerpo humano, principalmente la zona exploratoria de los dedos de la mano y la planta del pie [9-12, 17, 24, 25, 28, 45-57, 67-69]. Sin embargo, se ha

encontrado evidencia experimental que desafía la TDS. En 2007 se encontró [25] que, si se adiciona ruido sincronizado temporalmente con una señal de estímulo tipo pulso rectangular, esto es que el ruido se inicia y termina en los mismos momentos que se inicia y termina la señal de estímulo como se muestra en la Figura 1.1, se consigue una tasa de detecciones positivas mayor que en la situación en que el ruido se encuentra presente durante todo el intervalo de atención. Este fenómeno no se explica completamente por la teoría de RE ya que ésta predice que la tasa de detecciones positivas debería ser la misma en ambos casos, ya que en ambos casos la señal se sumaría al ruido y permitiría superar el umbral de detección. Esto que indica que el modelo planteado por la teoría de RE debe ser corregido o complementado para explicar este fenómeno.

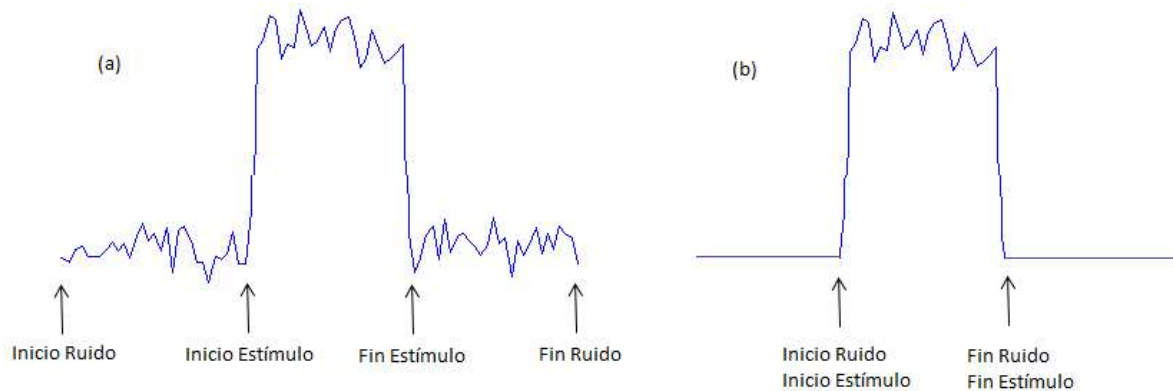


Figura 1.1: Tipos de estímulos empleados por Pérez y Cohn. (a) estímulo con ruido en todo el intervalo de atención, (b) ruido presente sólo mientras dura el estímulo [25].

Pérez y Cohn [25] propusieron una explicación basada en la Teoría de la Incerteza (TI), propuesta por Tanner en 1961 [20], tal que la sincronización del ruido con el estímulo ayudaría a reducir la incerteza temporal del observador. En el modelo sensorial propuesto por Tanner [20], se asume que el observador tiene información incierta respecto de los parámetros de la señal de estímulo, por lo que se debe considerar información sensorial proveniente de diversas rutas sensoriales. El ruido como refuerzo ayudaría a reducir la incerteza, en este caso incerteza temporal. Debido a que Pérez y Cohn [25] han demostrado experimentalmente una posible relación entre la RE y la incerteza temporal en el sistema táctil humano resulta relevante indagar los efectos que pueda tener sobre la incerteza espacial, considerando como base el modelo sensorial de Tanner.

El análisis de la relación entre la RE y la incerteza espacial, para el sistema táctil humano, es sumamente relevante ya que puede contribuir con información útil para el estudio y aplicaciones del modelo psicofísico de la RE, y a su vez contribuir a reforzar la TI, ayudando a explicar fenómenos no predichos por la RE. El estudio de los fenómenos de percepción ante estímulos táctiles con presencia de ruido de distintas características puede además contribuir a una mejor comprensión del funcionamiento del sistema táctil humano, permitiendo el desarrollo de interfaces hápticas, herramientas de diagnóstico de patologías asociadas al sistema nervioso, prótesis, interfaces hombre-máquina y sensores.

La mayoría de los estudios referentes a la incerteza espacial [21-23, 42], se enfocan en los efectos de la incerteza sobre la percepción. Sin embargo, no se han encontrado publicaciones que indaguen sobre la RE y sus efectos sobre la incerteza espacial. Únicamente se han encontrado

trabajos que evidencian una relación entre la RE y la incerteza temporal [25], en que se evidencia que la RE puede reducir la incerteza temporal.

En esta investigación se plantea estudiar el efecto de la adición de ruido espacialmente distribuido sobre la incerteza espacial ante estímulos sub-umbral. Para esto se implementará un protocolo experimental donde los resultados predichos por la TRE y de la TI difieren. Se aplicarán múltiples series de estímulos táctiles aleatoriamente distribuidos en cuatro posiciones, la mitad de ellas contendrán ruido que coincidirá espacialmente con la posición del estímulo, mientras la otra mitad contendrá ruido presente en los cuatro puntos de estimulación de manera simultánea; se analizarán y compararán las tasas de detecciones positivas para las dos situaciones. La teoría de la RE no predice diferencias en los resultados para ambas situaciones, mientras que la teoría de la incerteza predice un aumento en la tasa de aciertos para la primera situación. La tasa de aciertos corresponde a la suma de los verdaderos positivos y verdaderos negativos sobre el total de presentaciones. Si existe equilibrio en las tasas de aciertos, se reforzaría la TRE.

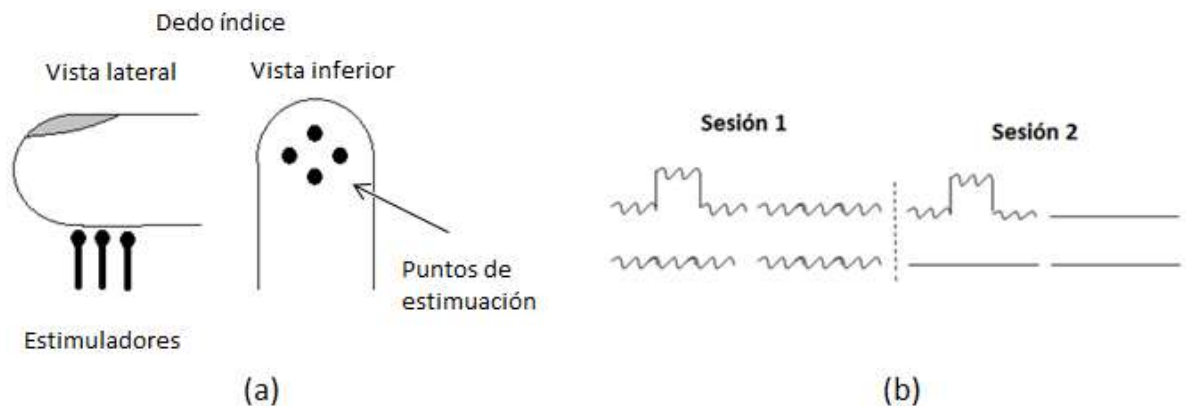


Figura 1.2: Tipos de estímulo. (a) Representación de los cuatro estimuladores y sus puntos de estimulación, (b) representación de los tipos de estímulo, donde en la sesión 1 el ruido está presente solo en 1 punto, mientras que en la sesión 2 está presente en todos los puntos.

Para estudiar el efecto del ruido coincidente espacialmente se propone aplicar estímulos táctiles en cuatro posiciones espaciales distintas en el dedo índice, ver Figura 1.2, con ruido presente en todos los puntos de estímulo (sesión 1) y con ruido coincidente espacialmente con el punto de estímulo (sesión 2) se analizarán las tasas de detecciones positivas para ambas situaciones.

1.2 Hipótesis

Según lo que predice la TRE, para un sistema de cuatro puntos de estimulación táctil, la adición de un cierto nivel de ruido sub-umbral sólo en el estimulador que contiene una señal sub-umbral, debería producir un mismo nivel de detecciones positivas respecto del caso en que los cuatro estimuladores contengan ruido de forma simultánea. Si, por el contrario, los resultados experimentales muestran que existe una mayor tasa de detecciones positivas para el caso en que sólo hay ruido coincidente con la posición del estímulo, respecto del caso en que el ruido está

presente en los cuatro estimuladores, entonces estos resultados podrían explicarse a través de la teoría de la incerteza y no de TRE. Para la teoría la incerteza, la posición espacial del ruido sería un parámetro adicional que se le entregaría al observador y que le ayudaría a discriminar el estímulo. En base a lo anterior se plantea la hipótesis de que la adición de ruido vibro táctil espacialmente coincidente con una señal de estímulo, en un esquema de cuatro puntos de estimulación, permite mejorar la detección de estímulos sub-umbral.

1.3 Objetivo General

En esta investigación se propone determinar si la adición de ruido táctil sub-umbral coincidente espacialmente con un estímulo táctil, en un esquema de múltiples puntos de estimulación, permite aumentar la tasa de detecciones positivas respecto de la situación en que el ruido está presente simultáneamente en todos los puntos de estimulación. Para esto se diseñará e implementará un equipo y protocolos experimentales para la medición de la percepción táctil en dos condiciones diferentes de ruido, en que los resultados predichos por la TRE y aquellos de la TI difieran.

1.4 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar una plataforma experimental de cuatro estimuladores que permita evaluar el efecto que tiene la adición de ruido sub-umbral distribuido espacialmente a estímulos táctiles en diferentes condiciones.
- Determinar experimentalmente en humanos el efecto que tiene la adición de ruido sub-umbral espacialmente distribuido, que produce RE, en estímulos táctiles sub-umbral aplicados en la zona exploratoria del dedo índice, empleando un sistema de cuatro estimuladores, contrastando la teoría de la RE con la TI.
- Evaluar estadísticamente los resultados de la estimulación espacial con ruido de ambas sesiones y establecer si existen diferencias estadísticamente significativas.

1.5 Estructura del documento

Esta tesis está organizada de la siguiente forma. La introducción es presentada en el Capítulo 1. El estado del arte es presentado en el Capítulo 2. La metodología es presentada en el Capítulo 3 y se divide en dos partes. La primera parte se enfoca en el desarrollo de la plataforma experimental y su validación en dos secciones. La segunda parte se enfoca en el diseño de los experimentos. El Capítulo 4 presenta los resultados experimentales. El Capítulo 5 contiene la discusión y conclusiones.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Definición del problema

El contexto del problema abordado en esta tesis se explica en esta sección. Previamente se dará una introducción general de conceptos de psicofísica, específicamente aplicada a sistemas táctiles humanos.

2.1.1 Receptores Táctiles

Crucial para cualquier organismo vivo, particularmente organismos complejos como los mamíferos, es la capacidad de obtener información de su entorno, parte de esta información es mecánica que da cuenta de características tales como volumen, textura y ubicación espacial. Para obtener esta información el cuerpo humano, dispone de una serie de sensores con distintas ubicaciones y propósitos diversos [42]. Su principio de funcionamiento se basa en que una acción mecánica, externa o propia del organismo, efectúa una deformación del mecano receptor lo que constituye un estímulo. Existen estímulos dinámicos o estáticos dependiendo del comportamiento del estímulo a lo largo de un intervalo de tiempo determinado. Algunos de estos mecanorreceptores entregan la capacidad de proveer información de la posición del sujeto cuando se encuentra quieto o en movimiento. La Tabla 2.1 muestra un resumen de los mecanorreceptores que participan y su función y/o ubicación en el cuerpo humano [44, 47,48].

Cada mecanorreceptor se encuentra conectado al sistema nervioso central, empleando axones para transmitir mediante impulsos eléctricos la información relativa a los estímulos que detectan. Estos impulsos eléctricos viajan a través de fibras nerviosas cuyo grosor determina la velocidad de transmisión, que van desde 1m/s hasta 100 m/s [44, 48].

Un canal es un elemento que se encuentra “sintonizado” a una región específica del espectro de energía al cual el sistema responde [26]. En [27] se propone que existen cuatro canales psicofísicos diferentes que contribuyen a la percepción táctil en la piel libre de vellosidades; cada canal es mediado por un tipo específico de fibra nerviosa. El modelo propone que los canales son psicofísicamente definidos en relación de su fibra nerviosa, sensación individual respectiva y el rango de frecuencia nominal sobre el cual operan, dando como resultado la clasificación expuesta en la Tabla 2.2[27].

Tabla 2.1: Estructuras anatómicas destinadas a percepción mecánica y su ubicación en el cuerpo humano [43].

| Receptor | Distribución anatómica. |
|--------------------------------|---|
| Corpúsculos de Meissner | Labios, yemas de dedos, pezones, palma de mano y especialmente en zonas donde no hay pelo. |
| Discos de Merkel | Palmas de las manos y en las plantas de los pies. |
| Corpúsculos de Pacini | Dedos de las manos y de los pies. |
| Corpúsculos de Ruffini | Dermis. |
| Corpúsculos de Krause | Todo el cuerpo. |
| Terminaciones Nerviosas Libres | Dolor profundo que se origina en los músculos esqueléticos, tendones y articulaciones son pobremente localizados. Dolor superficial que se desencadena a partir de estímulos en la piel y se localiza fácilmente. |

Cada canal psicofísico responde en un determinado rango de frecuencias, sin embargo, su respuesta dentro de ese rango es variable, en la Figura 2.1 se muestra la característica de respuesta a frecuencia de estímulo para cada uno de los canales y el efecto combinado de ellos. No todos los canales necesitan ser activados para producir una sensación, de hecho, para ciertos estímulos supra umbral (estímulos con amplitud superior a la mínima percibida por el observador) basta que sólo uno o dos sean activados para que el observador perciba un estímulo [42].

Tabla 2.2: Muestra la clasificación y descripción de los cuatro canales psicofísicos [27].

| Clasificación del Canal | Descripción |
|--------------------------|---|
| P (Paciniiano) | Canal mediado por los corpúsculos de Pacini, produce las sensaciones de “vibración” en el rango de frecuencia de 40-500Hz. |
| NPI (No Paciniano I) | Mediado por los corpúsculos de Meissner y fibras de adaptación rápida, produce sensación de “aleteo” en el rango de frecuencia de 2-40Hz. |
| NPII (No Paciniano II) | Mediado por el órgano de terminación de Ruffini y aferentes de adaptación lenta, produce la sensación “cuasi zumbido” en el rango de 100-500Hz. |
| NPIII (No Paciniano III) | Mediado por los discos de Merkel y fibras de adaptación lenta, produce la sensación de “presión” para el rango de 0,4 a 2,0 Hz. |

El presente estudio se centra en la percepción táctil de la estimulación provocada principalmente sobre los corpúsculos de Meissner (canal NPI), ya que el estímulo estará concentrado en el rango de frecuencias de 0Hz a 30Hz [44], ver Figura 2.1.

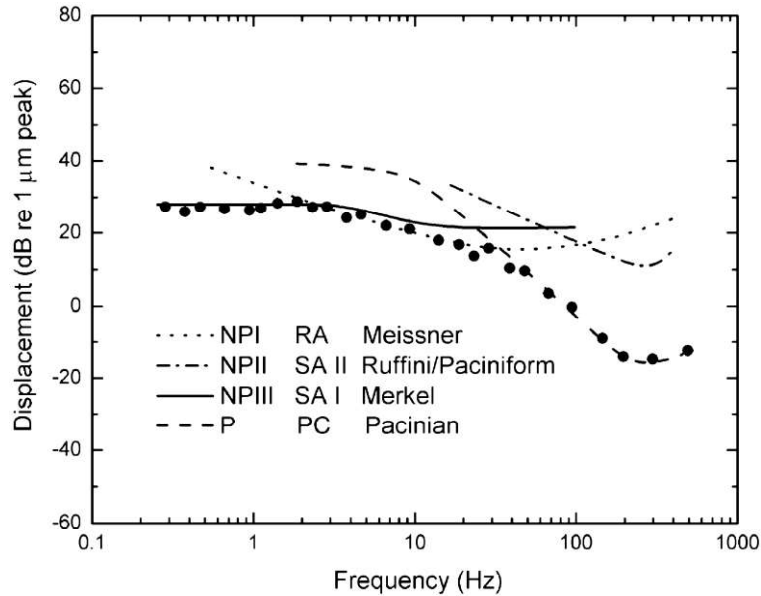


Figura 2.1: Modelo de cuatro canales. Umbrales de percepción de los cuatro canales psicofísicos para estímulos táctiles en función de la frecuencia del estímulo, la respuesta combinada de los cuatro canales se muestra con la serie de círculos negro [44].

2.2 Medición de Umbrales

La función más básica de cualquier sistema sensorial es manifestar una respuesta ante un estímulo de energía o cambios de energía en el ambiente. La mínima cantidad de energía necesaria para que un estímulo sea percibido por un observador se define como umbral absoluto [2]. Este umbral, sin embargo, no se encuentra fijo y cambia levemente en el tiempo, de tal manera que, para varios estímulos de la misma intensidad, cerca del umbral, el observador declarará que algunos los percibe y otros no. Estas variaciones se producen en torno a un valor central que es el determinado como umbral absoluto. De forma experimental se ha logrado determinar que la función de distribución de probabilidad que mejor describe las variaciones de umbral es de tipo gaussiano [2, 16, 24, 26-28]. La determinación de los umbrales táctiles en la zona exploratoria del dedo índice para un observador particular es fundamental para cumplir los objetivos del presente estudio.

Existen diversas técnicas para la determinación de umbrales sensoriales, que pueden ser aplicadas para la medición de umbrales táctiles [7]. Para umbrales táctiles, uno de los métodos más empleados es el denominado método de la escalera por su simpleza y ventajas relativas a la detección y reducción de sesgo entre otras [4].

2.2.1 Método de la Escalera

En este método el observador es sometido a una serie de presentaciones que contienen el estímulo táctil, para este caso específico cada presentación es alertada por un tono audible. El estímulo inicial posee una amplitud muy por encima del umbral estimado del observador, tal que exista una alta probabilidad de que sea percibido. Después de cada estímulo se interroga al observador respecto de si ha percibido o no el estímulo, cada vez que el sujeto contesta “SI” el estímulo siguiente se disminuirá en intensidad un paso, magnitud fija, si el sujeto contesta “NO” se incrementa el estímulo en un paso; de esta manera el estímulo presentado al observador oscila en torno a su umbral absoluto. La prueba se detiene en función de diversos criterios, por ejemplo, seis o nueve inversiones en la monotonía de la intensidad, un número fijo de presentaciones o que la desviación estándar de las últimas n muestras sea menor a un valor definido como criterio [4, 7]. El método de la Escalera puede ser implementado también con una serie ascendente, partiendo desde un nivel de estímulo por debajo del umbral esperado [7].

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de resultado de aplicar este método. El umbral es obtenido, en este caso, promediando las últimas seis muestras lo que entrega un valor de umbral de 5,83 [μm].

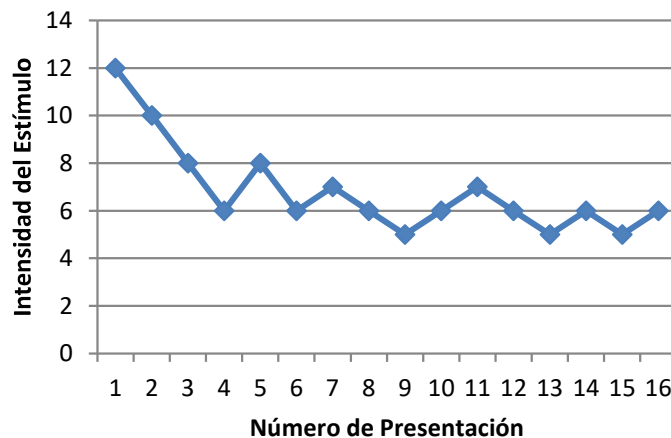


Figura 2.2: Medición de umbral por el método de la Escalera Descendente.

El número de presentaciones que se efectuarán en una medición quedará determinado por el método, el tipo de estímulo, la precisión requerida y características del mecano-receptor que sea estimulado [4, 7]. En términos generales considérese un total de N presentaciones, el umbral se calcula mediante:

$$T = \frac{1}{k} \sum_{i=N-k+1}^N A_i \quad (2.1)$$

Expresión que considera las últimas k amplitudes (A_i) de la serie de medición. La cantidad de muestras empleadas en este cálculo debe satisfacer el criterio:

$$\sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=N-k+1}^N (A_i - T)^2} < 2\Delta A \quad (2.2)$$

En que ΔA es el diferencial de amplitud entre dos muestras consecutivas. En términos simples, el grupo de datos que se consideran para el cálculo del umbral debe tener una dispersión menor al doble de la amplitud de un paso en el método de escalera. La condición señalada puede ser ajustada para aumentar la exigencia en la precisión a costa de un mayor número de presentaciones o para reducir el tiempo de medición a costa de una reducción en la precisión [2].

2.2.2 Métodos de Alternativa Forzada

Todos los métodos psicofísicos mostrados, son relativamente subjetivos, por cuanto el observador reporta lo que percibe, de modo que el experimentador no puede controlar si las respuestas del observador son correctas o no. En esos casos el resultado depende del criterio del observador para juzgar si el estímulo ha sido percibido o no. El método de alternativa forzada provee una aproximación más objetiva [4, 7], en él se le solicita al observador dar una respuesta positiva en cada presentación, esto es por ejemplo elegir entre SI o NO, dependiendo si percibió o no el estímulo [7].

A la luz de la evidencia experimental, la cantidad de información de estímulo necesaria para apoyar una decisión es mayor en una prueba de alternativa no forzada que en una situación de alternativa forzada. Esta cantidad de información se cuantifica considerando, por ejemplo, la intensidad del estímulo, duración, indicadores externos como tono audible o señal luminosa que alerte sobre la presencia del estímulo, conocimiento previo de la ubicación y características del estímulo, entre otras. Una comparación entre las pruebas de alternativas forzadas y no forzadas es sumamente útil para excluir posibles diferencias de criterio entre observadores [7]. El criterio puede ser definido como una regla implícita que un observador obedece al convertir información sensorial en respuestas abiertas [4, 7].

Existe un importante número de variantes de los métodos presentados en las secciones previas, tanto para la presentación del estímulo, las limitaciones a las respuestas de los sujetos, el análisis de la medición, determinación de umbrales, análisis de la función psicométrica, etc. Más detalles sobre estas variaciones se encuentran en [2, 4, 7].

2.3 Teoría Clásica de Umbral

Las primeras teorías de umbral se basaban en la suposición de que las mediciones obtenidas mediante experimentos psicofísicos eran estimaciones de un umbral neural en el

observador, el cual no podía ser medido directamente. Se creía que el umbral era una transición abrupta entre sensación y no sensación. Se asumía también que el valor del umbral variaba con las propiedades del estímulo, tales como duración, área de contacto y forma; así como también respecto de la condición del sistema nervioso del observador, tales como adaptación o actividad de fondo [2], esta actividad de fondo corresponde a la actividad neuronal espontánea existente en la corteza sensorial. Según esta visión, si todos los factores que afectan el nivel de umbral pudiesen ser controlados y mantenidos constantes, un estímulo cualquiera sería entonces siempre detectado o siempre no detectado. Sin embargo, resulta imposible comprobar esta teoría controlando por completo los factores de estímulo y fisiológicos relativos al fenómeno. Aunque el umbral de un observador sea abrupto en un instante de tiempo, en un experimento este límite parece cambiar constantemente. Por lo que para un estímulo de una misma magnitud resultará en una respuesta de detección por parte del observador cuando se haya superado el umbral momentáneo [6]. La proporción de estímulos que momentáneamente superaban el umbral y que producen una respuesta afirmativa por parte del observador, se incrementa en forma sigmoidea conforme aumenta la intensidad del estímulo, si es que la variación momentánea del umbral tiene una distribución normal [2], ver Figura 2.3, a esta curva sigmoidea, que representa la probabilidad de obtener una respuesta afirmativa por parte del observador, se le denomina Función Psicométrica (PF, por su sigla en inglés). Sea $f(\phi)$ la función de distribución de probabilidad del umbral ante un estímulo ϕ , la probabilidad de obtener una respuesta afirmativa a la percepción del estímulo queda determinada por:

$$P(SI | \phi) = \int_{-\infty}^{\phi} f(\phi) d\phi \quad (2.3)$$

Si $f(\phi)$ está distribuida de manera gaussiana, a medida que el estímulo ϕ aumenta, la amplitud de $P(SI | \phi)$ se incrementa asintóticamente a la unidad.

$$\lim_{\phi \rightarrow \infty} \left(P(SI | \phi) = \int_{-\infty}^{\phi} f(\phi) d\phi \right) = 1 \quad (2.4)$$

En la Figura 2.3 se aprecia en la parte inferior la distribución normal teórica del umbral del observador, a partir de la cual se obtiene la probabilidad de obtener una respuesta “SI” por parte del observador ante un estímulo. Esta corresponde al área bajo la curva inferior hasta el punto correspondiente al estímulo.

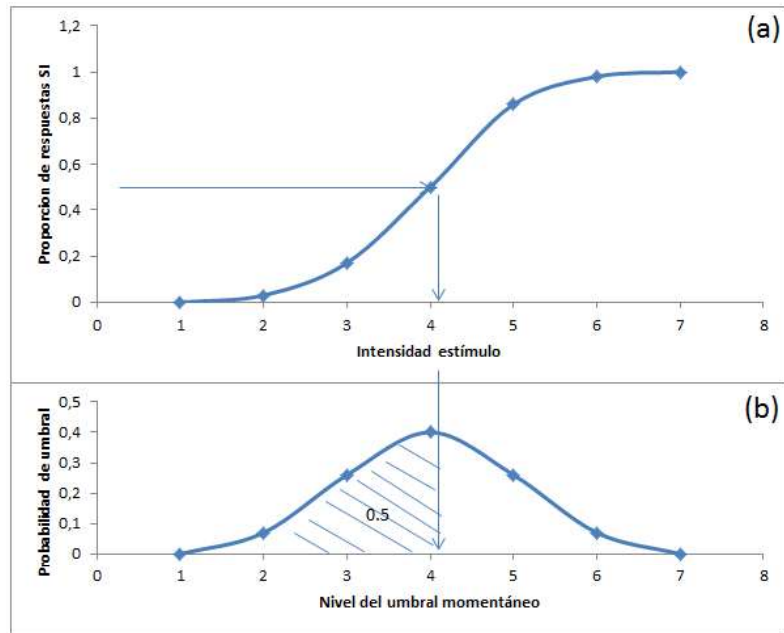


Figura 2.3: Curva psicométrica. (a) Sigmoidea de la función psicométrica, representa la probabilidad de obtener una respuesta “Si” ante una intensidad de estímulo dada, (b) distribución de probabilidad del umbral de percepción del observador según la teoría clásica de umbral.

Una explicación alternativa para este comportamiento probabilístico es que, en lugar de ser el umbral el que varía, éste se encuentra fijo pero el efecto que tiene un mismo estímulo sobre el sistema nervioso es el que varía aleatoriamente en torno a un valor central. Ambas explicaciones no pueden ser distinguidas con experimentos psicofísicos [6], ya que ninguna de estas dos variables depende de las características del estímulo o de la manera en que sea formulada la respuesta del sujeto.

2.4 Teoría de Detección de señales

Una observación sensorial es la declaración de un observador respecto de la presencia o no de una señal de estímulo y su percepción de la magnitud de dicho estímulo, lo que es una representación subjetiva del estímulo. La evidencia de que la señal está de hecho presente, se asume variable entre presentaciones. Se asume además que la señal puede ser caracterizada de mejor manera como una distribución en un continuo de evidencia sensorial en lugar de un solo valor [5]. El concepto de ruido es fundamental para esta teoría.

Usualmente una señal es detectada contra una cierta actividad de fondo, llamada ruido, cuyo nivel se asume que varía aleatoriamente y puede ser intrínseco o extrínseco al receptor (transductor electrónico, fisiológico, mecánico, etc.) por ejemplo el ruido fisiológico causado por la actividad espontánea del sistema nervioso [2].

En el proceso de percepción, el observador primero realiza una observación (x) y luego toma una decisión respecto de dicha observación. En cada presentación el observador debe decidir si x se

debe a la señal agregada al ruido de fondo o es sólo el ruido. Si el estímulo es débil, resulta difícil para el observador decidir. En algunos casos el nivel de ruido es tan alto que puede ser confundido con el estímulo, y viceversa. La Figura 2.4 muestra tres casos de señal S y señal más ruido SN . Cuanto mayor es el estímulo respecto del ruido, las distribuciones se separan lo que vuelve más probable una observación positiva correcta.

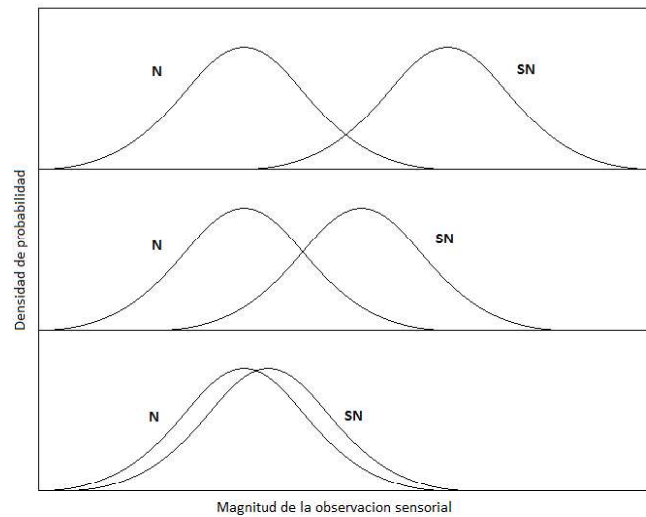


Figura 2.4: Funciones de distribución teóricas. De señal más ruido (SN) y ruido (N) para tres diferentes intensidades de estímulo [2].

Dado un estímulo en particular, el observador realiza una observación x , consistente en una muestra de alguna de las dos distribuciones, basándose en su magnitud sensorial, el observador decidirá si x pertenece a la distribución N o SN , con solo cuatro resultados posibles, estos se representan en la tabla 2.3, denominada matriz de respuestas.

Tabla 2.3: Matriz de respuesta para un observador.

| | SI | NO |
|---------------|-------------------|-------------------|
| Señal + Ruido | Correcto Positivo | Falso Negativo |
| Ruido | Falso Positivo | Correcto Negativo |

Dado que hay solo dos grados de libertad en la matriz de respuesta, solamente dos de los parámetros son necesarios para una descripción completa del desempeño, los Correctos Positivos y Falsos positivos son usualmente empleados y pueden ser combinados en la proporción de clasificados correctamente, $P(c)$:

$$P(c) = P(SI | SN) \cdot P(SN) + [1 - P(SI | N)] \cdot P(N) \quad (2.5)$$

Se asume que la variable de decisión x , está distribuida de manera gaussiana con varianzas equivalentes [58], tal que para estímulos sólo con ruido y de señal más ruido, tienen funciones de distribución de probabilidad $P(x|N)=f_N$ y $P(x|SN)=f_{SN}$, respectivamente. Por lo tanto, x puede ser expresada en términos de esas dos densidades de probabilidad mediante una proporción denominada Razón de Verosimilitud $l(x)$ (Likelihood Ratio) [2], i.e.

$$l(x) = \frac{P(SN | x)}{P(N | x)} = \frac{P(SN)}{P(N)} \cdot \frac{P(x | SN)}{P(x | N)} \quad (2.6)$$

Tomando en cuenta que las distribuciones son gaussianas para f_N y f_{SN} , se tiene que tanto x y $l(x)$ son monótonas, estas probabilidades se obtienen mediante el cálculo de la integral bajo la curva que representa la función de distribución de probabilidades, luego la razón de verosimilitud se puede expresar como:

$$l(x) = \exp \left[\frac{(\mu_{SN} - \mu_N)}{\sigma^2} \cdot x + \frac{(\mu_{SN}^2 - \mu_N^2)}{2\sigma^2} \right] \quad (2.7)$$

Cuando $l(x)$ es superior a la unidad, es más probable que la observación sea resultado de la señal más ruido que del ruido por sí solo; si el valor es menor que la unidad es más probable que la observación sensorial sea resultado del ruido, que de la señal más ruido.

Otra de las suposiciones de la Teoría de Detección de Señales (TDS), es que un observador establece un valor particular para $l(x)$ como punto de corte o criterio (β). En [6] se propone que el observador se rige por una regla de decisión tal que cuando $l(x)$ es igual o superior a β , se produce una observación de SN, mientras que si $l(x)$ es menor que β , la observación es producida por N. Al momento de diseñar un protocolo experimental, se deben tener en cuenta las suposiciones hechas por la TDS, para que de alguna manera ésta pueda ser contrastada con los resultados experimentales, específicamente se desprende de estas suposiciones el hecho de que las señales de estímulo deben manifestar una diferencia sensorial medible y distinguible respecto del ruido sensorial de fondo presente en el observador.

Normalmente se realiza un experimento de detección de señales, en el cual ocurren una serie de presentaciones que contienen y que no contienen la señal de estímulo, aleatoriamente ordenadas, a partir del análisis de las respuestas del observador respecto de su aseveración de que, SI existe señal o NO existe señal, se pueden determinar las funciones de distribución de probabilidad para S y SN, tal como también el criterio empleado por el observador, como se indica en la Figura 2.5. Esta es la potencialidad de la TDS, de ser correcta, sería posible especificar cuantitativamente el proceso interno del observador que fundamenta la decisión sensorial, mediante el análisis de las tasas de aciertos y falsos positivos [8]. La mayoría de las tareas de detección son precisamente pruebas binarias.

Una de las principales fortalezas de la TDS es su capacidad de predecir las curvas ROC (Receiver-Operation Characteristic Curve), que es precisamente donde falla la Teoría de Umbral

[7]. Las curvas ROC, reflejan el desempeño del observador en función de las tasas de aciertos positivos, falsos positivos, correctos negativos y falsos negativos. La TDS, predice estos cuatro escenarios al definir el umbral y el ruido de fondo como distribuciones continuas, ver Figura 2.5, y dado un criterio de observador, predice el desempeño de este en términos de la curva ROC. Por otro lado, la teoría de umbral define el umbral del sujeto como un punto discreto y no contempla la presencia de ruido sensorial, lo que no da a lugar a falsos positivos o falsos negativos, siendo incapaz de predecir las curvas ROC para el desempeño de un observador.

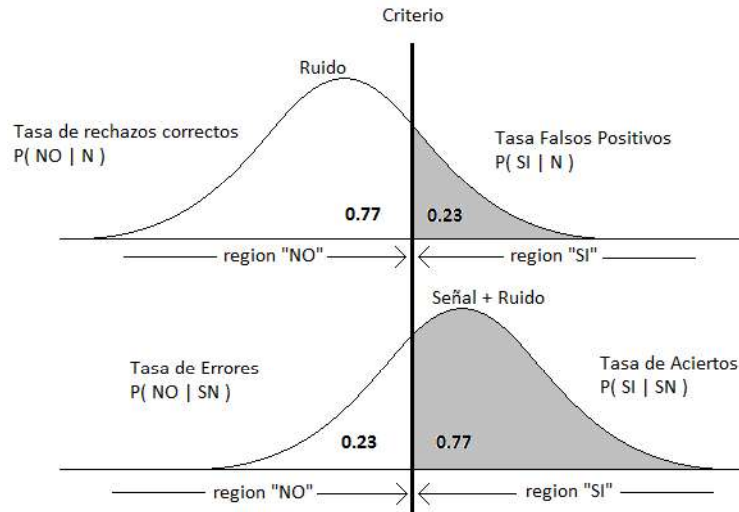


Figura 2.5: Modelo ROC según TDS. Para distribuciones de SN y N, se muestra la tasa de rechazos correctos, falsos positivos, tasa de errores y tasa de verdaderos positivos para un criterio específico [2].

2.5 Factores relevantes en la percepción táctil.

Al realizar experimentos psicofísicos en general, y particularmente de percepción táctil, han de tenerse en cuenta una serie de factores tanto físicos como psicológicos que pueden afectar la medición [7]. Estos factores deben ser controlados o monitoreados para ser considerados en el análisis de los datos, por ejemplo, un aumento en la medición de un umbral puede ser provocado por distracción del sujeto, su previa exposición a esfuerzo mecánico, vibraciones u otros [4, 7, 28, 29, 30].

2.5.1 Factores Médicos

Ha sido documentado el detrimento en la percepción táctil derivado de gran número de patologías en los seres humanos y otros mamíferos [13], tanto es así que se han implementado procedimientos clínicos para la medición de percepción táctil como herramienta diagnóstica,

existiendo incluso estándares como el ISO 13091 para normar la medición e interpretación de estas mediciones.

En general todo evento o condición que provoque disfunción o daño directo o indirecto tanto a los receptores, fibras nerviosas, sistema nervioso central o el cerebro, pueden provocar una alteración en la percepción táctil, pacientes con diabetes, accidentes cerebro vasculares, entre otros pueden presentar una disminución significativa en la percepción táctil [9-11, 13, 15, 17-19, 28, 30]. Se ha demostrado también la correlación que existe entre la edad y la disminución de la percepción táctil [17, 18, 28]. Así mismo se ha determinado que distintas regiones del cuerpo humano presentan distintos niveles de umbral para el mismo tipo de estímulo [28, 39]. Se ha demostrado también que existen diferencias en la percepción táctil que dependen del sexo del observador y del tamaño de la punta del dedo en que se realiza la estimulación [35, 36].

2.5.2 Factores Ambientales

Al realizar un experimento psicofísico cualquiera, el ambiente en el cual se realiza la prueba debe ser controlado respecto de una serie de factores. Se ha demostrado que la temperatura de la piel, que naturalmente puede verse afectada por la temperatura ambiente, tiene una incidencia en la alteración de los umbrales táctiles sin que necesariamente la temperatura sea causante de incomodidad en el observador [29]. En este mismo sentido cualquier condición de temperatura o humedad relativa del aire que provoque en el sujeto incomodidad, distracción o disminución en su capacidad de concentrarse en la tarea que le es presentada, naturalmente afecta la medición [7, 33, 38]. Aunque se ha demostrado que la privación de la luz ambiental o visión por periodos prolongados de tiempo produce una mejora significativa en la percepción táctil, también se ha demostrado que la privación de la visión por periodos cortos de tiempo no produce mejoras sustanciales [30]. Usualmente se trata de impedir que el sujeto reciba otro tipo de estímulos, distintos de aquel que se pretende medir, que puedan distraer su atención ya que pueden hacer fallar el método de medición o alterar la medición en sí [2, 7]. Se ha reportado en diversos estudios [2, 4, 7, 9, 16, 24, 30, 43, 64, 71, 73], que ciertos tipos de estímulos, visuales o auditivos pueden tener un efecto sobre los umbrales de percepción táctil, por lo que dichas relaciones son tenidas en cuenta y evaluadas al momento de diseñar los experimentos.

2.5.3 Condiciones de Estimulación

En experimentos psicofísicos táctiles se suele caracterizar el estímulo por su amplitud o la fuerza aplicada entre otros parámetros, sin embargo, es usual encontrar especificaciones de las condiciones de la estimulación, tales como la forma en que el sujeto ubica su mano, pie u otra zona de estimulación, la geometría que tiene el estimulador que aplica finalmente la fuerza en la piel del observador, el nivel de indentación, entre otras. En diversas publicaciones se ha mostrado evidencia experimental de cómo este y otros factores directos de la condición de estimulación afectan la medición [31, 32, 34, 37, 40, 62, 66, 71]. Estas consideraciones son de mucha importancia, ya que los factores que alteren la detección deben ser controlados o monitoreados para ser prevenidos o considerar sus efectos al momento de analizar los resultados.

2.6 Resonancia estocástica en el sistema táctil humano

Se ha demostrado experimentalmente que la adición de una cierta cantidad de ruido mejora significativamente la habilidad de un individuo para detectar estímulos táctiles sub-umbral [9]. Esta cantidad de ruido tiene un valor crítico para el cual produce un óptimo en la detección de estímulos táctiles. Si a un observador se le presentan estímulos que se encuentran por debajo de su umbral absoluto, la TDS predice una tasa de detecciones positivas de 50% para una serie en que hay igual número de presentaciones con estímulos táctiles como sin. Los resultados exhibidos por Collins en [9] muestran que, para un determinado nivel de ruido, se produce un máximo de detecciones positivas por sobre el nivel de significancia estadística para ese caso específico, igual número de presentaciones con estímulos táctiles como sin, esto es que efectivamente existe un cierto nivel de ruido para el que se maximizan las detecciones positivas.

2.6.1 Efectos de la RE táctil en el umbral absoluto

En [9] se emplea un dispositivo controlado por fuerza que aplica un estímulo en la zona exploratoria del dedo medio en la mano derecha del observador. El estímulo es aplicado por una sonda cilíndrica con terminación plana de 1mm de diámetro. El protocolo de medición consiste en la presentación de dos tipos de señales al observador, una de ellas contiene el estímulo más un cierto nivel de ruido, mientras que la otra contiene sólo el ruido. El estímulo es un pulso rectangular de duración 300ms y amplitud 20% por debajo del umbral del sujeto (previamente medido con el método modificado de Von Békésy [44]). Una pantalla de computador le indica al observador cuando se produce cada presentación, luego de la cual debe indicar si percibe o no el estímulo. En cada prueba se presenta igual número de presentaciones con y sin señal de estímulo. Se realizan pruebas considerando entre siete a nueve niveles de ruido. El ruido es de tipo Gaussiano, media cero y es convolucionado digitalmente con un filtro pasa bajos a 30Hz. Cada nivel de ruido se caracteriza por la desviación estándar del mismo. La Figura 2.6 muestra los resultados obtenidos para un sujeto particular en que se muestra el porcentaje de detecciones correctas en función de siete niveles distintos de ruido, distribuidos homogéneamente entre 0 y 50% del umbral medido.

La línea punteada indica el nivel de significancia ($p < 0.05$), determinada usando la prueba binomial, con la suposición de que ambos eventos (una respuesta correcta o una incorrecta para cada presentación) fueran igualmente probables.

Collins [9] presenta resultados similares para un grupo de diez sujetos. Se muestra que el porcentaje de aciertos positivos, para un nivel específico de ruido, por sobre el nivel de significancia estadística son mucho mejores que los esperados por el azar. Estos resultados muestran claramente los efectos de la resonancia estocástica. A medida que el nivel de ruido se incrementa, se alcanza un máximo de aciertos positivos significativos y luego decrecen.

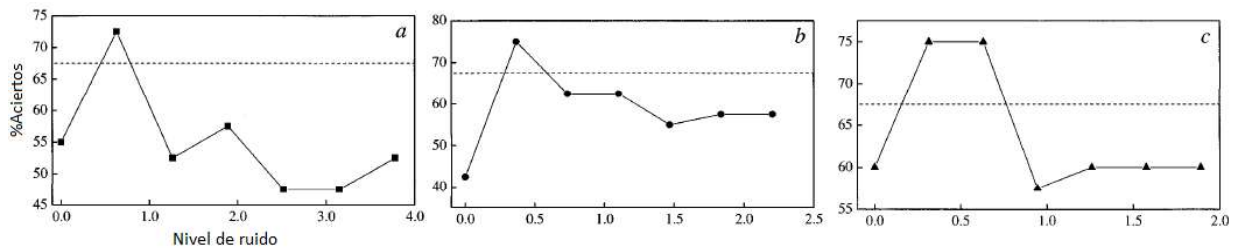


Figura 2.6: Porcentaje de aciertos positivos en función del nivel de ruido. Desviación estándar del ruido como factor del umbral del sujeto, para un estímulo táctil sub-umbral [9].

Este fenómeno se encuentra presente no sólo en el sistema táctil humano, sino también para el sistema auditivo, visual y olfativo [26]; y a partir de él se han obtenido diversos beneficios tales como mejoras en el desempeño de algoritmos de detección basados en procesamiento de imágenes, aplicaciones a terapias de rehabilitación motora en sujetos con daño neurológico o distrofia muscular y mejora en interfaces hombre máquina, entre otras [10, 11, 12, 13, 14, 15, 63, 65].

Se ha demostrado que se puede conseguir resonancia estocástica para estímulos vibro táctiles, que son estímulos senoidales de frecuencia fija en el rango de 25Hz a 400Hz [16], lo que implica que los cuatro grupos distintos de mecanorreceptores cutáneos presentan este fenómeno.

Es importante destacar que para aquellas condiciones en que se produce RE, el nivel de ruido que optimiza las detecciones positivas, no es detectable por sí solo [16, 17], esto es que, si solo se aplica ese nivel de ruido como estímulo, no se producen detecciones verdaderas.

2.6.2 Presencia de RE táctil sobre el umbral diferencial de frecuencia

Se ha encontrado evidencia experimental [17, 70] que demuestra que la adición de ruido óptimo afecta notoriamente el umbral táctil diferencial en discriminación de frecuencia. En estos experimentos al observador se le presentan dos estímulos vibro táctiles, uno de referencia a una frecuencia fija y un segundo de comparación a una frecuencia que varía según el procedimiento de medición. El observador es requerido a identificar cuál de los estímulos es de mayor frecuencia. Los resultados muestran que la adición de un determinado nivel de ruido táctil produce una disminución en el umbral diferencial, esto implica una mejora en la capacidad de discriminar frecuencias.

2.6.3 Presencia de RE táctil sobre el umbral diferencial en discriminación de amplitud

Ha sido demostrado experimentalmente [18], ver Figura 2.7, que la adición de ruido táctil tiene un efecto positivo en la capacidad de distinguir estímulos según su amplitud, o sea, en el umbral diferencial de amplitud. En estos experimentos se presentan al observador dos estímulos vibro táctiles de 6Hz, uno de amplitud constante como referencia y otro de igual frecuencia, pero de amplitud variable entre presentaciones como comparación. El observador es interrogado

respecto de cuál de los dos estímulos percibe como más intenso. La evidencia experimental demuestra que existe cierto nivel de ruido, distinto del caso para frecuencia, al cual se produce reducción y un mínimo en el umbral diferencial, esto implica una mejora en la capacidad de discriminar estímulos según su amplitud producto de la RE.

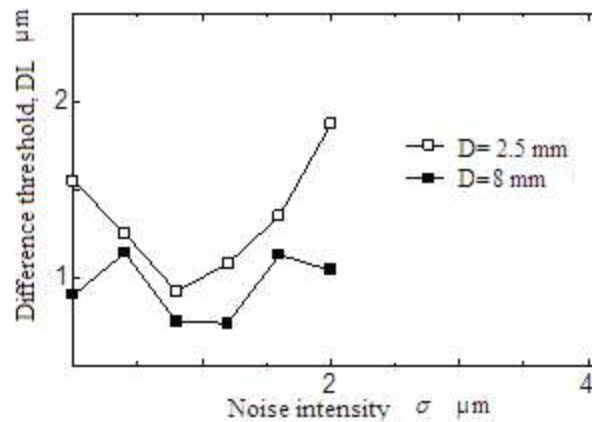


Figura 2.7: Umbrales diferenciales promedio para un grupo de 5 observadores. Obtenidos para dos diámetros de estimuladores [18].

2.6.4 Presencia de RE táctil sobre la capacidad de ordenar eventos sensoriales

Experimentos realizados en [19] muestran que la adición de ruido a señales de estímulos sub- umbral, permiten al sujeto ordenar eventos sensoriales por sobre el nivel de azar. En este experimento al observador se le presentan tres intervalos distinguidos por tonos audibles, de los cuales solo uno contiene el estímulo con una amplitud sub-umbral, los tres intervalos poseen ruido. El observador debe elegir dos intervalos en orden de preferencia considerados los más probables de contener el estímulo. Los resultados presentados en [19] muestran que la adición de ruido mejora la capacidad del observador para ordenar eventos sensoriales por debajo del umbral.

2.7 Teoría de la Incerteza

La suposición de que un observador, enfrentado a una determinada prueba de detección, tiene un conocimiento exacto de la señal, es un error, como lo planteó W. Tanner en [20], cuestionando de manera directa la TDS que asume la detección ideal de una señal conocida de manera exacta. Este cuestionamiento dio origen a la Teoría de la Incerteza (TI) como reemplazo de la TDS, planteando que el observador, debido a que toma sus decisiones como si desconociera los parámetros de la señal que se le presenta, introduce no linealidades en el proceso de detección, especialmente al tratarse de estímulos de baja intensidad. La TI ha sido exitosamente probada en experimentos de visión y audición [20, 21, 22, 72].

2.8 Comparación entre la TI y la TDS

En la TDS un observador ideal es aquel que puede establecer una razón de verosimilitud $I(x)$ para un estímulo x y compararlo con determinado criterio. El resultado de dicha comparación dará origen a su respuesta “SI” o “NO” respecto de si detectó o no el estímulo x [8]. El cálculo de $I(x)$ requiere del conocimiento de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad tanto del ruido como de la señal más ruido, tal como fue expuesto en la sección 2.4. Adicionalmente, la elección del criterio requiere a su vez del conocimiento de la probabilidad de aparición del estímulo y la recompensa asociada a los aciertos. La TI reconoce el hecho de un observador no ideal, aunque éste sea instruido respecto de todos los parámetros requeridos para que el estímulo $x(t)$ sea completamente conocido por él o ella, al momento de realizar una observación no tendrá la capacidad de reconocer completamente estos parámetros [20]. Para esto, el observador requeriría una especie de memoria para almacenar una representación temporal de $x(t)$ dentro del intervalo de atención. Esta es una diferencia crucial de la TI respecto de la TDS, que plantea que la detectabilidad aumenta linealmente con la intensidad del estímulo. La TI propone que mientras menor es el estímulo resulta más difícil para el observador memorizar sus parámetros. Predice por lo tanto una curva psicométrica no lineal al tener en cuenta el comportamiento no óptimo del observador [20].

La incapacidad de un observador de recordar la totalidad de los parámetros de un estímulo es equivalente a un observador ideal frente a un estímulo incompletamente especificado [20]. Así el grado de incerteza al que está afecto un observador enfrentado a un estímulo con una intensidad determinada, puede ser evaluado en función del número de señales independientes que el observador espera durante el intervalo de atención.

2.8.1 Efectos del Ruido sobre la Incerteza

Se define a un observador de comportamiento óptimo como aquel sujeto que acierta correctamente en todas sus respuestas a la detección y/o discriminación de estímulos. Dado un observador que manifieste un comportamiento no óptimo, a raíz de su incapacidad de memorizar los parámetros de una señal, la inclusión de un reforzamiento de la memoria como parte del procedimiento experimental en las presentaciones al observador, debería disminuir la incerteza y aproximar el desempeño del observador al nivel óptimo [20].

En [20] se muestra que la inclusión de una señal de reforzamiento, por ejemplo, sinusoidal para el caso de estímulos auditivos, satisface la necesidad de memoria respecto de fase y frecuencia. Como también la suma de una portadora pulsátil o pedestal al estímulo, puede satisfacer las necesidades de memoria respecto del tiempo para el inicio y duración del estímulo. Los resultados obtenidos en [20] demuestran que la incerteza puede ser reducida mediante señales de reforzamiento. Conforme a lo expuesto por [20], el ruido podría ser empleado como reforzamiento para reducir la incerteza mejorando el desempeño de un observador en tareas de detección. Lo anterior resulta de suma importancia para el presente trabajo, ya que, si la inclusión de ruido sincronizado con el estímulo puede reducir la incerteza temporal mejorando las tasas de detección, efecto que no sería explicado totalmente por la TDS.

Capítulo 3

Metodología

Con el objetivo de estudiar el comportamiento del umbral y de la incerteza espacial, en un sistema de cuatro estimuladores táctiles, basándose en la teoría de la RE y la TI se propone un procedimiento experimental que será ejecutado con un grupo de sujetos saludables e instruidos respecto del procedimiento.

Es importante destacar que el enfoque metodológico es novedoso en si mismo, en aspectos no vistos anteriormente en la literatura, estos son: estimulación táctil en 4 puntos de la zona exploratoria del dedo índice, empleando señales de estímulo puntuales independientes; el uso de distribuciones espacial de ruido diferenciada, incluyendo ruido en solo un punto de estimulación y en los 4 puntos, para mediciones diferentes; y finalmente el hecho de emplear la medición del umbral de percepción al ruido como referencia para determinar el punto de resonancia, diferenciando también esta medición para 1 punto y 4 puntos de estimulación.

3.1 Sujetos

Un total de 13 sujetos de ambos sexos, 11 hombres y dos mujeres, saludables y con edades entre 22 y 38 años, fueron seleccionados y entrenados. Los participantes debieron reportar estar libres de enfermedades neurológicas u otras patologías con detrimento de la percepción táctil, adicionalmente deberán leer y firmar un documento de consentimiento informado, acreditando así conocer el propósito del estudio, sus características y los riesgos involucrados. El proceso de selección consistió en una serie de sesiones en que el sujeto es sometido a mediciones de umbral táctil. El procedimiento aplicado, que incluye detección de sesgo y detección de cambio de respuestas, permite identificar a aquellos sujetos cuyo comportamiento ante el experimento es consistente, que no se distraen con facilidad y que no cambian sus respuestas para forzar un resultado.

3.2 Protocolos experimentales

Los protocolos experimentales han sido aprobados por el comité de Bioética, INTA, Universidad de Chile (resolución No 11, junio 14, 2006). Se establecen tres procedimientos experimentales que son requeridos para cumplir el objetivo ya planteado, que permiten en orden de precedencia, determinar el umbral táctil de cada sujeto, determinar el nivel de ruido óptimo que produce resonancia estocástica y finalmente evaluar la incerteza espacial.

En cada uno de los siguientes protocolos experimentales se considera evitar el fenómeno de adaptación a los estímulos, lo cual produce una incapacidad de realizar las mediciones de percepción y detección esperadas [2, 4, 7, 17, 19, 24, 25, 44]. Dado que se busca estimular y analizar la respuesta de los corpúsculos de Meissner, el dispositivo de estimulación se construye y dispone de tal forma de producir una fuerza estática de entre 70[mN] y 120[mN], esto permite producir adaptación de los corpúsculos de Merkel [2, 4, 7, 19, 25], evitando su participación en la percepción a los estímulos táctiles. Adicionalmente, la señal eléctrica de excitación que genera los movimientos de los estimuladores táctiles, es filtrada a 32[Hz] mediante un filtro pasa bajos Butterworth de 4to orden, esto restringe la respuesta táctil al rango de frecuencia de respuesta de los corpúsculos de Meissner, evitando excitar los corpúsculos de Pacini [2, 4, 19, 25]. Finalmente, los estímulos se restringen a una duración de 300[ms], en un intervalo de atención con ruido en una duración de 1.5[s], estas restricciones buscan evitar producir adaptación de los corpúsculos de Meissner [2, 4, 19, 25, 62].

3.2.1 Determinación del umbral táctil

El objetivo de este procedimiento es determinar el umbral de percepción táctil de cada sujeto, esto es el nivel de intensidad o amplitud del estímulo que produce un 50% de detecciones positivas, para ello se implementa la tarea del tipo SI/NO y una medición de tipo escalera descendente. Para un total de 50 presentaciones, se genera una señal de estímulo táctil que estará presente sólo en uno de los cuatro estimuladores. El estímulo se aplica en la zona exploratoria del dedo índice de la mano derecha, cada presentación será advertida al sujeto por una señal audible en un intervalo de atención de 1,5 segundos. El sujeto es instruido a indicar verbalmente si percibe el estímulo “SI” o no lo percibe “NO” una vez terminada la señal audible. Ante una respuesta “SI” se disminuye el estímulo para la siguiente presentación en un peldaño (3 μ m), ante una respuesta “NO” se aumenta el estímulo en un peldaño, este método permite que el desempeño del sujeto converja al 50% de detecciones positivas. Cinco de las 50 presentaciones no contendrán el estímulo para detectar y prevenir sesgo por parte del observador, las 45 presentaciones que contienen la señal serán distribuidas aleatoriamente entre los cuatro estimuladores. La señal de estímulo es un pulso rectangular de 300[ms] de duración ubicado aleatoriamente en una ventana de atención de 1,5 segundos. El umbral se obtiene promediando los últimos ocho niveles de estimulación. Una representación de la señal de estímulo empleada en esta medición se muestra en la Figura 3.1.

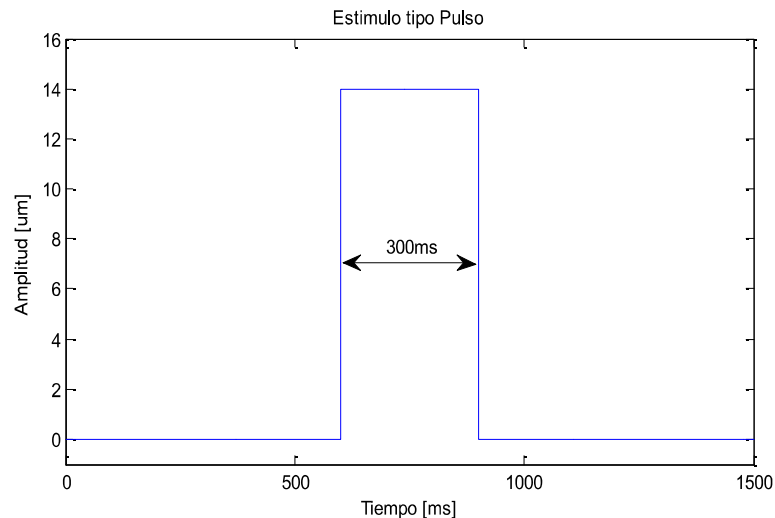


Figura 3.1: Estímulo tipo pulso. Representación de la señal de estímulo empleada para la determinación de umbral de percepción táctil. Esta señal mecánica tiene una amplitud variable entre presentaciones, dependiendo de las respuestas del observador, tiene una duración de 300ms, aleatoriamente ubicada dentro de un intervalo de atención de 1,5[s].

3.2.2 Determinación de nivel óptimo de ruido

El objetivo de este procedimiento es determinar el nivel de ruido gaussiano necesario que maximiza las detecciones positivas por sobre el nivel de azar, para estímulos con una intensidad del 80% del umbral de percepción, en un arreglo de cuatro estimuladores mecánicos. El ruido empleado se cuantifica mediante su desviación estándar. Los resultados derivados de esta medición serán utilizados para realizar la prueba de incerteza espacial.

3.2.2.1 Determinación del nivel óptimo de ruido para sesión 1

El objetivo de este procedimiento es determinar qué nivel de ruido es necesario para optimizar las detecciones positivas por sobre el nivel de azar para una señal de estímulo táctil sub-umbral, 80% del umbral, acompañada de ruido en los cuatro puntos de estimulación. Se utiliza una tarea del tipo de SI/NO y el método de estímulo constante, una señal de estímulo de características similares al procedimiento para determinación de umbral, pero con una amplitud fija y equivalente al 80% del umbral medido del sujeto, a la cual se suma ruido gaussiano de media cero y desviación estándar fija. Se ejecutan cinco series de 40 presentaciones para cinco diferentes niveles de ruido. En cada serie la mitad de las presentaciones contendrán la señal de pulso rectangular que estará presente sólo en un estimulador y ruido en los cuatro estimuladores, la mitad restante contendrá sólo ruido en los cuatro estimuladores, como se muestra en la Figura 3.2, el estimulador que contenga la señal será distribuido aleatoriamente entre los cuatro estimuladores.

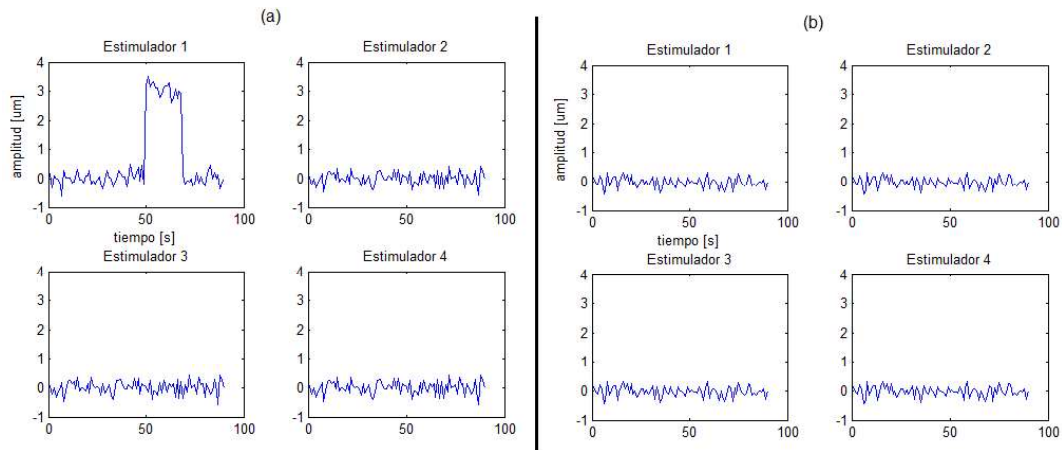


Figura 3.2: Señales de estímulo para sesión 1. Ejemplos de presentaciones con estímulo (a) y sólo ruido (b), para determinación de nivel óptimo de ruido en Sesión 1.

Se registran las respuestas del sujeto y se calculan el porcentaje de aciertos positivos para cada nivel de ruido. Se escoge como nivel óptimo de ruido aquel que produzca el mayor porcentaje de aciertos positivos y que se encuentre por sobre el nivel de significancia estadística. Para determinar este nivel, se emplea una prueba binomial, ecuación 3.1, con la suposición de que ante cada presentación el azar indica que las respuestas SI y NO por parte del observador son igualmente probables.

Los parámetros del experimento para esta medida son los siguientes:

- $n=40$, Número total de presentaciones.
- $k=20$, Número de presentaciones que contienen el estímulo.
- $p=0.5$, Probabilidad de que el sujeto responda SI en una presentación particular.
- $q=0.5$, Probabilidad de que el sujeto responda NO en una presentación particular.

$$P_{(k|n)} = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k} \quad (3.1)$$

A partir de este cálculo, se obtiene que cualquier tasa de aciertos positivos por sobre el 67.5%, resulta estadísticamente significativa, esto es, que no se explica por el azar. Para un total de 40 presentaciones por nivel de ruido, el punto de resonancia debe contener un mínimo de 27 respuestas correctas para superar el nivel de significancia estadística, con un intervalo de confianza $p < 0,04$. Al conjunto de datos obtenidos en esta medición, se realiza una prueba de adherencia a normalidad con el método de Shapiro-Wilk [2]; si los datos superan esta prueba para un intervalo de confianza de 0,05; se realiza luego una prueba ANOVA para validar la significancia estadística de los resultados.

3.2.2.2 Determinación del nivel óptimo de ruido para sesión 2

El objetivo de este experimento es determinar qué nivel de ruido es necesario para optimizar las detecciones positivas por sobre el nivel de azar para una señal de estímulo táctil sub-umbral, 80% del umbral medido al sujeto, acompañada de ruido sólo en el estimulador que contiene la señal de estimulación. Se emplea una tarea del tipo de SI/NO y el método de estímulo constante, una señal de estímulo de características similares al procedimiento para determinación de umbral, a la cual se suma ruido gaussiano de media cero y desviación estándar fija. Se ejecuta cinco series de 40 presentaciones para cinco niveles de ruido diferentes. En cada serie la mitad de las presentaciones contienen la señal más ruido que está presente sólo en un estimulador y la mitad restante contiene sólo ruido en un estimulador, como se muestra en la Figura 3.3. El estimulador que contenga la señal más ruido o sólo ruido será distribuido aleatoriamente entre los cuatro estimuladores.

Se registran las respuestas del sujeto y se calcula el porcentaje de aciertos positivos para cada nivel de ruido. Se escoge como nivel óptimo de ruido aquel que produzca el mayor porcentaje de aciertos positivos y que se encuentre por sobre el nivel de significancia estadística, que corresponde 67,5% al igual que en el caso anterior. Al conjunto de datos obtenidos en esta medición, se realiza una prueba de adherencia a normalidad con el método de Shapiro-Wilk [2]. si los datos superan esta prueba para un intervalo de confianza de 0,05; se realiza luego una prueba ANOVA para validar la significancia estadística de los resultados.

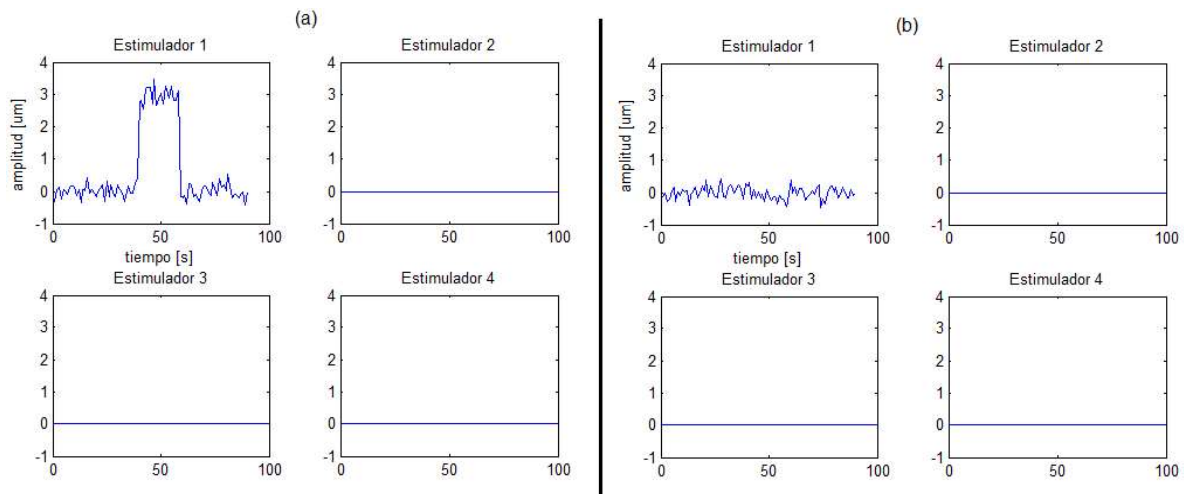


Figura 3.3: Señales de estímulo para sesión 2. Ejemplos de presentaciones con estímulo (a) y sólo ruido (b), para determinación de nivel óptimo de ruido en Sesión 2.

3.2.3 Evaluación del efecto del ruido sobre la incerteza espacial

El objetivo es determinar la tasa de detecciones positivas para una señal de estímulo sub-umbral con ruido óptimo en las condiciones correspondientes a Sesión 1 y Sesión 2 que son,

ruido presente en los cuatro estimuladores o ruido presente en sólo un estimulador que contiene la señal de pulso rectangular. Para ello se implementan cuatro tipos de estímulos divididos en dos grupos de señales, como se ilustra en la Figura 3.4. El primer grupo denominado Sesión 1, contiene ruido en los cuatro estimuladores para cada presentación, además la mitad de las presentaciones de esta sesión contendrá un pulso mientras la otra mitad solo está compuesta por ruido. El segundo grupo denominado Sesión 2 contiene ruido en sólo un estimulador, la mitad de las presentaciones de esta Sesión contendrá la señal de pulso, en esos casos el ruido estará en la misma posición del pulso, en la otra mitad en que no hay pulso el ruido se presentará en una posición aleatoria.

Se debe tener en cuenta que cada medición no debe extenderse por mucho tiempo, idealmente menos de 30 minutos ya que es difícil mantener un sujeto cómodo y concentrado por periodos mayores de tiempo. En cada presentación el sujeto será estimulado con una de estas cuatro con figuraciones de estímulos. Los estímulos del tipo 1, 3 y 4 diferencian un estimulador, el cual contiene la señal con ruido (1 y 3) o sólo ruido (4), mientras el estímulo de tipo 2 no diferencia estimulador pues los cuatro contienen ruido simultáneamente.

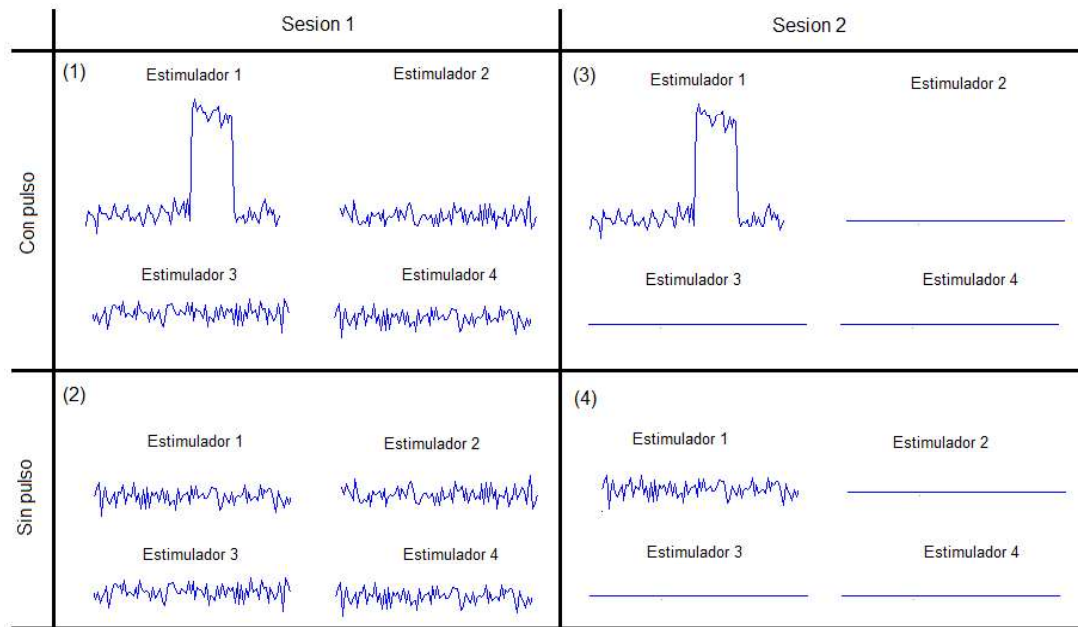


Figura 3.4: Cuatro distintos tipos de estímulo empleados para la evaluación de la incerteza espacial. Los estímulos pertenecientes a la Sesión 1 contienen ruido en los cuatro estimuladores, para la Sesión 2 el ruido está presente en solo un estimulador. (1) estímulo con pulso y ruido en los cuatro estimuladores, (2) estímulo sin pulso y ruido en los cuatro estimuladores, (3) estímulo con pulso y ruido sólo en el estimulador que contiene el pulso, (4) estímulo sin pulso y ruido en sólo uno de los estimuladores.

Se proyecta un total de 112 presentaciones, 56 presentaciones para cada sesión, 28 presentaciones para cada configuración, lo que permite repetir siete veces cada configuración para cada uno de los cuatro estimuladores. Considerando que se requieren aproximadamente 10 segundos para que se genere el estímulo, el sujeto observe la presentación, tome una decisión, la reporte y el experimentador registre la respuesta, cada medición toma alrededor de 20 minutos. El

sujeto debe reportar dos datos sobre sus observaciones, primero es consultado respecto si percibió “SI” el estímulo o si no lo percibió “NO”; luego es requerido a identificar en cuál de las cuatro posiciones percibió dicho estímulo, esta última pregunta se conoce como 4AFC (4 Alternative Forced Choice), opción forzada de 4 alternativas, ya que aunque el sujeto declare no estar seguro de la posición, debe elegir una de las 4 opciones, arriba, abajo, izquierda o derecha.

El nivel de ruido empleado corresponde al nivel óptimo determinado en el experimento anterior para cada sesión. El pulso tendrá una duración de 300ms en una ventana de 1,5s advertidos por una señal audible, la amplitud corresponderá al 80% del umbral medido al sujeto. Después de cada presentación el sujeto será interrogado respecto de si percibe o no el estímulo. Al conjunto de datos obtenidos en esta medición, se realiza una prueba de adherencia a normalidad con el método de Shapiro-Wilk [2]. si los datos superan esta prueba para un intervalo de confianza de 0,05; se realiza luego una prueba ANOVA para validar la significancia estadística de los resultados.

3.3 Equipamiento

Conforme a los requerimientos de los distintos protocolos experimentales, se dispondrá de una serie de elementos físicos e informáticos para la ejecución de las mediciones. El sistema completo está compuesto por cuatro elementos principales que se resumen en el esquema de la Figura 3.5.

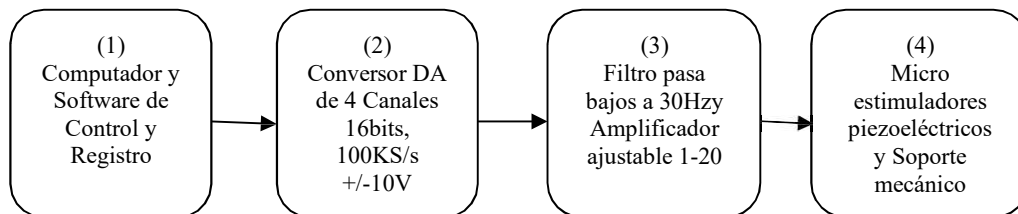


Figura 3.5: Esquema del sistema experimental propuesto. (1) Computador que contiene el software genera las señales y realiza las mediciones, (2) Conversor digital a analógico que recoge las señales digitales desde el computador y las convierte en señales de voltaje, (3) adaptación de la señal mediante filtrado y amplificación, (4) conjunto de estimuladores piezoeléctricos en sus soportes mecánicos para realizar la estimulación en el dedo índice del observador.

El principal propósito de esta plataforma experimental es generar las señales de estímulo mecánico en la zona exploratoria del dedo índice de la mano derecha de los sujetos, controlando su amplitud, sincronización temporal y espacial aplicando cada uno de los protocolos específicos de medición. Permite además registrar la evolución y resultado de las mediciones.

3.3.1 Computador y Software de Control

Se desarrolló un algoritmo de control en la plataforma computacional Matlab para el control de los experimentos, registro de las respuestas de los sujetos y análisis de los resultados. Esta aplicación es capaz de mostrar al experimentador, quién controlará el proceso, toda la información relevante durante la ejecución de cada uno de los protocolos que aplican en cada etapa del experimento, mostrando resultados parciales, gráficas y análisis de los datos al final de cada experimento. Este algoritmo generará también las señales de excitación para los estimuladores, estas señales son transmitidas digitalmente a un conversor Digital-Análogo que se detalla más adelante.

De acuerdo con los requerimientos experimentales se confeccionan tres módulos para el software de control:

- Medición de Umbrales.
- Medición de Punto de Resonancia.
- Efectos sobre la Incerteza Espacial.

Cada uno de estos módulos, emplea una serie de funciones comunes, como por ejemplo la generación de ruido, generación de pulso rectangular, envío de la señal al conversor digital análogo, etc. Estas funciones comunes fueron creadas, probadas y validadas de manera independiente.

3.3.1.1 Algoritmo para Medición de Umbrales

Se desarrolló un algoritmo en Matlab, con una interfaz gráfica apropiada para su uso, que permite la medición de dos tipos de umbrales, en dos condiciones para cada uno. En total cuatro tipos de mediciones de umbral de percepción táctil, empleando la plataforma de cuatro estimuladores:

- Estímulo rectangular en un solo punto.
- Estímulo rectangular en cuatro puntos simultáneamente.
- Estímulo ruido gaussiano en un solo punto.
- Estímulo ruido gaussiano en cuatro puntos simultáneamente.

Cada una de estas cuatro mediciones fue implementada mediante el método de la escalera descendente, con los siguientes parámetros para la medición de umbral al pulso rectangular:

- Estimulo inicial: 50 [μm].
- Amplitud diferencial: 3[μm].
- Número máximo de presentaciones: 50.
- Número de pruebas de captura: 5.
- Criterio de cancelación: Número de falsos positivos ≥ 3 .

Para el caso de umbral al ruido gaussiano los parámetros empleados fueron los siguientes, tanto la amplitud como el diferencial están referidos a la desviación estándar del ruido y que además es de media cero:

- Estimulo inicial: 10 [μm].
- Amplitud diferencial: 0.4[μm].
- Número máximo de presentaciones: 50.
- Número de pruebas de captura: 5.
- Criterio de cancelación: Número de falsos positivos ≥ 3 .

A pesar de que entre sujetos los umbrales no varían mucho, el algoritmo implementado permite laposibilidad de modificar los parámetros de la medición para permitir una medición más rápida, modificando por ejemplo el valor del estímulo inicial, esto permite lograr convergencia en la medición en un menor número de iteraciones. En la Figura 3.6 se aprecia una imagen real del algoritmo para medición de umbrales.

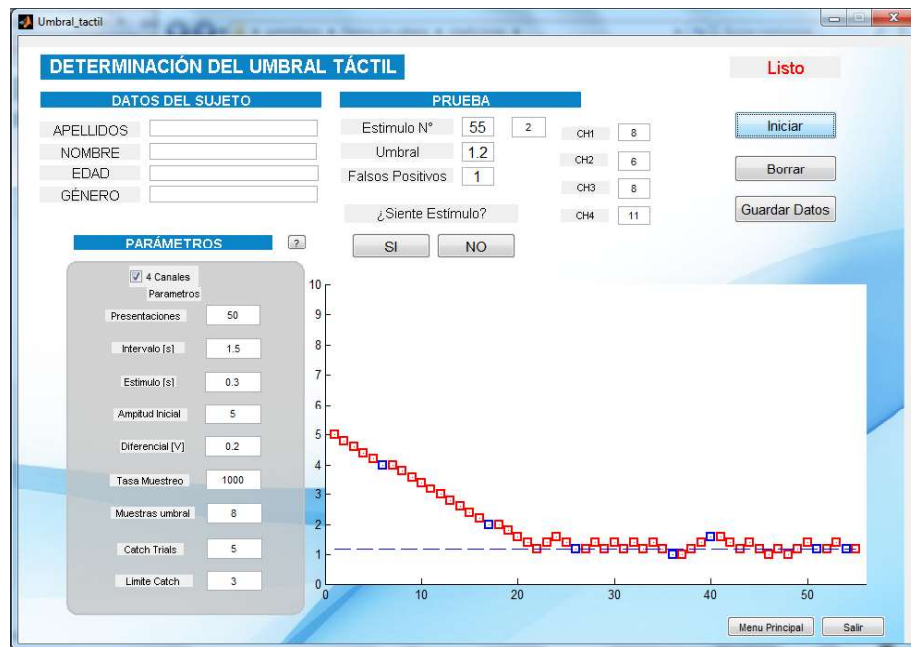


Figura 3.6: Imagen real del software de control y registro para medición de umbral. En este ejemplo se realizó una medición de umbral táctil al pulso. La línea segmentada indica el umbral medido.

Una vez completado el proceso de medición, el algoritmo de control realiza el cálculo del umbral promediando las últimas 8 amplitudes de estímulo, sin considerar las pruebas de captura. Cada medición se considera valida si cumple además con el criterio descrito en el método de la escalera, formalmente se debe cumplir:

$$\sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=N-k+1}^N (A_i - T)^2} < 2\Delta A \quad (3.2)$$

Donde:

- A_i : i -ésima amplitud de estímulo en la serie de medición.
- T : umbral medido en base a las últimas k amplitudes de estímulo en la serie de medición.
- k : número de valores de amplitud que serán empleados para calcular el umbral.
- ΔA : amplitud diferencial empleada en la medición, corresponde a la diferencia de amplitud entre dos estímulos consecutivos.

3.3.1.2 Algoritmo para Medición de Punto de Resonancia

Se desarrolló un algoritmo en Matlab, con una interfaz gráfica apropiada para su uso, que permite la medición del Punto de Resonancia, esto es, la cantidad de ruido sub-umbral que produce Resonancia Estocástica para un estímulo táctil sub-umbral. Lo anterior en la plataforma de cuatro puntos de estimulación. Se implementó el algoritmo de forma que es capaz de controlar la generación de señales y progresión de la medición en dos condiciones:

- Punto de resonancia con ruido en un solo estimulador.
- Punto de resonancia con ruido en los cuatro estimuladores.

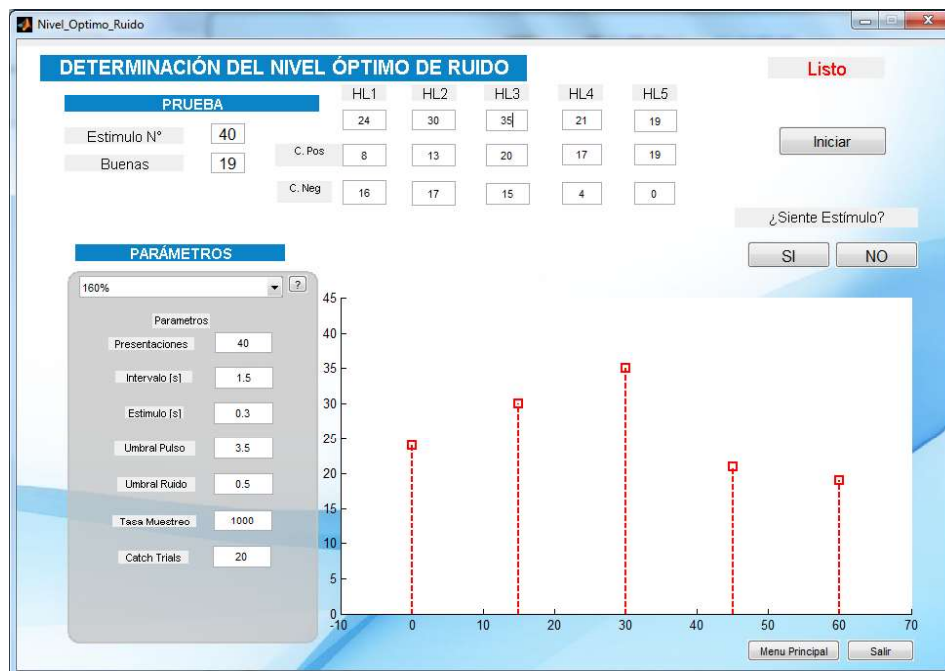


Figura 3.7: Imagen real del software de control y registro en que se realizó una medición de nivel óptimo de ruido. Se aprecian las cinco líneas que representan el número de aciertos positivos para cada nivel de ruido (HL1 al HL5).

Este algoritmo emplea como parámetros de entrada los umbrales medidos de percepción táctil para estímulo rectangular y para estímulo de ruido gaussiano. Según lo descrito en el protocolo de medición, se emplean cinco niveles de ruido: 0%, 15%, 30%, 45% y 60%, estos porcentajes

son relativos al umbral táctil medido para estímulo rectangular y determinan la desviación estándar del ruido que será agregado en cada presentación. En la Figura 3.7 se puede apreciar una captura de pantalla del algoritmo en el que se ha realizado una medición de nivel óptimo de ruido.

La interfaz permite modificar los parámetros de la medición, tales como el número de presentaciones, características del estímulo, características del ruido, etc. Se realizan 40 presentaciones por cada nivel de ruido, de las cuales 20 contienen el estímulo rectangular con ruido gaussiano superpuesto, mientras que las 20 presentaciones restantes contienen solo el ruido.

3.3.1.3 Algoritmo para Determinación del Efecto sobre la Incerteza Espacial

Se desarrolló un algoritmo en Matlab, con una interfaz gráfica apropiada para su uso, que permite la medición del desempeño del sujeto en la tarea de detección de señales táctiles sub-umbral en un esquema de cuatro puntos de estimulación. Este algoritmo implementa el protocolo de medición descrito en 3.2.3, controlando la generación de señales de estímulo, su consecución y registro de las respuestas del sujeto. Una vez concluida la aplicación del procedimiento de medición, este software realiza el cálculo de las tasas de aciertos y errores tanto para la Sesión 1 como para la Sesión 2.

Este algoritmo emplea como parámetros de entrada los resultados obtenidos de las mediciones anteriores:

- Umbral de percepción táctil para estímulo rectangular.
- Nivel óptimo de ruido para Sesión 1.
- Nivel óptimo de ruido para Sesión 2.

La interfaz programada permite ingresar el número total de presentaciones por sesión, amplitud y duración de la señal de estímulo rectangular y nivel óptimo de ruido para Sesión 1 y Sesión 2 de manera independiente. La Figura 3.8 muestra una captura de pantalla real del programa en ejecución. Una vez terminada la medición, la interfaz presenta gráficos de barra que representan las tasas de aciertos positivos para cada sesión y los resultados derivados de las respuestas del sujeto.

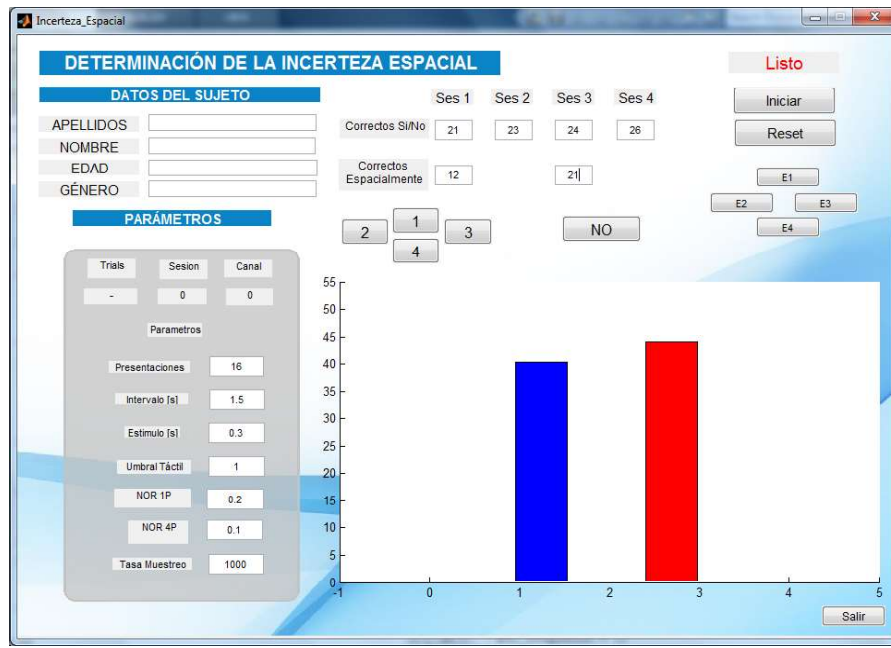


Figura 3.8: Imagen real del software de control y registro para determinar efectos sobre la Incerteza Espacial. Las barras roja y azul representan las tasas de aciertos positivos para Sesión 1 y Sesión 2 respectivamente.

3.3.2 Conversor Digital a Análogo

El algoritmo de control genera las señales de estímulo para la implementación de los diversos protocolos de medición necesarios. Estas señales se generan en forma de vectores S_k unidimensionales en el algoritmo de control, cuyas celdas representan el valor instantáneo de la amplitud de la señal.

$$S_k = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_i \quad \dots \quad s_N] \quad (3.3)$$

S_k , corresponde a la k-ésima señal de estímulo, compuesta por N elementos. La longitud de este vector está dada por dos parámetros:

- Tasa de muestreo: S_T .
- Duración de la señal de estímulo: T.

Tal que, $N=S \times T$. Para todos los experimentos se empleó $S_T=10,000$ y todas las presentaciones tienen una duración de 1,5[s], por lo que $N=15,000$. Los valores S_i , son calculados en cada presentación.

Para poder ser transformadas en una señal de voltaje, que eventualmente corresponderá a la señal de excitación de los transductores piezoeléctricos que ejercen la estimulación táctil, se emplea un conversor Digital a Análogo. En este caso se empleó el módulo NI9263 fabricado por National Instruments, este cuenta con cuatro canales de salida con una resolución de 16 bits para el rango de +/-10[V], con una tasa de muestreo de hasta 100K[muestras/s]. En la Figura 3.9 se muestra una fotografía real del conversor análogo digital.



Figura 3.9: Imagen real del módulo de conversión Análogo Digital NI9263.

El conversor empleado está calibrado de fábrica y cuenta con su respectivo certificado vigente a la fecha en que se realizaron los experimentos. Posee una interfaz de comunicación USB para ser conectada al computador en que se ejecutan los softwares de control y registro. Por otro lado, cuenta con un bloque de conexiones que permite el acceso a los cuatro canales de salida, que además se encuentran protegidos contra corto circuito. Estas salidas tienen un rango dinámico desde $-10[V]$ hasta $+10[V]$, sin embargo, para lograr los niveles de excitación requeridos por los estimuladores piezoeléctricos, se requiere de una posterior etapa de amplificación.

3.3.3 Filtro y Amplificador

Se diseñó, implementó y validó el circuito electrónico requerido para excitar los estimuladores piezoeléctricos, a partir de las señales producidas por el conversor digital a análogo. Este circuito se compone de cuatro canales, cada uno con una etapa de filtrado y una etapa de amplificación de potencia. En la Figura 3.10 se muestra el diagrama esquemático del circuito implementado.

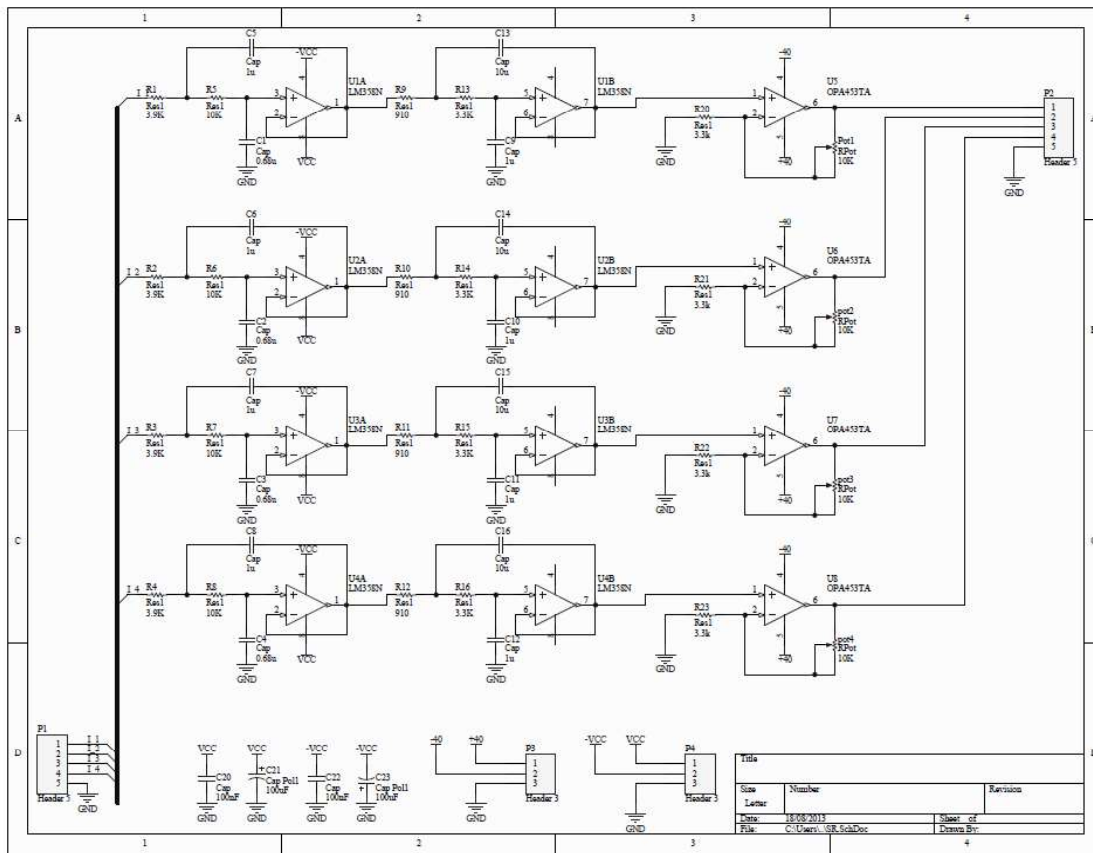


Figura 3.10: Diagrama esquemático del circuito de filtrado y amplificación. Esquema de cuatro canales para excitar los estimuladores piezoeléctricos.

Se pueden apreciar en el diagrama los cuatro canales del circuito, dos etapas de filtrado que componen un filtro pasa bajos Butterworth de cuarto orden y frecuencia de corte en 30[Hz], seguidas de un amplificador de potencia con ganancia ajustable. El circuito fue montado en una placa de circuito impreso diseñada específicamente para este propósito y luego encapsulada en una caja plástica para su protección y manipulación. La Figura 3.11 muestra una fotografía real del dispositivo resultante, se pueden apreciar cuatro interruptores que están destinados a la conexión o desconexión de los filtros de cada canal, cuatro indicadores luminosos que señalan con una luz verde que el filtro de ese canal está conectado, o con una luz roja indica que el filtro está desconectado. Finalmente se encuentran los cuatro potenciómetros de precisión, de 10 revoluciones con dial y freno, que permiten ajustar de manera muy precisa la ganancia de cada una de las etapas de amplificación como parte del proceso de calibración de los estimuladores.



Figura 3.11: Fotografía del módulo de amplificación y filtrado en su encapsulado.

3.3.4 Micro Estimuladores Piezoeléctricos

Como dispositivos de estimulación táctil, se emplean cuatro transductores piezoeléctricos de 35mm de longitud, 2,5[mm] de ancho y 0,6[mm] de espesor, como se puede apreciar en la Figura 3.11, estos dispositivos bi-laminares modelo 40-2040 fabricados por APC International, están compuestos por tres capas metálicas conductoras separadas por dos porciones de material cerámico aislante. Si se aplica un potencial eléctrico en los terminales del elemento, como se muestra en la Figura 3.12, este presenta una deflexión.

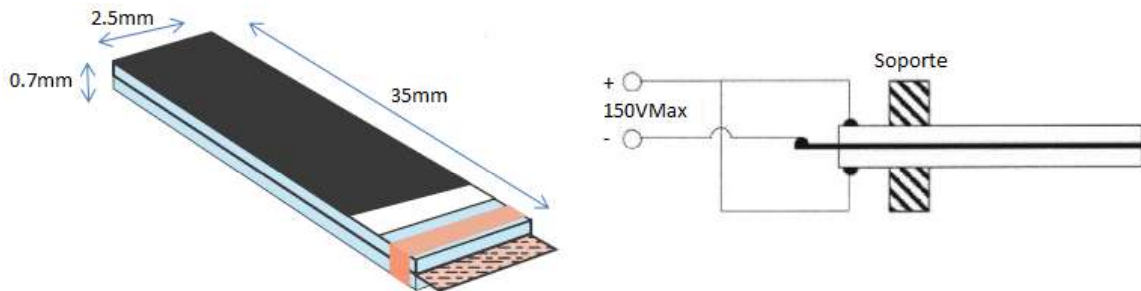


Figura 3.12: Características del estimulador piezoeléctrico. Dimensiones físicas del estimulador piezoeléctrico y diagrama de conexionado eléctrico para excitación en modo paralelo.

Cuando son energizados a su máxima capacidad, estos dispositivos son capaces de producir una deflexión superior a 1,1[mm] con una fuerza superior a 0,6[N], según los datos del fabricante.

En esta serie de experimentos, se desea controlar el desplazamiento de los estimuladores táctiles, el fabricante de estos dispositivos provee la siguiente fórmula que permite predecir la deflexión producida como función del voltaje aplicado en la configuración de la Figura 3.12.

$$D = 2.2 \times 10^{-6} \left(\frac{l_f}{h} \right)^2 \times V \quad (3.48)$$

Donde:

- D: Deflexión total en milímetros.
- l_f : Longitud libre del actuador en milímetros.
- h: Espesor del actuador en milímetros.
- V: Voltaje aplicado en modo paralelo (máximo 150[V]).

Se emplearon cuatro de estos estimuladores, a los que se les adosó un vástago de plástico con terminación esférica de 2[mm] de diámetro y una longitud de 17,5[mm], para que entrara en contacto con la piel del sujeto. Adicionalmente, esta pieza plástica cumple con el propósito de proveer aislación galvánica entre la piel y el actuador, que se encontrará energizado con tensiones de hasta +40[VDC]. El actuador ya posee en recubrimiento aislante, lo que incrementa aún más la seguridad para el sujeto. Las dimensiones del vástago son apropiadas para la estimulación táctil en condiciones similares a las de experimentos comparables en cuanto a mediciones de umbral y resonancia estocástica [1, 9, 17, 19, 29]. En la Figura 3.13 se puede apreciar la disposición de un estimulador respecto del dedo del sujeto, no es la disposición final, esta imagen tiene sólo propósitos explicativos.

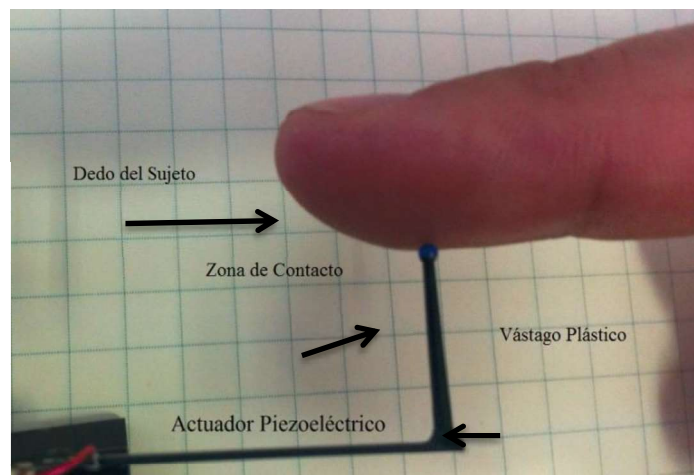


Figura 3.13: Imagen del actuador piezoeléctrico y el vástago plástico entrando en contacto con el dedo del sujeto.

3.3.5 Montaje Mecánico

Los estimuladores táctiles deben ser ubicados de tal manera que puedan producir estimulación simultánea en la zona exploratoria del dedo índice de la mano derecha de los sujetos de experimentación. Los puntos de contacto han de estar distribuidos en un arreglo cuadrado de lado 5mm y, además, cada punto debe ejercer la misma presión estática que produzca la misma indentación en cada uno de ellos cuatro.

Se diseñó y construyó un sistema mecánico de soporte para satisfacer estas y otras condiciones funcionales requeridas, en la Figura 3.14 se puede apreciar una fotografía real del sistema construido. Se pueden apreciar cuatro piezas metálicas de bronce, éstas tienen un doble propósito, junto con dar soporte y posicionar los estimuladores en la zona deseada, cuentan además con un sistema basculante que permite controlar, mediante el ajuste de la posición de un perno, la presión estática que ejerce cada uno de los puntos de contacto. Los cuatro soportes se encuentran por debajo de una plataforma transparente de material acrílico, que tiene una perforación cónica por la cual sobresalen los extremos de los vástagos plásticos que entrarán en contacto con el dedo del sujeto.

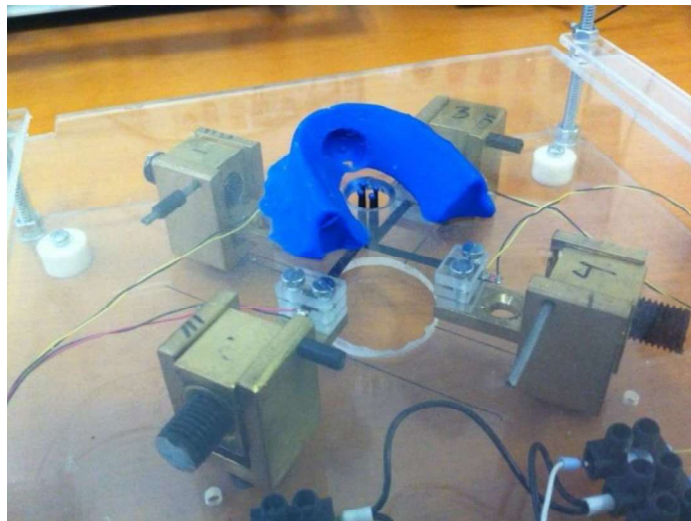


Figura 3.14: Imagen de montaje real para la toma experimental de datos. Se aprecian los cuatro soportes mecánicos basculantes que sostienen los transductores piezoeléctricos. Una placa acrílica sirve de soporte para la mano y una perforación permite la salida de los estimuladores táctiles en el lugar que se ubicará el dedo. Una pieza epóxica de color azul se emplea como guía para la ubicación del dedo [61].

En la Figura 3.14 se puede observar además una porción de masilla epóxica de color azul con forma de “U”, su propósito es orientar al sujeto en la manera que debe ubicar el dedo sobre la plataforma, además al tener una geometría muy ajustada al tamaño del dedo, permite facilitar que el dedo sea ubicado en la misma posición cada vez que se realiza una medición. En la Figura 3.15 se muestra un diagrama esquemático de la interacción de los elementos que componen el soporte mecánico, estimuladores y el dedo del sujeto.

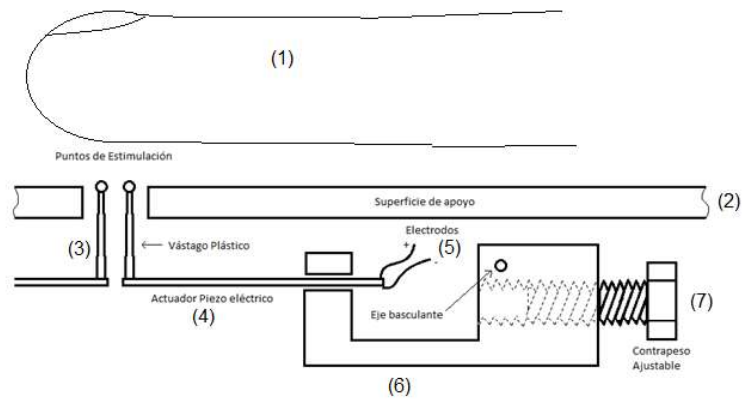


Figura 3.15: Detalle esquemático del montaje mecánico real de cada transductor piezoeléctrico. (1) Dedo índice del observador, (2) superficie de apoyo para la mano, (3) estimuladores plásticos, (4) actuadores piezoeléctricos, (5) electrodos de conexión, (6) soporte mecánico basculante, (7) contrapeso ajustable para control de la presión estática.

Capítulo 4

Experimentos y Resultados

Aplicando los protocolos propuestos en el capítulo anterior y usando plataforma implementada y el software de control, se realizaron exitosamente los tres experimentos propuestos, cuyos resultados se presentan a continuación. Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de Ingeniería Biomédica del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile. Tanto el entrenamiento de sujetos, el proceso de selección y experimentos subsecuentes fueron realizados en un periodo de cuatro meses para el total de los sujetos. Cada medición fue realizada en condiciones en que se controló la temperatura ambiente, manteniendo al mínimo los distractores visuales y auditivos. En la Figura 4.1, se puede apreciar una fotografía real de la escena en la que se realizaron las mediciones.



Figura 4.1: Fotografía real de la escena en que se realizaron los experimentos [61].

En cada medición, el sujeto de experimentación era consultado respecto de una serie de variables que pueden afectar a la medición, el sujeto era requerido a señalar si se encontraba relajado o bajo stress, si había comido hace menos de una hora. Se midió la temperatura de la palma de la mano, verificando que esta se encontrara por encima de 30°C y por debajo de 35°C , para descartar errores en la medición debido a temperatura irregular [29]. Los sujetos eran

requeridos a permanecer relajados durante un par de minutos y siempre se les realizaba una medición de umbral táctil para comprobar su concentración y capacidad de realizar las pruebas.

Durante las mediciones, el sujeto de experimentación se sienta cómodamente en una silla de altura ajustable, con su brazo derecho apoyado sobre un conjunto de esponjas de goma espuma y descansando su mano extendida apoyando la palma sobre la superficie de la plataforma de estimulación, tal que el dedo índice de la mano derecha quedara ubicado dentro de la guía de masilla epóxica y que la zona exploratoria del dedo índice descansara sobre los cuatro estimuladores táctiles. El sujeto era requerido a colocar sobre sus oídos un par de audífonos auriculares, para aislar el ruido ambiente y poder escuchar la señal audible que alerta la presencia de los estímulos.

4.1 Medición de Umbrales Táctiles

Para el total de 13 sujetos de experimentación se realizaron mediciones de umbral de percepción táctil para dos tipos de estímulo, en dos condiciones diferentes.

- Tipos de estímulo: Rectangular, Ruido Gaussiano.
- Condiciones: 1 punto de estimulación, 4 puntos de estimulación.

Tabla 4.1: Resultados en micrómetros, promedio para un caso por sujeto, de la medición de Umbral Táctil al Pulso Rectangular, “dest” representa la desviación estándar del ruido empleado.

| Sujeto | 1CH | 4CH | dest 1CH | dest 4CH |
|--------|------|-----|----------|----------|
| 1 | 17 | 9,5 | 2 | 0,6 |
| 2 | 15 | 6 | 1,7 | 1 |
| 3 | 18 | 9,5 | 2,1 | 0,8 |
| 4 | 16,3 | 8,3 | 2,7 | 0,5 |
| 5 | 14,5 | 8 | 1,5 | 0,7 |
| 6 | 13,5 | 7,5 | 3,1 | 0,64 |
| 7 | 11 | 6 | 2,1 | 0,34 |
| 8 | 12,5 | 6,5 | 2,7 | 0,89 |
| 9 | 21 | 9,5 | 2,5 | 1 |
| 10 | 13,5 | 7,3 | 1,3 | 1,5 |
| 11 | 16,5 | 7,5 | 2,1 | 0,65 |
| 12 | 13 | 6,5 | 1,7 | 0,98 |
| 13 | 13,5 | 7,5 | 2,1 | 0,88 |

Cada una de estas mediciones toman entre 3 a 5 minutos, a cada sujeto se le realiza 16 veces cada una de las dos mediciones en días diferentes, se empleaba el software de control y

registro correspondiente, cuyos resultados fueron registrados en una planilla de cálculo. Los resultados obtenidos de estas mediciones para el estímulo de tipo pulso rectangular se muestra en la Tabla 4.1.

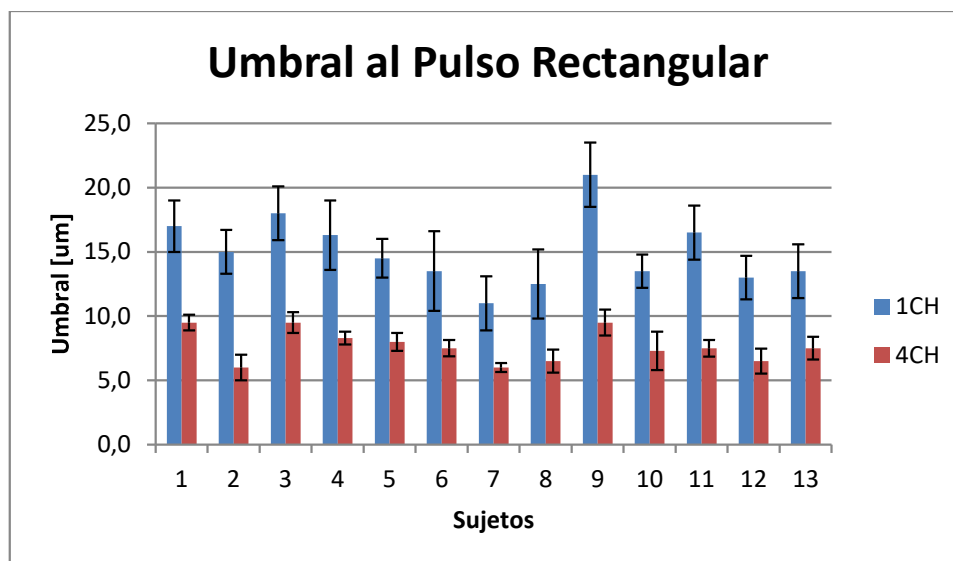


Figura 4.2: Resultados de la medición de Umbral Táctil al pulso rectangular. 1CH representa los resultados para medición de umbral con estímulo presente en un solo canal. 4CH representa los resultados para medición de umbral con estímulo presente en los cuatro canales de forma simultánea. Resultados para los 13 sujetos [61].

Se realiza una prueba de adherencia a la normalidad empleando el método de Shapiro-Wilk [2], tanto para los umbrales al pulso rectangular en 1 canal, como en 4 canales. Para este conjunto de datos, fijando un intervalo de confianza de 0,05. Em el caso del umbral en 1 canal, $p=0,378$, por tanto, supera el nivel de significancia estadística y el conjunto de datos puede ser considerado como de distribución normal. Análogamente para 4 canales, el valor se obtiene $p=0,13$, por tanto, este conjunto de datos también se considera de distribución normal. Para poder apreciar de mejor forma las relaciones entre los umbrales entre sujetos y para ambas condiciones, se presentan los resultados en forma gráfica en la Figura 4.2.

Se puede apreciar que consistentemente para todos los sujetos de experimentación, existe una diferencia notable en el umbral de percepción táctil medido para estímulo de tipo pulso rectangular, cuando se comparan las situaciones de 1 punto de estimulación (1CH) y 4 puntos de estimulación (4CH). Un análisis de tipo ANOVA indica que la probabilidad de la hipótesis nula para este conjunto de datos es $p < 2,60 \times 10^{-8}$, en consecuencia, la diferencia entre las dos condiciones resulta estadísticamente significativa.

Los resultados obtenidos para la medición de umbral de percepción táctil para estímulo de tipo ruido Gaussiano, se muestran en la Tabla 4.2. Para este conjunto de datos, también se realiza una prueba de adherencia a la normalidad empleando el método de Shapiro-Wilk [2], tanto para los umbrales al ruido en 1 canal, como en 4 canales. Para este conjunto de datos, fijando un intervalo de confianza de 0,05. Para el caso del umbral en un canal se obtiene $p=0,57$, y para el

caso del umbral en cuatro canales $p=0,3$. Por tanto, ambos resultados se consideran distribuidos normalmente.

Tabla 4.2: Resultados en micrómetros de la medición de Umbral Táctil a Ruido Gaussiano, “dest” representa la desviación estándar del ruido empleado.

| Sujeto | 1CH | 4CH | dest 1 | dest 4 |
|---------------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1 | 2,6 | 1,3 | 0,62 | 0,20 |
| 2 | 3,5 | 1,5 | 0,29 | 0,24 |
| 3 | 3,2 | 1,6 | 0,34 | 0,27 |
| 4 | 2,5 | 1,5 | 0,27 | 0,22 |
| 5 | 3,7 | 1,6 | 0,63 | 0,22 |
| 6 | 2,1 | 1 | 0,31 | 0,36 |
| 7 | 1,8 | 0,9 | 0,39 | 0,20 |
| 8 | 2,4 | 1,5 | 0,26 | 0,21 |
| 9 | 4,2 | 2,1 | 0,34 | 0,37 |
| 10 | 2,6 | 1,4 | 0,24 | 0,15 |
| 11 | 5,1 | 2,3 | 0,37 | 0,28 |
| 12 | 3 | 1,3 | 0,19 | 0,26 |
| 13 | 3,1 | 1,1 | 0,24 | 0,34 |

Nuevamente se muestran estos resultados gráficamente para apreciar mejor las relaciones entre los umbrales de ambas condiciones y entre sujetos. Ver Figura 4.3.

Al igual que en el caso anterior, se observa que, para todos los sujetos de experimentación, existe una diferencia notable en el umbral de percepción táctil medido para estímulo de tipo ruido Gaussiano, cuando se comparan las situaciones de 1 punto de estimulación (1CH) y 4 puntos de estimulación (4CH). El análisis ANOVA arroja que la probabilidad de la hipótesis nula para este conjunto de datos es $p < 2,66 \times 10^{-5}$, por lo tanto, la diferencia entre ambas condiciones resulta estadísticamente significativa.

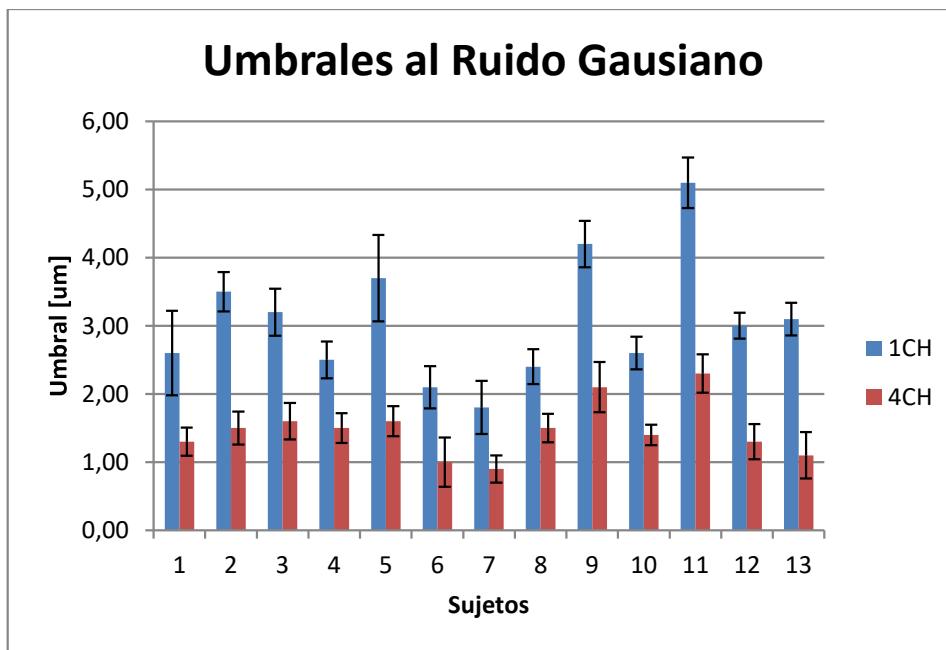


Figura 4.3: Resultados de la medición de Umbral Táctil al Ruido Gaussiano. Resultados para 1 y 4 canales.

En la Figura 4.4 se muestra una gráfica comparativa de los tres tipos de señal que se emplearán como base para generar los estímulos, correspondiendo a umbral táctil al pulso rectangular, umbral táctil al ruido Gaussiano aplicado en un solo punto de estimulación, y umbral táctil al ruido Gaussiano aplicado a los cuatro puntos de estimulación.

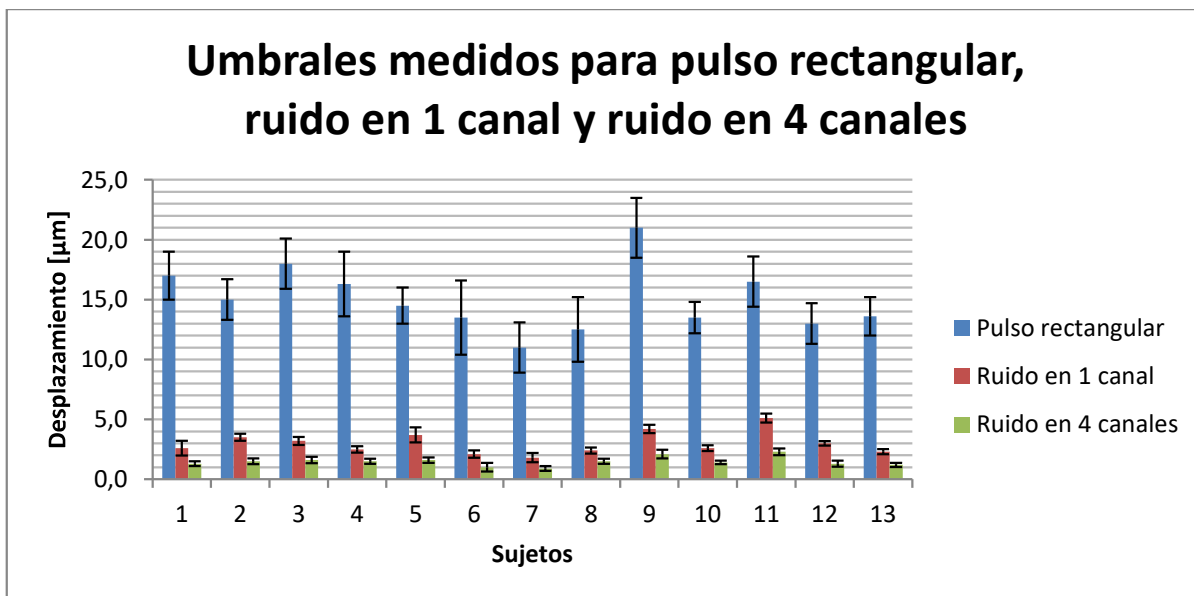


Figura 4.4: Umbrales de percepción medidos para las tres condiciones. En azul se muestra umbral para pulso rectangular, en rojo el umbral para ruido en un solo estimulador, y en verde el umbral medido para ruido en los cuatro estimuladores de forma simultánea [61].

4.2 Medición de Nivel Óptimo de Ruido para sesión 1 y sesión 2

Para el total de 13 sujetos se realizó la medición del Nivel Óptimo de Ruido (NOR), aplicando el protocolo de medición descrito en el capítulo 3.2.2, tanto para sesión 1 como para sesión 2. Como parámetros necesarios para realizar esta medición se requieren el umbral de percepción al Pulso y el umbral de percepción al Ruido Gaussiano. En cada medición se realizan 5 series para diferentes niveles de ruido: 0%, 15%, 30%, 45% y 60%, relativos al umbral de percepción al Pulso. A cada sujeto se le realizaron 3 mediciones de NOR en días diferentes, cada medición toma entre 20 a 35 minutos, el sujeto toma un descanso de 1 a 2 minutos después de cada serie. Se considera una medición exitosa de NOR si es que existe un nivel de ruido para el que exista un máximo de detecciones positivas y que este se encuentre por encima del nivel de significancia estadística, esto es 67,5% que corresponde a 27 respuestas correctas, si para un sujeto no se conseguía medir el NOR en una determinada sesión, ésta era repetida horas después el mismo día o un día diferente. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de estas mediciones.

Tabla 4.3: Nivel Óptimo de ruido para sesión 1 por sujeto, como porcentaje del Umbral al Pulso. Correspondientes a tres mediciones independientes.

| Sujeto | %NOR1 | %NOR2 | %NOR3 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 30 | 30 | 30 |
| 2 | 40 | 30 | 30 |
| 3 | 40 | 40 | 30 |
| 4 | 30 | 30 | 40 |
| 5 | 40 | 40 | 30 |
| 6 | 30 | 30 | 30 |
| 7 | 30 | 30 | 40 |
| 8 | 40 | 40 | 30 |
| 9 | 30 | 30 | 40 |
| 10 | 30 | 30 | 40 |
| 11 | 40 | 40 | 30 |
| 12 | 30 | 30 | 30 |
| 13 | 30 | 30 | 30 |

Se aprecia que, en la mayoría de los casos, el NOR está en el rango del 30% del umbral de percepción al pulso medido para cada sujeto. Esto se correlaciona correctamente con los resultados obtenidos por otros experimentos [1, 9, 10, 11, 18, 19, 24, 25]. En la Figura 4.5 se muestra una gráfica de los resultados obtenidos para las dos sesiones, en que el NOR está expresado en micrómetros, o sea, valores absolutos de la desviación estándar de ruido Gaussiano, en micrómetros, que produce resonancia estocástica, para un estímulo de pulso rectangular con amplitud equivalente al 80% del umbral medido al pulso.

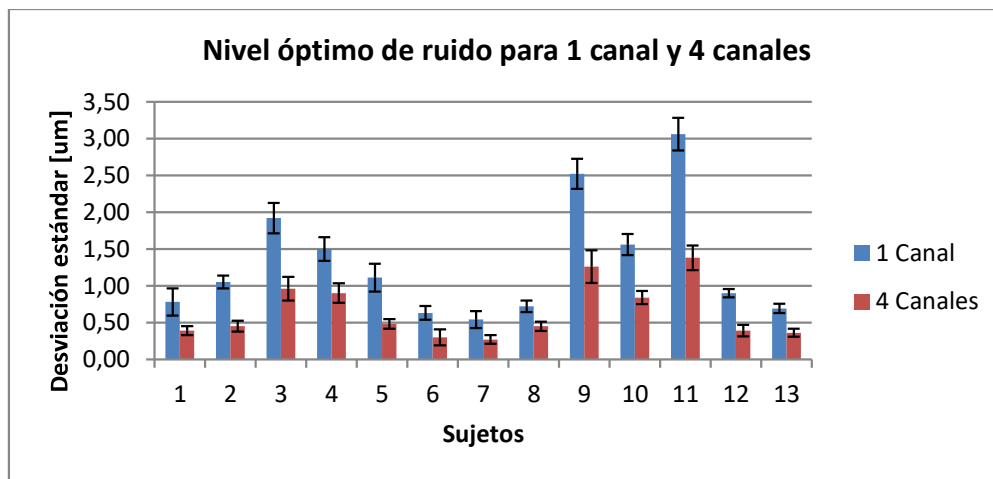


Figura 4.5: Resultados de la medición de nivel óptimo de ruido. Umbral Táctil al Ruido Gaussiano para las dos sesiones, en azul se muestran los NOR para 1 punto de estimulación, en rojo se muestran los NOR para 4 puntos de estimulación [61].

Es importante señalar que esta medición de NOR es una aproximación con precisión suficiente para la determinación del fenómeno de Resonancia Estocástica y sus efectos sobre la Incerteza Espacial, ya que el concepto de óptimo es superlativo y en este procedimiento se evaluó la tasa de aciertos positivos usando valores discretos de amplitud para el ruido, es que el NOR real, se encuentra próximo en una vecindad del valor estimado, con un error de estimación máximo de 7,5% (valor medio entre dos niveles de ruido adyacentes).

Resulta interesante poder comparar el umbral de percepción táctil medido para cada sujeto, con el nivel de ruido óptimo correspondiente, estos datos se muestran en la Figura 4.6.

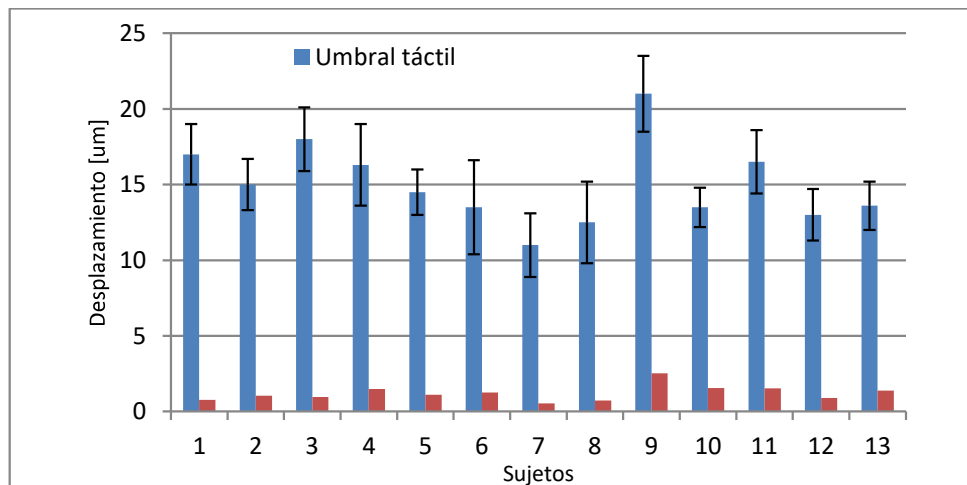


Figura 4.6: Comparación de umbrales táctiles. Con NOR para sesión 1, en azul resultados de la medición de umbral de táctil para estímulo rectangular, en rojo nivel óptimo de ruido para sesión 1 [61].

4.3 Efecto de la distribución del Ruido sobre la Incerteza Espacial

Para el total de 13 sujetos se realizó la medición de la tasa de aciertos positivos en dos escenarios distintos, Sesión 1 y Sesión 2, tal como fue descrito en el protocolo respectivo del capítulo 3.2.2.3. A cada sujeto se le realizaron 3 mediciones, cada una de ellas separada menos de 30 minutos después de haberle realizado una medición exitosa de Nivel Óptimo de Ruido, ya que los datos derivados de esa medición son empleados para realizar este tercer experimento, de esta manera se reducen variabilidades asociadas a agentes exógenos. Cada una de estas mediciones tiene una duración de entre 35 a 45 minutos, periodo en que el sujeto toma dos descansos de entre 1 a 2 minutos.

En esta medición se encuentran dos grupos de datos asociados a las sesiones 1 y 2 que son analizadas por separado para cada sujeto. Los resultados de ambas sesiones deben superar el nivel de significancia estadística según la prueba binomial, según la ecuación 3.1, de manera análoga a la determinación del punto de resonancia, pero el conjunto de parámetros en este caso es el siguiente para cada sesión.

Donde:

- $n=56$, Número total de presentaciones.
- $k=28$, Número de presentaciones que contienen el estímulo.
- $p=0.5$, Probabilidad de que el sujeto responda SI en una presentación particular.
- $q=0.5$, Probabilidad de que el sujeto responda NO en una presentación particular.

Lo que determina el nivel de significancia estadística que debe superarse para ambas sesiones es de 36 respuestas correctas, con un intervalo de confianza $p<0,05$.

En la Tabla 4.4 se muestra el detalle de respuestas correctas para Sesión 1(CS1), y respuestas correctas para Sesión 2 (CS2), en cada una de las 3 mediciones para el total de sujetos de experimentación.

En la tabla 4.4 se muestra el detalle de respuestas correctas para Sesión 1(CS1), y respuestas correctas para Sesión 2 (CS2), en cada una de las 3 mediciones para el total de sujetos de experimentación.

Se puede apreciar que todos los sujetos presentan niveles de desempeño en la tarea de detección, por encima del nivel de significancia estadística, esto implica que estos resultados no pueden ser explicados por el azar. Nótese que tanto en la Sesión 1 como en la Sesión 2, el estímulo empleado tiene una amplitud sub-umbral, la adición de ruido Gaussiano óptimo, permite incrementar el desempeño del sujeto por encima de lo que predice el azar, esta es la manifestación del fenómeno de Resonancia Estocástica que se corrobora en esta serie experimental.

Tabla 4.4: Registro de respuestas y cálculo de las tasas de aciertos positivos CS1 y CS2 para las sesiones S1 y S2 respectivamente. Tres mediciones por cada sujeto.

| Sujeto | Medición 1 | | Medición 2 | | Medición 3 | |
|--------|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
| | CS1 | CS2 | CS1 | CS2 | CS1 | CS2 |
| 1 | 41 | 47 | 41 | 50 | 43 | 47 |
| 2 | 44 | 49 | 41 | 46 | 42 | 48 |
| 3 | 43 | 46 | 45 | 48 | 41 | 50 |
| 4 | 40 | 45 | 42 | 48 | 41 | 48 |
| 5 | 43 | 47 | 42 | 47 | 43 | 48 |
| 6 | 42 | 44 | 43 | 46 | 44 | 45 |
| 7 | 45 | 50 | 44 | 49 | 42 | 48 |
| 8 | 42 | 47 | 41 | 48 | 39 | 47 |
| 9 | 40 | 44 | 43 | 46 | 45 | 48 |
| 10 | 45 | 48 | 42 | 48 | 39 | 45 |
| 11 | 39 | 45 | 40 | 47 | 44 | 47 |
| 12 | 41 | 46 | 41 | 48 | 42 | 47 |
| 13 | 43 | 46 | 42 | 48 | 42 | 47 |

Tal como fue expuesto en el capítulo anterior, se requiere cuantificar la tasa de aciertos positivos en la Sesión 1 y Sesión 2. Un Verdadero Positivo se produce cuando el estímulo rectangular está presente y el sujeto responde “SI”, un Verdadero Negativo ocurre cuando el estímulo no está presente y el sujeto responde “NO”, el número de Respuestas Correctas resulta de la suma aritmética de estas dos cantidades.

$$PC = VP + VN \quad (4.1)$$

Dado el total de presentaciones, se puede expresar esta cantidad en forma porcentual. En la Figura 3.4 se muestran los 4 tipos de presentaciones empleadas en este experimento. En base a las respuestas del sujeto se calculan dos cifras PC(1)+PC(2) que corresponde a la tasa de aciertos positivos para la Sesión 1, y PC(3)+PC(4) que corresponde a la tasa de aciertos positivos para la Sesión 2. Los resultados obtenidos de estas mediciones se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Registro de respuestas y cálculo de las tasas de aciertos positivos. Los datos aquí mostrados corresponden a una sola medición por sujeto.

| Sujeto | VP 1-2 | VN 1-2 | VP 3-4 | VN 3-4 | PC(1+2)% | PC(3+4)% |
|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| 1 | 20,00 | 21,00 | 23,00 | 24,00 | 73,21 | 83,93 |
| 2 | 21,00 | 23,00 | 24,00 | 25,00 | 78,57 | 87,50 |
| 3 | 19,00 | 24,00 | 22,00 | 24,00 | 76,79 | 82,14 |
| 4 | 18,00 | 22,00 | 23,00 | 22,00 | 71,43 | 80,36 |
| 5 | 20,00 | 23,00 | 22,00 | 25,00 | 76,79 | 83,93 |
| 6 | 19,00 | 23,00 | 20,00 | 24,00 | 75,00 | 78,57 |
| 7 | 21,00 | 24,00 | 24,00 | 26,00 | 80,36 | 89,29 |
| 8 | 20,00 | 22,00 | 22,00 | 25,00 | 75,00 | 83,93 |
| 9 | 18,00 | 22,00 | 21,00 | 23,00 | 71,43 | 78,57 |
| 10 | 21,00 | 24,00 | 23,00 | 25,00 | 80,36 | 85,71 |
| 11 | 19,00 | 20,00 | 21,00 | 24,00 | 69,64 | 80,36 |
| 12 | 18,00 | 23,00 | 21,00 | 25,00 | 73,21 | 82,14 |
| 13 | 20,00 | 23,00 | 22,00 | 24,00 | 76,79 | 82,14 |

En la Figura 4.7 se muestran de manera gráfica las tasas de aciertos positivos, o porcentaje de respuestas correctas, para ambas sesiones, determinadas en base a tres mediciones por cada sujeto.

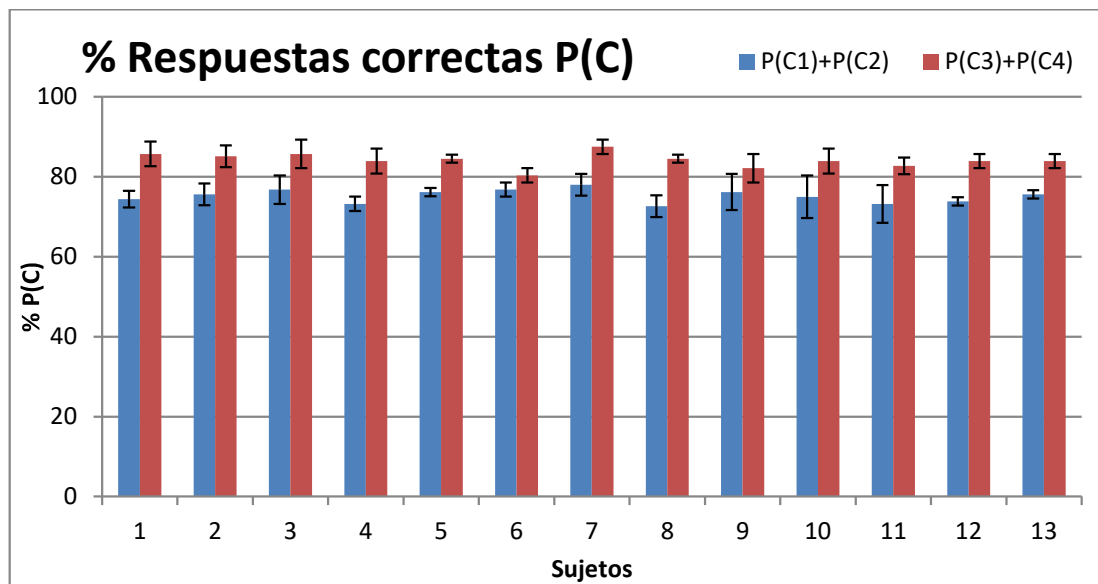


Figura 4.7: Porcentaje de respuestas correctas. %P(C) por cada sujeto para un total de 3 mediciones. En azul PC(1)+PC(2) que corresponde a la tasa de aciertos positivos para la Sesión 1, en rojo PC(3)+PC(4) que corresponde a la tasa de aciertos positivos para la Sesión 2 [61].

Para este conjunto de datos, se realiza una prueba de adherencia a la normalidad empleando el método de Shapiro-Wilk [2], tanto para PC(1)+PC(2), como para PC(3)+PC(4), fijando un intervalo de confianza de 0,05. Se obtiene $p=0,73$ para el primer caso y $p=0,74$ para el segundo caso, por lo que ambos conjuntos de datos son considerados de distribución normal.

A primera vista se puede apreciar que, de manera consistente, para cada sujeto la tasa de aciertos positivos es mayor en la Sesión 2, PC(3)+PC(4). Un análisis ANOVA de dos factores y medidas repetidas para este conjunto de datos permite concluir que ésta es una diferencia estadísticamente significativa con $p < 5,9 \times 10^{-4}$, esto significa que entre ambos grupos de datos existe una diferencia que no puede ser explicada por el azar, dando indicios de la presencia de un fenómeno subyacente que explica esta diferenciación. Las Sesiones 1 y 2 se distinguen únicamente en un aspecto, la distribución espacial del ruido; mientras que en la Sesión 1 el ruido está presente simultáneamente en los cuatro puntos de estimulación, en la Sesión 2 el ruido se presenta únicamente en la posición en que también se encuentra la señal de estímulo rectangular. La teoría de detección de señales no predice diferencias en el desempeño del observador para ambas Sesiones, tampoco la teoría de Resonancia Estocástica explica esta diferencia. Estos resultados permitirían corroborar la hipótesis de investigación en términos de que la coincidencia espacial del ruido táctil que produce resonancia estocástica permitiría mejorar el desempeño de un observador por sobre la situación en que el ruido se encuentra distribuido espacialmente de manera uniforme.

A partir de los registros obtenidos para este conjunto de sujetos, resulta interesante poder observar que ocurre con las tasas de falsos positivos. En la Figura 4.8 se muestran gráficamente las tasas de falsos positivos por sujeto para el total de 3 mediciones. Como era de esperarse, a partir del resultado anterior, se puede apreciar una reducción en la tasa de Falsos positivos.

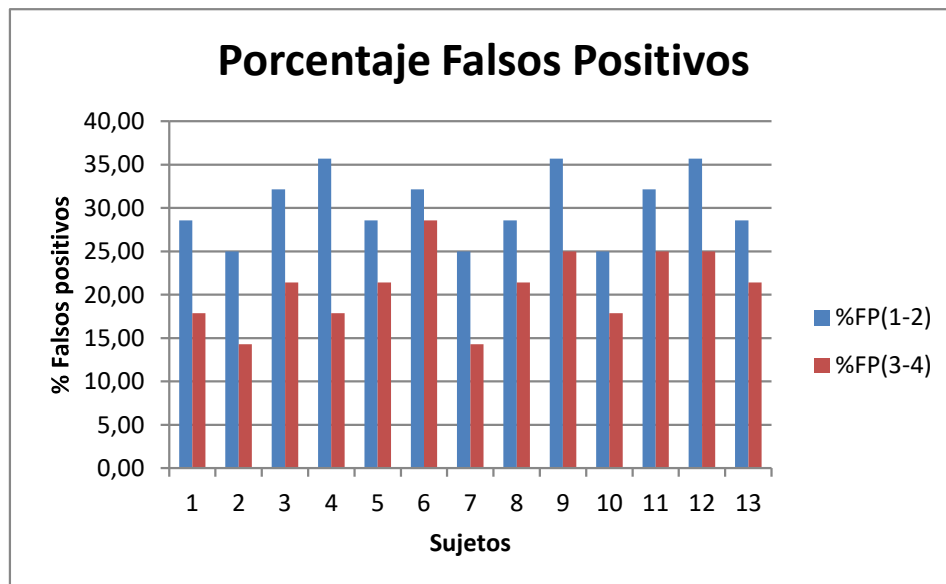


Figura 4.8: Porcentaje de falsos positivos. Por cada sujeto para un total de tres mediciones, en azul la tasa de falsos positivos para las sesiones 1-2, en rojo la tasa de falsos positivos para las sesiones 3-4 [61].

En la Figura 4.9, se muestran las tasas de respuestas incorrectas por sujeto, esto es la suma de los Falsos Positivos y Falsos Negativos. Se aprecia una disminución de las respuestas incorrectas cuando el ruido coincide espacialmente con el estímulo. Lo anterior es sumamente relevante, por cuanto demuestra que el incremento de los aciertos positivos en el desempeño del observador no incrementa los falsos positivos o falsos negativos en el resultado de la tarea de detección.

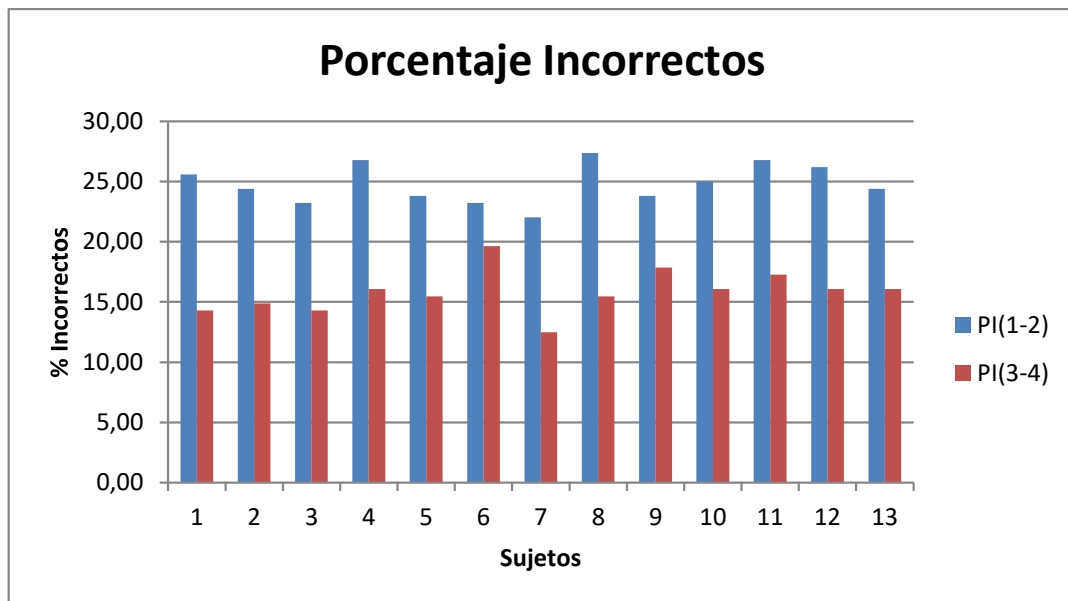


Figura 4.9: Porcentaje de respuestas incorrectas. Por cada sujeto para un total de 3 mediciones, en azul la tasa de respuestas incorrectas para las sesiones 1-2, en rojo la tasa de respuestas incorrectas para las sesiones 3-4 [61].

Los resultados de la tarea 4AFC se muestran en Figura 4.10, donde se pidió a los sujetos que identificaran la posición en la que se aplicaba el estímulo. En esta Figura se comparan los aciertos correctos para las condiciones C1 que contiene un estímulo rectangular sumado a ruido en los cuatro puntos de estimulación, y C2 que solo tiene ruido en los cuatro puntos de estimulación.

Se puede observar que no hay una diferencia significativa en el desempeño de los observadores en esta tarea, al comparar la detección correcta de la posición en las condiciones C1 con estímulo y C2 sin estímulo, por lo que no se diferencia significativamente de elecciones al azar.

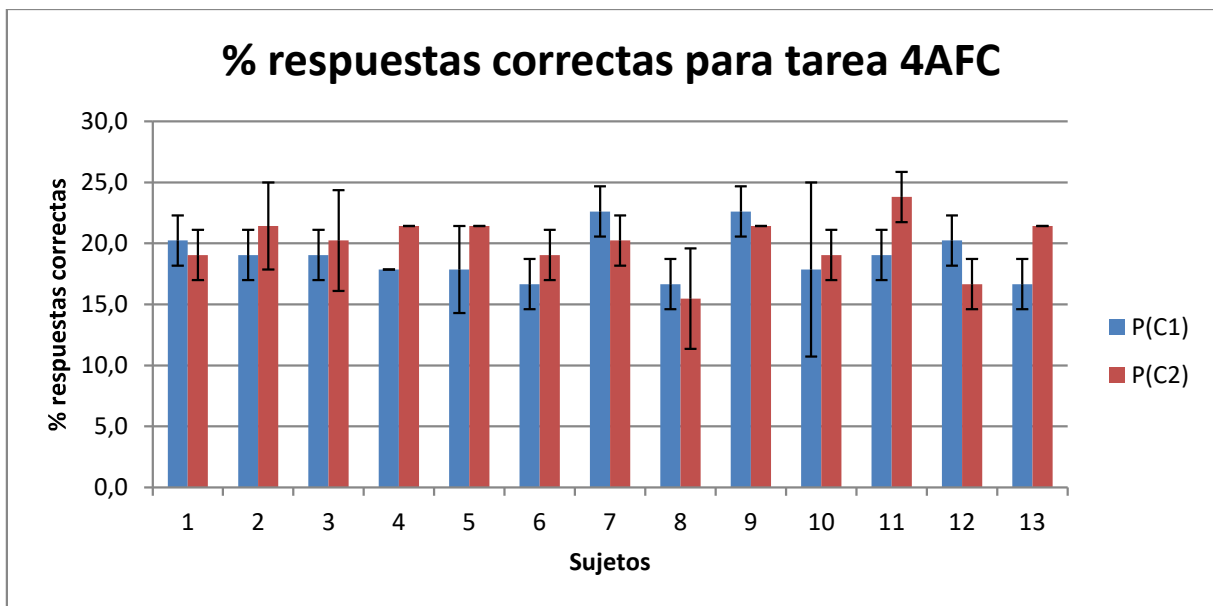


Figura 4.10: Porcentaje de respuestas correctas en la tarea 4AFC. En azul el porcentaje de aciertos para la condición C1, en rojo el porcentaje de aciertos para la condición 2 [61].

Se debe señalar, como parte de los resultados, que este trabajo en cuanto a su hipótesis, metodología, materiales, procedimientos, resultados y conclusiones, fueron publicados en la revista científica PLoS ONE, en noviembre de 2017 [61].

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

El comportamiento del sistema táctil humano es un ámbito relevante en una amplia gama de aplicaciones que van desde el desarrollo de interfaces hápticas hasta la biónica. Múltiples estudios recientes han explorado diversos aspectos de la percepción táctil y del rol que juega la resonancia estocástica en la mejora del rendimiento en tareas de detección y otras medidas de desempeño. El trabajo en esta tesis se dividió fundamentalmente en dos grandes etapas, la primera parte estuvo enfocada en el desarrollo, implementación y validación de una plataforma experimental para el estudio del fenómeno de resonancia estocástica en un esquema de cuatro puntos de estimulación. La segunda parte conforma el trabajo requerido para el diseño de un procedimiento experimental apropiado para dilucidar a interrogante principal de este trabajo, que es determinar si la distribución espacial del ruido táctil sub-umbral que produce resonancia estocástica, tiene efecto sobre el desempeño de un observador en una tarea de detección.

En la primera etapa se propuso un diseño completamente nuevo para la realización de experimentos de percepción táctiles, con un esquema nunca visto, en el cual específicamente se pueden realizar estímulos táctiles en cuatro puntos de contacto, con capacidad de controlar en forma individual la presión estática. Adicionalmente la incorporación de hardware especializado permitió un alto grado de confiabilidad en las mediciones y reproducibilidad de los resultados. Empleando esta plataforma, se pudo replicar exitosamente los resultados obtenidos por otros investigadores en múltiples experimentos, con algunas diferencias interesantes. Estas diferencias no necesariamente representan una inconsistencia, sino más bien fuentes de posibles hallazgos interesantes que merece la pena ser investigados. Por ejemplo, experimentadores anteriores aparentemente sobreestimaron la magnitud del nivel óptimo de ruido que produce resonancia estocástica. Esto no pone en entredicho el fenómeno, por el contrario, lo enfatiza. En los experimentos derivados de este trabajo, se encontró que la cantidad de ruido necesaria para producir resonancia estocástica es aparentemente menor de lo que se creía, sin embargo, para poder verificar este hecho se requiere una investigación exhaustiva y que escapa al alcance de los objetivos planteados en este estudio. De igual manera, se evidenció que el umbral de percepción al ruido Gaussiano es mucho menor que el umbral de percepción a estímulos rectangulares, teniendo en cuenta que la respuesta del sistema de estimulación está restringida al corpúsculo de Meissner, esta diferencia no parece tener una explicación trivial, por lo que también requiere de mayor investigación para tratar de determinar el origen de esa diferencia. Adicionalmente, se encontró que el umbral táctil de percepción al ruido es menor para el caso de cuatro estimuladores con ruido, que para el caso de ruido presente en un solo estimulador. Lo anterior requiere también más estudio, ya que, si bien se ha reportado que no existe sumación espacial para el corpúsculo de Meissner, los resultados aquí obtenidos, y por otros investigadores [62], indican que aún falta indagar por completo esta característica.

La segunda etapa, tenía como objetivo principal la aplicación de tres protocolos experimentales para someter a prueba la hipótesis presentada en este trabajo, determinar los efectos de la distribución espacial del ruido óptimo sobre el desempeño del observador en una tarea de detección. Gracias a los buenos resultados obtenidos en la etapa anterior es que se dispuso de una plataforma experimental robusta y muy versátil, durante su desarrollo se entrenó a un gran número de sujetos que sirvieron como miembros del grupo experimental. El despliegue de los experimentos fue exitoso y permitió la integra implementación de los protocolos, recolectando datos suficientes para el análisis. De cada una de las múltiples etapas de los diferentes protocolos se obtuvo información necesaria y muy interesante. En el caso de la determinación del nivel óptimo de ruido, se encontró evidencia de un fenómeno no descrito hasta el momento. Investigadores anteriores, han modelado la respuesta de los diferentes canales de percepción táctil, caracterizando la respuesta individual de cada una de las estructuras anatómicas que juegan algún rol en la percepción táctil. Es así como en base a ciertos experimentos es que se había llegado a la conclusión que el canal de percepción mediado por los corpúsculos de Meissner no presentaba el fenómeno sensorial conocido como sumación espacial, esto es que en la medida de que son estimulados más campos receptivos adyacentes, los umbrales de percepción se reducen, característica declarada únicamente para el canal tipo P, mediado por los corpúsculos de Pacini. Sin embargo, al realizar los experimentos para determinar el nivel óptimo de ruido, se descubrió que el umbral de percepción, tanto para estímulo rectangular como para ruido Gaussiano, es menor cuando se estimula simultáneamente en cuatro puntos que cuando el estímulo está presente en solo un punto de contacto. Esta evidencia experimental, fue ampliamente discutida y el proceso de medición y aplicación de los protocolos respectivos, fue exhaustivamente revisado para despejar toda duda al respecto. Lo anterior no refuta directamente la aceptación general de que el canal mediado por el corpúsculo de Meissner no presenta sumación espacial, ya que algunas características de los experimentos no son comparables. En este punto es que se abre lo que es quizá la arista más interesante derivada del presente trabajo y que sin duda requiere una cantidad de trabajo y dedicación que se encuentran fuera del alcance de los objetivos planteados para este trabajo.

Finalmente, con relación al objetivo principal de esta tesis, se recolectó suficiente evidencia experimental relativa al efecto que tiene la distribución espacial del ruido Gaussiano sobre el desempeño del observador. Los resultados experimentales señalan inequívocamente que existe una diferencia en los dos escenarios propuestos a comparar. Cuando el ruido óptimo coincide espacialmente con la posición del estímulo rectangular, el desempeño del observador es notablemente superior que el escenario en que el ruido está presente simultáneamente en los cuatro puntos de contacto. Esta diferencia no es predicha por la Teoría de Detección de Señales ni Teoría de Resonancia estocástica. Tal como fue planteado en el marco teórico, se propone como explicación a este fenómeno el fundamento planteado en la Teoría de la Incerteza. Esta considera la existencia de observadores no ideales, que desconocen a cabalidad todos los parámetros de una señal, por lo que aumentan los requerimientos de memoria que permiten caracterizar la señal a detectar. Plantea además que el uso de señales de reforzamiento puede reducir los requerimientos de memoria en alguna de las dimensiones sensoriales, como lo son la incerteza temporal y la incerteza espacial. Sobre esta segunda componente es que se plantea que tiene efecto la coincidencia espacial del ruido con la señal de estímulo. Al estar presente únicamente en la posición del estímulo, entrega información adicional relativa a la ubicación espacial, reduciendo los requerimientos de memoria por parte del observador y consecuentemente produce un incremento en el desempeño del observador ante una tarea de detección.

Bibliografía

- [1] J. J. Collins, C. C. Chow, T. T. Imhoff. “Noise-enhanced tactile sensation”. *Scientific Correspondence, Nature* vol. 376, pp 236-238, July. 1995.
- [2] G. A. Gescheider. “*Psychophysics The Fundamentals*”. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1997.
- [3] H. Lieberman, A. Pentland. “Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The Best PEST”, *Behavior Research Methods & Instrumentation*, vol. 14, pp. 21-25, Jan. 1982.
- [4] S. A. Klein. “Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary”. *Perception & Psychophysics*, vol. 63, pp. 1421-1455, Nov. 2001.
- [5] D. M. Green, J. A. Swets. *Signal detection theory and psychophysics*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1966.
- [6] J. A. Nevin. “Signal Detection Theory And Operant Behavior”. *Journal of the experimental analysis of behavior*, vol. 12, pp. 475-480, May. 1969.
- [7] W. H. Ehrenstein, A. Ehrenstein. “Psychophysical Methods” in *Modern techniques in neuroscience research*, Har/Cdr ed., Uwe Windhorst, Hakan Johansson. German: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH & Co. K, 1999, pp. 1211-1242.
- [8] T. D. Wickens. *Elementary Signal Detection Theory*. Los Angeles: Oxford University Press, 2002.
- [9] J.J. Collins, T. T. Imhoff, P. Grigg. “Noise-Mediated enhancements and decrements in human tactile sensation”. *Physical Review E.*, vol. 56, July. 1997.
- [10] M. Ohka, K. Beceren, T. Jin, A. Chami, H. B. Yussof ,T. Miyaoka. “Experiments on Stochastic resonance toward human mimetic tactile data processing”. *International Journal of Social Robotics*, vol. 4, pp. 65-75, Jan. 2012.
- [11] F. Moss, K. Wiesenfeld. “The benefits of background noise”. *Scientific American*, vol. 273, pp.50-53, 1995.
- [12] L. Gammaitoni, P. Hanggi, P. Jung & F. Marchesoni. “Stochastic Resonance”. *Rev Mod Phys*, vol. 70, pp. 223-287, Jan. 1998.
- [13] W. Liu, L. A. Lipsitz, M. Montero-Odasso, J. Bean, D. Casey Kerrigan, J. J. Collins. “Noise-Enhanced Vibrotactile Sensitivity in older adults, patients with stroke, and patients with diabetic neuropathy”, *Phys Med Rehabil*, vol 83, pp. 171-176, Feb. 2002.
- [14] F. Zeng, Q. Fu, R. Morse. “Human hearing enhanced by noise”. *Brain research*, vol. 869, pp. 251-255, 2000.
- [15] E. Simonotto, M. Riani. “Visual perception of Stochastic Resonance”. *Phys Rev Letters*, vol. 78, pp. 1186-1189, 1997.
- [16] F. Moss, L.M. Ward, W.G. Sannita. “Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application”. *Clin. Neurophysiology*, vol. 115, pp. 267-281, 2004.
- [17] C. E. Wells. “Stochastic resonance in elderly tactile sensation”, PhD Thesis, University of British Columbia, Canada, 2002.
- [18] K. Beceren, M. Ohka, T. Jin, T. Miyaoka, H. Yussof, “Optimization of Human Tactile Sensation Using Stochastic Resonance”, *Procedia Engineering*, Volume 41, Pages 792-797,ISSN 1877-7058, 2012.
- [19] C. Perez, J. Donoso, L. Medina. “A critical experimental study of the classical tactile threshold theory”. *BMC Neuroscience*, vol. 11:76, June. 2010.

- [20] W. Tanner. "Physiological implications of psychophysical data". *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 89, pp.752-765, 1961.
- [21] T. Cohn, D. Lasley. "Detectability of a luminance increment: Effect of spatial uncertainty". *Journal of the Optical Society of America*, vol. 64(12), pp. 1715-1719, 1974.
- [22] D. Pelli. "Uncertainty explains many aspects of visual contrast detection and discrimination". *Journal of the Optical Society of America*, vol. 2(9), pp. 1508-1532, 1985.
- [23] T. E. Cohn, D. J. Lasley. "Detectability of a luminance increment: Effect of spatial uncertainty". *Journal of the Optical Society of America*, vol. 64, pp. 1715-1719, Dec. 1974.
- [24] L. Medina. "Estudio de la resonancia estocástica en el sistema táctil humano". Tesis MSc., Universidad de Chile, Chile, 2006.
- [25] C. A. Perez, T. E. Cohn, L. E. Medina, J. R. Donoso. "Coincidence-enhanced stochastic resonance: Experimental evidence challenges the psychophysical theory behind stochastic resonance". *Neuroscience Letters*, Vol. 424, pp. 31-35, Agosto, 2007.
- [26] G.A. Geisheider, S.J. Bolanowski, R.T. Verrillo. "Some characteristics of tactile channels". *Behavioural Brain Research*, vol. 148 (2004), pp. 35-40, May, 2003.
- [27] R. T. Verrillo. "A duplex mechanism of mechanoreception in The skin senses". DR. Kensalo, Springfield, IL: Thomas, pp.135-159, 1968.
- [28] C. Wells, L. M. Ward, R. Chua, T. Inglis. "Regional variation and changes with ageing in vibrotactile sensitivity in the human footsole". *The Journals of Gerontology Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, vol. 58, pp. 680-686, Sept. 2003.
- [29] B. G. Green. "The effect of skin temperature on vibrotactile sensitivity". *Perception & Psychophysics*, vol. 21(3), pp. 243-248, 1977.
- [30] M, Wong, E. Hackeman, C. Hurd, D. Goldreich. "Short-Term Visual Deprivation Does Not Enhance Passive Tactile Spatial Acuity". *Plos One*, vol. 6, Sept. 2011.
- [31] D. J. Whitehouse, M. J. Griffin. "A comparison of vibrotactile thresholds obtained using different diagnostic equipment: the effect of contact conditions". *Int. Arch. Occupational environmental Health*, vol. 75, pp. 85-89, 2002.
- [32] J. Z. Wu, K. Krajnak, D. E. Welcome, R. G. Dong. "Analysis of the biodynamic interaction between the fingertip and probe in the vibrotactile tests: The influences of the probe/fingertip contact orientation and static indentation". *Journal of Biomechanics*, vol. 42, pp. 116-124, Jan. 2009.
- [33] J. Leveque, J. Dresler, E. Ribot-Ciscar. "Changes in tactile spatial discrimination and cutaneous coding properties by skin hydration in the elderly". *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 115, pp. 454-458, 2000.
- [34] R. D. Frisna, G. A. Gescheider. "Comparision of child and adult vibrotactile thresholds as a function of frequency and duration". *Perception & Psychophysics*, vol. 22(1), pp. 100-103, 1977.
- [35] R. M. Peters, E. Hackeman, D. Goldreich. "Diminutive digits discern delicate details: fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity". *The journal of neuroscience*, vol. 29(50), pp. 15756-15761, 2009.
- [36] S. A. Seah, M. J. Griffin. "Normal values for thermotactile thresholds in males and females". *International Arch. Occup. Enviromental Health*, vol. 81, pp. 535-543, 2008.
- [37] J. W. Morley, M. J. Rowe. "Perceived pitch of vibrotactile stimuli: Effects of vibration amplitude, and implications for vibration frequency coding". *Journal of physiology*, vol. 431, pp. 403-416, 1990.

- [38] T. G. McPoil, M. W. Cornwall. "Plantar tactile sensory thresholds in healthy men and women". *The Foot Journal*, vol. 16, pp. 192-197, 2006.
- [39] F. W. Cody, R. A. Garside, D. Lloyd, E. Poliakoff. "Tactile spatial acuity varies with site and axis in the human upper limb". *Neuroscience letters*, vol. 433, pp. 103-108, March 2008.
- [40] R. Daud, S. Maeda, N. Kameel, M. Y. Ripin, N. Bakrun, R. Zein, M. Kido, K. Higuchi. "A pilot study of reference vibrotactile perception thresholds on the fingertip obtained with Malaysian healthy people using ISO 13091-1 equipment", *Industrial Health*, vol. 42, pp. 189-195, 2004.
- [41] M. Pino. *Perception of Moving Tactile Stimuli*. Berlin: Max Planck Gesellschaft, 2005.
- [42] S.J. Bolanowski, Jr., G.A. Gescheider, R.T. Verrillo, C.M. Checkosky. "Four channels mediate the mechanical aspects of touch". *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 84(5), 1988.
- [43] A.B. Vallbo, R.S. Johansson. "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation". *Human Neurobiology*, vol. 3, pp. 3-14, 1984.
- [44] R.T. Verrillo, S.J. Bolanowski. "Tactile response to Vibration". *Handbook of signal processing in acoustics*, pp. 1185-1213, 2009.
- [45] H.Chen, P.K.Vershey, "Theory of the stochastic resonance effect in signal detection". *IEEE Transactions on signal processing*, Vol.55, pp.3172-3184, No 7, July 2007.
- [46] S. Kudoh, M. Ding, "Improvement of plantar tactile sensitivity by Stochastic Resonance for Prevention of Falling", *IEEE 4th International Congress on Image and Signal Processing*, pp. 182-185, 2011.
- [47] Y. Sueda, M. Hatton, "Improvement of tactile sensitivity by stochastic resonance effect, Applications to surgical grasping forceps", *35th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 4601-4604, 2013.
- [48] J. Collins, A. Priplata, "Noise-Enhanced Human Sensorimotor Function", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, pp. 76-83, 2003.
- [49] D. Repperger, Ch. Phillips, "Human-Machine Haptic Interface Design Using Stochastic Resonance Methods", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 574-582, 2005.
- [50] J. Wu, "Research on Improving Haptic Texture Display Using Stochastic Noise", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2125-2129, 2009.
- [51] M. Kawaguchi, H. Mino, "Stochastic Resonance Can Enhance Information Transmission of Supra-threshold Neural Signals", *31st Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 6806-6809, 2009.
- [52] Ch. Wen, "Stochastic resonance effects of visual perception", *International Computer Symposium*, pp. 809-812, 2010.
- [53] K. Beceren, M. Ohka, "Stochastic Resonance Occurring in Tactile Sensation of Human Finger", *35th Annual International Conference of IEEE EMBS*, pp. 5236-5239, 2013.
- [54] J. Liu, Zh. Lou, "Study of Noise Enhancing Sense Based on Psychophysical Method", *IEEE Third International Conference on Natural Computation*, pp. 473-480, 2007.
- [55] J. Liu, T. Gao, "Study on Noise to Enhance the Fine-motor of Human Hands", *IEEE EMBS 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, pp. 2110-2113, 2010.
- [56] L. Ai, J. Liu, "Using Auditory Noise to Enhance the Fine-motor of Human's Hand due to Cross-modal Stochastic Resonance", *IEEE 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, pp. 1-4, 2009.

- [57] Y. Kurita, M. Shinohara, “Wearable Sensorimotor Enhancer for Fingertip Based on Stochastic Resonance Effect”, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 43, No. 3, pp. 333-337, 2013.
- [58] J. Tougaard, “Signal detection theory, detectability and stochastic resonance effects”, *Biological Cybernetics*, Vol. 87, pp. 79-90, 2002.
- [59] P. Hur, Y.H. Wan, N.J. Seo, “Investigating the role of vibrotactile noise in early response to perturbation”. *IEEE Trans Biomed Eng.* Jun;61(6):1628-33, 2014. doi: 10.1109/TBME.2013.2294672.
- [60] Y. Xu, L. Collins, “Predictions of Psychophysical Measurements for Sinusoidal Amplitude Modulated (SAM) Pulse-Train Stimuli From a Stochastic Model”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 54, No. 8, pp. 1389-1398, 2007.
- [61] L. Arredondo, C. Pérez, “Spatially coincident vibrotactile noise improves subthreshold stimulus detection”, *PLoS One* 12, e0186932, 2017. doi: 10.1371/journal.pone.0186932.
- [62] R.K. Ray, M. Manivannan, “Spatial Summation of Electro-Tactile Displays at Subthreshold”, T. Ahram, R. Tair, F. Groff, (eds) *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications IV. IHET-AI 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1378. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74009-2_59.
- [63] O. White, J. Babic, Carlos Trenado, Leif Johannsen, Nandu Goswami, “The Promise of Stochastic Resonance in Falls Prevention”, *Journal of Frontiers in Physiology*, Volume 9, 2019.
- [64] K. Patrick, T. Konstantin, S. Achim, S. Holger, “Cross-Modal Stochastic Resonance as a Universal Principle to Enhance Sensory Processing”, *Frontiers in Neuroscience*, volume 12, 2018.
- [65] S. Nobusako, M. Osumi, A. Matsuo, T. Fukuchi, A. Nakai, T. Zama, S. Shimada, S. Morioka, “Stochastic resonance improves visuomotor temporal integration in healthy young adults”. *PLoS One* 13, e0209382, 2018. doi: 10.1371/journal.pone.0209382.
- [66] S. Ikemura, T. Endo, F. Matsuno, "Multiple Remote Vibrotactile Noises Improve Tactile Sensitivity of the Fingertip via Stochastic Resonance", *IEEE Access*, vol.9, pp.17011-17019, 2021.
- [67] K. Chamnongthai, T. Endo, F. Matsuno, K. Fujimoto and M. Kosaka, "Two-Dimensional Fingertip Force Training with Improved Haptic Sensation via Stochastic Resonance," in *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 50, no. 6, pp. 593-603, 2020. doi: 10.1109/THMS.2020.3022859.
- [68] K. Chamnongthai, T. Endo, S. Nisar, F. Matsuno, K. Fujimoto and M. Kosaka, "Fingertip Force Learning with Enhanced Haptic Sensation using Stochastic Resonance," *IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2019, pp. 539-544, 2019. doi: 10.1109/WHC.2019.8816114.
- [69] L. Weiting, G. Zhang, B. Zhan, L. Hu, T. Liu. "Fine Texture Detection Based on a Solid-Liquid Composite Flexible Tactile Sensor Array" *Micromachines* 13, no. 3: 440. <https://doi.org/10.3390/mi13030440>, 2022.
- [70] E. Sugimoto, H. Sasaki, “Using visual noise to improve tactile two-point threshold”, *British journal of medical & Health sciences*, vol.2 issue 12, 2020.
- [71] N. Komeno and T. Matsubara, "Tactile Perception Based on Injected Vibration in Soft Sensor", *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 5365-5372, 2021. doi: 10.1109/LRA.2021.3075664.
- [72] M. Chancel, H Henrik Ehrsson, W. Ji “Uncertainty-based inference of a common cause for body ownership” *eLife* 11:e77221, 2022. <https://doi.org/10.7554/eLife.77221>.

- [73] Rossi Sebastiano, A., Bruno, V., Ronga, I. “Diametrical modulation of tactile and visual perceptual thresholds during the rubber hand illusion: a predictive coding account”, *Psychological Research* 86, 1830–1846, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01608-0>.
- [74] Zou, Liang, Chang Ge, Z. Jane Wang, Edmond Cretu, and Xiaoou Li. "Novel Tactile Sensor Technology and Smart Tactile Sensing Systems: A Review", *Sensors* 17, no. 11: 2653, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17112653>.
- [75] M. Kaboli¹, K. Yao¹, D. Feng, G. Cheng “Tactile-based active object discrimination and target object search in an unknown workspace”, *Auton Robot* 43, 123–152, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10514-018-9707-8>.