

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO DE LA RESONANCIA ESTOCÁSTICA EN EL SISTEMA TÁCTIL HUMANO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCION INGENIERÍA BIOMÉDICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**LEONEL EUGENIO MEDINA DAZA**

**PROFESOR GUÍA:  
CLAUDIO PÉREZ FLORES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
NICOLÁS BELTRÁN MATURANA  
PABLO ESTÉVEZ VALENCIA  
ADRIÁN PALACIOS VARGAS**

**SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE 2006**

RESUMEN DEL INFORME FINAL PARA OPTAR  
AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA BIOMÉDICA  
Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: LEONEL EUGENIO MEDINA DAZA  
FECHA: 19/12/2006  
PROF. GUÍA: DR. CLAUDIO PÉREZ F.

## **ESTUDIO DE LA RESONANCIA ESTOCÁSTICA EN EL SISTEMA TÁCTIL HUMANO**

El sentido del tacto ha sido usado en una diversidad de aplicaciones tales como la telecirugía, la robótica y la realidad virtual, entre otras. En la última década han surgido aplicaciones en que la adición de vibraciones mecánicas aleatorias (ruido táctil) permite mejorar la percepción de pequeños estímulos táctiles. Este fenómeno, denominado resonancia estocástica (RE), consiste en que la detección de un estímulo débil o sub-umbral puede ser mejorada por la adición de un nivel óptimo de ruido.

La interpretación usual de la RE en psicofísica es que el ruido óptimo ayuda al estímulo, en fase con él, a superar la barrera umbral del sistema sensorial. El objetivo de esta tesis es demostrar que esta interpretación de la RE no explica resultados experimentales claves. Por otra parte, se contrasta la RE con la teoría de detección de señales y la teoría de la incerteza (TI).

Se diseñó un protocolo experimental para seis individuos (4 hombres y 2 mujeres) a quienes se les presentó, en su dedo índice, estímulos táctiles de tipo pulso rectangular de 300 ms en un intervalo de atención de 1,5 s. En un primer experimento se estimó el umbral de percepción. En un segundo experimento, usando un estímulo sub-umbral, se determinó las detecciones resultantes de sumar cinco niveles distintos de ruido a todo el intervalo de atención. Se identificó el nivel de ruido óptimo que mejora la percepción del estímulo. En un tercer experimento, y usando el mismo estímulo sub-umbral, se midieron las detecciones obtenidas al añadir el nivel de ruido óptimo de dos formas distintas: en todo el intervalo de atención (condición 1) y sólo durante el pulso rectangular (condición 2).

Si el ruido ayudara al estímulo a superar el umbral como lo plantea la RE, entonces las condiciones 1 y 2 del tercer experimento deberían ser equivalentes puesto que en ambos casos el ruido generaría cruces de umbral en fase con el estímulo. En cambio, de acuerdo a la TI, si el ruido está limitado a la duración del pulso como en la condición 2, la detección mejoraría respecto de la condición 1 porque el ruido ayuda al observador a reforzar su memoria respecto del tiempo de inicio y término del estímulo.

Los resultados experimentales muestran que en el segundo experimento todos los individuos mejoraron su detección para un nivel no nulo y pequeño de ruido, llamado ruido óptimo. Esta mejora es estadísticamente significativa con respecto a la situación en que el individuo responde al azar, de acuerdo a un test binomial. En el tercer experimento los seis individuos tuvieron mejor desempeño en las pruebas correspondientes a la condición 2, obteniéndose un promedio de porcentajes de aciertos del 81,75 %, mucho mayor que el 71,08 % promedio obtenido para la condición 1. Se prueba además que esta diferencia es significativa al hacer un test binomial.

La diferencia experimental encontrada entre las condiciones 1 y 2 del tercer experimento demuestra que existe inconsistencia al considerar efectos de la RE en el sistema táctil humano. Estos hallazgos son significativos ya que exigen una interpretación alternativa a la RE tradicional. Se prueba, además, que el ruido puede ser usado como un pedestal que mejora aún más la percepción táctil si coincide en tiempo de inicio y duración con el estímulo.

# Agradecimientos

La culminación de esta tesis no representa sólo el término de duros meses de trabajo de investigación, sino que es la punta de un *iceberg* que comenzó a formarse hace más de veinte años atrás cuando empecé mi educación escolar. Y durante todos estos años, ha sido gracias a la abnegada y permanente entrega de mis padres que he podido recibir tan valiosa educación. Por esto quiero expresarles mis más profundos y eternos agradecimientos a mis papitos, Malú y Eugenio, por todo el apoyo, guía, protección, enseñanza, empuje, comprensión y amor que han sabido darme de manera incondicional. Mi educación, que hoy se ve coronada con la finalización de este trabajo, se la debo por completo a ellos. Muchas gracias, papitos.

También quisiera agradecer el constante apoyo de mi núcleo familiar en general. En él encontré la paz y alegría que me permitió sacar adelante con éxito mi carrera. Gracias Bárbara, Valeria, Nadia y Angelita.

Quiero agradecer a mi profesor guía, don Claudio Pérez, por permitirme trabajar con él en esta investigación, y así depositar su confianza en mí. Le agradezco enormemente su permanente apoyo, sus correcciones y oportunos comentarios, sugerencias, críticas e ideas. Le agradezco su excelente disposición para ayudarme y aconsejarme cada vez que se lo pedí. Los agradecimientos los hago extensivos a los profesores, don Pablo Estévez, don Nicolás Beltrán y don Adrián Palacios por sus valiosas correcciones que me dieron un punto de vista novedoso y productivo en varias secciones del trabajo.

Muchas gracias también para los voluntarios que participaron en los experimentos. Su paciencia, concentración y ganas permitió que se recolectara información valiosísima. Gracias a la gente del laboratorio de biomédica, Javier (vale por el video) y Leo Causa, Chubo, Bena y Guillaume, por crear un ambiente de trabajo propicio y alegre. Gracias a mis compañeros de Eléctrica por su apoyo durante la carrera, a los amigos de generación por las jornadas de estudio en grupo en los difíciles primeros años, a la Sra. Eliana Monardes por su ayuda en esos grandes pequeños detalles, a Vanel y Rodrigo por los ánimos finales.

Un agradecimiento muy especial a Jote Donoso por sus comentarios, críticas y aportes. Sin duda muchas de las ideas aquí plasmadas se fueron puliendo gracias a las fructíferas discusiones que tuvimos en el laboratorio de estimulación táctil.

Por último, quiero expresarle mis más sinceros y profundos agradecimientos a mi novia, Marcela, por todo el apoyo, comprensión y amor permanentes que me entregó mientras trabajé en esta tesis. Ella siempre estuvo cuando la necesité, me dio ánimo permanentemente, me felicitó por mis logros y siempre fue capaz de ver lo positivo. Además, fue una ayuda directa en este trabajo en numerosos detalles, participó en las pruebas, me ayudó con las fotos y videos, e incluso hizo comentarios que me fueron muy provechosos para el trabajo. ¡Gracias, mi amor, por todo!

El trabajo de investigación realizado para esta tesis fue financiado gracias al proyecto Fondecyt 1040693.

Este trabajo fue financiado en parte gracias la beca de financiamiento parcial de tesis de post-grado, PG/37/2005, entregada por la Vicerrectoría de Asuntos Académicos de la Universidad de Chile.

*A mis padres*

# Índice General

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	El paradigma de la resonancia estocástica . . . . .	3
1.2	Teoría de detección de señales y el cuestionamiento del umbral . . . . .	4
1.3	Teoría de la incerteza . . . . .	9
1.4	Objetivo general . . . . .	13
1.5	Objetivos específicos . . . . .	13
1.6	Organización del documento . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Receptores Táctiles</b>	<b>17</b>
2.1	Aspectos generales del sistema somatosensitivo . . . . .	17
2.2	Receptores mecanosensitivos . . . . .	18
2.2.1	Corpúsculo de Pacini . . . . .	18
2.2.2	Corpúsculo de Meissner . . . . .	20
2.2.3	Disco de Merkel . . . . .	21
2.2.4	Corpúsculo de Ruffini . . . . .	22
2.3	Umbrales Sensitivos . . . . .	23
2.4	Respuesta en frecuencia . . . . .	24
2.5	Vías ascendentes y corteza somatosensitiva . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>27</b>
3.1	Protocolo experimental . . . . .	27
3.1.1	Experimento 1: Estimación del umbral . . . . .	27
3.1.2	Experimento 2: Variación de la detección con la adición de ruido . . . . .	31
3.1.3	Experimento 3: Comparación de la situación con ruido en todo el intervalo v/s ruido sólo en estímulo . . . . .	34

3.1.4	Voluntarios . . . . .	36
3.2	Montaje experimental . . . . .	38
3.2.1	Computador como generador de señales . . . . .	38
3.2.2	Circuito interfaz computador-piezoeléctrico . . . . .	40
3.2.3	Estimulador táctil: dispositivo piezoeléctrico . . . . .	43
3.3	Programa computacional para la generación de señales . . . . .	45
3.3.1	Generación de muestras . . . . .	47
3.3.2	Envío de muestras al puerto paralelo . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
4.1	Experimento 1: Umbrales . . . . .	51
4.2	Experimento 2: Determinación del ruido óptimo . . . . .	51
4.3	Experimento 3: Ruido como puntero de la ubicación temporal del estímulo . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Discusión</b>	<b>57</b>
5.1	Prueba estadística de los aciertos con ruido óptimo . . . . .	57
5.2	Comparación experimentos 2 y 3 . . . . .	59
5.3	Análisis de los resultados del experimento 3 . . . . .	59
5.4	Sobre la estimación del umbral . . . . .	62
5.5	Resonancia estocástica en términos de teoría de detección de señales . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>67</b>
6.1	Implicancias neurofisiológicas . . . . .	68
6.2	Proyecciones futuras . . . . .	69
	<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>

# Índice de Figuras

1.1	Señal sinusoidal más dos niveles distintos de ruido . . . . .	4
1.2	Gráfico de resonancia estocástica en un experimento psicofísico táctil . . . . .	5
1.3	Distribución del umbral y curva sigmoideal . . . . .	6
1.4	Distribuciones N y S+N de la teoría de detección de señales . . . . .	6
1.5	Modelo de un observador ideal . . . . .	11
1.6	Modelo de observador con memoria . . . . .	12
1.7	Ejemplos de experimentos con distintos requerimientos de memoria . . . . .	14
1.8	Ruido como pedestal . . . . .	14
2.1	Ilustración esquemática de un corpúsculo de Pacini . . . . .	20
2.2	Ilustración esquemática de un disco de Merkel . . . . .	22
2.3	Modelo de los cuatro canales de mecanorreceptores . . . . .	24
3.1	Ejemplo de estimación de umbral por el método adaptable de subida–bajada simple	30
3.2	Estímulo: pulso rectangular de 300 ms filtrado pasa-bajos . . . . .	31
3.3	Tipos de estimulación usados en experimento 2 . . . . .	33
3.4	Ejemplos de archivo de resultados del experimento 2 . . . . .	34
3.5	Tipos de estimulación utilizados en experimento 3 . . . . .	35
3.6	Disposición física del voluntario para las pruebas . . . . .	37
3.7	Esquema de los pines del puerto paralelo del PC . . . . .	39
3.8	Diagrama de bloques del circuito interfaz PC-piezoeléctrico . . . . .	40
3.9	Respuesta en frecuencia del filtro pasa bajos . . . . .	42
3.10	Esquema del circuito del filtro pasa bajos . . . . .	42
3.11	Esquema del circuito interfaz PC-piezoeléctrico . . . . .	44
3.12	Dimensiones y disposición del piezoeléctrico . . . . .	45
3.13	Montaje completo del aparato estimulador táctil . . . . .	46



3.14	Histograma de números generados como ruido gaussiano . . . . .	49
4.1	Proporción de aciertos v/s nivel de ruido para los 6 individuos . . . . .	52
4.2	Gráfico agregado de las detecciones correctas v/s el nivel de ruido . . . . .	53
4.3	Detectabilidad $d'$ v/s nivel de ruido para los 6 individuos . . . . .	54
5.1	Test ANOVA para $d'$ de experimento 3 . . . . .	61
5.2	Ejemplos de condiciones C1 y C2 que según RE son igualmente detectados . . . .	61
5.3	Modelo de RE en términos de la TDS . . . . .	66
6.1	Nuevo experimento teoría de la incerteza . . . . .	70

# Índice de Tablas

1.1	Combinaciones respuesta/presentación en una tarea “Sí/No” . . . . .	8
1.2	Memoria requerida para distintos experimentos psicofísicos . . . . .	13
2.1	Principales tipos de mecanorreceptores . . . . .	19
3.1	Parámetros del algoritmo de estimación del umbral . . . . .	30
3.2	Niveles de ruido usados en experimento 2 . . . . .	32
3.3	Listado de pines del puerto paralelo . . . . .	40
3.4	Fuerza generada v/s voltaje aplicado al piezoeléctrico . . . . .	46
4.1	Umbral táctiles de los 6 individuos . . . . .	51
4.2	Niveles óptimos de ruido y los respectivos porcentajes de acierto . . . . .	53
4.3	Resultados del experimento 3 . . . . .	55
4.4	Verdaderos positivos, falsos positivos y total de aciertos en experimento 3 . . . . .	55
4.5	Resultados del experimento 3 en términos de $d'$ . . . . .	56
5.1	Prueba estadística de los aciertos con ruido óptimo . . . . .	58
5.2	Tasas de VP y FP en experimento 2 . . . . .	59
5.3	Test estadístico de la diferencia entre C2 y C1 en el experimento 3 . . . . .	60
5.4	Proporciones de aciertos obtenidas en el experimento 2 en el caso de ruido cero . . . . .	63

# Capítulo 1

## Introducción

Hace casi cuatro décadas atrás se mostró que el sentido del tacto podía ser usado para la transferencia de información en individuos con discapacidad visual [1]. Desde entonces, ha sido utilizado en una diversidad de aplicaciones tales como la telecirugía o cirugía de acceso mínimo, la realidad virtual, la robótica, juegos computacionales, la rehabilitación de ciegos y sordos, entre otras [17] [19] [25] [45] [49] [58] [63] [64].

La cirugía de acceso mínimo, conocida también como telecirugía o cirugía endoscópica, es una técnica de operación desarrollada para disminuir el efecto traumático de la cirugía abierta con las consiguientes ventajas de menor dolor post-operatorio, menor tiempo de recuperación, reducción de la estadía en el hospital, ente otras [19]. Sin embargo, en esta técnica el cirujano pierde la capacidad de palpar, usada rutinariamente en la cirugía abierta para explorar los tejidos y órganos y así percibir dureza, densidad y rugosidad que le permiten distinguir estructuras anatómicas y patologías. La restitución de esta capacidad táctil para los cirujanos que operan con esta técnica significaría inmensos beneficios para el bienestar y seguridad del paciente [19]. De ahí que el desarrollo de interfaces táctiles que transmitan la información desde sensores táctiles montados en el instrumental quirúrgico hacia el cirujano sean necesarios e indispensables para mejorar la cirugía de acceso mínimo [45].

Por otra parte, el sentido del tacto también está siendo usado en la realidad virtual. Esta última se entiende como un modo ontológico de existencia que lleva a una expansión de nuestro mundo ordinario [62]. En los ambientes virtuales, además de las imágenes y audio virtuales es importante la incorporación de estimulación mecánica, en especial la manipulación de objetos con las manos. El objetivo de esta estimulación física es la recreación de diversas formas y figuras por el contacto de superficies de fuerzas que se aplican sobre la piel (típicamente de la mano) del sujeto [12] [17]

[25] [63]. Incluso se han desarrollado ambientes virtuales para el entrenamiento de robots que permitan hacer más eficiente la manipulación de objetos con sus extremidades [64].

En la última década han surgido aplicaciones en las que la adición de un pequeño nivel de ruido táctil, lejos de entorpecer la respuesta de un individuo ante estímulos táctiles, la mejoran. Así por ejemplo, al aplicar un estímulo táctil en la planta del pie de individuos de la tercera edad con deficiencias sensoriales, se ha visto que éstos detectan mejor el estímulo si viene acompañado de un pequeño nivel de ruido [11], mientras que si el ruido es muy grande la detección se entorpece. Esto ha abierto la puerta para que hoy se estén buscando diseños de calzados que incorporando ruido táctil aplicado en la planta del pie permitan mejorar la capacidad de equilibrio de estas personas [11]. Esta capacidad está íntimamente ligada a la percepción táctil en la planta del pie, entre otras variables. Por otra parte, el uso de interfaces hápticas<sup>1</sup> compuestas por un *joystick* y una silla móvil, y en las que se ha agregado un determinado nivel de ruido háptico, ha permitido mejorar el desempeño de “búsqueda de objetivo” en simulaciones de vuelo [44]. En estas simulaciones, los individuos deben hacer uso del *joystick* para, en el menor tiempo posible, seguir un objetivo en una pantalla virtual. Se ha encontrado que este tiempo es menor cuando tanto la silla como el *joystick* están contaminados con pequeñas vibraciones aleatorias, que de ser muy grandes enlentecen el seguimiento del objetivo [44].

Las aplicaciones recién descritas han mostrado que el ruido podría jugar un papel importante en el diseño de interfaces táctiles hombre-máquina que sean más eficientes y utilitarias en el manejo de la información. Por esto, se hace crucial una correcta interpretación de los mecanismos subyacentes a este fenómeno, a la vez que se requiere del planteamiento de modelos matemáticos que den soporte a la evidencia experimental. Con esto se podrían explotar otras modalidades del uso del ruido, como ser sus características temporales y/o espaciales.

Los beneficios que el ruido introduce en la percepción táctil han sido atribuidos a un fenómeno denominado **resonancia estocástica** (ver sección 1.1). Sin embargo, el modelo usualmente planteado para describir este fenómeno resulta incompatible con otras teorías modernas usadas en psicofísica<sup>2</sup> (teoría de detección de señales y teoría de la incerteza) como se explica en las secciones siguientes.

---

<sup>1</sup>Anglicismo para denotar el uso de sistemas mecánicos para aplicar fuerzas en un humano.

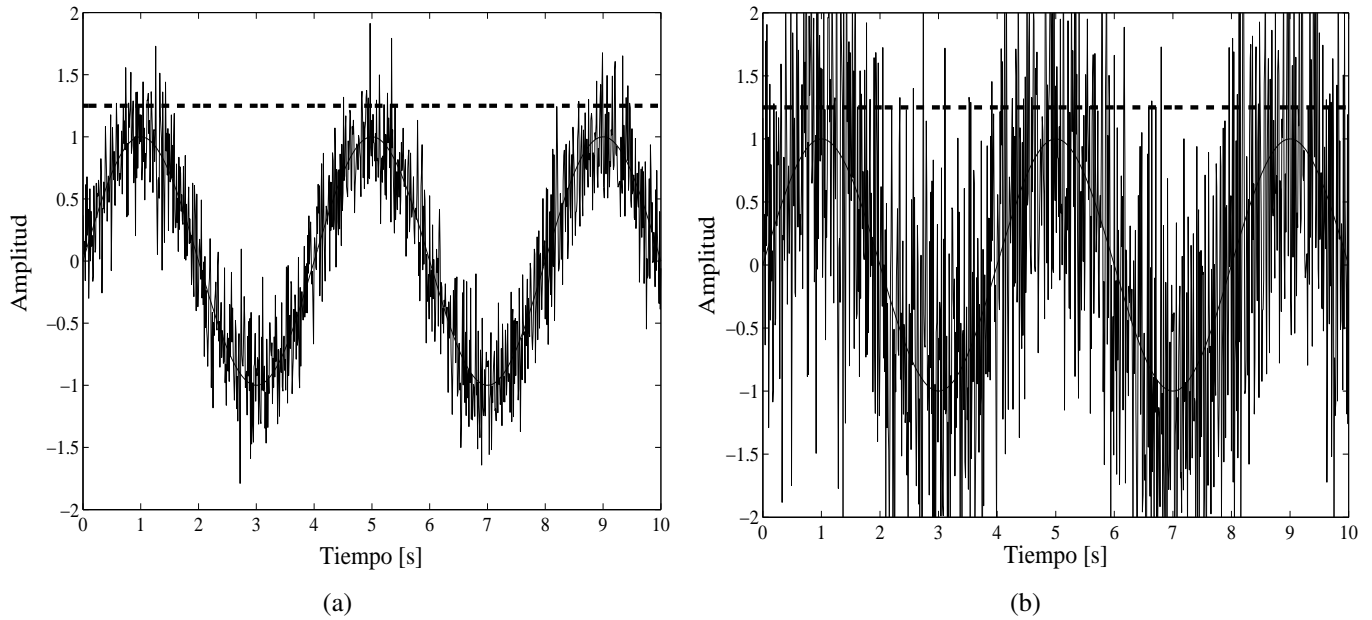
<sup>2</sup>La psicofísica es la disciplina que estudia las relaciones entre la magnitud de los estímulos físicos y la intensidad de las sensaciones que producen.

## 1.1 El paradigma de la resonancia estocástica

Hace más de 20 años atrás, Benzi *et al.* [2] mostraron que un sistema dinámico sometido a una fuerza periódica y a una perturbación aleatoria puede mostrar un máximo en el espectro de potencia que no ocurre si la fuerza o la perturbación está ausente [2]. Este fenómeno fue denominado resonancia estocástica (RE) debido a la potenciación de la respuesta que se puede lograr con cierto nivel de ruido.

Desde la publicación de este descubrimiento, diversas aplicaciones en distintas áreas de las ciencias naturales han sido presentadas [13] [23] [46] [48], así como profundizaciones teóricas en base a modelos matemáticos [8] [26] [30]. En particular, gran número de estudios han mostrado aplicaciones de RE en los sistemas sensoriales, tanto de humanos como animales [9] [46]. Un completo tutorial y revisión de aplicaciones se encuentra en [38]. Dentro de los estudios en sistemas sensoriales humanos, una serie de experimentos psicofísicos han mostrado que cierto nivel de ruido táctil es capaz de mejorar la detección de un estímulo táctil pequeño que está por debajo del umbral de percepción del observador [9] [61]. En la teoría clásica el umbral es el límite bajo el cual el observador no puede discriminar estímulos; para mayor detalle ver sección 1.2. Estos resultados han sido usualmente explicados por una versión “no dinámica” o de “umbral” de RE [38] [59] [61]. En el paradigma de esta versión, el ruido ayuda al estímulo a superar el umbral. A su vez, el ruido debe ser lo suficientemente pequeño para superar el umbral sólo en fase con el estímulo; si el ruido es grande, los cruces de umbral serán aleatorios y no reflejarán la fase del estímulo que será mayormente cubierto por el ruido. En la Fig. 1.1 se muestran dos situaciones con diferentes niveles de ruido gaussiano añadido a una señal del tipo sinusoidal que por si sola no es capaz de superar el umbral, i.e. no es capaz de generar una respuesta no nula por parte del sistema. Cuando el ruido es pequeño (Fig. 1.1(a)), la señal agregada (sinusoide ruidosa) supera el umbral sólo en los picos de la onda y genera respuestas que tendrán cierta sincronía temporal con la sinusoide. Por otra parte, si el ruido es muy grande (Fig. 1.1(b)), los cruces de umbral se tornan aleatorios y la respuesta del sistema se hace asíncrona respecto de la sinusoide. De este modo, si se caracterizara el desempeño del sistema con alguna medida de la coherencia entre la salida y la entrada del mismo, se vería que esta medida es una función no-monótona del nivel de ruido agregado a la entrada [8].

En el contexto de la psicofísica, donde el sistema en estudio es un sistema sensorial, como por ejemplo el táctil, los tres elementos esenciales de la versión de umbral de la RE son entonces: el umbral, el estímulo sub-umbral y el ruido. El desempeño del sistema se mide aquí como la

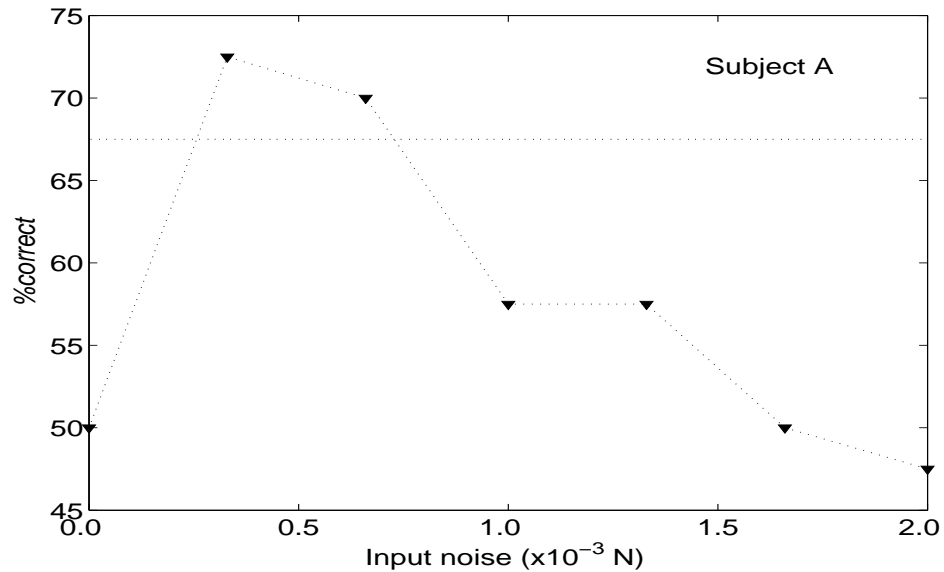


**Figura 1.1:** Dos casos de señal sinusoidal de frecuencia 0.25 Hz y amplitud 1 cada uno con ruido de distinta varianza. La línea punteada indica el umbral de amplitud 1.25. Las magnitudes de la señal, el ruido y el umbral son arbitrarias. a) Ruido de varianza 0.1. b) Ruido de varianza 1.

capacidad de detectar el estímulo. La curva de resonancia estocástica en este caso se vería como la que se muestra en la Fig. 1.2, extraída de Collins *et al.* [9]. En ella se muestra el porcentaje de detecciones correctas (ver sección 1.2 para mayores detalles) que obtiene un individuo en un número dado de presentaciones de un estímulo sub-umbral en función del nivel de ruido adicionado a este estímulo, comenzando de un nivel cero de ruido. En esta curva, se obtiene un máximo de detecciones correctas para un nivel no nulo de ruido, lográndose una relación no-monótona que es propia de la RE [9].

## 1.2 Teoría de detección de señales y el cuestionamiento del umbral

En psicofísica clásica se plantea la existencia de un umbral o *limen* de percepción entendido como un límite en el cual el individuo cruza de no detección a detección [14] [35]. En tal circunstancia, en una tarea de detección de estímulos, la curva que relaciona intensidad de estímulo con la proporción (o el porcentaje) de detección es del tipo escalón unitario. Sin embargo, los hallazgos experimentales han mostrado que esta función, denominada curva psicométrica, tiene forma sigmoideal similar a la que se muestra en la Fig. 1.3(b). Esto podría ser interpretado como que el umbral es variable en el tiempo, distribuyéndose por ejemplo de manera gaussiana para distintas intensidades de estímulo.

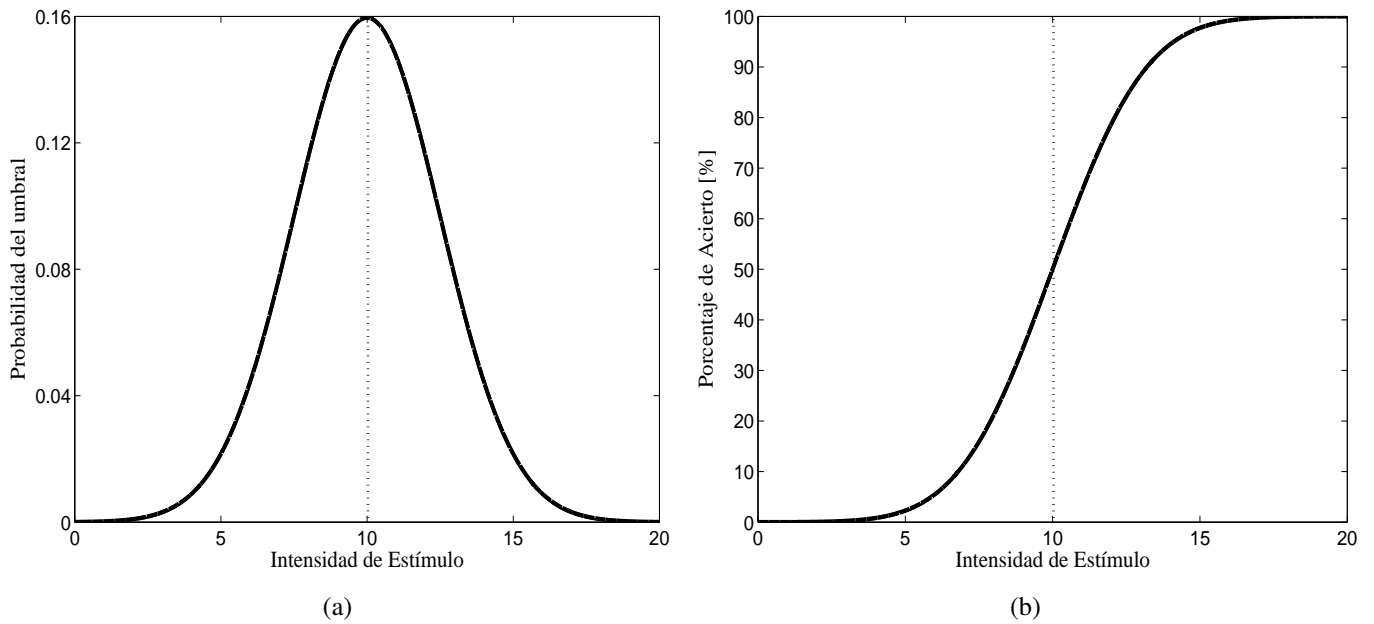


**Figura 1.2:** Curva típica de resonancia estocástica en una tarea psicofísica táctil que muestra el porcentaje de detecciones correctas, rotulado en este ejemplo como *%correct*, v/s la desviación estándar del ruido (*Input noise*) sumado al estímulo, en unidades de fuerza. Figura extraída de Collins *et al.* [9].

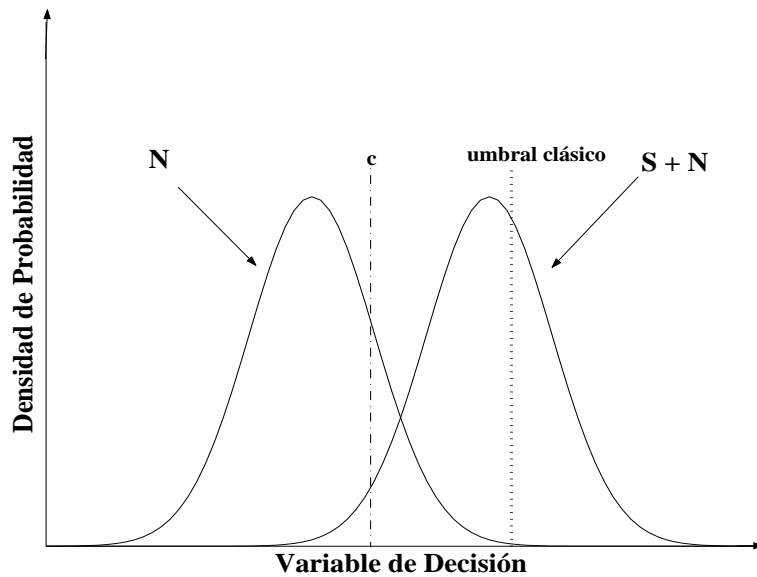
lo (ver Fig. 1.3(a)), o bien que el estímulo está contaminado con algún tipo de variación aleatoria. Como quiera que sea, si el estímulo cae debajo del *limen* en un momento dado evocará un “No”, de lo contrario un “Sí”. Ahora bien, si el umbral sigue cierta distribución, entonces la integral de esta curva representaría la probabilidad de que una intensidad dada esté por sobre el umbral en cierto momento. Esto resulta ser consistente con la evidencia experimental puesto que la función acumulativa de una distribución, por ejemplo normal, es una sigmoide que se puede ajustar a la curva psicométrica. En estas condiciones, la convención usual es considerar como umbral aquella intensidad que evoca un “Sí” en la mitad de las pruebas.

En la década de 1950, Tanner y Swets [55] plantearon la denominada teoría de detección de señales (TDS) aplicada al estudio del sistema visual, adaptando así los conceptos –en ese entonces recientes– ingenieriles de la teoría de detectabilidad de señal [42] a la psicofísica. Esta teoría cuestionó fuertemente la existencia del umbral y consideró por primera vez las variaciones en el criterio que el observador podría estar introduciendo para tomar sus decisiones. Numerosas evidencias experimentales en visión [24] [51] [53] [55], audición [24] [51] y tacto [22] [40] [52] han dado sustento a esta teoría, que es ahora considerada como una poderosa herramienta de análisis en la psicofísica actual.

En la TDS se asume que el observador toma una decisión estadística respecto de la presencia o ausencia de un estímulo dado en cierto intervalo de observación de acuerdo a una variable de



**Figura 1.3:** (a) Posible distribución de la probabilidad del umbral a cada intensidad. (b) Función acumulada de la distribución en (a). Las intensidades se muestran en una escala arbitraria. En ambos casos se indica con una línea punteada una posible elección de umbral.



**Figura 1.4:** Distribuciones de probabilidad de las situaciones de sólo ruido (N) y señal más ruido (S+N) supuestas en la TDS. La línea punteada rotulada "c" representa un posible criterio del observador, y "umbral clásico", el corte abrupto que especifica la teoría clásica.



decisión que podría ser el nivel de activación de la corteza sensitiva y que puede ser considerada continua y unidimensional [24]. Se postula que esta variable se distribuye probabilísticamente de cierta manera ante la ausencia de estímulo principalmente debido a la presencia de ruido (en la Fig. 1.4 distribución “N”), que puede ser interno (descargas espontáneas de las neuronas del sistema sensorial) o externo (perturbaciones introducidas de manera artificial y/o natural al estímulo). Por otra parte, ante la presencia de un estímulo la variable de decisión sigue una distribución de probabilidades cuya media será mayor que la de “N” y que dependerá de la intensidad del estímulo (en la Fig. 1.4 distribución “S+N”). Dadas estas distribuciones que usualmente son asumidas normales y que podrían tener varianzas distintas, el observador fija un criterio o punto de corte para su variable de decisión de modo que todo evento sensorial que él califique como mayor a este corte lo identificará como producto de un estímulo, mientras que los eventos sensoriales menores a este criterio le significarán presentaciones sin estímulo. En la Fig. 1.4 se muestra, además de las distribuciones “N” y “S+N”, un posible criterio del observador (línea “c”). Sean  $n(x)$  y  $sn(x)$  las distribuciones de probabilidad de la variable de decisión  $x$  para los casos “N” y “S+N” respectivamente. Entonces una estimación de la probabilidad de que el observador indique que sintió el estímulo cuando efectivamente éste fue presentado sería [24]:

$$P_{acierto} = \int_c^{\infty} sn(x)dx \quad (1.1)$$

Por otra parte, la probabilidad de una “falsa alarma”, es decir, que el observador diga “sí” cuando no se presentó estímulo, se estima por [24]:

$$P_{falsa-alarma} = \int_c^{\infty} n(x)dx \quad (1.2)$$

Una tarea psicofísica típica es la denominada tarea del tipo “Sí/No”. En ella, el observador es sometido a presentaciones en las que puede o no haber un estímulo dentro de un intervalo temporal al que debe prestar atención, y debe responder “Sí” si cree que vio/oyó/sintió/degustó el estímulo, o “No” en caso contrario [24]. Así, existe un total de 4 combinaciones que dan cuenta del desempeño del individuo en esta tarea. Si se le presentó el estímulo y respondió “Sí”, entonces obtuvo un “verdadero positivo”; si respondió “No”, un “falso negativo”. Si no se le presentó el estímulo y respondió “Sí”, entonces obtuvo un “falso positivo” o “falsa alarma”; y si respondió “No”, un “verdadero negativo”. Estas respuestas se esquematizan en la Tabla 1.1. De este modo, es posible caracterizar el desempeño del individuo con una medida que dé cuenta de las detecciones correctas, tanto de presentaciones con y sin estímulo. Así por ejemplo se puede estimar el porcentaje de

detecciones correctas  $P(C)$  como [36]:

$$P(C) = \frac{NA}{NT} \cdot 100 \quad (1.3)$$

donde  $NA$  es el número de aciertos y  $NT$  el número total de presentaciones. Además, si  $NT$  incluye igual número de presentaciones con y sin estímulo, entonces  $NA$  se puede estimar como  $NA = (VP + NT/2 - FP)$ , con  $VP$  el número de verdaderos positivos y  $FP$  el número de falsas alarmas.

**Tabla 1.1:** Combinaciones de resultados en una tarea “Sí/No” en la que puede o no haberse presentado un estímulo.

Tipo de presentación	Respuesta del observador	
	Sí	No
Con estímulo	Verdadero positivo	Falso negativo
Sin estímulo	Falso positivo	Verdadero negativo

El índice de desempeño  $P(C)$  es ampliamente usado en psicofísica. Sin embargo, esta medida no da cuenta de las variaciones en el criterio del observador. En efecto, de las Ecs. 1.1 y 1.2 es claro que los verdaderos positivos y las falsas alarmas dependen del criterio, y por tanto  $P(C)$  no es independiente de la subjetividad del observador. En TDS, sin embargo, existe un índice de detectabilidad que es independiente del criterio del observador, conocido como  $d'$ , que da cuenta de la distancia de las dos distribuciones “N” y “S+N” de la Fig. 1.4. Si  $\mu_N$  y  $\mu_{SN}$  son las medias de las distribuciones “N” y “S+N”, entonces [36]:

$$d' = \frac{\mu_N - \mu_{SN}}{\sigma_N} \quad (1.4)$$

con  $\sigma_N$  la varianza de la distribución “N”. En la práctica, se debe suponer la forma de las distribuciones para evaluar numéricamente  $d'$ . Así, asumiendo distribuciones normales, se puede estimar  $d'$  por [36]:

$$d' = z(vp) - z(fp) \quad (1.5)$$

donde  $z(\cdot)$  es la función inversa de la distribución normal,  $vp$  es la proporción de verdaderos positivos y  $fp$  es la proporción de falsas alarmas.

La TDS dio por primera vez un enfoque consistente a las falsas alarmas que se presentaban en una proporción no despreciable en los experimentos psicofísicos del tipo “Sí/No”. En la psicofísica clásica las falsas alarmas se consideran como adivinanzas en el sentido de que al no presentarse estímulo el observador no tiene motivos para responder “Sí”, ya que no hay un nivel de activación sensorial. Por el contrario, en la TDS una situación sin estímulo (sólo ruido) puede generar eventos

sensoriales que podrían superar el criterio del observador induciendo a que éste responda “Sí”. Así, la TDS sustenta la posibilidad de que la probabilidad de las falsas alarmas sea no nula, no como adivinanzas del observador sino con una base sensorial. Ahora bien, en términos de la TDS la teoría clásica podría interpretarse bajo los mismos conceptos de eventos sensoriales que siguen cierta distribución de probabilidades, pero que no pueden caer más abajo de cierto corte abrupto en el espacio de la variable de decisión. Este corte, de existir, tendría que estar ubicado bien por sobre la media de la distribución “N” de modo que cualquier evento sensorial proveniente de una situación de sólo ruido no pudiese ser discriminado. En la Fig. 1.4 se indica esta limitación supuesta por la teoría clásica con una línea punteada rotulada como “umbral clásico”. La evidencia experimental para el caso del sistema táctil muestra que esta limitación, de existir, no puede ser tan alta como lo indica la teoría clásica pues eventos sensoriales que caen por debajo de este límite pueden ser discriminados por el observador [22] [40].

A pesar de los cuestionamientos al umbral clásico, numerosos estudios que conciernen procesos sensoriales táctiles y aplicaciones ingenieriles asociadas han seguido usando este concepto [41] [60] [61]. En particular, los experimentos psicofísicos descritos en la sección anterior y que han abogado por efectos de RE en el sistema táctil se apoyan en el concepto del umbral clásico [9] [10] [61].

### **1.3 Teoría de la incerteza**

Aunque el sólo hecho de refutar la idea de un umbral como lo propone la teoría clásica menoscaba la versión no dinámica de la RE, los fenómenos psicofísicos en los que el ruido mejora la detección de estímulos resultan ser, a primera vista, inconsistentes bajo los supuestos de la TDS. En la TDS el ruido sólo entorpece la detección. En efecto, el gráfico de la detectabilidad  $d'$  en términos del ruido añadido al estímulo mostraría una curva monótonamente decreciente. Aún así, un examen más profundo de los supuestos e implicancias de la TDS permitiría lograr un entendimiento más acabado del verdadero rol del ruido que se le añade a un estímulo.

En 1961 Tanner [54] sugirió que el supuesto de la detección ideal de una señal conocida de manera exacta en la TDS podría ser erróneo. Más aún, argumentó que este error estaba en asumir que el observador posee conocimiento exacto de la señal. Surgió así la Teoría de la Incerteza (TI) como una extensión de la TDS en la que el observador introduce no-linealidades en el proceso de detección al actuar como si no conociera los parámetros de la señal que se le presenta, en especial cuando este estímulo es de baja intensidad. Esta teoría ha sido probada con éxito en visión

y audición [6] [7] [39] [54].

En el modelo de la TDS descrito en la sección 1.2, el observador debe dicotomizar el espacio de entrada, considerando los estímulos  $x$  presentados, de modo de separar todos aquellos  $x$  que deberían llevar a una respuesta “Sí” de aquellos que deberían evocar un “No”. Esto puede ser establecido matemáticamente como el problema de escoger un espacio  $A$  tal que se maximice la diferencia entre aciertos y falsas alarmas [42]:

$$\max_A P_{\text{acierto}}(A) - W \cdot P_{\text{falsa-alarma}}(A) \quad (1.6)$$

donde  $W$  es un número o una función de pesos que asigna mayor o menor importancia a las falsas alarmas referidas a los falsos negativos. Si  $W = 1$ , entonces ambos tipos de errores tienen igual importancia.

Peterson *et al.* [42] mostraron que la razón de verosimilitud, definida como  $l(x) = \frac{sn(x)}{n(x)}$ , contiene la información relevante para la decisión que debe tomar el observador. La Ec. 1.6 se puede reescribir como:

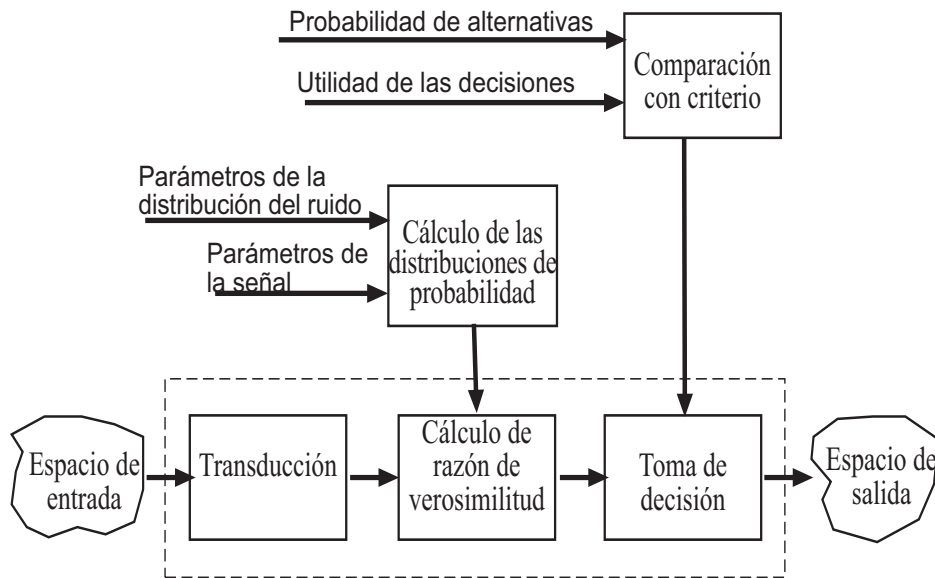
$$\max_A \int_A sn(x)dx - W \cdot \int_A n(x)dx \quad (1.7)$$

y como ambas variables pertenecen al mismo espacio y la integral es máxima cuando incluye sólo valores positivos, se deduce que:

$$l(x) = \frac{sn(x)}{n(x)} \geq W \quad (1.8)$$

De este modo, un observador ideal es aquel que es capaz de calcular la razón de verosimilitud  $l(x)$  asociada a la entrada  $x$  y luego compararla con un criterio  $W$ , de modo que si  $l(x)$  es mayor que  $W$  entonces responderá “Sí”, en caso contrario, “No” [24] [42]. Esto se ilustra en la Fig. 1.5, adaptada de [54]. En ella se muestra que el cálculo de la razón de verosimilitud requiere conocer la forma y los parámetros de las distribuciones asociadas a las presentaciones de sólo ruido ( $n(x)$ ) y señal más ruido ( $sn(x)$ ). Asimismo, la elección del criterio requiere de la información respecto de la probabilidad de aparición del estímulo o las alternativas de estimulación presentadas, y la utilidad que el observador sacará de las decisiones que tome. La utilidad para el observador se refiere a la conveniencia de las respuestas en términos de lo que gana o pierde con los aciertos y/o falsas alarmas.

En la TI un observador humano no es ideal en el sentido de que actúa como si no tuviese conocimiento de los parámetros de la señal a detectar, incluso si el experimentador le indica todos los parámetros de ésta: amplitud, frecuencia, fase, tiempo de inicio y duración [54]. Para que la fun-

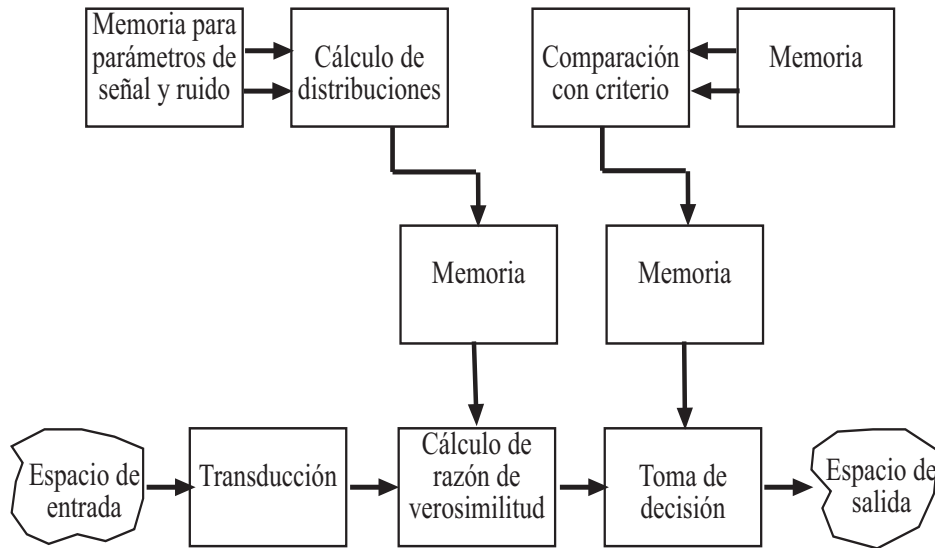


**Figura 1.5:** Modelo de un observador ideal que debe calcular las distribuciones asociadas a sólo ruido y señal más ruido, calcular la razón de verosimilitud, comparar con un criterio y, en base a esto, tomar una decisión. En el bloque punteado se enmarca el sistema sensorial que estaría bajo el mando de un sistema “inteligente” que realiza los cálculos. Adaptada de [54].

ción en el tiempo,  $x(t)$ , que representa la señal que el observador debe detectar sea completamente conocida por él, es necesario que éste tenga una completa representación temporal de  $x(t)$  dentro del intervalo de observación. Para ello, el observador debe tener almacenada en una memoria una representación precisa de la función, lo que requeriría un mecanismo de reloj que le permita sincronizarse perfectamente con el intervalo de observación y localizar exactamente dentro de este intervalo el momento de inicio de  $x(t)$  y su duración. Requeriría una memoria que especifique exactamente la amplitud, frecuencia, fase, tiempo de inicio y duración de la señal [54]. En la Fig. 1.6 se muestra un modelo modificado del observador ideal que incluye los bancos de memoria que requeriría el observador y que sugerirían algunos focos de imperfecciones en el proceso de detección [54].

A diferencia de un observador ideal en el marco conceptual de la TDS donde la detectabilidad  $d'$  crece linealmente con la intensidad del estímulo, en la TI mientras más pequeño es el estímulo más difícil es para el individuo memorizar los parámetros del mismo [39] [54]. De este modo, la TI predice una curva psicométrica no-lineal del tipo  $d' \propto E^b$ , con  $b > 1$ , si  $E$  es la energía o intensidad del estímulo [39], dando cuenta del comportamiento no-óptimo en el desempeño del observador.

Tanner [54] notó que un observador que no puede recordar completamente los parámetros de la señal tendría un desempeño igual al de un observador ideal enfrentado a una señal incompletamente especificada. En otras palabras, el grado de incerteza de un observador respecto de una señal



**Figura 1.6:** Modelo modificado de un observador ideal para incluir la memoria. Esquema adaptado de [54].

de determinada intensidad podría ser evaluado en base al número de señales ortogonales que el observador estaría esperando al momento de prestar atención en un intervalo de atención. Si  $M$  es la dimensión del espacio de posibles señales que el individuo espera observar, entonces la depresión en el desempeño del observador se puede evaluar por [7]:

$$(d')^2 = \ln\left(1 - \frac{1}{M} + \frac{1}{M} \exp\left(\frac{E^2}{N^2}\right)\right) \quad (1.9)$$

con  $E$  la intensidad del estímulo y  $N$  la varianza del ruido.

Ahora bien, si el individuo tiene un comportamiento sub-óptimo porque es incapaz de recordar los parámetros de la señal, un diseño experimental en el que se le refuerce la memoria debería suprimir la incerteza para alcanzar el desempeño óptimo. Así por ejemplo, si en la detección de una señal acústica sinusoidal, al estímulo a detectar se le suma una onda sinusoidal de amplitud grande y de la misma fase y frecuencia de éste (“onda continua”), entonces se eliminaría la memoria requerida por el individuo respecto de la fase y la frecuencia. Habría, aún, necesidad de memoria acerca del tiempo de inicio y duración de la señal. Esta necesidad podría ser satisfecha por la adición de una “portadora pulsátil” o “pedestal”, esto es, una senoide de igual frecuencia y fase que coincida exactamente en tiempo de inicio y duración con la señal. De este modo habrían tres tipos de experimentos, como se indica en la Tabla 1.2: detección, onda continua y pedestal; con dos sub-divisiones, “Sí/No” y 2AFC (del inglés, *2 Alternatives Forced Choice*), experimento en el que el sujeto debe decidir en cuál de dos intervalos temporales se le presentó el estímulo. El experimento de detección requiere memoria para la amplitud, la frecuencia, la fase, tiempo de inicio y duración.

**Tabla 1.2:** Memorias que requiere el observador en seis condiciones experimentales distintas. Sí: Requiere memoria para el parámetro; No: No requiere memoria para ese caso.

Experimento		Memoria requerida				
		Amplitud	Frecuencia	Fase	Tiempo de inicio	Duración
Detección	“Sí/No”	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	2AFC	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Onda continua	“Sí/No”	Sí	No	No	Sí	Sí
	2AFC	No	No	No	Sí	Sí
Pedestal	“Sí/No”	Sí	No	No	No	No
	2AFC	No	No	No	No	No

En el de onda continua sólo se requiere memoria para el tiempo de inicio y duración, mientras que el de pedestal no requiere ningún tipo de memoria. La diferencia entre “Sí/No” y 2AFC radicaría solamente en la necesidad de memoria para la amplitud de la señal en el primer caso. La Fig. 1.7 muestra un ejemplo para cada uno de estos tres tipos de experimentos en el caso de 2AFC, en los que la señal a detectar es una senoide de 10 Hz y 300 ms de duración.

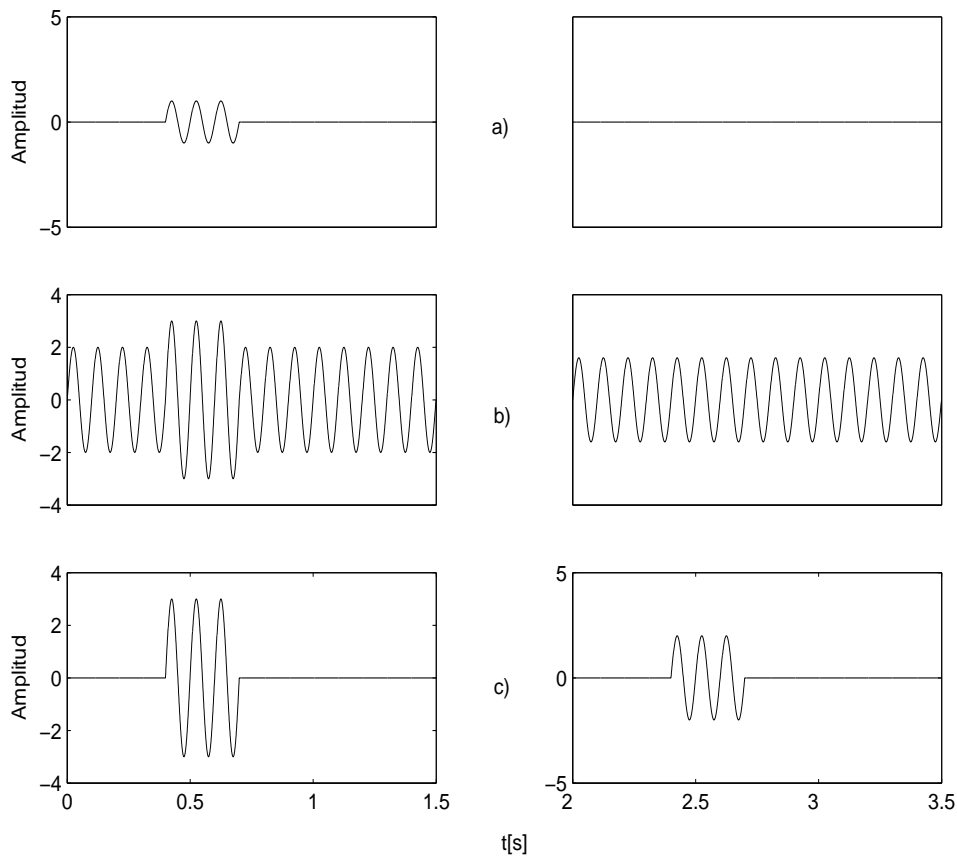
De acuerdo a lo anterior, en esta tesis se plantea la siguiente hipótesis: el propio ruido podría ser usado para disminuir la incerteza y así mejorar el desempeño de un individuo en una tarea psicofísica. Si bien es cierto que el ruido entorpece la identificación de la fase y la frecuencia de una señal, también puede usarse como pedestal para indicar el tiempo de inicio y duración de la señal. Así, si en una tarea psicofísica se quiere detectar un pulso rectangular en un ambiente ruidoso, la detección aumentaría si el ruido estuviese limitado a la duración del estímulo, como se ve en la Fig. 1.8b), porque ayudaría a reforzar la memoria del observador respecto del tiempo de inicio y término del pulso, a diferencia de la situación mostrada en la Fig. 1.8a), en la que el ruido no entrega información de la ubicación temporal del pulso.

## 1.4 Objetivo general

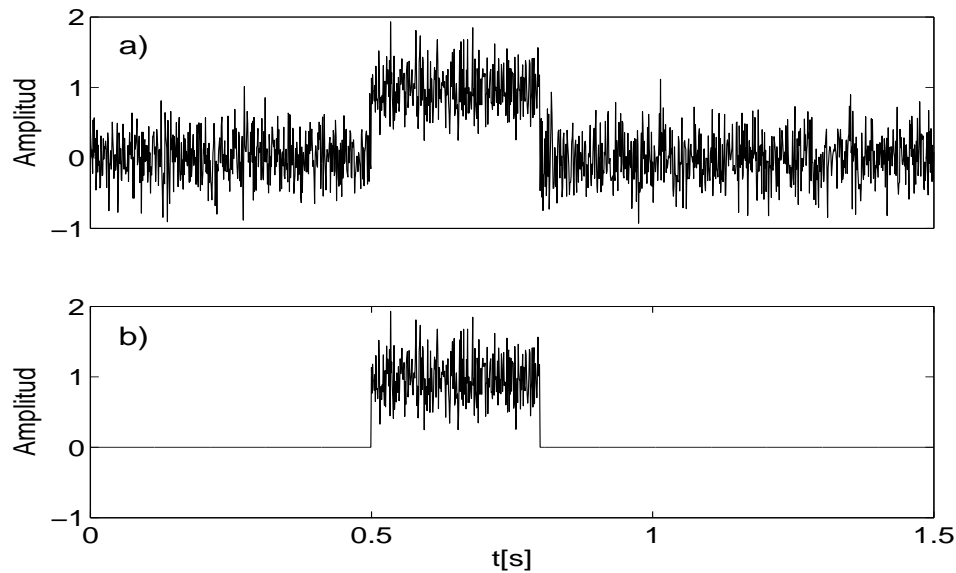
Demostrar que la resonancia estocástica no es capaz de explicar resultados experimentales claves que involucran percepción táctil en humanos, y contrastar el modelo de la resonancia estocástica en su versión no dinámica con el modelo de la teoría de detección de señales y la teoría de la incerteza.

## 1.5 Objetivos específicos

1. Diseñar un protocolo experimental adecuado de pruebas psicofísicas táctiles cuyos resultados sean predichos de manera distinta entre los modelos a contrastar. La estimulación táctil se



**Figura 1.7:** Tres ejemplos de experimentos del tipo 2AFC con distintos requerimientos de memoria. (a) Detección, (b) Onda continua y (c) Pedestal. El estímulo es una onda sinusoidal de 10 Hz, amplitud 1 y 300 ms de duración que, en estos ejemplos, siempre aparece en el primer intervalo temporal de observación (ambos de duración 1.5 s, con 0.5 s de descanso entre ellos). En (b) se añadió una sinusoide de amplitud 2 y frecuencia 10 Hz a todo el intervalo de atención. En (c) se añadió la misma sinusoide pero ahora coincidiendo con el estímulo en tiempo de inicio y duración.



**Figura 1.8:** Ejemplos de estímulo tipo pulso rectangular (amplitud 1, arbitraria) más ruido (gaussiano de varianza 0.1) dentro de un intervalo de atención de 1.5 s. (a) Ruido como onda continua (presente en todo el intervalo) y (b) Ruido como pedestal (presente sólo en la duración del pulso).



- hará en grupo reducido de voluntarios en los dedos índices de la mano.
2. Implementar el *hardware* requerido para 1) de modo que la estimulación táctil se logre con un dispositivo piezoeléctrico que reciba señales desde un computador.
  3. Programar el *software* para controlar 2) y crear una interfaz entre el computador y el voluntario que sea entendible para este último.
  4. Explicar los resultados de los experimentos psicofísicos a llevar a cabo, y exponer debilidades de una teoría y fortalezas de la otra en la interpretación de los mismos.
  5. Buscar explicaciones alternativas para el fenómeno de la RE.

## 1.6 Organización del documento

Esta tesis se estructura como se señala a continuación. Después de la introducción, en el capítulo 2, se hace una descripción general del sistema somatosensitivo y los mecanorreceptores táctiles que permite entender la fisiología detrás de los fenómenos psicofísicos que se estudiarán.

Posteriormente, en el capítulo 3, se describe en detalle el protocolo experimental llevado a cabo, dividido en tres experimentos principales realizados sobre un grupo reducido de sujetos: medición de umbral, evaluación del desempeño ante la adición de distintos niveles de ruidos y comparación de dos situaciones con ruido de distinta configuración temporal. Además se describe el montaje experimental construido para llevar a cabo los experimentos psicofísicos. Se incluye la descripción del *hardware* (computador, circuito externo y piezoeléctrico) y *software* implementados.

En el capítulo 4 se muestran los resultados logrados en cada uno de los experimentos descritos en el capítulo 3. Se detallan los umbrales vibrotáctiles de cada sujeto, se muestran las curvas que relacionan detección con nivel de ruido añadido y se comparan las detecciones de las dos condiciones del experimento final.

En el capítulo 5 de discusión, se muestran los estudios estadísticos para probar la optimalidad del ruido encontrado en el segundo experimento y mostrar diferencias significativas en los resultados de las dos condiciones del tercer experimento. Además, se discute acerca de las consideraciones que se deben tener al estimar el umbral y se ensaya un modelo para explicar la RE en términos de la TDS.

Finalmente, en el capítulo 6, se entregan las principales conclusiones que se pueden sacar de esta tesis, así como los aportes concretos y algunas consideraciones para investigaciones futuras.

# Capítulo 2

## Receptores Táctiles

En este capítulo se verán los aspectos fundamentales de la estructura y funcionalidad de los receptores involucrados en la percepción táctil. Primero se hará una descripción general de los receptores que participan en la generación de las sensaciones somáticas, en especial aquellas relacionadas con el tacto. Luego se detallarán las características principales de cada uno de los mecanorreceptores táctiles en cuanto a estructura anatómica, transducción sensorial, localización, respuesta en frecuencia y funcionalidad. También se verán algunos aspectos de los umbrales sensoriales de los mecanorreceptores de la piel y su posible participación en el fenómeno de la resonancia estocástica. Finalmente se estudiarán las vías mecanosensitivas y algunos aspectos del procesamiento central de la información táctil.

### 2.1 Aspectos generales del sistema somatosensitivo

Las sensaciones corpóreas o somáticas están divididas en dos componentes fundamentales: aquellas provenientes de estímulos mecánicos como el tacto leve, la vibración y la presión, y las sensaciones producidas por estímulos dolorosos y la temperatura. Ambos tipos de sensaciones están mediadas por subsistemas independientes, que en su total le permiten al individuo detectar formas, movimientos y texturas, controlar las fuerzas internas y externas que actúan sobre su cuerpo y detectar situaciones potencialmente nocivas. Los estímulos mecánicos, dolorosos y térmicos externos son transducidos por una población diversa de receptores cutáneos y subcutáneos ubicados en todo el cuerpo. Los potenciales de acción así generados son transmitidos al encéfalo por varias vías ascendentes que discurren paralelas a través de la médula espinal, el tronco encefálico y el tálamo para alcanzar la corteza sensitiva primaria en el lóbulo parietal.

## 2.2 Receptores mecanosensitivos

Los receptores en los tejidos cutáneos y subcutáneos incluyen las terminaciones nerviosas libres en la piel, las terminaciones nerviosas asociadas a especializaciones que actúan como amplificadores o filtros y las terminaciones sensitivas asociadas a células transductoras especializadas [43]. Los nociceptores y termorreceptores asociados con las sensaciones dolorosas y de temperatura se denominan terminaciones nerviosas libres, y las ramas terminales de estas neuronas amielínicas se ramifican ampliamente en las regiones superiores de la dermis y la epidermis. Por su parte, los mecanorreceptores relacionados con el tacto tienen asociados en sus terminaciones nerviosas algún tipo de célula especializada, o bien presentan algún grado de encapsulación que les permite modular la respuesta a los diferentes estímulos mecánicos, por lo que se les denomina encapsulados.

Los receptores mecanosensitivos del tronco y los miembros están asociados a neuronas aferentes largas cuyo soma o cuerpo celular se localiza en el ganglio de la raíz dorsal, desde donde proyecta axones hacia los tejidos cutáneos a través de los distintos nervios periféricos por una parte, y axones más cortos hacia la región dorsal de la médula donde hacen sinapsis con otras neuronas de la médula y/o con neuronas del tronco encefálico. Los axones largos que se dirigen a la periferia terminan en algún tipo de encapsulación que estructura el mecanorreceptor. Por otra parte, una sola neurona sensitiva puede llegar a tener un campo receptivo de varios centímetros cuadrados. Asimismo, los axones que nacen de la raíz dorsal pueden ramificarse en numerosas vías cerca de la terminación del axón, inervando de este modo diversos receptores mecanosensitivos.

De acuerdo a la velocidad de conducción, los axones de las neuronas involucradas en las sensaciones somáticas se dividen en tres categorías principales, A, B y C; siendo A el grupo de axones más gruesos y rápidos y C, los más delgados y lentos. El grupo A además se subdivide en  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , siendo  $\alpha$  los más rápidos. Los mecanorreceptores, en general, caen en la categoría A $\beta$ .

En la Tabla 2.1 se listan los principales tipos de mecanorreceptores que se encuentran en la piel de los mamíferos y se indican sus características generales. Éstos son: el receptor de Pacini, el corpúsculo de Meissner, el disco de Merkel y el corpúsculo de Ruffini.

### 2.2.1 Corpúsculo de Pacini

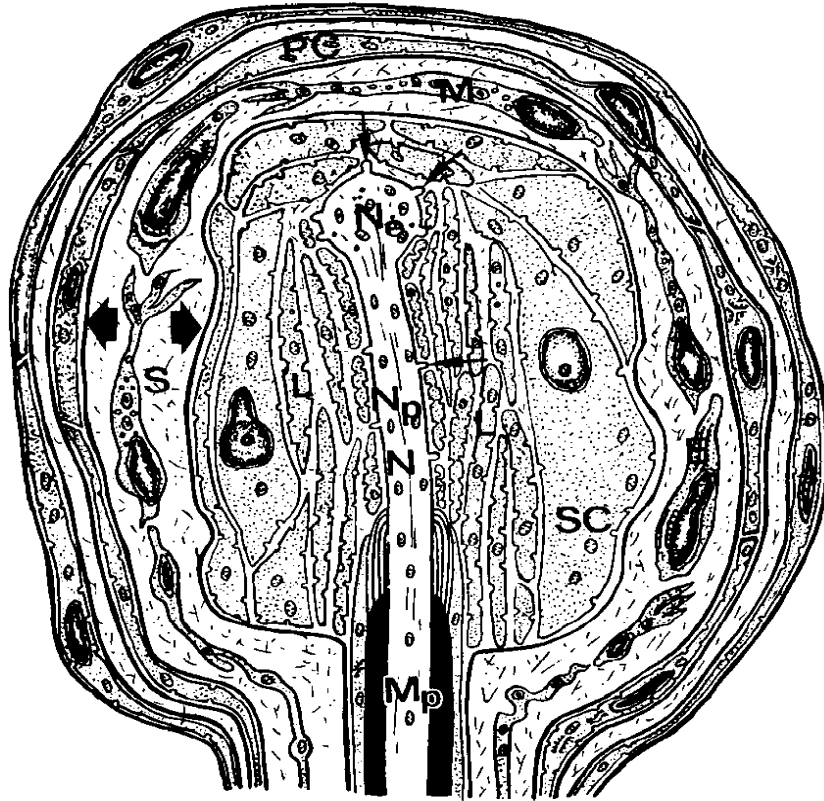
El corpúsculo de Pacini es un mecanorreceptor grande, encapsulado, que se localiza en el tejido subcutáneo (constituyendo cerca del 15 % de los receptores de la mano) y, más profundamente, en las membranas interóseas y los mesenterios intestinales [27]. Las células que rodean el termi-

**Tabla 2.1:** Principales tipos de mecanorreceptores táctiles y algunas de sus características

Tipo de receptor	Características anatómicas	Localización	Función asociada	Tiempo de adaptación
Corpúsculo de Pacini	Encapsulado con revestimiento tipo capas de cebolla	Tejido subcutáneo, membranas interóseas, vísceras	Presión profunda, vibración	Rápido
Corpúsculo de Meissner	Encapsulado	Piel glabra, entre papilas dérmicas	Tacto, presión	Rápido
Disco de Merkel	Asociados con células liberadoras de péptidos	Toda la piel, folículos pilosos	Tacto, presión estática	Lento
Corpúsculo de Ruffini	Paralelo a líneas de tensión de la piel	Toda la piel	Estiramiento de la piel	Lento

nal nervioso forman una gruesa cápsula de entre 20 a 70 capas celulares que contiene un espacio capsular lleno de líquido, un núcleo interno con varias células de Schwann y el terminal nervioso amielínico en el centro del receptor. Toda esta estructura en promedio tiene un tamaño entre 0,5 y 2 mm de largo y 0,7 mm de diámetro. La cápsula, constituida entonces como una serie de capas en catáfilas de cebolla, actúa como un filtro mecánico pasa altos que permite que sólo aquellos estímulos mecánicos de alta frecuencia (de 250 a 350 Hz) estimulen el terminal nervioso. En la Fig. 2.1 se muestra un esquema de la estructura y organización del receptor de Pacini, señalándose algunos elementos importantes. Se ve en ella que el terminal nervioso se engrosa hacia el final y en esencia es amielínico en la porción encapsulada. Sin embargo, la porción que sale del encapsulamiento está recubierta de mielina, así como la fibra aferente respectiva. Las células perineurales que constituyen una capa celular están unidas entre sí por contactos tipo desmosomas, mientras que las distintas capas podrían estar enlazadas por fibras de colágeno. Dentro de la cápsula, el terminal nervioso está acompañado de numerosas células de Schwann de función secundaria.

El corpúsculo de Pacini es un mecanorreceptor de adaptación muy rápida, capaz de seguir altas frecuencias de estimulación sinusoidal [27]. Esto sumado al hecho de estar encapsulado con una estructura que realiza filtrado mecánico pasa altos, sugiere que los corpúsculos de Pacini participan en la discriminación de texturas de superficie finas y de estimulaciones que producen vibraciones de alta frecuencia en la piel. Más aún, la estimulación selectiva de las fibras aferentes de los receptores de Pacini producen sensaciones de cosquilleo o vibración en seres humanos. Los receptores de Pacini son también conocidos como receptores tipo **PC**.



**Figura 2.1:** Ilustración esquemática de un corpúsculo de Pacini. Se indican los nombres de algunas estructuras: **Np**, terminal nervioso amielínico; **Mp**, parte mielínica del terminal nervioso; **Ne**, terminal de la neurona; **SC**, células de Schwann y sus laminillas (L); **PC**, células perineurales; **S**, espacio capsular. (Figura extraída de [27].)

## 2.2.2 Corpúsculo de Meissner

Los corpúsculos de Meissner son receptores relativamente grandes, de forma alargada con dimensiones que bordean los 150  $\mu\text{m}$  de largo y los 40 a 70  $\mu\text{m}$  de diámetro. Están presentes principalmente en la piel glabra, en las papilas dérmicas inmediatamente por debajo de la epidermis de los dedos, las palmas y las plantas, representando cerca del 40 % de los mecanorreceptores de la mano [27]. Al igual que el receptor de Pacini, el terminal nervioso de estos receptores está encapsulado por una serie de capas celulares, pero que envuelven sólo la mitad basal del receptor, con un espacio capsular mal definido. El núcleo central compuesto por las células de Schwann y varios terminales nerviosos, tiene un aspecto distintivo debido a las laminillas de las células de Schwann que hacen un *sandwich* sobre los terminales nerviosos en forma de óvalo o elipsoides. Típicamente de 2 a 6 axones aferente mielinados entran al corpúsculo de Meissner.

El corpúsculo de Meissner, identificado como el receptor tipo **RA** (*Rapidly Adapting*), es de adaptación rápida, aunque respondería a estímulos de más baja frecuencia que el caso de los receptores tipo **PC** [27]. El receptor tipo **RA** mediaría la sensación de objetos texturados cuando se mueven por sobre la piel.

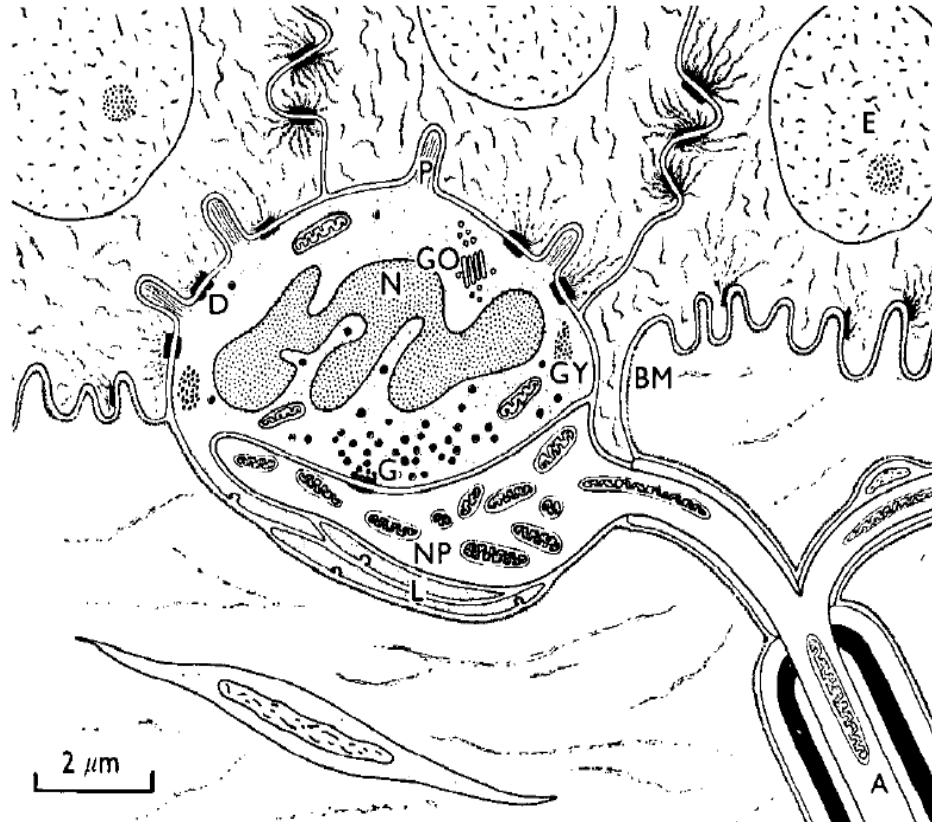
### 2.2.3 Disco de Merkel

Las terminaciones nerviosas de Merkel o discos de Merkel se caracterizan por estar asociadas a células liberadoras de péptidos conocidas como células de Merkel, formando un complejo presente en la epidermis tanto de la piel glabra como la piel pilosa [27]. Las fibras aferentes mielinadas se ramifican extensivamente cerca de 500  $\mu\text{m}$  de las células de Merkel. Las ramas pierden su mielina antes de penetrar en la membrana basal de la epidermis para formar una estructura aplanada en forma de disco conteniendo una gran cantidad de mitocondrias y descansando en contacto con la célula de Merkel. Esta estructura es la que se conoce como disco de Merkel. En la Fig. 2.2 se muestra un esquema de la disposición en la epidermis del disco y la célula de Merkel y algunos de sus componentes.

La célula de Merkel se encuentra sólo en la epidermis de los mamíferos adultos. Se caracteriza por tener un núcleo polilobulado que abarca la mayor parte de la célula, vesículas osmiofílicas granulares esféricas concentradas cerca de la terminación nerviosa, y junturas tipo sinápticas con el disco de Merkel. La célula de Merkel está sujeta al keratinocito (epidermis) por medio de desmosomas, los que, sin embargo, están ausentes en un conjunto de proyecciones de la célula sobre el keratinocito a través de una serie de brazos celulares. Estas proyecciones de 300 nm de diámetro y 2 a 3  $\mu\text{m}$  de largo están insertas en invaginaciones del keratinocito adyacente, y raramente penetran en él. Además, se caracterizan por la presencia de numerosos filamentos orientados longitudinalmente dentro de ellas, posiblemente de actina, a los que se les ha asociado un rol en la transducción de los estímulos mecánicos [27].

Los discos de Merkel son especialmente abundantes en la piel glabra, localizándose en el fondo de las crestas dérmicas características de este tipo de piel. Su alta concentración en estas zonas de la piel permite que los campos receptivos de las fibras aferentes asociadas a ellos sean relativamente pequeños, restringidos a un área de entre 2 y 3 mm de diámetro.

Estudios electrofisiológicos en gatos [27] han permitido establecer que los discos de Merkel actúan como receptores de adaptación lenta, y hoy en día son conocidos como unidades tipo **SA I**



**Figura 2.2:** Ilustración esquemática de una célula y un disco de Merkel en la base del epitelio. Se indican los nombres de algunas estructuras: **NP**, terminal nervioso aplanado (disco de Merkel); **BM**, membrana basal de la epidermis; **N**, núcleo de la célula de Merkel; **D**, desmosomas; **P**, invaginaciones en los keratinocitos. (Figura extraída de [27].)

(*Slowly Adapting type I*). Esta característica les permitiría participar en las sensaciones producidas por presiones estáticas en la piel y en el tacto fino de formas.

## 2.2.4 Corpúsculo de Ruffini

De forma de huso, el corpúsculo de Ruffini está presente tanto en la piel glabra como en la piel pilosa y tiene un largo promedio de 0,5 a 2 mm [27]. Posee una cápsula de 3 a 5 capas de lamini-llas que rodea un prominente y compartimentalizado espacio capsular lleno de líquido. El núcleo interior contiene un axón mielinado que se ramifica ampliamente formando un denso cepillo de ramas y terminales nerviosos en el interior del corpúsculo.

El corpúsculo de Ruffini, asociado a las fibras sensitivas aferentes tipo **SA II** (*Slowly Adapting type II*), generalmente tiene una orientación paralela a las líneas de tensión de la piel, lo que les permitiría participar en la generación de sensaciones producidas por el estiramiento de la piel [43].



## 2.3 Umbrales Sensitivos

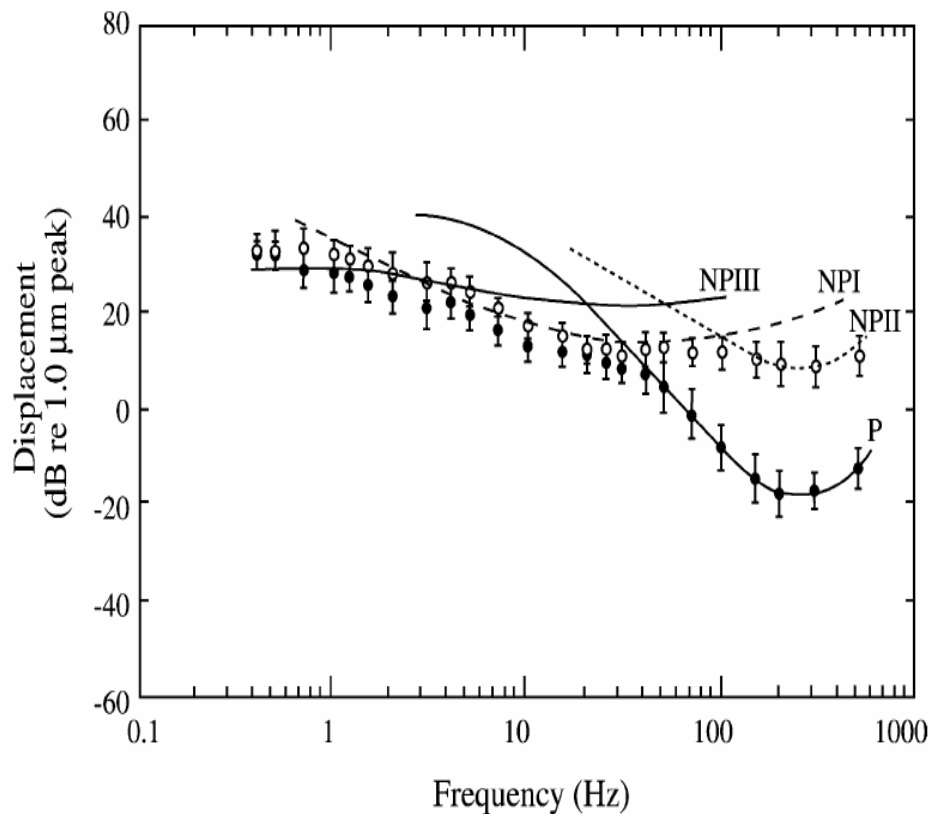
Diversos modelos de neuronas [29] [43] consideran la existencia de un umbral de estimulación que debe ser superado para que se pueda generar un potencial de acción que se propague por el axón neuronal. Así por ejemplo, para que un neurotransmisor liberado por una neurona presináptica logre excitar a la neurona postsináptica, es necesario que éste supere una concentración mínima que logre abrir una cantidad tal de canales iónicos que produzcan corrientes de despolarización para llevar el potencial de membrana a un valor umbral que gatilla la propagación del potencial de acción [29].

Las neuronas receptoras, y en particular las mecanorreceptoras, pareciera que no escapan a esta premisa general de las células nerviosas. Estudios fisiológicos en seres humanos con la técnica de microelectrodos percutáneos muestran que los cuatro tipos de mecanorreceptores (RA, PC, SA I y SA II) poseen un umbral bajo el cual los estímulos mecánicos no son capaces de generar potenciales de acción en el nervio mediano (localizado en el miembro superior) que inerva esos receptores [32] [33]. Más aún, los estudios psicofísicos de Gescheider *et al.* [22] y Eijkman y Vendrik [18] prueban que existen pequeñas intensidades bajo las cuales los estímulos mecánicos no son capaces de producir sensaciones táctiles, o más precisamente, no son discriminables de una situación en la que existe sólo ruido, para ponerlo en términos de la teoría de detección de señales (TDS).

Sin embargo, la existencia de umbrales sensitivos de las neuronas mecanorreceptoras no implica que éstos se correspondan con el umbral psicofísico que se mide usualmente [35]. De hecho, en el estudio de Geschider *et al.* [22] mencionado antes se enfatiza que el umbral absoluto es mucho menor al umbral medido como el punto medio de la curva psicométrica, el que además depende de la prueba que se realice para medirlo. Por su parte, Eijkman y Vendrik [18] mostraron que eventos sensoriales por debajo del umbral de la teoría clásica (ver capítulo introductorio) son discriminables y que para la existencia de un umbral psicofísico se requeriría que estuviese ubicado bien abajo en la distribución de sólo ruido de la TDS. La evidencia experimental para el caso táctil [18] [22] [52] favorece así a la TDS con la introducción de un umbral bajo [51]. Por otra parte, los estudios que han demostrado resonancia estocástica en el sistema táctil humano [9] [11] [61] han utilizado el concepto de umbral desde el punto de vista psicofísico, por lo que los umbrales sensitivos de los mecanorreceptores no participarían directamente en este fenómeno.

## 2.4 Respuesta en frecuencia

Los aspectos mecánicos del tacto de la piel glabra han sido modelados con éxito por el modelo de los cuatro canales de información [3]. En éste se postula la existencia de cuatro vías independientes de procesamiento de la información táctil con distintas características de sintonización que parecen ser determinadas en la periferia, tanto a nivel de los receptores sensoriales como de sus respectivas vías aferentes nerviosas. Cada uno de estos canales responde de manera selectiva ante estímulos en determinados rangos de frecuencias, y más aún, el enmascaramiento o la adaptación de un canal no tiene efecto sobre la sensibilidad de los otros canales [20].



**Figura 2.3:** Modelo de los cuatro canales de información táctil que muestra los umbrales de percepción en función de la frecuencia del estímulo (escala logarítmica). Los datos corresponden a los umbrales promedio más menos la desviación estándar para el caso de una punta de contacto grande de 3 cm<sup>2</sup> (círculos negros) y una punta de contacto pequeña de 0,001 cm<sup>2</sup> (círculos blancos). Se muestran las curvas de sintonización de los canales P, NP I, NP II, y NP III, que corresponden a las fibras PC, RA, SA II y SA I, respectivamente. (Figura extraída de [20].)

En la Fig. 2.3 se muestran los umbrales psicofísicos en función de la frecuencia del estímulo para dos tipos de puntas aplicadas sobre la eminencia tenar, una de diámetro grande de 3 cm<sup>2</sup>

(puntos negros) y otra de diámetro pequeño de 0,001 cm<sup>2</sup> (puntos blancos). En ambos casos se obtienen curvas con forma de U, aunque aplanadas hacia las bajas frecuencias. Además, sobre la misma figura se han dibujado las curvas de sintonización de los cuatro canales de información obtenidas con el procedimiento psicofísico de curvas de adaptación-sintonización [20]. Se observa que para pequeñas frecuencias en el rango de 0,4 a 2 Hz los umbrales son determinados por el canal NP III tanto para el caso de la punta grande como la pequeña. Cuando se usa la punta grande, los umbrales en el rango de frecuencia de 2 a 40 Hz son determinados por el canal NP I, mientras que por sobre 40 Hz, por el canal P. Por otra parte, cuando se usa la punta pequeña, los umbrales en el rango de frecuencias de 2 a 100 Hz son determinados por el canal NP I, y sobre 100 Hz, por el canal NP II. Los canales P, NP I, NP II y NP III se sabe se corresponden con los receptores PC, RA, SA II y SA I, respectivamente.

El hecho de que el tamaño de la punta utilizada para estimular la piel glabra sólo afecte sustancialmente la sensibilidad táctil en el rango de frecuencia mediada por el canal P, como se ve en la Fig. 2.3, muestra que este canal presenta sumación espacial, diferenciándose de los canales NP en ese aspecto. En efecto, se ha determinado que sólo el canal P es capaz de realizar sumación tanto espacial como temporal [20]. Por otra parte, los cuatro canales ven afectada su sensibilidad con la edad, aunque el canal P a una tasa mayor que los demás.

## 2.5 Vías ascendentes y corteza somatosensitiva

Los potenciales de acción generados por los estímulos táctiles viajan por los axones aferentes que llegan a la médula espinal a través de los nervios periféricos. Estos axones pertenecen a neuronas de primer orden cuyos somas se localizan en los ganglios de la raíz dorsal, desde donde prologan otros axones más cortos que alcanzan la región dorsolateral de la médula espinal y se bifurcan en ramas ascendentes y descendentes. Estas últimas pueden hacer sinapsis con diversas ramas colaterales o con otras neuronas que median, entre otras cosas, los reflejos segmentarios. Sin embargo, la rama principal de los axones entrantes a la médula, asciende homolateralmente integrándose a la principal vía somatosensitiva: la **vía funicular posterior-lemnisco medial** [43]. Las ramas ascendentes sensitivas provenientes del tronco, las extremidades y la parte posterior de la cabeza, suben por los funículos posteriores hasta alcanzar los núcleos grácil (vías desde la parte inferior del cuerpo) y cuneiforme (vías desde la parte superior del cuerpo) en el bulbo raquídeo inferior. Es aquí donde las neuronas de segundo orden proyectan axones arqueados que cruzan la línea media,

produciendo el entrecruzamiento de las fibras [29]. El lemnisco medial, formado por los axones de segundo orden ascendentes, alcanza el mesencéfalo y finalmente el tálamo a la altura del núcleo ventroposterolateral (VPL). Por su parte, la información somatosensitiva del rostro arriba al núcleo ventroposteriomedial (VPM) del tálamo desde el lemnisco trigeminal.

Desde las neuronas de los núcleos VPL y VPM del tálamo se proyectan numerosos axones que alcanzan la corteza somatosensitiva. Esta se localiza en el lóbulo parietal y comprende cuatro regiones distintas conocidas como áreas 3a, 3b (conocida también como corteza somatosensitiva primaria), 1 y 2 de Brodmann [43]. Experimentos en simios muestran que las neuronas de la corteza somatosensitiva primaria y del área 1 de Brodmann responden ante estímulos cutáneos, mientras que las del área 3a a estímulos propioceptivos [43]. Otros estudios han llegado a determinar un mapa somatotópico de la corteza somatosensitiva, donde las áreas que responden ante estímulos en los pies, piernas, tronco, miembros superiores y rostros, se ubican de medial a lateral, respectivamente [43]. En estos mapas, además, aquellas zonas de la piel que muestran alto grado de sensibilidad táctil, aparecerían sobrerrepresentadas. Por otra parte, el tipo de estimulación a la que es sometida la piel activa distintas neuronas dentro de estos mapas. Así, las neuronas del área 3b requerirían estímulos relativamente sencillos para su activación, no así las del área 1 y 2 que requerirían patrones más complejos de activación.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se describe el protocolo de los experimentos propuestos en esta tesis cuyos resultados permitirían contrastar la versión no dinámica de la RE con la TDS y la TI, explicando en detalle en qué consistió cada experimento realizado. Además, se describe el montaje experimental, que tiene como elemento fundamental un dispositivo piezoeléctrico que es sometido a un voltaje desde un circuito apropiado, voltaje cuya forma de onda es determinada desde un computador. Aquí se muestran algunos esquemas que detallan los componentes de la interfaz computador-piezoeléctrico. También se revisan los aspectos fundamentales del código computacional que permite el envío de señales desde el computador al circuito.

### 3.1 Protocolo experimental

Se realizó un total de 3 experimentos psicofísicos sobre un grupo de 6 individuos jóvenes, 4 hombres y 2 mujeres. Estos experimentos fueron:

1. Estimación del umbral.
2. Variación de la detección con la adición de ruido.
3. Comparación de la situación con ruido en todo en intervalo v/s ruido sólo en estímulo.

En las sub-secciones siguientes se describe cada uno de ellos.

#### 3.1.1 Experimento 1: Estimación del umbral

Si bien es cierto en la psicofísica moderna el concepto de umbral está fuertemente cuestionado [36], aún es posible convenir una definición de umbral que indique un nivel de estimulación bajo el cual

el individuo muestra un nivel de detección constante independiente del método usado [31]. Así, el umbral podría ser definido, por ejemplo, como aquel nivel de estímulo para el cual se cumple que  $d' = 1$ . Por otra parte, el umbral definido en la teoría clásica corresponde a aquel nivel de estímulo que es detectado en la mitad de las presentaciones o produce un 50 % de detecciones correctas en una tarea “Sí/No” [35]. Dado que en el paradigma de la RE se apela a este umbral clásico como componente esencial, en el protocolo experimental de esta tesis se incluyó la estimación de este umbral.

Existen diversos métodos para la estimación del umbral. En el **método de los límites** al sujeto se le presenta un estímulo de intensidad particularmente alta (que se tenga certeza que la va a percibir) disminuyéndose iterativamente hasta que el individuo dice no sentir el estímulo [35]. Este experimento de las “series descendentes” tiene su contraparte: el experimento de las “series ascendentes”, en el que el estímulo inicial es muy bajo y es incrementado hasta que el individuo lo percibe. Sin embargo, la estimación del umbral obtenida por este método depende fuertemente de la intensidad inicial del estímulo, en parte porque el sujeto, en una presentación dada, sabe qué tan intenso será el siguiente estímulo que se le presentará.

En el **método de los estímulos constantes** el experimentador escoge previamente un conjunto de niveles de estimulación que serán presentados al individuo una determinada cantidad de veces [35]. Más aún, el orden de presentación de los niveles es aleatorio, de modo que el sujeto es incapaz de adivinar qué nivel de estímulo se le presentará. Con esto, es posible construir un gráfico relacionando la proporción de aciertos con el nivel de estímulo, es decir, una curva psicométrica como se ilustró en la Fig. 1.3(b). De la curva psicométrica es posible hacer una interpolación para estimar el umbral como aquel nivel que generaría un 50 % de detecciones correctas. Además, este procedimiento se puede llevar a cabo usando pruebas de elección de alternativas forzada, eliminando la dependencia en el criterio del observador. Este método, sin embargo, requiere que el experimentador tenga mayor conocimiento respecto de la sensibilidad del sujeto para una correcta elección de los niveles a usar y puede ser costoso en términos del tiempo de ejecución pues se requiere de un conjunto no pequeño de niveles para lograr una interpolación acuciosa.

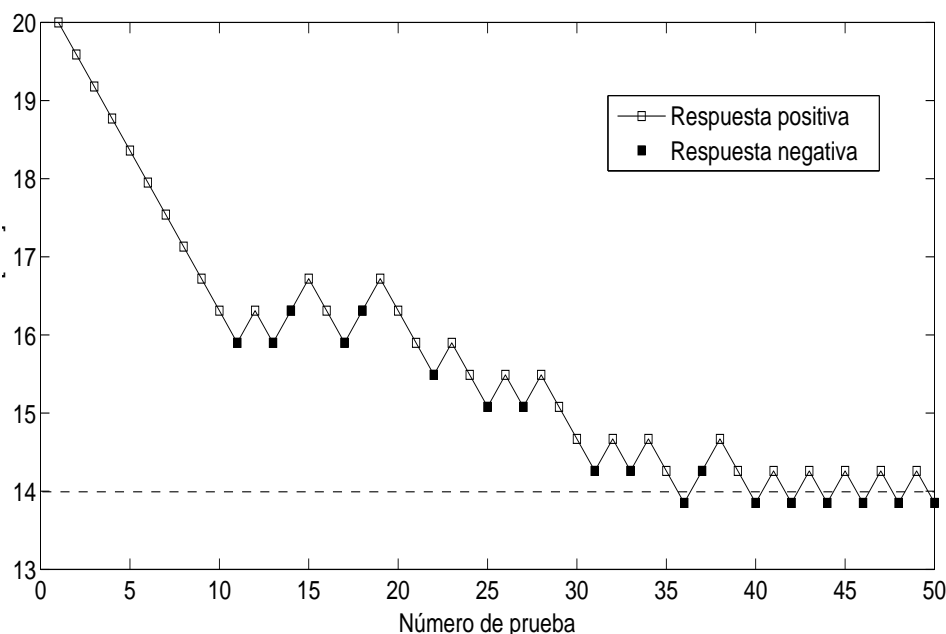
En la psicofísica actual, los **procedimientos adaptables** para la estimación del umbral están siendo cada vez más populares por su eficiencia y confiabilidad de medición [34]. Los procedimientos experimentales adaptables son aquellos en los que las características físicas del estímulo en cada instante son determinadas de acuerdo a los estímulos y las respuestas del instante anterior

o una secuencia de presentaciones anteriores. De acuerdo con el modo en que ordenan la secuencia de estímulos y a cómo estiman el resultado final, los procedimientos adaptables se dividen en tres grandes categorías:

1. **PEST** (*Parameter Estimation by Sequential Testing*). En esta categoría se aplica un test estadístico después de cada presentación a un nivel fijo para determinar si el desempeño a ese nivel es mejor o peor que un desempeño objetivo (e.g. 75 % de detecciones correctas) [34]. Una vez que se ha hecho la determinación se cambia el nivel en el paso actual de modo que el nivel se disminuye si el test indicó un desempeño mejor al objetivo y se aumenta en caso contrario. El algoritmo se detiene cuando cierto criterio en el tamaño del paso se ha alcanzado, y el umbral estimado corresponde al nivel donde se ha detenido el algoritmo.
2. **Procedimientos de máxima verosimilitud**. Aquí, ciertos conjuntos de pares estímulo–respuesta son ajustados con un tipo de función sigmoideal que ajusta la curva psicométrica, de modo que las subsecuentes intensidad de estímulo y estimación de umbral son hechas a partir de esta función [34]. El conjunto de curvas psicométricas es determinado en base a conocimiento a priori obtenido de literatura existente o pruebas pilotos.
3. **Procedimientos de escalera**. Introducidos por vez primera en 1948 por Dixon & Mood [16], en esta categoría una o más presentaciones anteriores determinan el nivel de estímulo actual, tal que respuestas negativas llevarán a un aumento del nivel y respuestas positivas a una disminución del nivel. La estimación del umbral puede ser de diversas maneras, típicamente promediando los niveles en torno al punto de equilibrio (donde hay cambios de dirección repetidamente).

De las categorías arriba descritas, las dos primeras involucran reglas de actualización del nivel de estímulo que pueden ser complejas. Además, la estimación del umbral requiere, en algunos casos, la completa secuencia de búsqueda. Por su parte, para los procedimientos de máxima verosimilitud es necesario suponer la forma de la curva psicométrica. Por último, en contraste con los procedimientos PEST, en los de escalera la actualización del nivel de estímulo, el tamaño del paso y el criterio de detención son relativamente simples y directos. Por esto, en esta tesis se optó por un procedimiento de escalera para la estimación del umbral.

El procedimiento de escalera de bajada–subida simple busca el punto medio (50 %) de una curva psicométrica que va desde un 0 % hasta un 100 % de detección, usando tareas “Sí/No” sin



**Figura 3.1:** Ejemplo de estimación adaptable de umbral por el procedimiento de escalera de bajada–subida simple. El umbral estimado se indica con una línea punteada y en este caso tiene valor 14 mN en unidades de fuerza, pues para ese nivel las respuestas del individuo oscilan entre un “Sí” y un “No”.

**Tabla 3.1:** Parámetros utilizados para el algoritmo adaptable tipo escalera de subida–bajada simple para la estimación del umbral

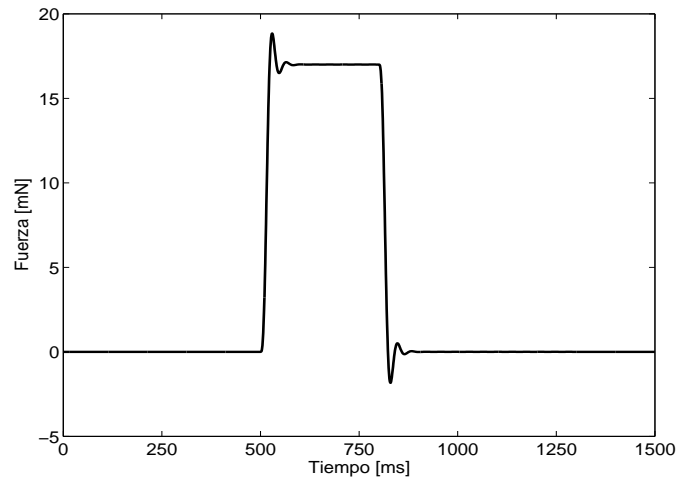
Parámetro	Valor	Unidad
Paso	0,41	mN
Número de iteraciones	50	—
Nivel de partida	Estimado para cada individuo en entrenamiento	—

*catch trials* (aquellas pruebas en que no se presenta estímulo). El algoritmo es bastante simple: cada vez que el sujeto da una respuesta positiva (“sí, siento”) el nivel de estímulo se disminuye en un paso, en caso contrario se sube un paso. Así, el objetivo es encontrar aquel nivel en que la búsqueda se movería arriba o abajo en el eje del nivel de estímulo con igual probabilidad. En la Fig. 3.1 se muestra un ejemplo de cómo varía el nivel de estímulo de acuerdo a las respuestas del individuo a lo largo de las iteraciones, estimando un umbral de 14 mN para ese caso.

En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros usados en el experimento. El nivel de partida fue escogido empíricamente durante las sesiones del entrenamiento tal que fuese lo suficientemente alto como para ser fácilmente detectado por el individuo y relativamente cercano a los valores en que la detección se le hace difícil, de modo que 50 iteraciones fueran suficientes para alcanzar el equilibrio.

La onda estimuladora utilizada fue un pulso rectangular cuya amplitud variaba de acuerdo al





**Figura 3.2:** Forma de onda utilizada para determinar el umbral: pulso rectangular (filtrado a 30 Hz pasa-bajos) de 300 ms dentro de un intervalo de atención de 1,5 s. La amplitud es arbitraria, pero está dentro del rango usual de estimulación.

algoritmo adaptable descrito. Este pulso estaba contenido en un intervalo de atención de 1,5 s (tiempo en el cual el individuo debe prestar atención para decidir si sintió o no el estímulo), fue ubicado aleatoriamente dentro del intervalo y tenía una duración de 300 ms. Además, como se describirá en la sección del montaje experimental, la señal estaba sometida a un filtrado pasa bajos que limita la estimulación de las fibras de adaptación rápida [20]. En la Fig. 3.2 se muestra la forma de onda usada como estímulo dentro del intervalo de atención de 1,5 s. El inicio de este intervalo de atención se indicaba a través de un tono enviado a un par de audífonos y mediante la pantalla de un computador (ver sección montaje experimental) que indicaba “Enviando estímulo”. El término del intervalo de atención se indicó en la pantalla mediante la pregunta “¿Sintió el estímulo?”.

### 3.1.2 Experimento 2: Variación de la detección con la adición de ruido

Determinado el umbral del individuo, se realizó una segunda experiencia en la que al mismo tipo de estímulo usado para la estimación de umbral y de **amplitud 80 % del valor del umbral**, se le sumó ruido gaussiano (que sumado al estímulo pasa por un bloque de filtrado que se describirá posteriormente) táctil de media nula y una desviación estándar que se varió en 5 niveles distintos. En esta prueba se conservaron la duración del intervalo de atención (se usaron los mismos indicadores de inicio y fin), el ancho del pulso (300 ms) y la aleatoriedad del tiempo de inicio del pulso dentro del intervalo.

Se realizaron un total de 200 pruebas para cada voluntario, de las cuales sólo 100 contenían efectivamente el pulso rectangular y las otras 100 sólo el ruido gaussiano (“*catch trials*”). Se se-

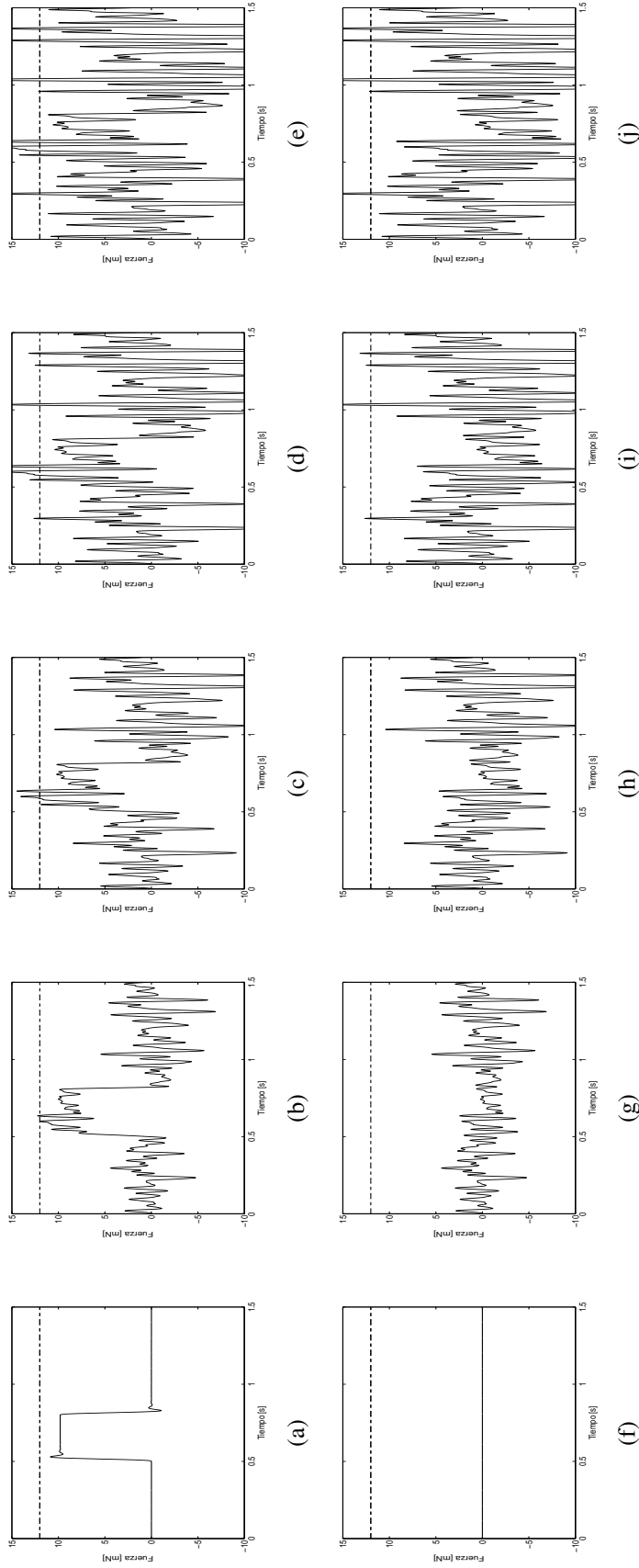
**Tabla 3.2:** Niveles de ruido usados en el experimento 2. Se indica su desviación estándar (STD) expresada como porcentaje del umbral.

Nivel	STD
0	0 %
1	15 %
2	30 %
3	45 %
4	60 %

leccionaron 5 niveles distintos de ruido totalizando 40 pruebas para cada uno de ellos, incluyendo 20 con estímulo y 20 sin estímulo. El nivel de ruido se cambiaba aleatoriamente cada 20 pruebas, luego de las cuales se presentaban 12 estímulos supra-umbrales para reforzar la memoria del individuo respecto de la forma del estímulo. Dentro de esas 20 pruebas, la probabilidad de aparición o no del estímulo dentro del intervalo de atención era 0,5. En la Tabla 3.2 se muestran los niveles de ruido utilizados caracterizados por su desviación estándar (STD), que a su vez está expresada como porcentaje del umbral. Así, la STD del ruido (se incluye el nivel cero, i.e. estímulo sin ruido y sub-umbral) depende de la fuerza del estímulo usado para cada individuo que es un porcentaje del umbral. Se debe hacer hincapié en que el hecho de expresar la STD como porcentaje del umbral no indica que el ruido esté bajo umbral puesto que se trata de otro tipo de estimulación que no tiene por qué ser caracterizada por un mismo umbral y, más aún, su STD no da cuenta de los máximos que puede tener este ruido. Así, un ruido de STD igual al 60 % del umbral resulta ser una estimulación que suele ser fuertemente percibida por el individuo.

En la Fig. 3.3 se muestran los 10 tipos posibles de estimulación correspondientes al experimento 2. En ellos, el umbral del individuo es 12,24 mN (línea punteada), por lo que el estímulo a detectar tiene una amplitud de 9,8 mN. En las sub-figuras (a), (b), (c), (d) y (e) el ruido tiene una STD de 0 mN, 1,84 mN, 3,67 mN, 5,51 mN y 7,34 mN, respectivamente (correspondientes a 0 %, 15 %, 30 %, 45 % y 60 % del umbral, respectivamente). Las sub-figuras (f), (g), (h), (i) y (j) corresponden a los “*catch trials*” de los casos anteriores.

Los resultados de este experimento para cada voluntario fueron almacenados en archivos computacionales distintos (formato TXT). En cada uno de ellos se guardó una matriz de 200 filas por 5 columnas, las filas correspondiendo a cada una de las 200 pruebas, y las columnas, a los siguientes campos: 1)Número de prueba, 2)Amplitud del estímulo (número entero que entrega el PC), 3)Nivel de ruido (STD como número entero generado por el PC), 4)Ausencia o presencia del estímulo (0=sin estímulo, 1=con estímulo), 5)Respuesta voluntario (0=NO, 1=SÍ). Así, un ejemplo



**Figura 3.3:** Tipos de estimulación usados en el experimento 2, incluyendo los 5 niveles de ruido distintos (partiendo de cero) y para cada uno de ellos las situaciones con el estímulo, (a), (b), (c), (d) y (e); y sin el estímulo, (f),(g), (h), (i) y (j)). En este ejemplo el estímulo es de amplitud 9,8 mN. Las desviaciones estándar de los ruidos añadidos, en mN, son: (a) y (f), 0; (b) y (g), 1,84; (c) y (h), 3,67; (d) e (i), 5,51; (e) y (j), 7,34.

de las 5 primeras líneas de uno de dichos archivos se muestra en la Fig. 3.4.

N°prueba	Nivel  estímulo	Nivel ruido	Presencia  de estímulo	Respuesta  sujeto
1	48	720.000000	1	0
2	48	720.000000	1	1
3	48	720.000000	1	0
4	48	720.000000	0	0
5	48	720.000000	0	0
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.

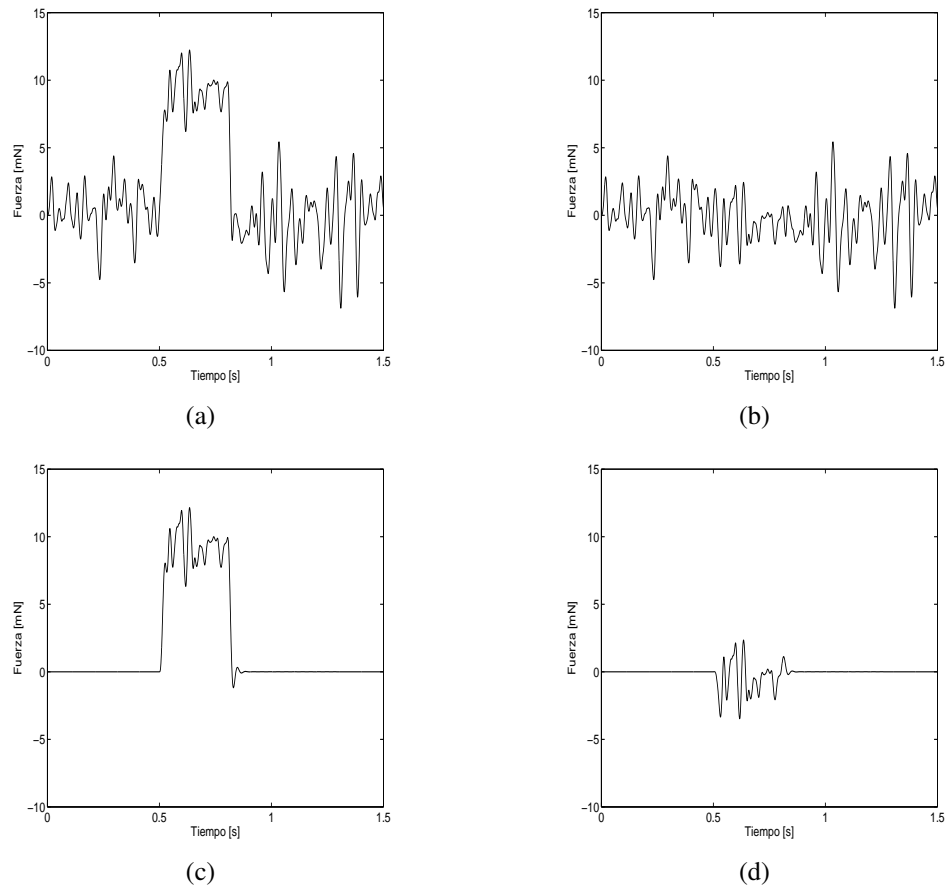
**Figura 3.4:** Ejemplos de las 5 primeras líneas de un archivo que almacena los resultados del experimento 2. Cada fila corresponde a una prueba, mientras que las columnas indican: número de prueba, nivel de estímulo, nivel de ruido, presencia de estímulo y respuesta del individuo. En este ejemplo se muestran 5 pruebas en las que la amplitud del estímulo fue de 48 (9,8 mN, 80% del umbral de 12,24 mN), más un ruido de STD de 720 (STD=5,5 mN, 45% del umbral) y donde el voluntario acertó en 3 de ellas.

### 3.1.3 Experimento 3: Comparación de la situación con ruido en todo el intervalo v/s ruido sólo en estímulo

El experimento 2 recién descrito permitió determinar un nivel de ruido óptimo,  $N_{opt}$ , para cada individuo. Este  $N_{opt}$  corresponde al nivel para el cual se produjo mayor número de detecciones correctas en dicho experimento.

Un tercer experimento fue llevado a cabo sobre los mismos 6 sujetos. En éste, el ruido no sólo fue añadido en la totalidad del intervalo de atención, sino que además se incluyeron pruebas en las que el ruido sólo estaba presente en la duración del pulso rectangular de 300 ms. Es decir, en este experimento habían pruebas en las que el ruido daba cuenta del inicio y término del estímulo a detectar.

Para esta experiencia se realizaron un total de 400 pruebas con las mismas características temporales del experimento 2, esto es, un estímulo de tipo pulso rectangular (de amplitud 80% del umbral) de 300 ms ubicado aleatoriamente dentro de un intervalo de atención de 1,5 s. En todas ellas se añadió el  $N_{opt}$  determinado en el experimento 2. Sin embargo, en sólo 200 de ellas el ruido fue añadido a todo el intervalo de atención, de las cuales sólo la mitad contenía efectivamente el estímulo, la otra mitad correspondiendo a “*catch trials*”. De las restantes 200, 100 casos incluyeron estímulo más ruido **sólo en la duración del mismo**, y 100 casos un pulso de sólo ruido de 300 ms de duración (representando una prueba sin estímulo para esta condición). Habían, entonces, dos condiciones experimentales distintas:



**Figura 3.5:** Tipos de estimulación utilizados en el experimento 3, incluyendo los dos casos donde el ruido  $N_{opt}$  (en este ejemplo igual a 1,84 mN) está en todo el intervalo de atención: (a) con estímulo (de amplitud 9,8 mN) y (b) sin estímulo; y los dos casos donde el ruido sólo está presente en la duración del estímulo: (c) con estímulo y (d) sin estímulo.

**Condición 1 (C1).** El ruido está presente en todo el intervalo de atención. Sólo en la mitad de los casos el estímulo, un pulso cuadrado de 300 ms, está presente. Total de pruebas: 200.

**Condición 2 (C2).** El ruido coincide en tiempo de inicio y duración con el estímulo, que está presente en la mitad de los casos. En la otra mitad se tiene un ruido de 300 ms de duración, correspondiendo a una situación sin estímulo para esta condición. Total de pruebas: 200.

Las cuatro situaciones posibles, es decir, condición 1 con y sin estímulo y condición 2 con y sin estímulo, se muestran en la Fig. 3.5, donde se ha ejemplificado usando un estímulo de amplitud 9,8 mN y un  $N_{opt}$  de 1,84 mN.

Las 400 pruebas fueron separadas en 5 sesiones de 80 pruebas cada una para evitar que los voluntarios se fatigaran. En cada una de esas sesiones se presentaron 20 pruebas de cada una de las cuatro situaciones descritas arriba, intercaladas al azar. Con esto se **evitó que el sujeto tuviese preferencia por una u otra condición experimental.**

Los resultados para cada voluntario fueron almacenados en archivos computacionales distintos (formato TXT). En cada archivo se almacenó una matriz de 400 filas por 5 columnas, las filas representando cada prueba y las columnas los siguientes campos: 1)Número de prueba, 2)Intensidad de estímulo (número entero generado por el computador), 3)Varianza del ruido (número entero generado por el computador), 4)Tipo de estimulación (0=Con estímulo (pulso cuadrado de 300 ms) más ruido en todo el intervalo de atención, 1=Con estímulo más ruido sólo en su duración, 2=Sin estímulo y ruido en todo el intervalo, 3=Sin estímulo y ruido sólo en pulso de 300 ms) y 5)Respuesta del individuo (0=NO, 1=SÍ).

### **3.1.4 Voluntarios**

Las pruebas psicofísicas fueron hechas sobre 6 individuos voluntarios jóvenes y sanos, dos mujeres y cuatro hombres. La edad promedio del grupo fue 23 años y 6 meses, con una edad mínima de 22 años y una máxima de 25 años. Todos ellos reportaron no tener desórdenes neurológicos que pudiesen influir en su desempeño ni estar tomando medicamentos.

Los individuos fueron familiarizados con el sistema experimental en algunas sesiones de entrenamiento. Más aún, todos ellos ya habían tenido experiencias previas en experimentos involucrando sensaciones vibrotáctiles en el dedo índice. Se escogió, para la estimulación, el dedo índice por ser éste ampliamente usado en pruebas de estimulación táctil [22] [40] [41] [50] [52] además de tener una gran resolución espacial [5].

Los sujetos debían sentarse en frente de un computador mirando la pantalla y con su brazo derecho descansando sobre una almohadilla en una superficie sólida con su dedo índice tocando un estimulador piezoeléctrico. Además, debían usar un par de audífonos para aislar el ruido acústico externo y para escuchar señales auditivas de aviso del comienzo de la estimulación táctil. En la Fig. 3.6 se muestra la posición del individuo para el experimento. Los estímulos en ningún caso representaban alguna amenaza a la integridad física de los sujetos; éstos eran pequeños desplazamientos de la punta roma de plástico sobre la piel que en la mayoría de los casos se acercaban al límite de percepción de los individuos, es decir, estaban muy lejos de producir algún tipo de molestia o dolor.

Los 6 sujetos fueron sometidos cada uno a los mismos tres experimentos descritos. Recibieron un estipendio monetario por su participación y debieron firmar un formulario de consentimiento informado. A cada uno se le asignó un identificador numérico del 1 al 6 para otorgar mayor



**Figura 3.6:** Ubicación y acomodación del voluntario durante las pruebas psicofísicas, mirando la pantalla de un computador y apoyando su brazo en una superficie tal que su dedo índice queda en permanente contacto con un estimulador.

confidencialidad a los datos.

## 3.2 Montaje experimental

Los elementos principales del montaje experimental son tres:

1. El computador que genera las formas de onda a enviar al piezoeléctrico.
2. El circuito que transforma la información que viene del computador en una señal de voltaje apropiada para el piezoeléctrico.
3. El dispositivo piezoeléctrico y los elementos estructurales que lo soportan, constituyendo el sistema que permite estimular el dedo índice de un sujeto.

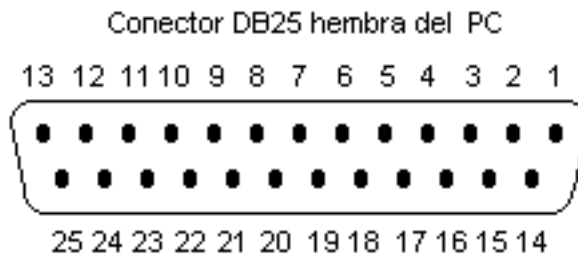
El dispositivo piezoeléctrico y la estructura ad hoc que le da el soporte mecánico fueron heredados de la investigación previa en umbrales vibrotáctiles, de modo que no hubo necesidad de construir esta pieza del montaje. Por su parte, el circuito de interfaz computador-piezoeléctrico fue construido sobre la base del circuito usado en dicha investigación y se conservaron algunos de sus bloques importantes como el *buffer* y la amplificación final, pero se reemplazó el convertidor digital/análogo y se añadió un filtro pasa bajos (ver detalle en secciones siguientes). El computador no había sido usado previamente y, respecto de trabajos anteriores, ahora se usó mayor cantidad de información desde el puerto paralelo.

### 3.2.1 Computador como generador de señales

Se trabajó con un computador personal con procesador *Pentium II* de velocidad 400 MHz y memoria RAM de 256 KB. El sistema operativo de dicho computador es el Microsoft Windows 2000 (*Service Pack 4*). El *software* implementado fue escrito en lenguaje C usando el editor y el compilador del Microsoft Visual C++ versión 5.0. Más detalles acerca del programa computacional implementado se encuentran en la sección respectiva en este mismo capítulo.

Por su simplicidad de manejo se usó el puerto de comunicaciones paralelo (LPT2) para el envío de datos desde el computador al circuito interfaz. La información fue manejada de manera unidireccional, esto es, sólo se transmitieron señales de voltaje desde el puerto paralelo hacia el circuito externo y no viceversa. El puerto paralelo, en este caso de dirección 0x378h (hexadecimal), trabaja con voltajes en la lógica TTL, o sea, 0 Volts para un 0 lógico y 5 Volts para un 1 lógico.





**Figura 3.7:** Esquema de los pines del puerto paralelo del PC (conector hembra) con la numeración estándar.

En la Fig. 3.7 se muestra un esquema de los pines que se encuentran en el puerto paralelo con la numeración estándar, mientras que en la Tabla 3.3 se listan los usos que se les da a cada uno de ellos.

En el diseño original las líneas de control son usadas para el control e intercambio de mensajes desde el PC al dispositivo externo. Las líneas de estado son usadas para intercambio de mensajes, indicadores de estado desde el dispositivo al PC (e.g., para el caso de una impresora: falta papel, impresora ocupada, error en la impresora). Las líneas de datos suministran los datos desde el PC hacia el dispositivo y solamente en esa dirección. Cada una de estas líneas (control, estado, datos) puede ser referidas de modo independiente mediante un registro. En este caso se usaron un total de 12 pines del puerto paralelo para el envío de datos, esto es, 12 bits de información, asegurando un total de  $2^{12} = 4096$  niveles de voltaje, resolución en la escala de voltajes que fue necesaria para disponer de los niveles de ruido gaussiano apropiados requeridos para el experimento (ver detalles en la sección Programa computacional para la generación de señales, la parte de generación del ruido gaussiano). Los pines del puerto paralelo usados fueron:

- Las ocho líneas de datos: pines 2 a 9. Éstas están activas con voltaje en alto (5 Volts).
- Las cuatro líneas de control: pines 1, 14 y 17 que están activos con voltaje en bajo (0 Volts) y el pin 16, activo en alto.

Para la conexión del puerto paralelo con el circuito externo se usó un cable paralelo con conectores machos en ambos extremos más un conector hembra con los cables de cobre soldados en los pines mencionados arriba.

**Tabla 3.3:** Pines del puerto paralelo: señal transmitida, tipo de uso (desde el punto de vista del PC) y actividad (voltaje en alto o bajo).

Pin	Señal	Tipo	Activo
1	Control 0	Salida	Bajo
2	Dato 0	Salida	Alto
3	Dato 1	Salida	Alto
4	Dato 2	Salida	Alto
5	Dato 3	Salida	Alto
6	Dato 4	Salida	Alto
7	Dato 5	Salida	Alto
8	Dato 6	Salida	Alto
9	Dato 7	Salida	Alto
10	Estado 6	Entrada	Alto
11	Estado 7	Entrada	Bajo
12	Estado 5	Entrada	Alto
13	Estado 4	Entrada	Alto
14	Control 1	Salida	Bajo
15	Estado 3	Entrada	Alto
16	Control 2	Salida	Alto
17	Control 3	Salida	Bajo
18–25	Tierra		



**Figura 3.8:** Bloques esenciales del circuito que convierte las señales digitales desde el PC a señales de voltaje apropiadas para el piezoeléctrico.

### 3.2.2 Circuito interfaz computador-piezoeléctrico

Un elemento fundamental del montaje experimental es el circuito que transforma las señales digitales desde el computador en voltajes analógicos apropiados para el piezoeléctrico. La idea esencial de este circuito es recibir los bits de datos desde las doce líneas usadas del puerto paralelo, aplicarles un seguidor de voltaje o *buffer* de ganancia unitaria, lograr la conversión de señal digital a analógica, realizar filtrado pasa bajos y amplificación. Los bloques esenciales de este circuito se muestran en la Fig. 3.8.

El primer bloque o *buffer* captura los bits o líneas de información desde el puerto paralelo con una alta impedancia de entrada. En su salida entrega el mismo voltaje de entrada pero ahora con una baja impedancia de salida. Con esto se logra que el bloque circuital posterior a este *buffer* no sobrecargue las señales desde el puerto paralelo y así no pueda intervenir en la correcta operación

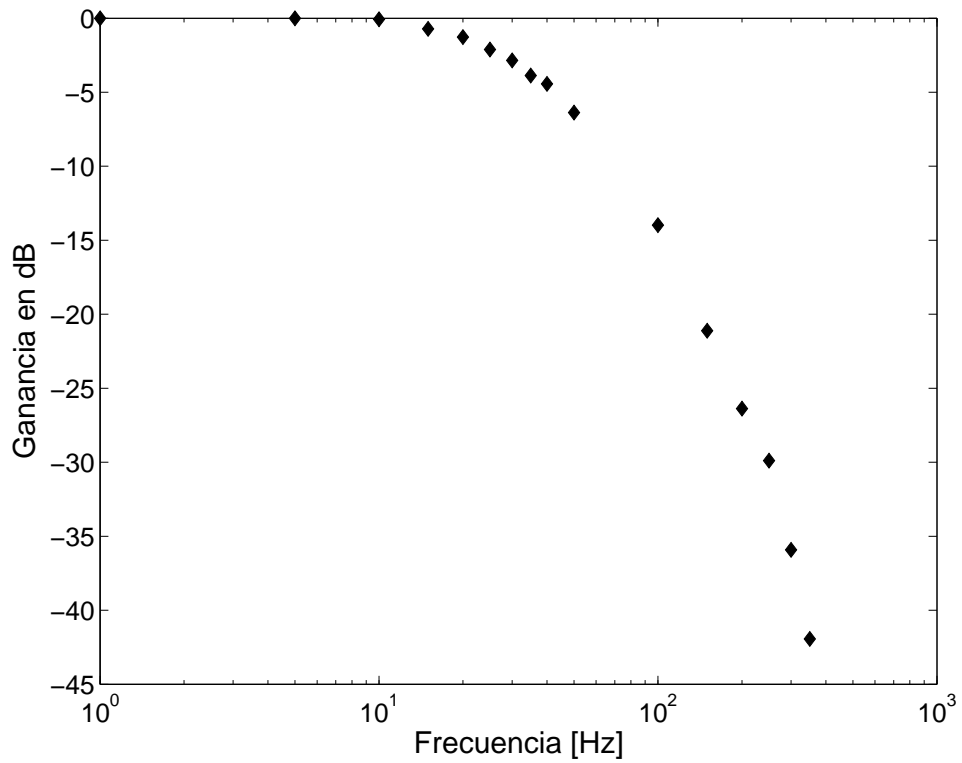
del mismo. En este circuito se usaron dos 74LS367 o *buffers* de seis entradas, totalizando doce líneas. Además, el 74LS367 posee dos puertas de control que abren o cierran el paso de 3 líneas cada una, aunque en este caso estuvieron conectadas siempre a tierra de modo de siempre permitir el paso de la información.

El bloque de conversión digital a analógico consta esencialmente de un convertidor A/D de 12 bits, el AD7521 (fabricante Intersil). Este recibe directamente como entradas las doce líneas desde los dos *buffers* y entrega una salida como señal de corriente. En su modo de operación bipolar (usado aquí) en el que la salida puede tomar tanto valores negativos como positivos, requiere la conexión de dos amplificadores operacionales (en este caso LM741) para transformar la señal de corriente en voltaje. Además, con un potenciómetro conectado a uno de los operacionales se ajusta el rango del voltaje de salida deseado.

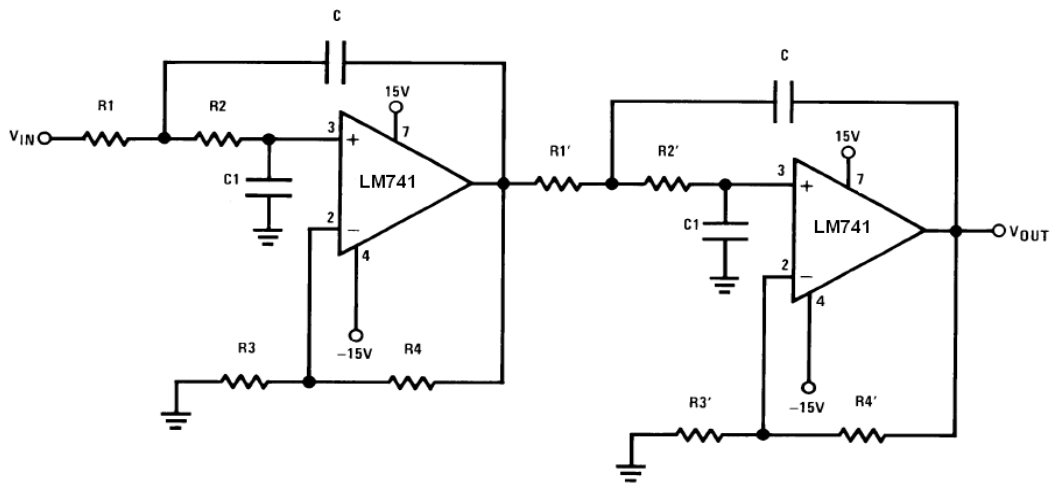
Con el objeto de limitar la estimulación táctil de las fibras de adaptación rápida [20] y así seguir el protocolo usado en demostraciones previas [9] [10], se debió implementar un bloque de filtrado pasa bajos con frecuencia de corte de 30 Hz. Se optó por un diseño de filtro activo Butterworth de cuarto orden [37] por ser relativamente simple de implementar, tener una función de transferencia de corte razonablemente abrupto y no modificar en demasía la amplitud de la señal en la banda de paso. En la Fig. 3.9 se ve la respuesta en frecuencia de este filtro en decibelios, que muestra que a 30 Hz la ganancia ha caído aproximadamente  $-3$  dB (definición usual de la frecuencia de corte), mientras que por sobre 50 Hz ya está por debajo de los  $-10$  dB. La implementación del filtro pasa bajos se hizo con dos amplificadores operacionales (LM741) en serie más algunos elementos pasivos (resistencias y condensadores) cuyas magnitudes fueron calculadas para obtener la frecuencia de corte de 30 Hz y una ganancia unitaria en la banda de paso. Un esquema del circuito de este filtro es el que se muestra en la Fig. 3.10. Para tener  $f_c \approx 30$  Hz se puede escoger  $R_2 = R_2' = 100$  k $\Omega$ ,  $R_1 = R_1' = 82$  k $\Omega$ ,  $C = 10$  nF y  $C_1 = 22$  nF. Asimismo, para que la ganancia sea unitaria basta tomar  $R_3 = R_3' = 0$ .

Por último, el bloque de amplificación final requiere el uso de un amplificador de alto voltaje que eleve la señal a valores en torno a las decenas de Volts que estén dentro del rango de operación del piezoeléctrico y que además genere señales eléctricas cuya transducción corresponda a señales mecánicas perceptibles para el observador. Esto se logra con el amplificador operacional LM343 alimentado con  $\pm 40$  V.

El circuito final construido es el que se muestra en la Fig. 3.11 con todos los detalles de los valo-



**Figura 3.9:** Gráfico de la respuesta en frecuencia –medida experimentalmente– del filtro pasa bajos Butterworth de cuarto orden.



**Figura 3.10:** Esquema detallado del circuito del filtro pasa bajos Butterworth de cuarto orden.

res de los elementos pasivos y los números exactos de las conexiones entre los pines de los circuitos integrados. Cabe mencionar que la resistencia y el condensador que acompañan al piezoeléctrico en la etapa final corresponden a un pequeño filtro pasa bajos pasivo para eliminar componentes de muy alta frecuencia que pudiesen estar interfiriendo la señal del piezoeléctrico.

### 3.2.3 Estimulador táctil: dispositivo piezoeléctrico

La transducción de señales eléctricas de voltaje en energía mecánica que ulteriormente estimulan el sistema táctil del sujeto, la realiza un pequeño dispositivo piezoeléctrico rectangular de doble capa del fabricante Morgan Matroc. Sus dimensiones son: 23 mm de largo, 3 mm de ancho y 0,5 mm de grosor. Fue dispuesto a manera de voladizo sobresaliendo 16 mm de una prensa plástica (llamada Technil) y montándole un pequeño cilindro plástico de 0,56 mm de diámetro y 16 mm de largo sobre su extremo libre, como se esquematiza y muestra en la Fig. 3.12. La punta de este cilindro de plástico es roma, esférica y más ancha (de diámetro 1,5 mm), y es la que finalmente queda en permanente contacto con el dedo índice del sujeto. Los dedos del voluntario, a su vez, descansan en una cubierta acrílica con una perforación circular de 5 mm para permitir que la punta roma toque la piel. La prensa plástica que da soporte al piezoeléctrico, por su parte, está montada en una estructura metálica de balance que permite mantener una fuerza constante sobre la piel de aproximadamente 0,022 N. El conjunto de la estructura metálica soportando la prensa plástica que afirma el piezoeléctrico más la cubierta acrílica donde descansan los dedos del sujeto, se muestran en la fotografía de la Fig. 3.13.

Dispositivos piezoeléctricos de las mismas características han sido usados previamente [40] [41] [47], y más aún, se ha determinado que su consumo de potencia necesario para cierto nivel de estimulación es menor que el de otros dispositivos como los electromecánicos [47].

La fuerza generada por el piezoeléctrico es proporcional al voltaje aplicado a sus terminales eléctricos y está descrita por la siguiente relación dada por el fabricante [15]:

$$F = Y_{11}^E d_{31} \frac{wt}{l} V \quad (3.1)$$

donde,

$F$  = Fuerza generada por el piezoeléctrico en Newtons.

$Y_{11}^E$  = Módulo de Young o de elasticidad.

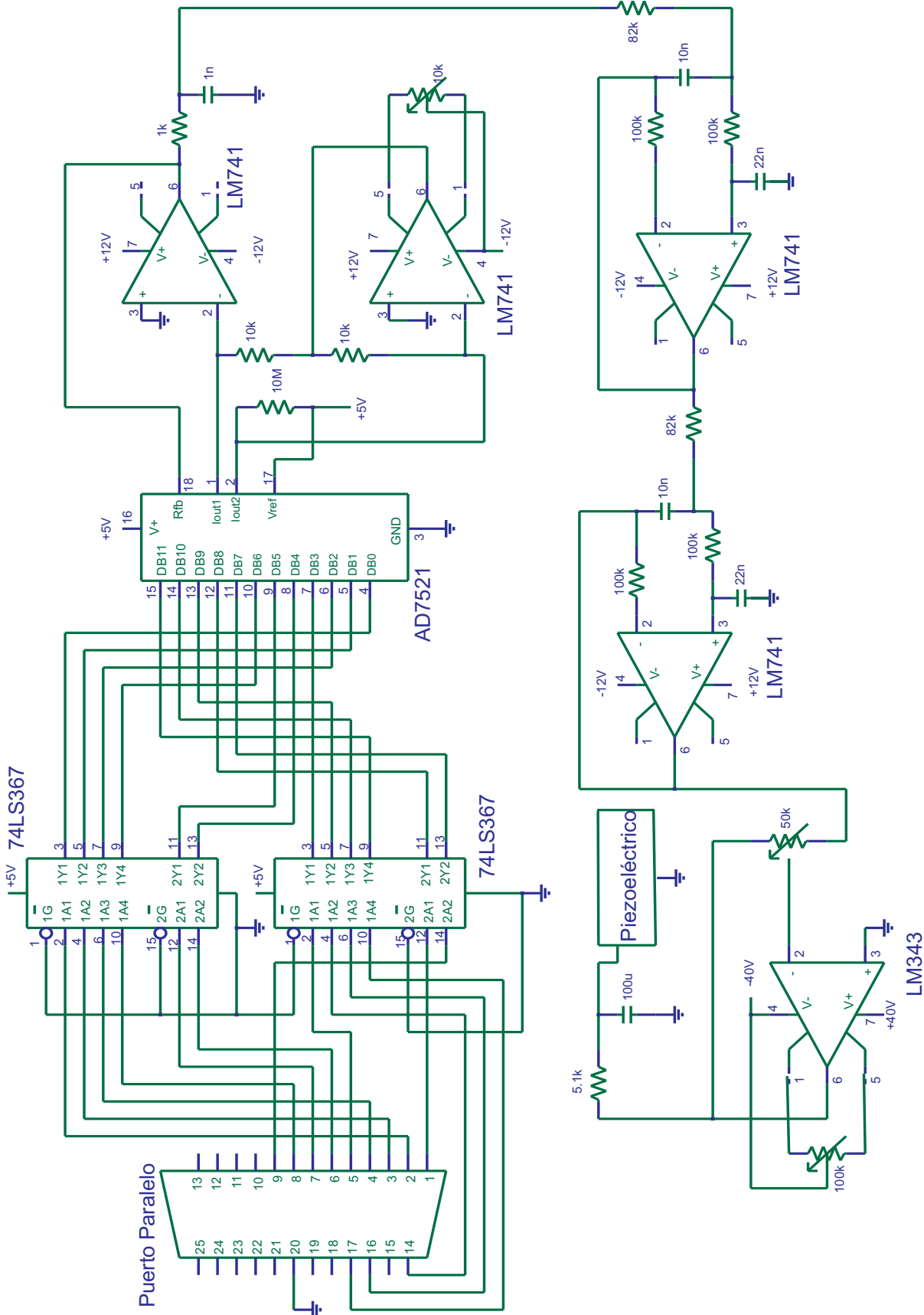
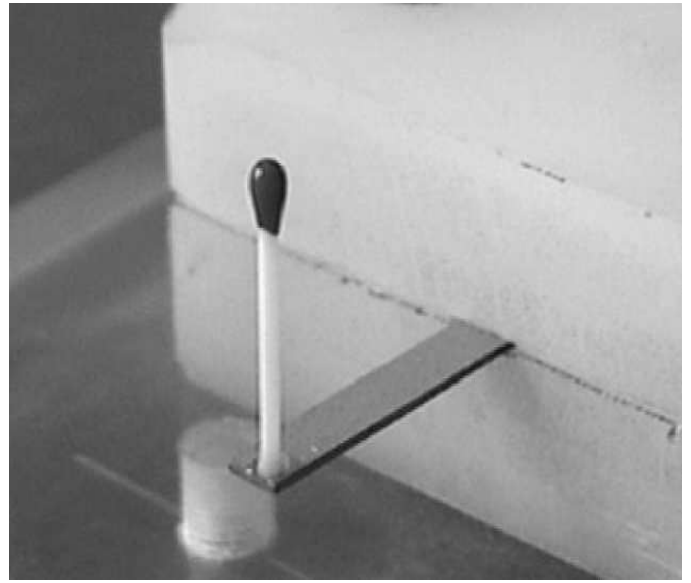
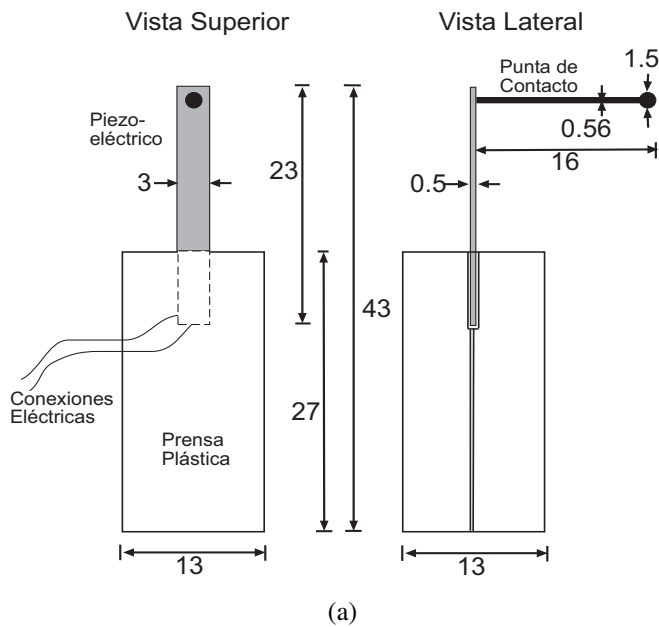


Figura 3.11 : Esquema detallado del circuito interfaz PC-piezoelectrico.



**Figura 3.12:** (a) Esquema de las dimensiones (en mm) del piezoeléctrico, la prensa plástica y el cilindro plástico de contacto. (b) Fotografía que muestra la disposición del piezoeléctrico sujetado con la prensa plástica, más el cilindro de contacto montado sobre el piezoeléctrico.

$d_{31}$  = Coeficiente del piezoeléctrico en la dirección longitudinal.

$w, t, l$  = Ancho, grosor y largo del piezoeléctrico, respectivamente.

$V$  = Voltaje aplicado en Volts.

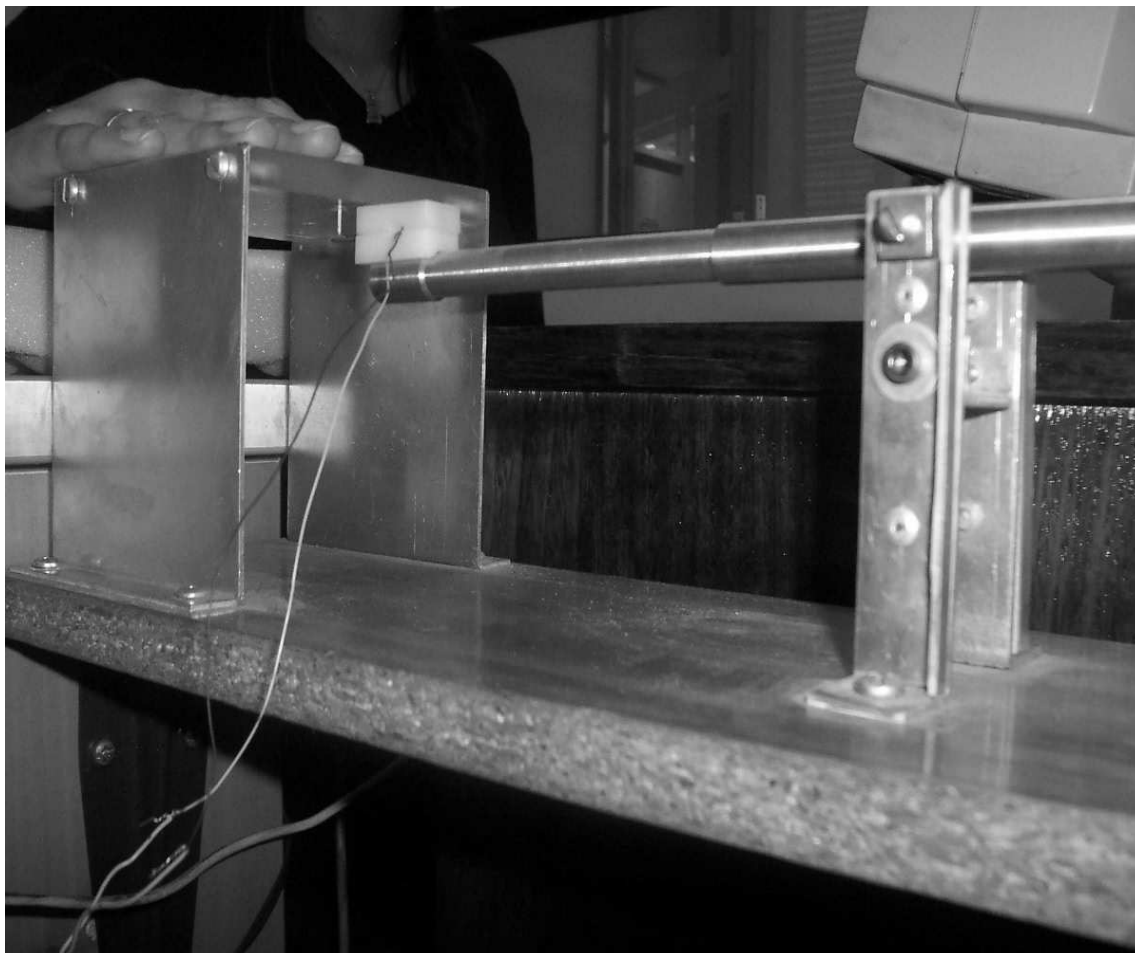
Recordando que las dimensiones del piezoeléctrico son  $w = 3$  mm,  $t = 0,5$  mm y  $l = 23$  mm, y notando que de acuerdo a la especificación del fabricante  $d_{31} = 171 \cdot 10^{-12}$  m/V e  $Y_{11}^E = 6,1 \cdot 10^{10} \frac{N}{m^2}$ , entonces la fuerza generada expresada en mN sería:

$$F = 0,6802 \cdot V \quad (3.2)$$

con  $V$  medido en Volts. Algunos pares voltaje-fuerza se muestran en la Tabla 3.2, donde el voltaje está en el rango usual de operación.

### 3.3 Programa computacional para la generación de señales

El código del *software* que maneja el envío de señales por el puerto paralelo fue escrito en lenguaje C. Las partes esenciales de este código son primero la generación de los números enteros que servirán de muestras a decodificar en el circuito externo, y segundo, la escritura de estos números en el puerto paralelo.



**Figura 3.13:** Montaje completo del aparato estimulador táctil, incluyendo la estructura metálica de balance, la prensa plástica que sostiene el piezoeléctrico con la punta cilíndrica de contacto, y la cubierta acrílica.

**Tabla 3.4:** Algunos valores de la relación voltaje aplicado-fuerza generada del piezoeléctrico.

Voltaje V	Fuerza mN
0	0
3	2,04
6	4,08
9	6,12
12	8,16
15	10,20
18	12,24
21	14,28
24	16,32
27	18,37
30	20,41



### 3.3.1 Generación de muestras

Los números enteros que representan las muestras de los pulsos cuadrados a enviar por el puerto paralelo se generan principalmente en la función cuyo encabezado es:

```
void EnviaPulso(unsigned short A,float Ttot, float T, char  
sr,float std)
```

donde las variables de entrada son:

unsigned short A : entero de 12 bits, sin signo, indicando la amplitud del pulso.

float Ttot : número real que indica la duración, en milisegundos, del intervalo de atención.

float T : número real que indica la duración, en milisegundos, del pulso cuadrado.

char sr : carácter para indicar la presencia o ausencia de ruido en el intervalo de atención y/o en el pulso.

float std : desviación estándar del ruido, en caso de haber.

Dependiendo del valor del parámetro “sr” hay tres casos distintos de generación de las muestras:

1. (sr=1 ) Hay ruido en todo el intervalo de Ttot ms. En cada instante la muestra generada es “cero+A+r ”.
2. (sr=2 ) Hay ruido sólo en la duración del pulso. En cada instante la muestra generada es “cero ”, salvo en Tms donde es “cero+A+r ”.
3. (sr=3 ) No hay ruido. La función envía al puerto paralelo el valor de “cero+A ” durante Tms.

En la descripción anterior “cero” es un entero de 12 bits sin signo (unsigned short ) que corresponde al nivel de voltaje cero en el piezoeléctrico. Se escogió  $\text{cero}=2048$  , que cae en la mitad de rango total de números enteros sin signo con 12 bits ( $2^{12} = 4096$ ). Por su parte “r” es un número generado con una función generadora de números aleatorios descrita abajo.

## Ruido gaussiano

Dado que en C no se tiene una función que genere números aleatorios gaussianos, es necesario generarlos a partir de números aleatorios uniformemente distribuidos en un intervalo, los que sí son posibles de generar en C. Si  $x_1$  y  $x_2$  son dos variables aleatorias distribuidas uniformemente en  $[-1,1]$  tales que  $x_1^2 + x_2^2 < 1$ , entonces una variable aleatoria  $y$  de distribución gaussiana de media cero y desviación estándar  $\sigma$  se puede aproximar por [4]:

$$y = \sigma x_1 \sqrt{\frac{-2 \ln(x_1^2 + x_2^2)}{x_1^2 + x_2^2}} \quad (3.3)$$

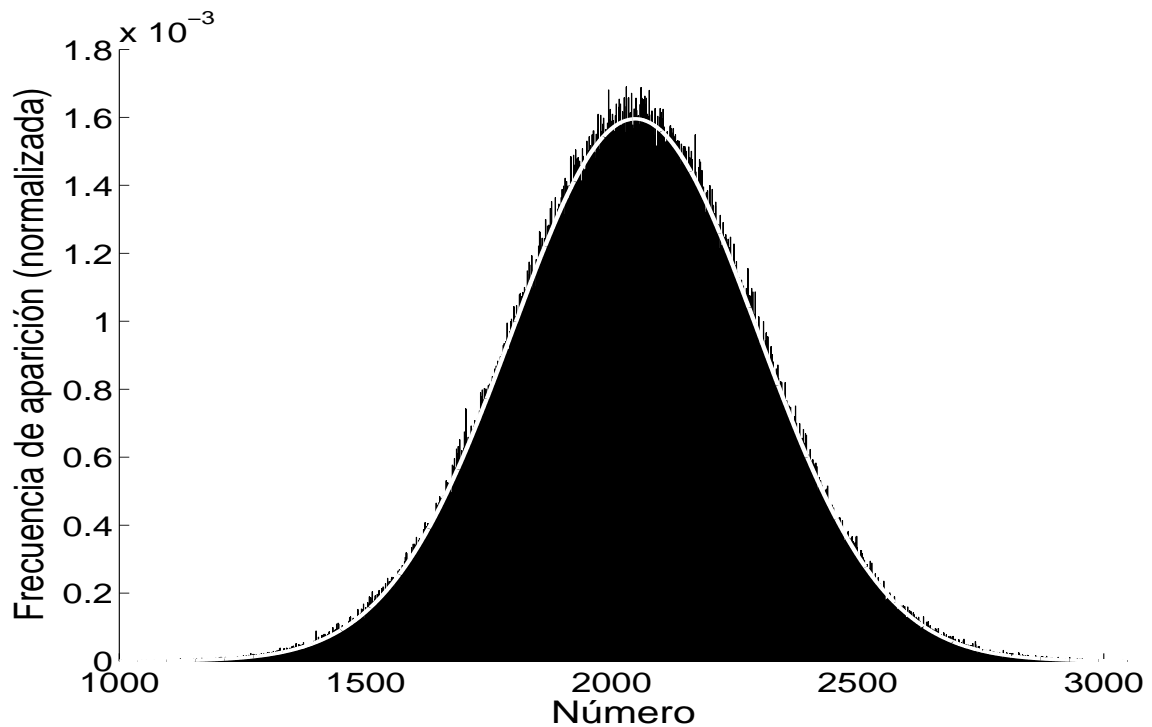
De este modo, el código C que implementa esta función generadora de números gaussianos es:

```
float ruido(float std) {
    float x1, x2, w, y;
    do{ x1=((float) rand())/RAND_MAX;
        x1=2.0*x1-1.0;
        x2=((float) rand())/RAND_MAX;
        x2=2.0*x2-1.0;
        w=x1*x1+x2*x2;
    }while(w >= 1.0);
    y=std* x1* sqrt((-2.0*log(w)/log(2.712))/w);
    return y;
}
```

En la Fig. 3.14 se muestra un histograma de los números que genera el programa al usar esta función (con argumento 250, la desviación estándar) y convertirlos en enteros sin signo de 12 bits a los que se les ha sumado un cero de referencia igual a 2048. En el histograma las frecuencias están normalizadas para compararlas con una distribución gaussiana de media 2048 y desviación 250 que también se muestra en el gráfico como una línea sobrepuesta. Se observa que los números generados se acercan bastantes a una distribución normal.

## Relación número entero-voltaje

Un número entero generado por el programa es convertido en voltaje para el piezoeléctrico como se explicó en la sección del montaje experimental. La conversión número generado–nivel de voltaje



**Figura 3.14:** Frecuencia de aparición (normalizada, i.e. dividida por el total de muestras) de los números enteros generados por *software* como una distribución gaussiana de media 2048 y desviación estándar 250. Se muestra además la curva *real* de una distribución gaussiana con los mismos parámetros.

en el piezoeléctrico es aproximadamente lineal y queda bien representada por la Ec. 3.4:

$$V = \frac{N \cdot 30}{100} \quad (3.4)$$

donde  $V$  es el nivel de voltaje en Volts y  $N$  es el número que genera el computador como un entero sin signo de 12 bits.

Se debe notar que si la desviación estándar de los números enteros generados como distribución gaussiana tiene un valor entero  $D$ , entonces la desviación del ruido respectivo en Volts,  $DV$ , entregado al piezoeléctrico no es  $D \cdot 30/100$ , sino que sufre una atenuación producto del filtrado pasa-bajos, resultando:

$$DV = \frac{1,1 \cdot D}{100} \quad (3.5)$$

### 3.3.2 Envío de muestras al puerto paralelo

Windows 98, 2000 y XP no permiten el acceso directo al puerto paralelo por razones de seguridad y estabilidad del sistema. Sin embargo, aún es posible tener acceso a él usando una “bi-

biblioteca de enlace dinámico” o DLL<sup>1</sup>(archivo io.dll). Esta biblioteca permite el uso de la función “PortOut(short int Port, char Data)” que escribe un carácter “Data” en la dirección “Port”, típicamente especificada como número hexagesimal.

Los primeros 16 bits del puerto paralelo, en grupos de 8, se acceden con las direcciones:

```
PORTA1=0x378 PORTA2=0x37a
```

Un entero de 12 bits sin signo (en C: “unsigned short”) “muestra” debe entonces ser separado en una “parte alta” de 4 bits y una “parte baja” de 8 bits:

```
unsigned char ParteAlta=muestra>>8; unsigned char
ParteBaja=muestra&255;
```

donde el operador “>>” desplaza los bits de un número hacia la derecha, y “&” es un “y” lógico de bit a bit (el 255 equivale a un 11111111 binario). Además, de la Tabla 3.3, el segundo bit de estado está activo en baja, por lo que se debe negar su valor lógico. Esto se logra con un “o exclusivo” lógico (operador “^” en C):

```
ParteAlta=ParteAlta^11;
```

donde el número 11 equivale a un 1011 binario.

---

<sup>1</sup>Del inglés, *Dynamic Linking Library*.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Experimento 1: Umbrales

Los umbrales táctiles medidos para los 6 individuos se listan en la Tabla 4.1, donde además se muestra el promedio y la desviación estándar. En los 6 casos se vio una rápida convergencia del algoritmo adaptable de estimación del umbral, lográndose en todos ellos no más de 30 iteraciones para alcanzar el equilibrio. En todos los casos el punto de partida no estuvo lejos del umbral alcanzado, asegurando la confiabilidad de la medición [31].

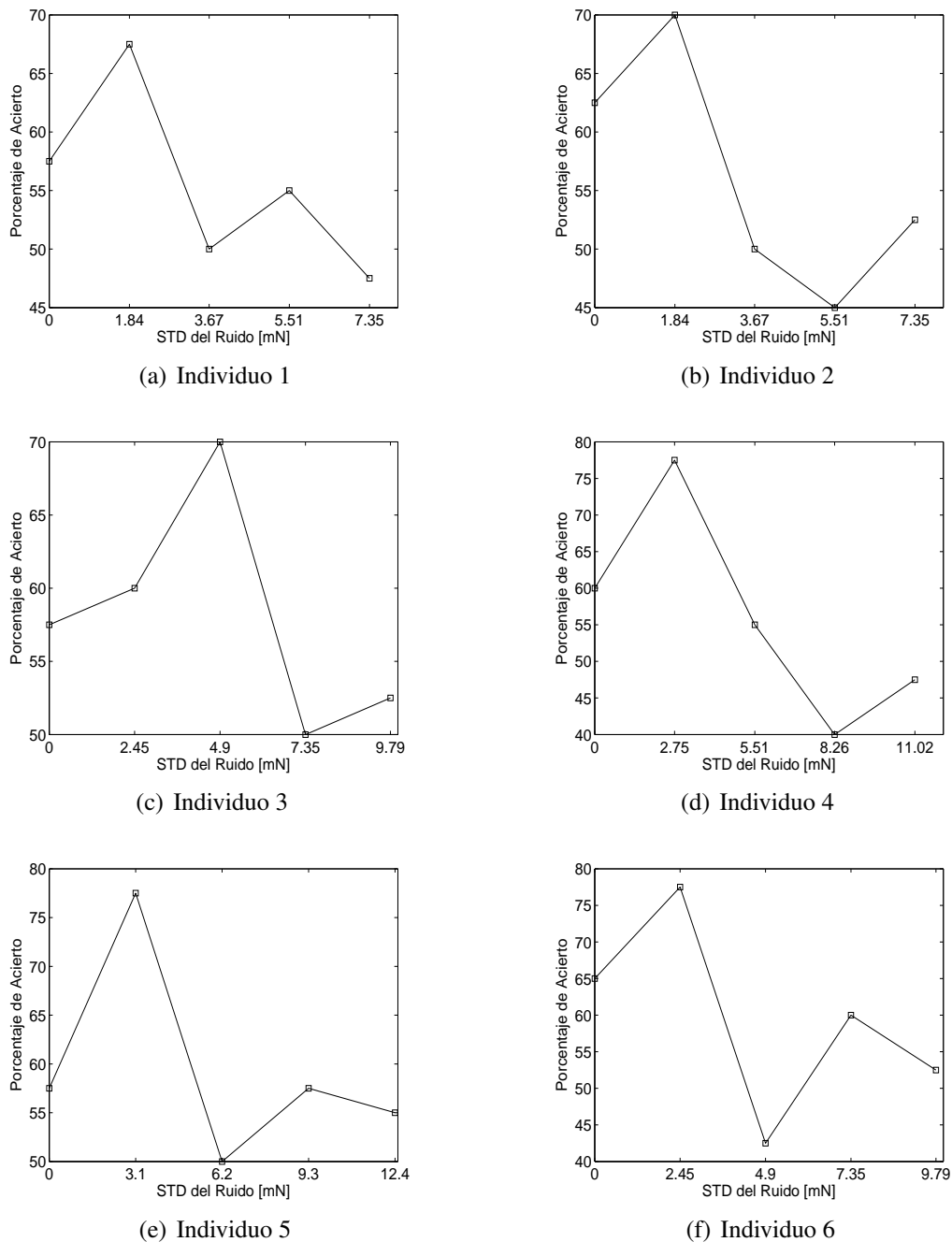
**Tabla 4.1:** Umbrales táctiles de los 6 individuos, expresados en voltajes y en fuerzas. Se muestra además el promedio y la desviación estándar (STD).

Individuo	Umbral [V]	Umbral [mN]
1	18	12,24
2	18	12,24
3	24	16,32
4	27	18,37
5	30,6	20,81
6	24	16,32
Promedio	23,6	16,05
STD	4,97	3,38

### 4.2 Experimento 2: Determinación del ruido óptimo

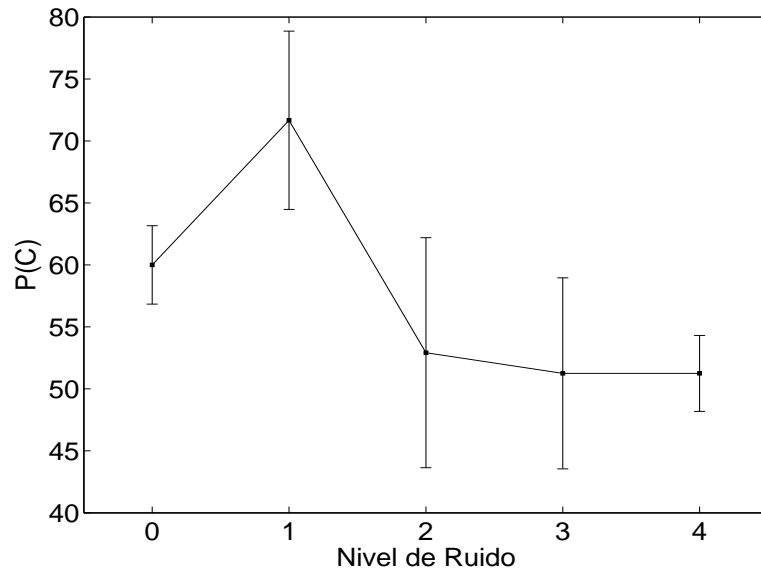
Usando la Ec. 1.3 para el cálculo del porcentaje de detecciones correctas,  $P(C)$ , se graficó para cada voluntario su desempeño en las distintas condiciones de ruido agregado. En la Fig. 4.1 se muestran las curvas de detección del estímulo en términos de la desviación estándar (STD) del ruido añadido para cada uno de los 6 individuos. La información agregada de los 6 individuos se muestra en la

Fig. 4.2 como un gráfico que muestra los promedios (con las respectivas desviaciones estándar) de detecciones correctas entre todos los individuos para cada nivel de ruido etiquetados de 0 a 4.



**Figura 4.1:** Porcentaje de detecciones correctas en función del nivel de ruido añadido (expresado en términos de su desviación estándar (STD)) para los 6 individuos.

También se evaluó el desempeño de los individuos con la medida de detectabilidad  $d'$  de la TDS (Ec. 1.5). En la Fig. 4.3 se muestran los 6 gráficos, uno para cada individuo, de la relación entre  $d'$  y el nivel de ruido, donde  $d'$  se ha estimado bajo el supuesto de distribuciones normales.



**Figura 4.2:** Promedios de porcentajes de detecciones correctas,  $P(C)$ , entre los 6 sujetos en función del nivel de ruido. Las líneas verticales simbolizan más y menos las respectivas desviaciones estándar.

De acuerdo a la proporción de aciertos (ver Fig. 4.1), para cada individuo existe sólo un nivel óptimo de ruido que produce el mayor porcentaje de detecciones correctas. Este nivel óptimo no coincide con el ruido óptimo según  $d'$  en dos sujetos; ver capítulo de discusión. En la Tabla 4.2 se lista el ruido óptimo para cada sujeto, indicando también el correspondiente porcentaje de acierto obtenido y el número del nivel de ruido dentro de los 5 presentados, partiendo del nivel de ruido nulo.

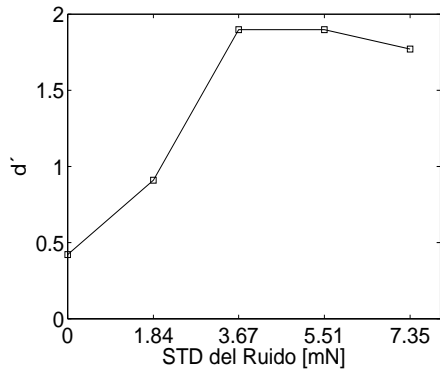
**Tabla 4.2:** Niveles óptimos de ruido,  $N_{opt}$ , para cada individuo (expresados como la desviación estándar (STD) en unidades de fuerza) y los respectivos porcentajes de acierto ( $P(C)$ ).

Individuo	Nivel	STD de $N_{opt}$ en mN	$P(C)$ para $N_{opt}$
1	1	1,47	67,5
2	1	1,47	70
3	2	3,92	70
4	1	2,20	77,5
5	1	2,48	77,5
6	1	1,96	77,5

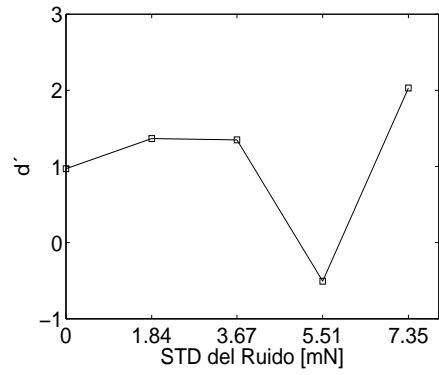
### 4.3 Experimento 3: Ruido como puntero de la ubicación temporal del estímulo

Recapitulando, en este experimento hay dos condiciones experimentales claramente diferenciables:

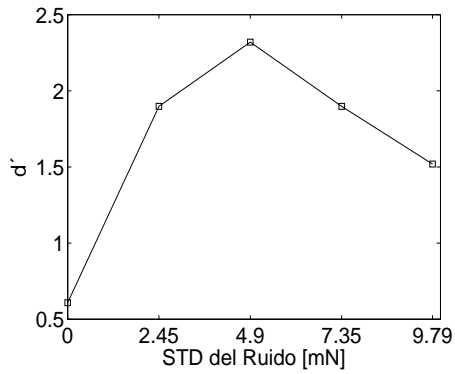
**Condición 1 (C1).** El ruido está presente en todo el intervalo de atención. Sólo en la mitad de los



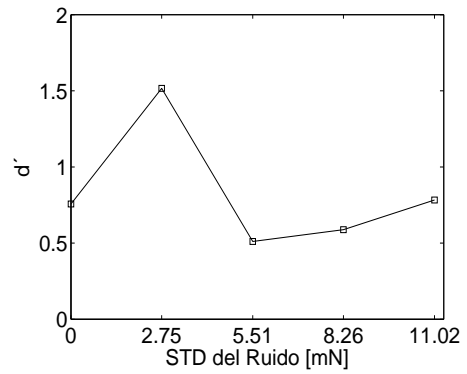
(a) Individuo 1



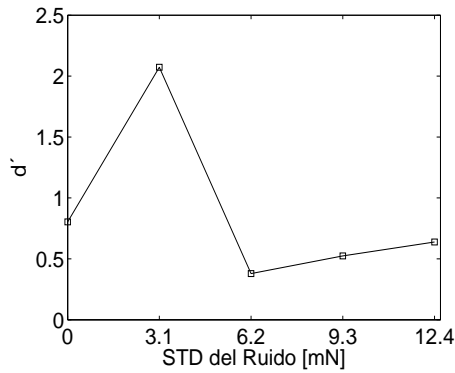
(b) Individuo 2



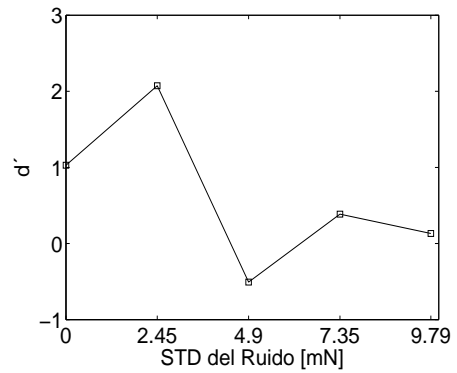
(c) Individuo 3



(d) Individuo 4



(e) Individuo 5



(f) Individuo 6

**Figura 4.3:** Detectabilidad  $d'$  en términos del nivel de ruido añadido (representado por su desviación estándar (STD) para los 6 individuos.

casos el estímulo está presente.

**Condición 2 (C2).** El ruido coincide en tiempo de inicio y duración con el estímulo, que está presente en la mitad de los casos. En la otra mitad se tiene un ruido de 300 ms de duración, correspondiendo a una situación sin estímulo para esta condición.



En la Tabla 4.3 se muestran los porcentajes de acierto (ver Ec. 1.3) de cada individuo en cada una de las dos condiciones del experimento 3. Se indica, además, la media y la desviación estándar para cada condición. Esta misma información más detallada se muestra en la Tabla 4.4, donde se listan la cantidad de verdaderos positivos (VP) y falsos positivos (FP) que obtuvo cada voluntario en ambas condiciones.

**Tabla 4.3:** Resultados del experimento 3. Porcentajes de acierto, P(C), de todos los individuos en las condiciones C1 y C2. Se indica además el promedio y la desviación estándar (STD) para cada condición.

Individuo	P(C) en C1	P(C) en C2
1	67	79
2	67,5	83
3	71,5	78,5
4	73	82
5	71	80,5
6	76,5	87,5
Promedio	71,08	81,75
STD	3,54	3,30

**Tabla 4.4:** Número de verdaderos positivos (VP), falsos positivos (FP) y total de aciertos obtenidos por cada individuo en las condiciones C1 y C2 sobre un total de 200 pruebas en cada caso.

Individuo	Condición C1			Condición C2		
	VP	FP	Total aciertos	VP	FP	Total aciertos
1	58	24	134	66	8	158
2	58	23	135	71	5	166
3	57	14	143	62	5	157
4	73	27	146	78	14	164
5	59	17	142	72	11	161
6	67	14	153	77	2	175

También se han calculado los desempeños de los individuos, que se muestran en la Tabla 4.5, en términos del índice  $d'$  característico de la TDS. De la Ec. 1.5 y usando las tablas estadísticas de la distribución normal, se calcula  $d'$  a partir de la proporción de verdaderos positivos y falsas alarmas. Vale destacar que este cálculo asume que las distribuciones “N” y “S+N” descritas por la TDS son normales.

**Tabla 4.5:** Resultados del experimento 3 expresados en términos de la detectabilidad  $d'$  para todos los individuos en ambas condiciones, C1 y C2.

Individuo	$d'$ en C1	$d'$ en C2
1	0,9082	1,8175
2	0,9407	2,1982
3	1,2567	1,9503
4	1,2256	1,8525
5	1,1817	1,8094
6	1,5202	2,7926
Promedio	1,1722	2,0701
STD	0,226	0,383

# Capítulo 5

## Discusión

En este capítulo se muestra el análisis estadístico de los resultados, incluyendo una prueba de la optimalidad del ruido en el experimento 2 y la comparación de las dos condiciones del experimento 3; algunas acotaciones respecto de la estimación del umbral, y algunas consideraciones teóricas respecto de la interpretación de la RE en el marco conceptual de la TDS.

### 5.1 Prueba estadística de los aciertos con ruido óptimo

Los resultados del experimento 2 muestran que todos los voluntarios mejoran sus porcentajes de acierto,  $P(C)$ , para un nivel pequeño de ruido (ver Fig. 4.1), lo que coincide con los resultados obtenidos por Collins *et al.* [9]. De hecho, en 5 de ellos este nivel óptimo de ruido correspondió al ruido más pequeño. Por otra parte, se debe verificar que este óptimo tiene una diferencia estadísticamente significativa con el nivel de azar.

En una prueba en que la mitad de las presentaciones corresponden a ejemplos sin estímulo y la otra mitad con estímulo, el individuo que responde al azar en una tarea del tipo “Sí/No” obtiene un **50 %** de detecciones correctas. En otras palabras, si el individuo nunca siente el estímulo entonces responde “No” en todas la pruebas y acierta en la mitad de ellas (en las que efectivamente no hubo estímulo).

Para cada nivel de ruido se realizaron 40 pruebas por sujeto, siendo 20 el número de aciertos que corresponde al nivel de azar. En un test binomial [56] se comparan las proporciones relativas de una variable dicotomizada, como ser la respuesta del individuo que pueden ser correcta o incorrecta, pero no ambas. De acuerdo a este test, el número de aciertos que asegura un p-valor menor a 0,05 (intervalo de confianza del 95 %) es 27 (p-valor=0,02686), que corresponde al 67,5 % de aciertos. Todo  $P(C)$  que sea igual o superior a ese valor tiene una diferencia estadísticamente significativa

con el nivel de azar. En la Tabla 4.2 se observa que **todos los individuos obtuvieron un P(C) igual o superior al 67,5 %**. Más aún, como información adicional, en la Tabla 5.1 se muestra, para cada uno de los voluntarios, el p-valor obtenido en un test binomial que compara el número de aciertos en el caso de ruido óptimo con una proporción de 0,5, sobre un total de 40 muestras. En todos los casos este p-valor es menor que 0,05.

**Tabla 5.1:** Listado de los p-valores obtenidos en un test binomial que compara el número de aciertos para el nivel de ruido óptimo,  $N_{opt}$ , con el nivel de azar.

Sujeto	Número de aciertos para $N_{opt}$	p-valor
1	27	0,0269
2	28	0,0114
3	28	0,0114
4	31	0,000504
5	31	0,000504
6	31	0,000504

Por otra parte, en la Fig. 4.3 se observa que para dos de los sujetos la detectabilidad óptima  $d'_{optima}$  no coincide con el  $N_{opt}$  encontrado a partir de P(C). El estudio en detalle de los resultados de los experimentos realizados a estos dos individuos revela que los  $d'$ s altos para ruidos altos podría ser un artificio derivado de las bajísimas tasas de falsas alarmas en esos casos. En la Tabla 5.2 se muestran las tasas de verdaderos positivos y falsas alarmas para los 6 sujetos en cada una de 5 las condiciones de ruido añadido al estímulo. Para el individuo 1, los tres niveles de ruido altos generan tasas de falsas alarmas nulas, lo que incrementa el  $d'$  por sobre el  $d'(N_{opt})$  ( $d'$  para el ruido óptimo obtenido usando P(C), que en este caso es el ruido no nulo más pequeño). El individuo reportó mostrar una tendencia a responder negativamente cuando percibía un ruido alto por creer muy difícil en esos casos distinguir el estímulo. Esto, lejos de ser un procedimiento experimental inadecuado, indica que este sujeto percibía muy marcadamente la diferencia entre los distintos ruidos, es decir, poseía una pendiente de la curva psicométrica muy elevada. Lo mismo se puede argumentar para el individuo 2 para el caso del ruido más alto, que coincide con el punto que se ve anormalmente alto en el gráfico de la Fig. 4.3(b). Por su parte, el individuo 3 también muestra bajas tasas de falsas alarmas para ruidos altos, pero eso no se refleja en el gráfico de  $d'$  v/s ruido (Fig. 4.3(c)) pues el  $d(N_{opt})$  es aún más alto. Esto se podría explicar por el hecho de que este individuo usó un criterio muy conservador que le llevó a responder “Sí” sólo en los casos que estaba muy seguro de haber percibido el estímulo.

**Tabla 5.2:** Tasas de verdaderos positivos ( $VP_i$ ) y falsas alarmas ( $FP_i$ ) en el experimento 2 para las 5 condiciones de ruido añadido al estímulo, distinguidas por el subíndice  $i$  (con  $i = 0, 1, 2, 3, 4$ ).

Sujeto	$VP_0$	$FP_0$	$VP_1$	$FP_1$	$VP_2$	$FP_2$	$VP_3$	$FP_3$	$VP_4$	$FP_4$
1	0,40	0,65	0,60	0,60	0,55	0,25	0,30	0,05	0	0,05
2	0,25	0,70	0,75	0,40	0,65	0	0,20	0,25	0,60	0
3	0,15	0,60	0,75	0,60	0,45	0	0,05	0	0	0
4	0,30	0,75	0,55	0,40	0,40	0,10	0,20	0,35	0,20	0,15
5	0,20	0,85	0,55	0,50	0,65	0,05	0,15	0,40	0,30	0,40
6	0,40	0,85	0,40	0,50	0,40	0,10	0,15	0,60	0,35	0,35

## 5.2 Comparación experimentos 2 y 3

La mitad de las presentaciones del experimento 3 correspondientes a la condición C1, tienen las mismas características de las presentaciones del experimento 2 con ruido óptimo. Sin embargo, el número de ejemplos fue 200 y 40, respectivamente. De las Tablas 4.3 y 4.2 se puede ver que los P(C) para estas dos situaciones son distintos en los 6 individuos. A excepción del individuo 3, el P(C) para la C1 del experimento 3 es mayor que el P(C) para el experimento 2 con ruido óptimo. Estas diferencias se deben principalmente al distinto número de ejemplos para cada caso, aunque a mayor número de pruebas se debería tener mayor confiabilidad en los datos. Para el caso de 200 pruebas, el P(C) que asegura diferencia estadística significativa por sobre el azar es 57 % (p-valor=0,048 en un test binomial). En la Tabla 4.3 se ve que los P(C) en la C1 del experimento 3 de todos los individuos están muy por sobre el 57 %, asegurando la optimalidad del ruido.

## 5.3 Análisis de los resultados del experimento 3

El hecho de que las pruebas correspondientes a la condición C1 y la condición C2 del experimento 3 se hayan intercalado de manera aleatoria, asegura que los individuos no hayan mostrado algún tipo de sesgo en sus respuestas en una u otra condición, evitando así cambios en el criterio del observador.

Todos los individuos tuvieron un mejor desempeño, medido en base a P(C), en las pruebas bajo la condición C2 respecto a las pruebas en C1, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4.3. Más aún, estas diferencias son estadísticamente significativas, como se muestra en la Tabla 5.3. En ella se indica el p-valor obtenido en un test binomial que compara el número de respuestas correctas bajo C2 respecto de la proporción de respuestas correctas bajo C1, proporción esperada en el caso de que ambas condiciones fuesen equivalentes. En todos los casos el p-valor es menor que 0,05, por

**Tabla 5.3:** Prueba estadística de la diferencia entre aciertos bajo C2 y aciertos bajo C1. La proporción esperada es la que se obtendría si el número de aciertos en C2 fuesen iguales a los de C1, sobre un total de 200. El p-valor indica el grado de confianza en un test binomial que compara este número de aciertos con la proporción esperada.

Sujeto	Número de aciertos bajo C2	Proporción esperada	p-valor
1	158	0,670	0,000307
2	166	0,675	0,000003
3	157	0,715	0,028308
4	164	0,730	0,004145
5	161	0,710	0,003068
6	175	0,765	0,000244

lo que se tiene un **nivel de confianza de al menos 95 % de que las respuestas correctas bajo C2 son significativamente mayores a las respuestas correctas bajo C1.**

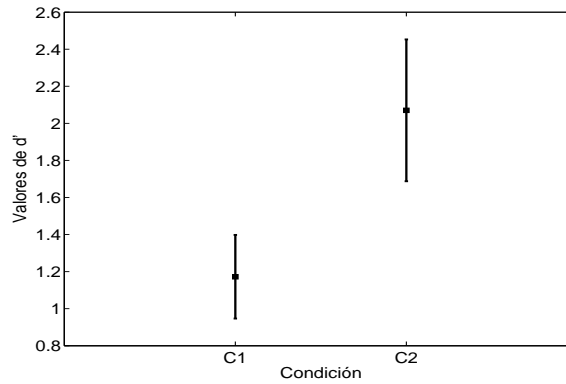
No sólo la medida  $P(C)$  muestra un mejor desempeño de todos los individuos bajo C2. En la Tabla 4.5 se observa que los 6 sujetos obtienen mayor  $d'$  bajo C2 que bajo C1. Por tanto, la detectabilidad se incrementa en la condición C2. Como se ve en la Tabla 4.4, los verdaderos positivos aumentan en C2, mientras que las falsas alarmas caen sustantivamente. Ambos cambios simultáneos no pueden ser debidos a un cambio del criterio del observador, sino que a un desplazamiento a la derecha de la distribución “S+N” de la TDS, lo que equivale a un aumento de la detectabilidad, hecho consistente con los resultados. El aumento de  $d'$  en C2 puede ser analizado estadísticamente con un test ANOVA<sup>1</sup>. La hipótesis nula,  $H_0$ , en este caso sería:

$H_0$ : *Las medias de los grupos de  $d'$ s correspondientes a las condiciones C1 y C2 son iguales.*

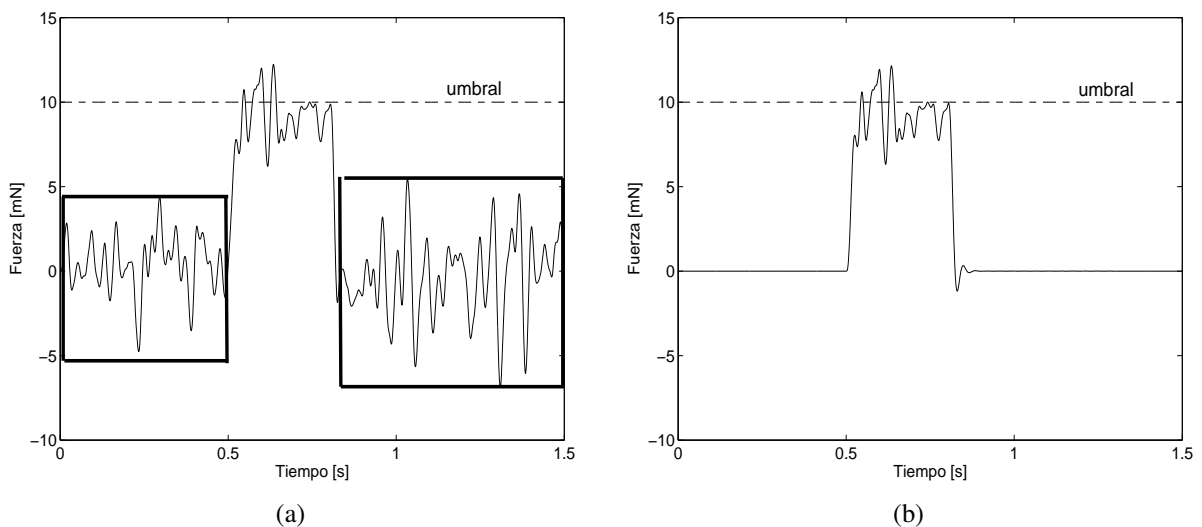
En el gráfico de la Fig. 5.1 se muestran las medias y desviaciones estándar respectivas de ambos grupos, notándose que la distancia entre las medias no permite el traslape de las desviaciones. El p-valor de 0,006 permite rechazar  $H_0$ , o bien, afirmar con un nivel de confianza superior al 99 % que las medias de los grupos son distintas.

Se probó que el desempeño de los individuos es sustantivamente superior en la condición C2 respecto de C1, tanto en la medida  $P(C)$  como en la medida  $d'$ . Sin embargo, **de acuerdo a la RE las condiciones C1 y C2 deberían ser igualmente detectadas** porque el ruido en ambos casos ayuda a superar el umbral donde se requiere, esto es, en la aparición del pulso rectangular. Luego, **los resultados del experimento 3 resultan ser inconsistentes con la teoría de la RE.** En esta teoría, toda estimulación bajo umbral no aporta información al individuo, por lo que el ruido que

<sup>1</sup>Del inglés, *ANALYSIS OF VARIANCE*, que se traduce como análisis de varianza.



**Figura 5.1:** Medias y desviaciones estándar de los dos grupos de  $d'$ s: condiciones C1 y C2. Con estos valores se realiza un test ANOVA para comparación de las medias de ambos grupos.



**Figura 5.2:** Ejemplos de estímulo más ruido bajo condiciones (a) C1 y (b) C2. Se indica el umbral con línea punteada, que en ambos casos es superado por la ayuda del ruido. El ruido encerrado con línea continua en el caso (a) no influye en la detección de acuerdo a la RE. Sin embargo, la TI predice que el ejemplo (b) es mayormente detectado que el (a).

no está sumado al pulso rectangular no tiene injerencia en la detección. En la Fig. 5.2 se muestra un ejemplo de la condición C1 (Fig. 5.2(a)) y otro de la condición C2 (Fig. 5.2(b)). En ambos casos el ruido ayuda al estímulo (pulso rectangular) a superar el umbral (línea punteada). Sin embargo, los segmentos de ruido encerrado con líneas continuas en el ejemplo (a) están bajo umbral y por tanto no influyen en la detección. De este modo, de acuerdo a la RE ambos ejemplos (a) y (b) son igualmente detectados.

Por otra parte, la TI es consistente con los hallazgos experimentales pues predice que las presentaciones bajo la condición C2 son mayormente detectados que aquellas bajo C1, como se explicó en el capítulo introductorio (ver Fig. 1.8). Es decir, el ruido encerrado con líneas continuas en el ejemplo de la Fig. 5.2(a) sí influye en la detección al disminuir la certeza respecto del tiempo de

inicio y duración del estímulo, lo que no ocurre en el ejemplo de la Fig. 5.2(b).

## 5.4 Sobre la estimación del umbral

Como se explicó en la metodología, el umbral que se estimó (experimento 1) es el de la teoría clásica, esto es, aquel nivel de estimulación que es detectado en la mitad de la pruebas. De manera más general, en la teoría clásica el umbral se define como la intensidad de estímulo que produce una proporción de aciertos en la mitad de la curva psicométrica [31], valor que debería ser estable entre los distintos métodos experimentales. Así, en una tarea psicofísica del tipo “Sí/No” en la que no se incluyen pruebas sin estímulo, el umbral correspondería a aquella intensidad que produce 50 % de detecciones porque en este caso la curva psicométrica iría de 0 % a 100 %. Sin embargo, en este experimento no es posible obtener una medida que sea independiente del criterio empleado por el observador. Así por ejemplo, el sujeto podría responder “Sí” incluso si no ha sentido el estímulo, para de este modo no defraudar al experimentador o simplemente magnificar su capacidad perceptiva. Incluso si el experimentador confía plenamente en la honestidad de los observadores porque efectivamente éstos hacen su mayor esfuerzo por responder de la manera más objetiva posible, aún así el sujeto podría cambiar su criterio de una prueba a otra porque sus motivaciones o su nivel de certeza respecto de la ausencia o presencia del estímulo pueden haber cambiado [36].

Por lo explicado arriba, una estimación más confiable del umbral podría haberse logrado introduciendo pruebas sin estímulo en el experimento 1. Kaernbach [28] propuso un algoritmo para un procedimiento adaptable de estimación del umbral en el que se introducen “*catch trials*”: bajar un paso para cada verdadero positivo y verdadero negativo; subir tres pasos para cada falsa alarma y falso positivo. El algoritmo permite una convergencia a un  $P(C)$  del 75 %, i.e. la mitad de la curva psicométrica en una tarea “Sí/No” con pruebas sin estímulo.

De todas formas, aún es posible verificar la confiabilidad de la estimación del umbral observando los resultados del experimento 2, específicamente las proporciones de aciertos para los casos en que el nivel añadido de ruido era nulo. Esta situación corresponde justamente a una tarea “Sí/No” en la que se han incluido pruebas sin estímulo (20 de un total de 40), con un nivel de estímulo equivalente al 80 % del umbral. En este caso el nivel umbral correspondería a un  $P(C)=75 %$ , por lo que en los gráficos de la Fig. 4.1 los puntos correspondientes al nivel 0 de ruido deberían estar por debajo de este valor. Estos datos han sido resumidos en la Tabla 5.4, donde se observa que todos ellos satisfacen esta condición. La varianza de los datos se puede deber a que la pendiente de la cur-



**Tabla 5.4:** Proporciones de aciertos obtenidas en el experimento 2 en el caso de ruido cero. Como el estímulo es 80 % del umbral, todas ellas caen por debajo de 75 %, mostrando la confiabilidad en la estimación del mismo. También se muestran los respectivos  $d'$ .

Individuo	P(C) para estímulo sub-umbral	$d'$
1	57,5	0,42
2	62,5	0,97
3	57,5	0,61
4	60,0	0,75
5	57,5	0,80
6	65,0	1,03
<b>Promedio</b>	60,0	0,76
<b>STD</b>	3,16	0,23

va psicométrica no es necesariamente igual de un individuo a otro, de modo que una energía 80 % del umbral no tiene por qué generar porcentajes iguales de aciertos entre los distintos individuos.

En la Tabla 5.4 también se muestran los respectivos  $d'$ s. En el contexto de la TDS, el punto medio de la curva psicométrica es distinto dependiendo del número de alternativas en un método de elección forzada o de la tasa de falsas alarmas en una tarea “Sí/No” [31]. Luego, en este contexto el umbral queda mejor definido como el nivel de estímulo que produce un  $d'$  constante, que usualmente es asumido igual a 1 (76 % de aciertos para 2AFC). En la Tabla 5.4 se ve que para todos los individuos, excepto uno, el nivel de estímulo genera  $d'$ s menores que 1, confirmando la condición subliminal en esos casos. Para el individuo 6 el valor de  $d'$  es muy cercano a 1, por lo que o bien el umbral fue subestimado, o bien la pendiente de la curva psicométrica de ese individuo es muy pronunciada, lo que generaría que estímulos sub-umbrales originen  $d'$ s en torno a la unidad.

## 5.5 Resonancia estocástica en términos de teoría de detección de señales

Los resultados del experimento 3 muestran que el paradigma de la RE falla en explicar una situación en la que el ruido es usado como puntero de la ubicación del estímulo en el tiempo porque en esta teoría el ruido es considerado sólo como un elemento que permite superar el umbral en fase con el estímulo. Sin embargo, aún no se ha explicado cómo es posible obtener una curva no monótona cuando se relaciona la detección con el nivel de ruido añadido. Esto incluso ha sido fuente de controversia y debate [57] [59], pero una clara explicación e interpretación del fenómeno de la RE en términos de la TDS no ha sido aún publicada.

Recapitulando, en la TDS el índice  $d'$  entrega una medida de la sensibilidad del observador

ante una señal, independiente del criterio que éste use para dicotomizar el espacio de entrada. Recordando la Ec. 1.4:

$$d' = \frac{\mu_{SN} - \mu_N}{\sigma_N}$$

se deduce que  $d'$  depende de la distancia de las distribuciones (ver Fig. 1.4). Además, si tanto el nivel de ruido del sistema sensorial (ruido interno) o el ruido que contamina el estímulo (ruido externo) aumentan, entonces  $d'$  disminuye de manera inversamente proporcional porque  $\sigma_N$ , la varianza de la actividad sensorial basal, aumenta.

Por otra parte, la adición de ruido externo visto como perturbaciones aleatorias que enmascaran la señal a detectar, también disminuye la detectabilidad. En efecto, para el modelo del observador ideal que conoce todos los parámetros de la señal, bajo el supuesto de distribuciones gaussianas de igual varianza, y asumiendo un ruido gaussiano limitado a una banda de frecuencia finita  $W$ , se puede probar que ([24], capítulo 6):

$$d' = \frac{\mu_{SN} - \mu_N}{\sigma_N} = \frac{2WE_S}{\sqrt{2N_0W^2E_S}} = \sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} \quad (5.1)$$

con  $E_S$  la energía de la señal a detectar y  $N_0$  la potencia del ruido por unidad de frecuencia. Se deduce que  $d'$  es monótonamente decreciente con el nivel de ruido, ya sea externo o interno.

El modelo anterior aplicado a un sistema sensorial debe imponer una cota inferior no nula a la potencia del ruido debido a la presencia de ruido sensorial interno. En otras palabras, la detectabilidad no puede, en este caso, tender a infinito si el ruido externo es cero. Luego,  $N_0 = N_e + N_i$  con  $N_i > 0$ . Una hipótesis de lo que podría ocurrir en un proceso de detección táctil en el que se ha añadido ruido táctil externo es que **a ruidos pequeños el observador no es capaz de diferenciar entre ruido y estímulo**. Esto no ocurriría para ruidos de magnitud grande ya que el observador sería capaz de distinguir claramente la presencia de las variaciones aleatorias, enmascarando el estímulo. De ser cierto esto, habría un rango dentro del intervalo de potencias del ruido externo,  $0 < N_e < N_m$ , para el cual el individuo realizaría una tarea de detección distinta: detectar ruido externo y estímulo. Además, esta influencia del ruido tendría que disminuir a medida que éste aumenta, hasta llegar a  $N_m$  donde el observador trata de detectar sólo el estímulo. Considerando estos supuestos, en esta tesis se propone el siguiente modelo para describir la medida de detectabilidad de la Ec. 5.1:

$$d' = \frac{2W(E_S + \alpha N_e T)}{\sqrt{2W^2(N_e + N_i)E_S}} \quad (5.2)$$

con  $T$  el tiempo de duración del estímulo y  $\alpha$  un factor de atenuación, dependiente de  $N_e$ , tal que

$\alpha(N_e = 0) = 1$  y  $\alpha(N_e = N_{max}) = 0$ . Aquí se ha supuesto que el observador trata de detectar un nuevo estímulo cuya energía es la suma de la energía del estímulo original,  $E_S$ , y la energía que aporta el ruido externo en la duración del estímulo,  $N_e T$ , atenuada por un factor dependiente de  $N_e$ . La función  $d'(N_e)$  tiene derivada:

$$\frac{d}{dN_e}(d') = \sqrt{\frac{2}{E_S}} \cdot \frac{2\alpha'N_e^2T + 2\alpha'N_eN_iT + \alpha N_eT + 2\alpha N_iT - E_S}{(N_e + N_i)^{3/2}} \quad (5.3)$$

Si  $\alpha = 1 - N_e/N_m$ , entonces la derivada anterior equivale a:

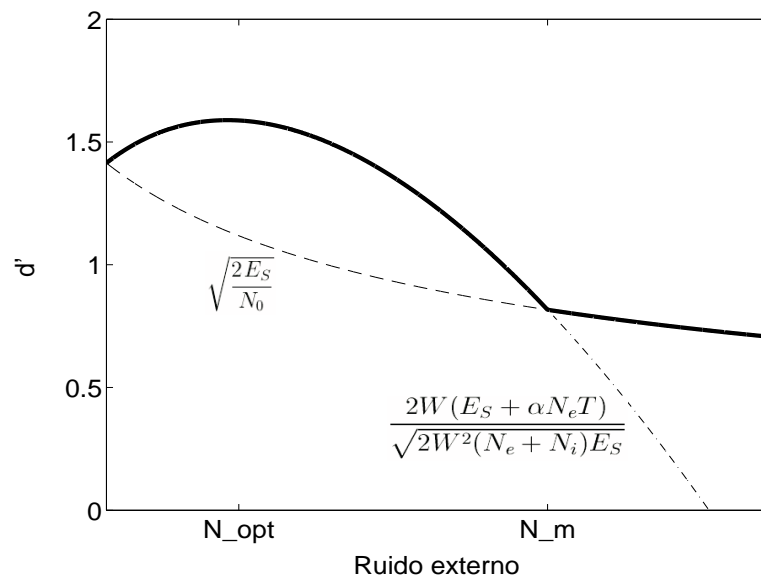
$$\frac{d}{dN_e}(d') = \sqrt{\frac{2}{E_S}} \cdot \frac{-3N_e^2T/N_m - 4N_eN_iT/N_m + N_eT + 2N_iT - E_S}{(N_e + N_i)^{3/2}} \quad (5.4)$$

que tiene un cero para  $N_e > 0$  si  $2N_iT > E_S$  (condición suficiente, aunque no necesaria). Es decir,  $d'$  tiene un óptimo si el estímulo es suficientemente pequeño. Con esto, bajo los supuestos de ruido externo positivo y acotado, y para un estímulo de intensidad pequeño, **la detectabilidad tiene un máximo para cierto nivel no nulo de ruido.**

De este modo, considerando las Ecs. 5.1 y 5.2, el modelo propuesto en esta tesis se escribiría de la siguiente forma:

$$d' = \begin{cases} \frac{2W(E_S + \alpha N_e T)}{\sqrt{2W^2(N_e + N_i)E_S}} & \text{si } N_e < N_m \\ \sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} & \text{si } N_e \geq N_m \end{cases} \quad (5.5)$$

En la Fig. 5.3 se muestra una curva que relaciona  $d'$  con el nivel de ruido externo de acuerdo al modelo propuesto. Dado que para  $N_e \geq N_m$  el observador realiza la tarea de detectar sólo el estímulo (sin la influencia del ruido externo), en ese rango  $d'$  se estimaría a partir de la Ec. 5.1, mientras que para  $N_e < N_m$  el observador está influenciado por el ruido externo y  $d'$  se estima por la Ec. 5.2.



**Figura 5.3:** Variación de la detectabilidad  $d'$  con el ruido externo  $N_e$  asumiendo un modelo de TDS en el que el observador detecta estímulo y ruido cuando ambos son pequeños. La curva punteada superior muestra la predicción del modelo de TDS con observador ideal; la inferior, la continuación de la curva de detección si por sobre  $N_m$  el observador aún actuara detectando ruido además del estímulo. Se observa un máximo para  $N_{opt}$ . Además, por sobre  $N_m$  el observador no confunde el ruido externo con el estímulo, por lo que  $d'$  decrece monótonamente con el ruido por sobre ese nivel. Se indican las expresiones matemáticas que describen a cada curva.

# Capítulo 6

## Conclusiones

En esta tesis se estudiaron los efectos que producen en la detección de pequeños estímulos táctiles la adición de perturbaciones aleatorias o ruido. Para ello se llevó a cabo un conjunto de pruebas psicofísicas en las que a 6 voluntarios se les pidió que indicasen si sentían o creían sentir distintos tipos de estimulación mecánica aplicada a su dedo índice derecho. Por una parte, se replicaron los resultados de trabajos previos que mostraban efectos de resonancia estocástica en el sistema táctil. Por otro lado, se diseñó un experimento que pone a prueba la hipótesis de la resonancia estocástica, obteniéndose resultados contradictorios con esta teoría.

Los resultados de uno de los experimentos realizados muestran que la adición de un nivel de ruido no nulo y de pequeña intensidad a un estímulo táctil de tipo pulso cuadrado, se refleja en que los individuos mejoran significativamente su desempeño en la detección del pulso. Estos resultados no son sorprendentes en la medida de que otros trabajos, bajo condiciones experimentales similares, han mostrado resultados parecidos [9] [10] [61]. El hecho de que el ruido permita mejorar la sensación táctil tiene enormes potencialidades en las aplicaciones que involucran este sentido; el conocer el nivel de ruido óptimo que mejora la detección permitiría diseñar interfaces táctiles más eficientes y utilitarias que operen con niveles pequeños de ruido.

Sin embargo, los mecanismos que explican este fenómeno, a primera vista contraintuitivo ya que generalmente el ruido es visto como algo que entorpece la detección, aún no están claramente establecidos. Los paradigmas usualmente planteados son incompatibles con las herramientas modernas de la psicofísica. En efecto, a la luz de los resultados obtenidos en esta tesis, un paradigma en el que el ruido ayuda a superar un umbral de detección en fase con el estímulo (versión no dinámica de la resonancia estocástica) no explica la mejora en la detección que se produce cuando el ruido está limitado a la duración del estímulo. Tal postulado requiere, por tanto, una reevaluación.

El principal aporte de esta investigación fue mostrar una situación experimental novedosa cuyos resultados no son explicados satisfactoriamente por el paradigma de la resonancia estocástica. Además, se mostró que los beneficios de la adición de ruido a los estímulos táctiles pueden ser aún mayores: es posible mejorar aún más la detección explorando otras configuraciones. En particular, se demostró que si el ruido se limita en el tiempo a sólo la duración del estímulo, entonces la detección se ve incrementada significativamente respecto de la situación en que el ruido es de mayor duración que la señal. Estos resultados, lejos de ser explicados satisfactoriamente por la teoría de la resonancia estocástica (al menos en su versión no dinámica), son consistentes con la **teoría de la incerteza**. El ruido utilizado de esta manera ayudaría a disminuir la incerteza temporal respecto del inicio y la duración del estímulo, es decir, actúa como un pedestal que le entrega información adicional al observador.

En consecuencia, es recomendable que futuras aplicaciones utilicen la información del tiempo de inicio y término de los estímulos para explotar también la configuración temporal de ruido para mejorar la detección.

## 6.1 Implicancias neurofisiológicas

En el capítulo 2 se estudió el modelo de los cuatro canales de información que postula la existencia de cuatro vías independientes de procesamiento de información táctil. Dado que todas las señales que se usaron para estimular el dedo índice de los sujetos fueron filtradas en 30 Hz, de acuerdo al modelo de los cuatro canales sólo las fibras RA y SA I, que corresponden a los receptores de Meissner y Merkel respectivamente, participarían en la percepción de los estímulos. Sin embargo, como los canales son independientes, se podría descartar que la facilitación lograda sea efecto de un enmascaramiento negativo [21] del canal SA I (que detectaría las variaciones de la componente continua del pulso) por ruido en el canal RA (que detectaría las variaciones más bruscas en el rango 2 a 30 Hz).

Por otra parte, la mejora en la detección experimentada por los seis sujetos en la condición 2 del experimento 3 respecto de la condición 1 del mismo experimento, no se puede explicar en base al procesamiento de información periférico, esto es, a nivel de receptores. En ese nivel sólo hay una separación de la información en canales de sintonización, por lo que no se permitiría diferenciar entre ambas condiciones. Por el contrario, se demuestra que es a nivel central donde se produciría la facilitación pues es ahí donde el observador tiene memoria respecto de los parámetros del estímulo,

memoria que se ve reforzada en la condición 2 del experimento 3 y no así en la condición 1.

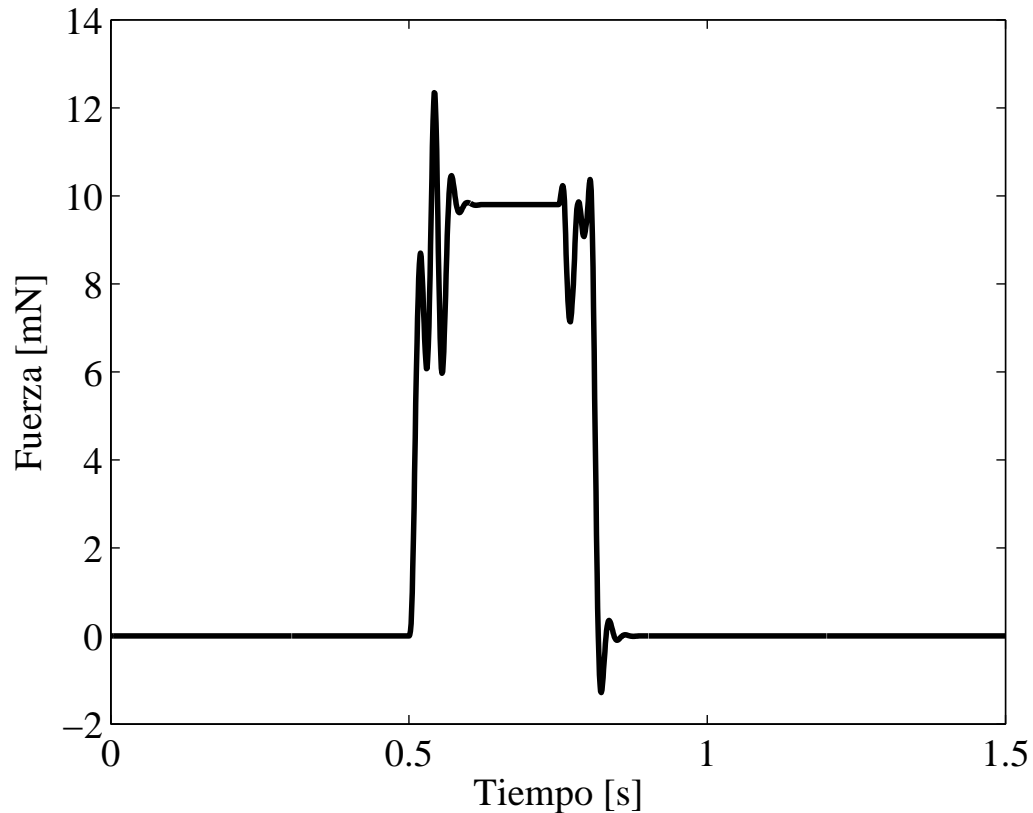
## 6.2 Proyecciones futuras

Otra posible investigación que involucra ruido y estímulos táctiles consiste en estudiar cómo el ruido ayuda a disminuir la incerteza espacial respecto de la aparición de un estímulo en uno de varios estimuladores ubicados lo suficientemente alejados para que no exciten las mismas fibras táctiles y lo suficientemente cercanos como para que no exciten fibras de muy diferente sensibilidad. Se podría comparar una situación en la que el ruido se añade a todos los estimuladores respecto de otra en la que se adiciona a sólo el estimulador que, en un momento dado, está enviando la señal a detectar. En esta última situación, de acuerdo a la teoría de la incerteza, el ruido actuaría como puntero de la ubicación del estímulo, por lo que permitiría mejorar la detección respecto de la primera.

Por otra parte, también se podría seguir explorando acerca de la incerteza temporal en el sistema táctil. Un posible experimento consiste en presentar al sujeto estímulos tipo pulso cuadrado a los que se añade ruido mecánico sólo justo al comienzo y justo al final de su duración, como se muestra en la Fig. 6.1. Un estímulo de este tipo debería ser detectado de la misma forma que un estímulo como el del experimento 3 en la condición 2 (ver Fig. 3.5(c)) pues, de acuerdo con la teoría de la incerteza, en ambas situaciones el ruido ayuda al sujeto con la memoria respecto del tiempo de inicio y término del pulso cuadrado.

Para experiencias futuras se recomiendan los siguientes puntos:

- En caso de estimar el umbral de percepción, usar un método que independice la estimación del criterio del observador. Para ello se requiere incluir pruebas que contengan ejemplos en los que no hay estímulo. Una sugerencia es el método adaptable propuesto en [28].
- Al momento de evaluar la detección para distintos niveles de ruido es conveniente intercalar las pruebas de manera aleatoria para así evitar que el observador cambie su criterio de un nivel de ruido a otro.
- Evaluar la posibilidad de usar pruebas psicofísicas de dos o más alternativas de elección forzada (por ejemplo, 2AFC) para así obtener de manera directa una medida que es independiente del criterio del observador. De todos modos, en estas pruebas se debe poner especial cuidado en el sesgo del observador en la elección de una u otra alternativa.



**Figura 6.1:** Ejemplo de estimulación que se podría utilizar en un nuevo experimento para corroborar los postulados de la teoría de la incerteza. El estímulo es un pulso de 9,8 mN al que se ha sumado ruido Gaussiano filtrado (pasa-bajos) en pequeñas ventanas de 50 ms al inicio y término del mismo. En esta situación el ruido ayuda a reforzar la memoria del observador respecto del tiempo de inicio y término del pulso, por lo que en una cantidad suficiente de pruebas el desempeño del sujeto debería ser el mismo que la situación en que el ruido está sumado en los 300 ms de duración del pulso.

- Explotar el uso de curvas ROC<sup>1</sup> para evaluar modelos como el de teoría de detección de señales con distribuciones de varianzas distintas [24], teoría de la incerteza (experimento de detección de incremento [54]) y otras. La pendiente de la curva ROC entrega información valiosa respecto de cuán distinto es un observador humano de un observador ideal [7].

---

<sup>1</sup>Del inglés, *Receiver Operating Characteristic*. Una curva ROC muestra la relación entre la tasa de falsas alarmas con la tasa de verdaderos positivos para distintos criterios del observador.



# Bibliografía

- [1] P. Batch-Y-Rita, C. C. Collins, F. S. Saunders, B. W. White, and L. A. Scadden. Vision substitution by the tactile image projection. *Nature*, 221:963–964, 1969.
- [2] R. Benzi, A. Sutera, and A. Vulpiani. The mechanism of stochastic resonance. *Journal of Physics A*, 14:453–457, 1981.
- [3] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky. Four channel mediate the mechanical aspects of touch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1680:1680–1694, 1988.
- [4] G. E. P. Box and M. E. Muller. A note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematical Statistics*, 29:610–611, 1958.
- [5] R. W. Cholewiak and J. C. Craig. Vibrotactile pattern recognition and discrimination at several body sites. *Perception & Psychophysics*, 35(6):503–514, 1984.
- [6] T. E. Cohn and D. J. Lasley. Detectability of a luminance increment: Effect of spatial uncertainty. *Journal of the Optical Society of America*, 64(12):1715–1719, 1974.
- [7] T. E. Cohn, L. N. Thibos, and R. N. Kleinstein. Detectability of a luminance increment. *Journal of the Optical Society of America*, 64(10):1321–1327, 1974.
- [8] J. J. Collins, C. C. Chow, and T. T. Imhoff. Stochastic resonance without tuning. *Nature*, 376:236–238, 1995.
- [9] J. J. Collins, T. T. Imhoff, and P. Grig. Noise-enhanced tactile sensation. *Nature*, 383:770, 1996.
- [10] J. J. Collins, T. T. Imhoff, and P. Grig. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation. *Physical Review E*, 56(1):923–926, 1997.
- [11] J. J. Collins, A. A. Priplata, D. C. Gravelle, J. Niemi, and J. Harry and L. A. Lipsitz. Noise-enhanced human sensorimotor function. *IEEE Engineering in Medicine & Biology Magazine*, 22(2):76–83, 2003.
- [12] C. Colwell, H. Petrie, D. Kornbront, A. Hardwick, and S. Fumer. Haptic virtual reality for blind computer users. *Third International Conference on Assistive Technologies*, Marina del Rey, USA, 92–99, 1998.
- [13] P. Cordo, J. T. Inglis, S. Verschueren, J. J. Collins, D. M. Merfeld, S. Rosenblum, S. Buckley, and F. Moss. Noise in human muscles spindles. *Nature*, 383:769–770, 1996.

- [14] S. Coren and L. M. Ward. *Sensation and perception*. HBJ Editions, 1989.
- [15] Vernitron Division. *Guide to modern piezoelectric ceramics*. Morgan Matroc Inc., Bedford Ohio, 1984.
- [16] W. J. Dixon and A. M. Mood. A method for obtaining and analyzing sensitivity data. *Journal of the American Statistics Association*, 43:109–126, 1948.
- [17] P. J. Durlach, J. Fowlkes, and C. J. Metevier. Effect of variations in sensory feedback on performance in a virtual reaching task. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 14:450–462, 2005.
- [18] E. Eijkman and J. H. Vendrik. Detection theory applied to the absolute sensitivity of sensory systems. *Biophysical Journal*, 3:65–78, 1963.
- [19] M. E. H. Eltaib and J. R. Hewit. Tactile sensing technology for minimal access surgery: A review. *Mechatronics*, 13:1163–1177, 2003.
- [20] G. A. Gescheider, S. J. Bolanowski, and R. T. Verrillo. Some characteristics of tactile channels. *Behavioural Brain Research*, 148:35–40, 2004.
- [21] G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and D. G. Pelli. Effects of noise on detection amplitude increments of sinusoidal vibration of the skin. *Journal of the Acoustic Society of America*, 91(1):348–353, 1992.
- [22] G. A. Gescheider, J. H. Wright, B. J. Weber, and W. G. Barton. Absolute thresholds in vibrotactile signal detection. *Perception & Psychophysics*, 10:413–417, 1971.
- [23] D. Gong, G. Qin, G. Hu, and X. Wen. Experimental study of stochastic resonance. *Physics Letters A*, 159:147–152, 1991.
- [24] D. M. Green and J. A. Swets. *Signal detection theory and psychophysics*. Peninsula Publishing, 1988 reprint edition, 1988.
- [25] H. G. Hoffman, A. Garcia-Palacios, A. Carlin, T. A. Furness, and C. Botella-Arbona. Interfaces that heal: Coupling real and virtual objects to treat spider phobia. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 16:283–300, 2003.
- [26] G. Hu. Stochastic resonance in a periodic potential system under a constant force. *Physics Letters A*, 174:247–249, 1993.
- [27] A. Iggo and K. H. Andres. Morphology of cutaneous receptors. *Annual Review of Neuroscience*, 5:1–31, 1982.
- [28] C. Kaernbach. A single-interval adjustment matrix (siam) procedure for unbiased adaptive testing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88:2645–2655, 1990.
- [29] E. Kandel. *Principios de neurociencia*. McGraw-Hill, 4a edition, 2001.
- [30] T. Kapitaniak. Stochastic resonance in chaotically forced systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 3:405–410, 1993.

- [31] S. A. Klein. Measuring, estimating and understanding the psychometric function: A commentary. *Perception & Psychophysics*, 63:1421–1455, 2001.
- [32] M. Knibestol. Stimulus-response functions of rapidly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *The Journal of Physiology*, 232:427–452, 1973.
- [33] M. Knibestol. Stimulus-response functions of slowly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *The Journal of Physiology*, 245:63–80, 1975.
- [34] M. R. Leek. Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63(8):1279–1292, 2001.
- [35] M. W. Levine. *Fundamentals of sensation and perception*. Oxford, 3rd edition, 2000.
- [36] N. A. Macmillan and C. D. Creelman. *Detection theory: A user's guide*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, second edition, 2005.
- [37] N. R. Malik. *Circuitos electrónicos. Análisis, simulación y diseño*. Prentice Hall, 1998.
- [38] F. Moss, L. M. Ward, and W. G. Sannita. Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application. *Clinical Neurophysiology*, 115:267–281, 2004.
- [39] D. G. Pelli. Uncertainty explains many aspects of visual contrast detection and discrimination. *Journal of the Optical Society of America*, 2(9):1508–1532, 1985.
- [40] C. A. Perez, T. E. Cohn, J. R. Donoso, and L. E. Medina. Classical vibrotactile threshold: A critical study. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, submitted.
- [41] C. A. Perez, A. J. Santibáñez, C. A. Holzmann, P. A. Estévez, and C. M. Held. Power requirements for vibrotactile piezo–electric and electromechanical transducers. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 41:718–726, 2003.
- [42] W. W. Peterson, T. G. Birdsall, and W. C. Fox. The theory of signal detectability. *Transactions of the IRE P.G.I.T.*, 4:171–212, 1954.
- [43] D. Purves. *Invitación a la neurociencia*. Panamericana, 1a edition, 2001.
- [44] D. W. Repperger, C. A. Phillips, J. E. Berlin, A. T. Neidhard-Doll, and M. W. Haas. Human-machine haptic interface design using stochastic resonance methods. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 35(4):574–582, 2005.
- [45] J. Rosen, B. Hannaford, M. P. Macfarlane, and M. Sinanan. Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery - experimental performance evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46(10):1212–1221, 1999.
- [46] D. F. Russell, L. A. Wilkens, and F. Moss. Use of behavioural stochastic resonance by paddle fish for feeding. *Nature*, 402:291–294, 1999.
- [47] A. J. Santibáñez. Estudio del consumo de potencia en vibradores piezoeléctricos y electro-mecánicos para estimulación táctil. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería mención ingeniería biomédica y al título de ingeniero civil electricista, Universidad de Chile, Diciembre 2002.

- [48] J. P. Sharpe, N. Sungar, and N. Macaria. Observation of stochastic resonance using an optically addressed amorphous silicon/ferroelectric liquid crystal spatial light modulator. *Optics Communications*, 114:25–29, 1993.
- [49] M. Shimojo, M. Shinohara, and Y. Fukui. Human shape recognition performance for 3d tactile display. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics A*, 29(6):637–644, November 1999.
- [50] I. R. Summers, P. R. Dixon, P. G. Cooper, D. A. Gratton, B. H. Brown, and J. C. Stevens. Vibrotactile and electrotactile perception of time-varying pulse train. *J. Acoust. Soc. Am.*, 95:1548–1558, 1994.
- [51] J. A. Swets. Is there a sensory threshold? *Science*, 134(3473):168–177, 1961.
- [52] J. A. Swets, J. Markowitz, and O. Franzen. Vibrotactile signal detection. *Perception & Psychophysics*, 6:83–88, 1969.
- [53] J. A. Swets, W. P. Tanner, and T. G. Birdsall. Decision processes in perception. *Psychological Review*, 68:301–340, 1961.
- [54] W. P. Tanner. Physiological implications of psychophysical data. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 89:752–765, 1961.
- [55] W. P. Tanner and J. A. Swets. A decision-making theory of visual detection. *Psychological Review*, 61(6):401–409, 1954.
- [56] E. Taucher. *Bioestadística*. Editorial Universitaria, 1a edition, 1997.
- [57] J. Tougaard. Signal detection theory, detectability and stochastic resonance effects. *Biological Cybernetics*, 87:79–90, 2002.
- [58] D. Tzovaras, G. Nikolakis, G. Fergadis, S. Malasiotis, and M. Stavrakis. Design and implementation of haptic virtual environments for the training of the visually impaired. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering*, 12(2):266–278, June 2004.
- [59] L. M. Ward. Psychophysics of stochastic resonance. *Fluctuation and Noise Letters*, 4(1):11–21, 2004.
- [60] C. Wells, L. M. Ward, R. Chua, and J. T. Inglis. Regional variation and changes with ageing in vibrotactile sensitivity in the human footsole. *Journal of Gerontology: Biological Sciences*, 58A:680–686, 2003.
- [61] C. Wells, L. M. Ward, R. Chua, and J. T. Inglis. Touch noise increases vibrotactile sensitivity in old and young. *Psychological Science*, 16(4):313–320, 2005.
- [62] M. Yoh. The reality of virtual reality. *Proceedings of the Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Berkeley, CA, 666–674, 2001.
- [63] S. Yoshida, K. Susami, H. Noma, and K. Hosaka. Proactive desk: New haptic interface and its experimental evaluation. *IEICE Transactions on Communications*, E89B:320–325, 2006.

- [64] T. Yoshikawa and Y. Ichinoo. Impedance identification of human fingers using virtual task environment. *Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE/ASME, Las Vegas, USA, 759–764, 2003.