

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FORMA DE ONDA EXCITATORIA EN  
ESTIMULACIÓN TÁCTIL PARA OPTIMIZAR LA POTENCIA DE ENTREGA,  
ANÁLISIS DE DOS TIPOS DE EXCITACIÓN MECÁNICA: PERPENDICULAR Y  
TANGENCIAL

Marcela Elena Osorio Herrera

Profesor Guía : Sr. Claudio Pérez Flores.

Profesores de Comisión: Sr. Pablo Estévez Valencia.

Sr. Fernando de Mayo Israel.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SANTIAGO DE CHILE

Marzo, 2007

"El hombre que no ha pasado  
por el infierno de sus pasiones  
no las puede trascender."

Carl Gustav Jung.

A mis hijos Amanda y Vicente

## Agradecimientos

No puedo dejar de nombrar al grupo de personas que apoyaron mi trabajo y me dieron parte de su tiempo y buena disposición. En primer lugar doy agradecimientos a mi profesor guía Claudio Pérez por la paciencia, dedicación y buena disposición para ayudarme a cruzar las vallas que enfrenté en el camino. Al señor Carlos Holzmann por su buena disposición y orientación.

Doy también gracias a mis compañeros y amigos: Sonia Duffau, Lillian Devia, Patricio Espinoza, Hector Pérez, Luz María González, Claudia Hermosilla y a mi hermana Jimena Osorio por la disponibilidad de tiempo y voluntad en la toma experimental de datos en el laboratorio de la facultad.

Agradezco también a la fundación FONDECYT que dio el respaldo económico para la realización de este proyecto; FONDECYT 1940268.

Especialmente doy las gracias a todas aquellas personas que trabajan en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y que hicieron de mi estadía un lugar grato y familiar.

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: MARCELA ELENA OSORIO HERRERA  
FECHA: 30/01/2007  
PROF.GUIA: SR.CLAUDIO PEREZ FLORES

Este estudio aborda el problema de reducir el consumo de energía en interfaces táctiles que pueden ser utilizadas por impedidos, transmisión de tacto a distancia o realidad virtual. Estas interfaces utilizan un arreglo de transductores que transmiten un patrón espacial a través de la piel.

El presente trabajo de título tiene como objetivo encontrar un óptimo teórico para la potencia entregada por una forma de onda en la banda de frecuencia donde la sensibilidad táctil es máxima 25-700 Hz. Además se realiza un estudio experimental para establecer si existen diferencias significativas entre dos tipos de estimulación mecánica a la piel: tangencial y perpendicular.

El estudio teórico consiste en optimizar la razón entre la potencia entregada por una onda de voltaje dentro de la región de máxima sensibilidad táctil y la potencia total entregada por ciclo estimulador de la forma de onda. Se considera la respuesta de frecuencia del sistema táctil y del transductor mecánico utilizado. La forma de onda está compuesta por un tren de pulsos rectangulares con una envolvente que modula los pulsos y un tiempo de recuperación. La optimización de la potencia se realiza en función de los parámetros indicados de la forma de onda. Por medio de una simulación computacional se realiza esta optimización para un transductor ideal con respuesta de frecuencia plana y luego para un transductor real del tipo piezoeléctrico, considerando estimulación perpendicular y tangencial a la piel.

Este estudio permite escoger la envolvente y ancho de pulsos óptimos para cada frecuencia de excitación. Se considera una forma de onda de tren de pulsos que maximiza la potencia de entrega, dentro del rango de frecuencia táctil, respecto de una forma de onda con una envolvente rectangular de un 50% de ciclo de trabajo.

El estudio experimental consistió en medir los umbrales de sensación táctil a 5 personas cuando la piel es estimulada por un transductor del tipo piezoeléctrico para dos tipos de estimulación táctil perpendicular y tangencial. Se utiliza un sensor óptico que mide la amplitud de movimiento del transductor sin afectar al sistema y se obtiene que en general para la banda de frecuencias táctiles la curva umbral de sensibilidad tangencial está por debajo del umbral de sensibilidad perpendicular. Los resultados muestran una mejora en la potencia para el piezoeléctrico ideal de respuesta plana mayor al 17% para la frecuencia de 250 Hz y llega a ser alrededor de 400% para la frecuencia 80 Hz. En el caso de un piezoeléctrico real con respuesta no plana esta mejora de potencia llega a ser de aproximadamente 30% para la frecuencia 250 Hz. Además se presenta una mejora de potencia al utilizar un piezoeléctrico de estimulación tangencial, respecto de la utilización de estimulación perpendicular, que llega a ser un 29% para la frecuencia 200 Hz.

El estudio teórico permitió encontrar una combinación de parámetros de la onda excitatoria que reducen la potencia total entregada mientras se mantiene el nivel de sensación táctil.

El análisis experimental no muestra diferencias significativas entre estimulación perpendicular y tangencial para los umbrales de sensación, dentro del rango de frecuencias 150-400 Hz, sin embargo para los rangos de frecuencias 25-150 Hz y 400-700 Hz, se encuentran diferencias significativas con un 95% de confianza.

## INDICE

CAPITULO I.	INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO II.	ANÁLISIS TEÓRICO .....	9
II.1	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS TEÓRICO.....	9
II.2	ANÁLISIS DE LA SEÑAL DE EXCITACIÓN.....	11
II.3	RAZÓN DE POTENCIA.....	12
II.4	OPTIMIZACIÓN DE LA RAZÓN ENTRE LA POTENCIA EN EL RANGO DE MAYOR SENSIBILIDAD TÁCTIL Y LA POTENCIA TOTAL CONSIDERANDO UNA RESPUESTA PLANA DEL TRANSDUCTOR Y LA RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL SISTEMA TÁCTIL.....	13
II.4.1	<i>Resultados de la envolvente óptima para frecuencias de pulso y ancho de pulso fijos con filtro rectangular.....</i>	15
II.4.1	<i>Discusión.....</i>	17
II.5	OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA PARA EL CASO DE UN TRANSDUCTOR CON RESPUESTA NO PLANA, CONSIDERANDO LA RESPUESTA DE FRECUENCIA HUMANA PARA EL CASO DE EXCITACIÓN PERPENDICULAR.....	19
II.5.1	<i>Resultados.....</i>	22
II.5.2	<i>Optimización de potencia en función de la envolvente para el caso excitación perpendicular.....</i>	23
II.5.3	<i>Resultados.....</i>	23
II.5.4	<i>Discusión.....</i>	27
II.6	OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA PARA EL CASO DE UN TRANSDUCTOR CON RESPUESTA NO PLANA, CONSIDERANDO LA RESPUESTA DE FRECUENCIA HUMANA PARA EL CASO DE MOVIMIENTO TANGENCIAL.....	28
II.6.1	<i>Resultados.....</i>	31
II.6.2	<i>Optimización de potencia en función de la envolvente para excitación tangencial.....</i>	32
II.6.3	<i>Resultados.....</i>	32
II.6.4	<i>Discusión.....</i>	36
CAPITULO III.	ANÁLISIS EXPERIMENTAL .....	37
III.1	METODOLOGÍA.....	40
III.2	CÁLCULO ESTADÍSTICO .....	43
III.3	RESULTADOS.....	44
CAPITULO IV.	CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS .....		50

La posibilidad de transferir información a través de estimulación táctil como ayuda a individuos visualmente discapacitados fue demostrada hace tres décadas con dispositivos contruidos en base a arreglos de estimuladores mecánicos aplicados sobre la piel [1,2]. El volumen, el peso, la ineficiencia y el alto costo del hardware involucrado continúa siendo un obstáculo para realizar un sistema que pudiera ser manipulado fácilmente por personas no videntes [3,4,5]. A través de una apropiada especificación de los parámetros de la forma de onda que se utiliza para estimular el sistema táctil, es posible reducir tanto los requerimientos de potencia como el tamaño de los componentes de hardware del sistema. Muchos estudios se han realizado en esta materia, pero han alcanzado sólo parcialmente su objetivo [3,7,8]. Se ha demostrado que utilizando pulsos rectangulares de ciclo de trabajo pequeño es posible reducir la potencia total entregada por el sistema sin disminuir la sensibilidad [9,10]. La Figura 1 presenta una forma de onda compuesta de un tren de pulsos seguido de un tiempo de recuperación donde este último segmento de tiempo evita la adaptación o acostumbamiento del sistema táctil al estímulo. Los parámetros relevantes de la forma de onda son frecuencia de los pulsos  $F$ , ancho de los pulsos  $W$ , número de pulsos en el tren  $NPB$ , tiempo de recuperación  $RT$ , y envolvente a la ráfaga de pulsos.

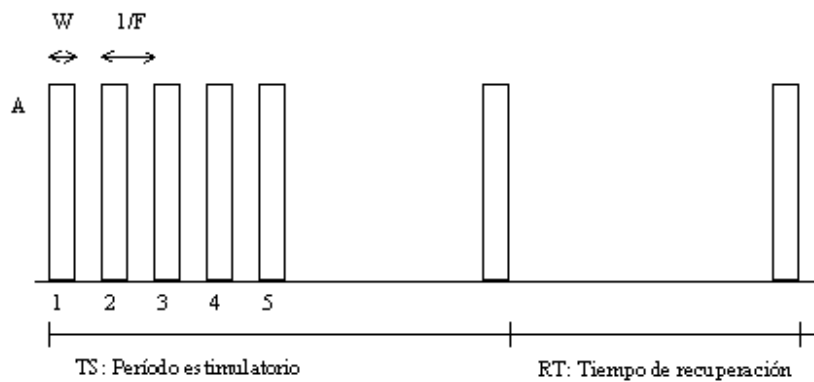


Figura 1: Ráfaga de pulsos rectangulares durante el período estimulatorio (TS), seguido de un tiempo de recuperación (RT).

En trabajos anteriores se optimizó el ancho de los pulsos para una frecuencia de pulso dada, considerando fijo los otros parámetros [13]. Esta forma de onda se utilizó para excitar al transductor empleando una forma de onda rectangular para modular la ráfaga de pulsos. Esta forma de onda que utiliza pulsos es preferida sobre otras continuas porque los períodos de apagado entre los pulsos permiten la multiplexión de varias señales en un mismo canal físico con el fin de reducir el hardware.

Experimentalmente se han determinado contornos de igual sensación vibrotáctil o intensidad subjetiva para diferentes niveles de intensidad. Estos contornos de igual magnitud subjetiva fueron establecidos para once niveles de intensidad a través de diez frecuencias referenciados a la frecuencia 250 Hz. Esto significa que se han seleccionado diferentes niveles de sensación para la frecuencia 250 Hz y luego se buscan los puntos de igual sensación para esta frecuencia. La curva de menor intensidad corresponde al umbral de sensación táctil. De esta manera el sistema táctil posee una respuesta de frecuencia dentro del rango 25 –700 Hz, como se observa en la Fig.2, donde el mínimo de la curva se encuentra en 250 Hz, ver [12]. Existe una variación del umbral de sensibilidad y resolución espacial entre distintas localidades de la piel. En los dedos de la mano el umbral de sensación se produce con desplazamientos entre 1-10  $\mu\text{m}$ , la discriminación a dos puntos es de alrededor 2.5 mm en el dedo índice de la mano [15].

Dado que la sensibilidad táctil difiere según las zonas del cuerpo se debe escoger un área específica de la piel para realizar todas las pruebas y así poder comparar los requerimientos de potencia. Para el estudio de optimización de la potencia se considerará la sensibilidad táctil del dedo medio como sensor de la estimulación mecánica. Esta estimulación será una señal de pulsos como la que se muestra en la Figura 1. Se buscarán los parámetros óptimos de señal excitatoria que permite dirigir la mayor fracción de potencia a la zona del espectro en que el tacto es más sensible. Así, una manera de optimizar la potencia es encontrar la máxima razón entre potencia dirigida a la zona de mayor sensibilidad táctil y la potencia total entregada por el sistema

$\frac{P_{50-700}}{P_T}$ . Donde  $P_{50-700}$  corresponde a lo potencia dirigida a la zona de mayor sensibilidad táctil dentro del rango de frecuencias 50-700 Hz y  $P_T$  la potencia total entregada al sistema.

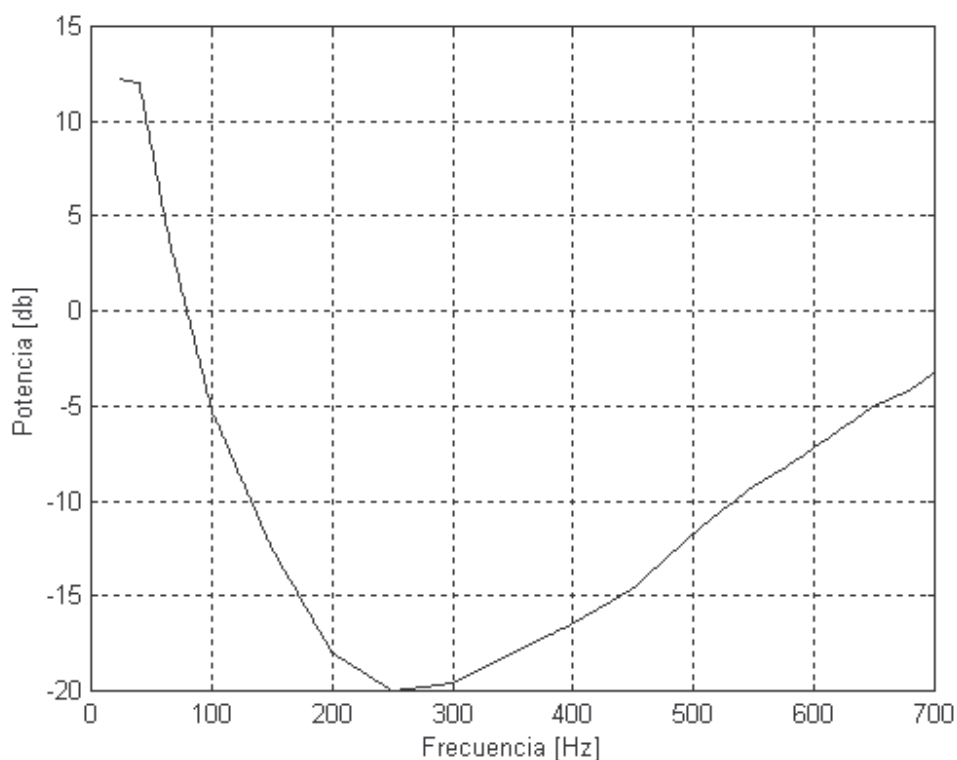


Figura 2: Respuesta de frecuencia del sistema táctil

Los resultados de investigaciones anteriores [11] han permitido encontrar un conjunto de parámetros óptimos de la señal para el estímulo táctil, respecto de la sensibilidad del sistema táctil y respecto de la potencia requerida para alcanzar el umbral de sensación. Para una onda excitatoria como la Figura 1 y un ciclo de trabajo corto seguido de un tiempo de recuperación, se aplicó el criterio de optimización para maximizar la razón entre la potencia entregada por la señal excitatoria dentro del rango de frecuencias de mayor sensibilidad táctil 25-700 Hz y la potencia total entregada por el sistema dentro del ciclo estimulador. Se encontró un ancho de pulso óptimo para cada frecuencia de pulsos posible [11,13]. Se encontró que la razón de potencia tiene un máximo en función del ancho de pulsos alrededor de 1.1 ms sin considerar la respuesta de frecuencia del sistema táctil y 1.3 ms si se considera dicho filtro. El estudio teórico determinó



que para una frecuencia de pulsos de 100 Hz, al seleccionar un ancho de pulso óptimo de 1.1 ms, se reduce la potencia total entregada por la onda excitatoria a 62.7% de la potencia total entregada por una onda de ciclo de trabajo del 50% donde el ancho de pulso es de 5 ms, manteniendo la potencia dentro de la región de frecuencias de máxima sensibilidad táctil. Los estudios experimentales se hicieron midiendo niveles de corriente y estos arrojaron resultados similares [11,13].

Esta memoria de Título fue realizada entre los años 1995 y 1996, por esto se hará una breve reseña de los últimos avances del tema en cuestión, que para la investigación realizada en esa época aportan interés y dejan actualizado al lector.

Dentro de las investigaciones realizadas desde 1996 en adelante respecto de las interfaces táctiles, se encontró que las personas frecuentemente fallan en notar cambios de patrones cuando este es entregado como un patrón táctil alternado, a una frecuencia de patrones menor que 800 ms presentado sobre la superficie humana. Esta falla al notar los cambios de patrones táctiles ocurre aún cuando la detección de cambios es la única tarea, es decir cuando la carga perceptual de la situación experimental es relativamente baja. Por consiguiente los problemas en la detección de cambios táctiles podrían ser mucho peores en un ambiente real donde los diseñadores de interfaces consideren implementarla. Estos últimos descubrimientos demuestran empíricamente la existencia de un equivalente táctil del fenómeno de cambios ciegos (Change Blindness) ya reportado en estudios de escenas visuales [15].

Transferir información a través de una excitación táctil ha direccionado nuevas aplicaciones en realidad virtual, robótica, cirugía, sustitución sensorial y rehabilitación para los discapacitados en los últimos años. El consumo de potencia es un factor importante en el diseño de interfaces vibrotáctiles, porque afecta las necesidades de energía, tamaño, peso, disipación de calor y costo de la electrónica asociada. Se presenta un estudio experimental respecto de la energía requerida para alcanzar umbrales táctiles en transductores electromecánicos y piezoeléctricos. Se consideran tres formas diferentes de onda con un período excitatorio formado por un ciclo de trabajo del 50% (R50), ciclo de trabajo corto de pulsos rectangulares (RLO) y pulsos con forma de onda sinusoidal (SIN). Se consideraron diez períodos de repetición de pulsos (RPs) en el

rango [1/550-1/25] segundos. Las formas de onda de voltaje y corriente aplicada a los transductores y umbrales de sensación en un grupo de 12 sujetos fueron probados y almacenados en un osciloscopio digital. La potencia promedio fue determinada para cada sujeto, y diferencias de dos órdenes de magnitud fueron medidas entre los transductores del tipo piezoeléctricos y electromecánicos. Para el caso electromecánico un consumo pequeño de potencia de 25 uW fue determinado para un período de repetición  $RP=1/25$  [s] y para ciclo de trabajo corto de pulsos rectangulares (RLO). En el caso de un transductor piezoeléctrico, la potencia de 0.21 uW fue determinada para excitación sinusoidal y un período de repetición  $RP =1/250$  [s]. Estos resultados muestran la ventaja de la reducción de los requerimientos de potencia para los display vibrotáctiles, los cuales pueden ser optimizados escogiendo un tipo apropiado de transductor, formas de onda excitatoria y períodos de repetición de pulsos [16].

La resolución espacial táctil es un factor importante en el diseño de arreglos vibrotáctiles. La distancia de discriminación es usada como una medida de resolución espacial táctil. En [17] se presentó un estudio experimental que muestra el efecto de los parámetros del tren de pulsos, período de repetición de pulsos y ciclo de trabajo en discriminación espacial vibrotáctil de dos puntos. Un arreglo de vibradores piezocerámicos fue usado para medir la discriminación espacial de dos puntos en el dedo índice. En un grupo de 14 sujetos, el promedio de la distancia de discriminación de dos puntos para un período de repetición de pulsos de 1/25 s fue de 2.1 mm (SD=1.0), donde para 1/500 s es 5.1 mm (SD=0.9). Las diferencias en distancias de discriminación son estadísticamente significativas de acuerdo al análisis ANOVA ( $p<0.001$ ). Los resultados muestran que la distancia de discriminación es mejor para períodos de repetición de pulsos más largos. Por lo tanto el período de repetición de pulsos en una forma de onda compuesta de un tren de pulsos es importante para la resolución táctil. No se encuentran diferencias significativas en la distancia de discriminación entre ciclos de trabajo menores al 50%. Estos últimos resultados indican que escogiendo formas de onda de ciclos de trabajo corto para estimulación táctil, la potencia puede ser reducida sin pérdida en la capacidad de discriminación de dos puntos [17].

El presente trabajo de título tiene como objetivo principal optimizar en forma teórica la potencia entregada por la forma de onda excitatoria al rango de frecuencias de mayor sensibilidad táctil, es

decir 25-700 Hz. La optimización se realiza en función de la forma de onda excitatoria y sus parámetros relevantes.

El trabajo a realizado consiste en un estudio de optimización de potencia orientado a la estimulación táctil utilizando la respuesta de frecuencia de un piezoeléctrico. Para esto se investigó de forma teórica el fenómeno, simulando matemáticamente el proceso de estimulación junto con todos sus componentes y se encontró la potencia óptima entregada a la piel. Se hizo también un trabajo experimental donde es posible medir la amplitud o deflexión del material piezoeléctrico cuando se realiza la estimulación mecánica. De esta manera se pueden obtener parámetros experimentales óptimos para la entrega de potencia y la obtención de la curva filtro asociada al transductor piezoeléctrico, para poder modelar el sistema de simulación.

A diferencia de mediciones realizadas con anterioridad, en este estudio se mide experimentalmente la respuesta táctil por medio de un sensor óptico. Este instrumento mide la amplitud del movimiento mecánico que provoca el transductor a la piel. Para nuestro estudio se utilizarán dos piezoeléctricos como transductor de la energía, uno para cada tipo de estimulación, tangencial y perpendicular. De esta manera se puede medir la respuesta táctil para el caso tangencial y el perpendicular. Luego se realiza un análisis estadístico para determinar si existen diferencias significativas entre los umbrales de sensibilidad de las distintas frecuencias para los dos tipos de estimulación: tangencial y perpendicular.

Esta memoria de título está organizada de la siguiente manera. En el capítulo 0 se presenta un estudio teórico de optimización de potencia entregada al sistema táctil, utilizando como excitación un tren de pulsos mecánicos modulado por una forma de onda sinusoidal, aplicado a la piel por medio de un transductor piezoeléctrico. Este último es un transductor de energía eléctrica a mecánica o viceversa que potencialmente puede llegar a tener aplicaciones en la entrega de información a discapacitados.

La primera optimización se realiza en función de los parámetros más relevantes en la forma de onda de estimulación (tren de pulsos) tales como frecuencia de pulsos, ancho de pulsos, etc. Luego de obtener parámetros óptimos asociados a los pulsos se realiza una búsqueda computacional, donde se selecciona la mejor forma de onda que modula la entrada de pulsos en base a estos parámetros. Se utilizó un programa computacional que calcula la razón entre la potencia de entrega al sistema táctil v/s la potencia total que entrega el sistema, en función de los parámetros de forma de onda implicados, de esta manera se realiza una búsqueda computacional

del conjunto óptimo de valores que representan a la forma de onda óptima que modula los pulsos. Este proceso se realiza para un transductor con respuesta de frecuencia plana y luego para un transductor con respuesta de frecuencia real.

En el capítulo III se incluye la parte experimental del estudio donde se presentan los resultados de una toma de muestras de sensibilidad táctil a un grupo de 5 personas. Se presenta la metodología de toma de datos, incluyendo el montaje de estimulación táctil utilizado, Se presentan además los resultados gráficos de las curvas umbrales de sensibilidad para el caso de estimulación tangencial y perpendicular junto con un análisis estadístico de los datos experimentales para determinar algún tipo de diferencia entre la estimulación mecánica del movimiento tangencial y el perpendicular aplicado al pulpejo del dedo.

En el capítulo IV se presentan las conclusiones del análisis teórico y del análisis experimental.

## Capítulo II. Análisis Teórico

### II.1 Introducción al análisis teórico.

Para nuestro análisis teórico se considera la forma de onda de excitación eléctrica a la salida del circuito, el transductor representado por su función de transferencia o filtro  $G_f(\omega)$  y la sensibilidad del sistema táctil como un segundo filtro  $H_f(\omega)$  como se representa en el diagrama de bloques de la Fig. 3. Se realiza un análisis espectral de la forma de onda excitatoria con el propósito de determinar una ecuación matemática que represente la potencia entregada a la piel para el caso más general que incluye los filtros involucrados en la transferencia de información. A partir de esta ecuación se realiza una búsqueda computacional con el fin de obtener parámetros óptimos de relevancia en la onda de excitación táctil que maximicen la potencia entregada en el rango de frecuencia de mayor sensibilidad táctil.

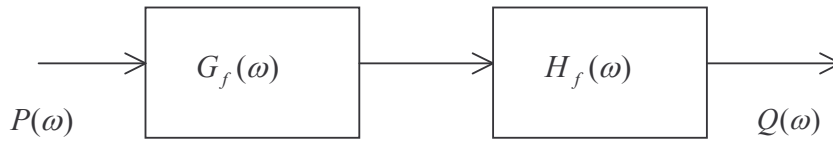


Figura 3: Diagrama en bloques mostrando las funciones de transferencia asociadas a la estimulación táctil.  $G_f(\omega)$  representa la función de transferencia asociada al transductor,  $H_f(\omega)$  representa la función de transferencia asociada al sistema táctil.  $P(\omega)$  es la potencia de entrega al sistema en función de la frecuencia y  $Q(\omega)$  la potencia de salida en función de la frecuencia.

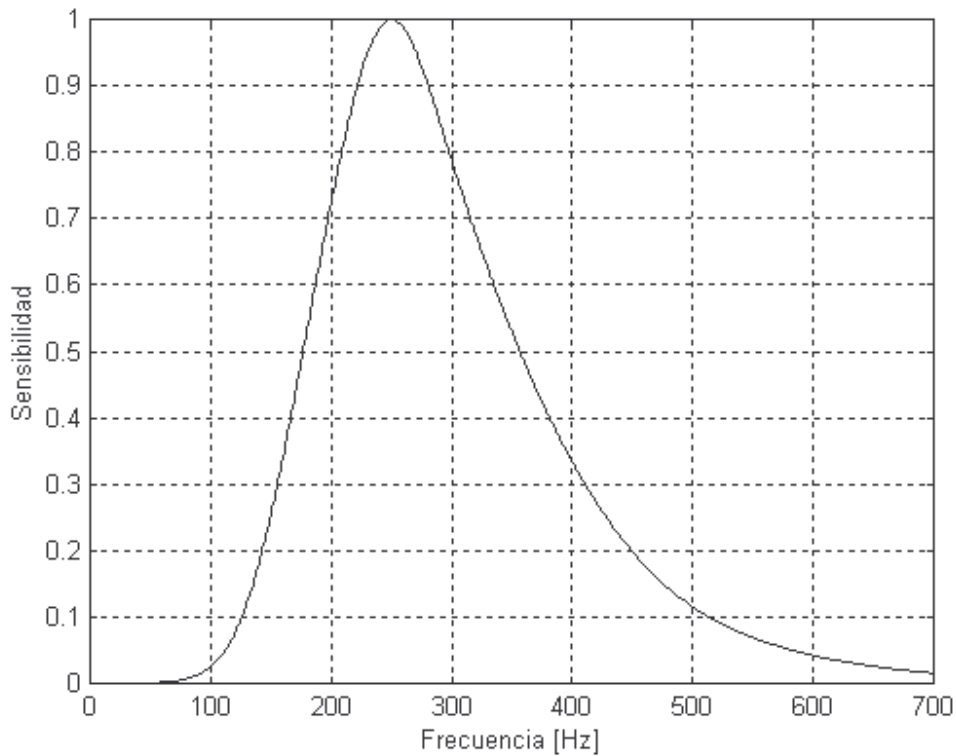


Figura 4: Función de sensibilidad táctil normalizada al valor máximo.

Se define la sensibilidad táctil como el inverso de la respuesta umbral de la sensación táctil a partir de la curva de respuesta umbral presentada en la Fig. 2 [14]. Para los efectos prácticos de obtención de puntos de la respuesta umbral, se toman datos en el momento de mínima percepción de movimiento. Mediante el método matemático SPLINE CUBICO se realiza una interpolación de los puntos experimentales. La curva se presenta en una escala lineal, invirtiendo los datos y normalizando los datos de modo de asignar sensibilidad 1 al valor máximo, obteniéndose la función de sensibilidad táctil como la que se presenta en la Figura 4.

El rango de mayor sensibilidad táctil se encuentra entre 25 y 700 Hz, por lo cual nos interesa maximizar la potencia entregada en esta ventana de frecuencia.

El filtro mecánico del transductor se obtiene midiendo la deflexión mecánica para los diferentes niveles de frecuencia de excitación con una salida de voltaje sinusoidal y entregando una potencia de entrada constante al transductor. Luego se mide la amplitud de la deflexión del transductor.

## II.2 Análisis de la señal de excitación

Dada una onda excitatoria periódica  $S(t)$ , su transformada de Fourier queda definida por:

$$X(\omega) = 2\pi \sum_n S_n \delta(\omega - n\omega_0) \quad (\text{II-1})$$

Donde  $S_n$  son los coeficientes de la serie de Fourier.

Como se explicó en la introducción se considerará una señal compuesta por un tren de pulsos seguida de un período de no estimulación. Este último período previene la adaptación de la piel a la estimulación mecánica. La onda estimulatoria es la mostrada en la Fig1.

Considerando  $NPB$  pulsos de ancho  $W$  y amplitudes  $A_k$ , donde  $k=0, \dots, NPB$  y  $A_k$  son las amplitudes de la forma de onda que modulan el tren de pulsos,  $F$  la frecuencia de los pulsos. Los coeficientes de Fourier de la señal de excitación son:

$$S_n = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{NPB-1} \int_{\frac{k}{F}}^{\frac{k+W}{F}} A_k \exp(-jn\omega_0 t) dt$$

$$S_n = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{NPB-1} \frac{A_k}{-jn\omega_0} \exp\left(-jn\omega_0 \frac{k}{F}\right) (\exp(-jn\omega_0 W) - 1) \quad (\text{II-2})$$

Donde para la onda excitatoria de interés se tiene como frecuencia  $\omega_0 = 2\pi/T$  y período

$T=TS+RT$ , donde  $TS=(NP-1)/F+W$  y  $RT$  corresponde al tiempo de recuperación.

La potencia total por ciclo estimulatorio puede ser calculada como:

$$P_T = \frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt$$

$$P_T = \frac{W}{T} \left( \sum_{k=0}^{NPB-1} A_k^2 \right) \quad (\text{II-3})$$

Esta es la potencia entregada por la forma de onda excitatoria como una forma de onda de voltaje. La respuesta de frecuencia táctil entrega una función de sensibilidad que se presenta en la Figura 4, que para efectos matemáticos se considera como un filtro a la potencia total, de esta manera incluimos el filtrado que realiza la piel sobre la onda excitatoria.

### II.3 Razón de Potencia

Se define la eficiencia de la potencia como la razón de potencia dentro del rango de mayor sensibilidad táctil sobre la potencia total como:

$$\frac{Q_{fW}}{P_T} \quad (\text{II.3-1})$$

Donde  $Q_{fW}$  corresponde a la potencia entregada por la forma de onda excitatoria en el intervalo de frecuencias de mayor sensibilidad táctil, y  $n_1, n_2$  son los números de las armónicas en el rango de frecuencias de interés.

$$Q_{fW} = 2 \sum_{n=n_1}^{n_2} |S_n|^2 \quad (\text{II.3-2})$$

La razón  $Q_{fW}/P_T$  puede ser optimizada computacionalmente en función de los parámetros de la onda, como el ancho de pulso  $W$ , la frecuencia de pulsos  $F$  o bien la forma de onda que modula el tren de pulsos, definida como la envolvente del tren de pulsos. Previo a la realización de cálculos se debe tomar en consideración el filtrado que se produce como resultado de la respuesta de frecuencia de la sensibilidad táctil. Para esto se considera una función de sensibilidad táctil normalizada,  $H_f(\omega)$ . Además se debe tomar en cuenta el filtrado que produce el transductor de energía, cuando este no tiene una respuesta de frecuencia suficientemente plana para el rango de frecuencia de interés, entonces se incluye el filtro correspondiente  $G_f(\omega)$ . En este caso el transductor utilizado es un transductor piezoeléctrico que posee una respuesta de frecuencia dependiente de las dimensiones físicas de la lámina piezoeléctrica a utilizar. El desarrollo experimental se presenta más adelante en el capítulo III donde se determina la respuesta de



frecuencia del transductor. Es posible representar el filtrado total que realiza el transductor y el filtro debido a la sensibilidad táctil como la ponderación de los dos filtros normalizados a uno en el dominio de la frecuencia:

$$H_f(\omega) = \frac{H_f(\omega)G_f(\omega)}{\max(H_f(\omega)G_f(\omega))} \quad (\text{II.3-3})$$

Utilizando la función  $H_f(\omega)$  en la ecuación II.3-2, la potencia que entrega la forma de onda en el rango de frecuencias correspondientes a las armónicas entre  $n_1$  y  $n_2$  ponderada por los dos filtros será:

$$Q_{fW} = 2 \sum_{n=n_1}^{n_2} |F(n\omega_0)H_f(n\omega_0)|^2, \quad (\text{II.3-4})$$

donde  $F(n\omega_0)$  corresponden a los coeficientes de Fourier de la potencia entregada, los que son ponderados por el valor del filtro a cada frecuencia.

II.4 Optimización de la razón entre la potencia en el rango de mayor sensibilidad táctil y la potencia total considerando una respuesta plana del transductor y la respuesta de frecuencia del sistema táctil.

Los parámetros de interés de la forma de onda del tren de pulsos con los cuales se optimiza la potencia son  $W$  y  $A_k$ . En un estudio realizado anteriormente [11] se encontró que para una envolvente rectangular se puede aumentar la potencia que ingresa a la piel escogiendo un ancho de pulso adecuado  $W$  [ms]. El estudio anterior se realizó para la respuesta de frecuencia con un transductor del tipo bobina, que posee una respuesta plana dentro del rango de frecuencias de interés. Al realizar este cálculo computacional se obtiene el gráfico de la razón de potencia entre la potencia en el rango de mayor sensibilidad táctil y la potencia total para el rango de ancho de pulso 0.2-16 ms y rango de frecuencias 60-500 Hz. Se obtiene una matriz de puntos que puede ser visualizada como una superficie como se muestra en la Figura 5.

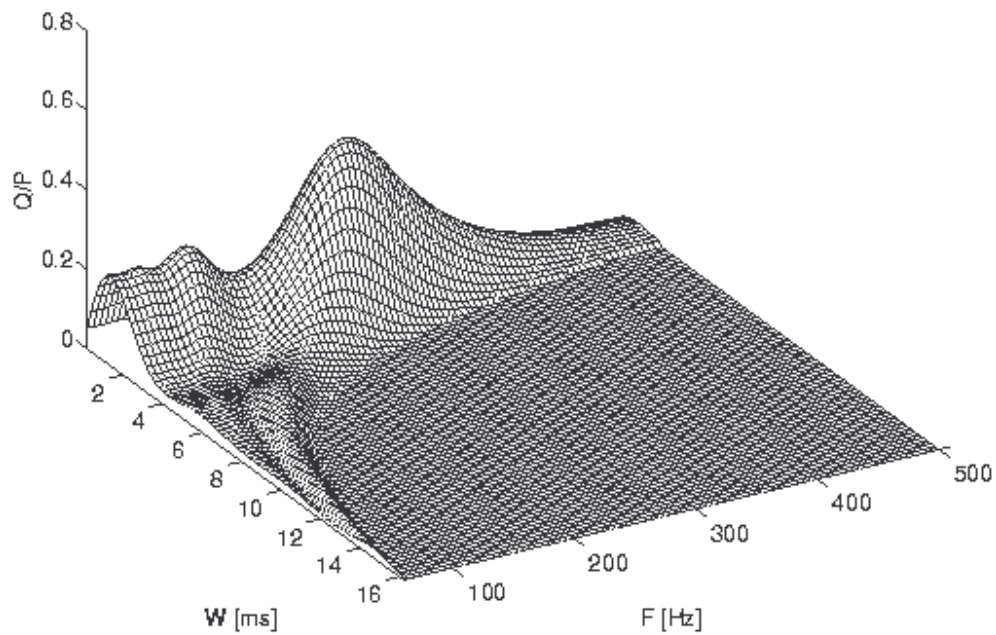


Figura 5: Razón de potencias entre potencia en el rango de mayor sensibilidad táctil y la potencia total entregada al sistema sin considerar la respuesta de frecuencia del transductor para una envolvente de tren de pulsos rectangular dentro del rango de ancho de pulso  $W \in [0.2-16]$  ms y la frecuencia  $F \in [60-500]$  Hz.

Seleccionando la máxima razón de potencia  $Q/P$  para cada frecuencia se puede encontrar un ancho de pulso óptimo que hace máxima esta razón  $Q/P$ . Estos valores se muestran en la tabla II-1 para algunas frecuencias de interés.

Tabla II-1: Razones de potencia  $Q/P$  para diferentes frecuencias de pulso considerando ancho de pulso óptimo y un tren de pulsos rectangular como envolvente.

Frecuencia [Hz]	W óptimo [ms]	Razón Q/P
60	1.4	0.2264
100	1.4	0.2171
150	1.2	0.1749
200	1.6	0.2463
250	1.4	0.4329
300	1.2	0.2892
400	1.0	0.0651

Centrándose en la forma de onda de la envolvente de pulsos es posible realizar un cálculo computacional de la eficiencia de la potencia para todas las combinaciones  $A_k$  de amplitudes de los diez pulsos. El valor máximo de los pulsos se fija en 1.0 y se hace variar la amplitud de los pulsos con un paso de 0.1 de tal manera de reducir el tiempo de proceso de los cálculos. Se mantiene la frecuencia de pulso y el ancho de los pulsos en los valores que optimizan la razón de potencia con una envolvente del tipo rectangular. Para simplificar la búsqueda computacional se supone una envolvente del tren de pulsos simétrica, así las combinaciones de amplitudes disminuyen en  $10^5$  veces, de esta manera el tiempo de proceso de cálculo se aminora considerablemente. Esta selección con respecto a la razón de potencia entregará la envolvente óptima de la onda para cada frecuencia y el ancho de pulso óptimo.

#### II.4.1 Resultados de la envolvente óptima para frecuencias de pulso y ancho de pulso fijos con filtro rectangular.

La tabla II-2 presenta las envolventes óptimas para diferentes frecuencias de pulso obtenidas con el cálculo computacional. Se seleccionó la envolvente de pulsos que optimiza la razón Q/P.

Tabla II-2: Razones de potencia Q/P para diferentes frecuencias de pulso considerando un ancho de pulso óptimo y una envolvente óptima.

Frecuencia [Hz]	W óptimo [ms]	Q/P	Amplitudes de los pulsos
60	1.4	0.2265	0.3 0.5 0.7 0.8 0.9
100	1.4	0.22431	1.0 0.1 0.1 0.1 0.1
150	1.2	0.21198	1.0 0.1 0.1 0.1 0.1
200	1.6	0.24081	0.2 0.4 0.6 0.8 0.9
250	1.4	0.44653	0.32 0.58 0.78 0.92 1.0
300	1.2	0.30145	0.6 1.0 0.94 0.42 0.02
400	1.0	0.21103	1.0 0.02 0.02 1.0 0.02

A partir de la Tabla II-2 se obtiene la Tabla II-3 donde se muestran los porcentajes de mejora de razón de potencia para distintas frecuencias de pulso, considerando una envolvente óptima respecto del escenario de una envolvente rectangular con el 50% de ciclo de trabajo, utilizando un transductor de respuesta plana dentro del rango de frecuencia de interés 25-700 Hz de la respuesta de sensibilidad táctil.

Tabla II-3: Porcentajes de mejora de una envolvente óptima respecto de una rectangular con el 50% de ciclo de trabajo.

Frecuencia [Hz]	% Mejora $\Delta$ Q/P
300	15.7
280	16.8

250	17.4
200	22.7
350	60.8
180	76.3
380	168.3
400	247.2
80	408.4
70	558.2
150	622.3
100	663
450	755.8
60	811.7
480	1073
500	1492
120	1632

#### II.4.1 Discusión.

En la figura 6 se presentan los resultados de las razones de potencia en función de la frecuencia para tres casos: a) envolvente óptima y ancho de pulso óptimo, b) envolvente rectangular y ancho de pulso óptimo, c) envolvente rectangular y pulso con 50% de ciclo de trabajo. Los resultados muestran que la razón  $Q_{fW}/P_T$  puede ser mejorada aproximadamente un 17 % para pulsos de

250 Hz cuando se utiliza una envolvente óptima y un ancho de pulso óptimo respecto de una forma de onda de la misma frecuencia pero con un 50 % de ciclo de trabajo. La mejora alcanza 163,2% para pulsos de frecuencia 120 Hz. Esto es válido para el caso de excitación táctil con un transductor de respuesta plana dentro del rango de frecuencias 25-700 Hz. Este estudio da la posibilidad de hacer una selección apropiada de los parámetros de la forma de onda, para encontrar la envolvente óptima y el pulso óptimo que de la máxima potencia dentro de la región de mayor sensibilidad táctil, minimizando la pérdida de potencia fuera de esta banda.

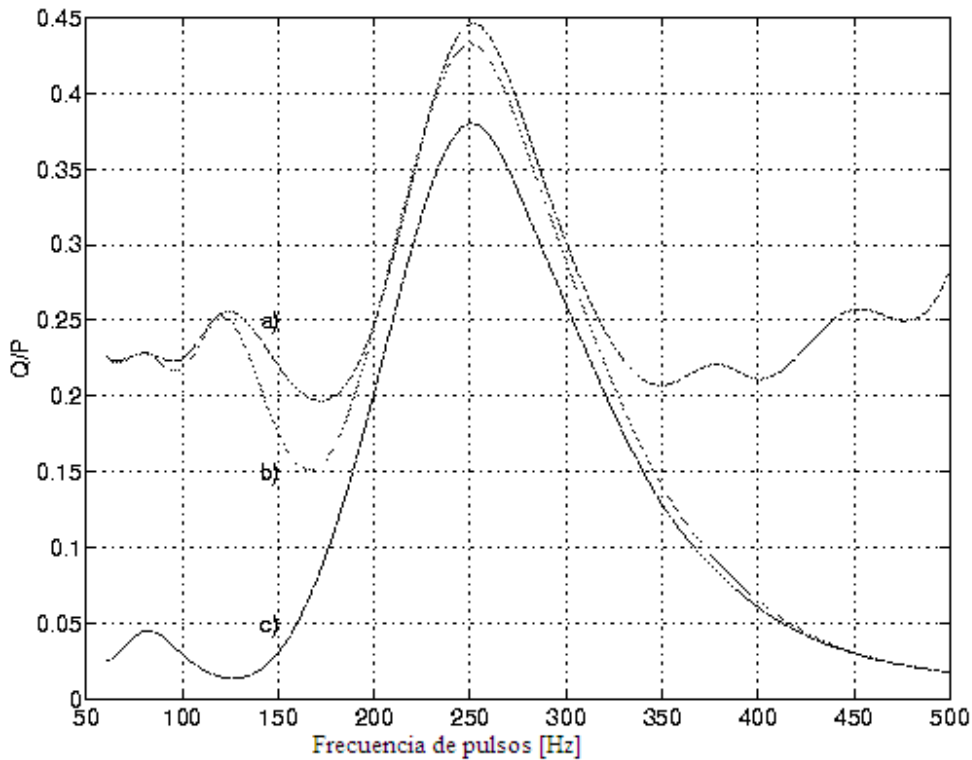


Fig 6: Razones de potencia considerando la función de sensibilidad táctil, para tres optimizaciones diferentes. Presenta tres tipos de cálculo de la pérdida de potencia en el sistema. La curva c) presenta la razón de potencia utilizando el 50% de ciclo de trabajo con una envolvente rectangular. La curva b) presenta la razón de potencia optimizada respecto del ancho de pulsos manteniendo una envolvente rectangular. La curva a) presenta la razón de potencia optimizada respecto de la forma de onda de la envolvente manteniendo los valores óptimos de ancho de pulsos de la curva b).

II.5 Optimización de potencia para el caso de un transductor con respuesta no plana, considerando la respuesta de frecuencia humana para el caso de excitación perpendicular.

En esta sección se verá un análisis semejante al hecho en la sección II.4 donde se supuso un transductor con respuesta de frecuencia plana dentro del rango de frecuencias 25-700 Hz.

Para los cálculos ahora se incluirá la respuesta de frecuencia de un transductor de tipo piezoeléctrico con su respuesta de frecuencia y que presenta un consumo de potencia mucho más bajo que los transductores basados en bobinas. Se medirá la respuesta de frecuencia del sistema táctil asociada al piezoeléctrico para incorporar este filtro en nuestros cálculos. Se hará uso de un sensor óptico para medir la amplitud del movimiento en el piezoeléctrico. Este instrumento de alta precisión entrega medidas del orden de un micrómetro de amplitud que es suficiente para la medición de amplitud de la deflexión mecánica de la piel. El objetivo de estos cálculos es obtener parámetros óptimos de la forma de onda que optimicen la razón de potencia  $Q_{fW}/P_T$ , cuando se aplica estimulación perpendicular a la piel usando un transductor del tipo piezoeléctrico como elemento de estimulación mecánica a la piel. Se optimizará la razón de potencia con respecto al ancho de pulso para la forma de onda rectangular utilizando un piezoeléctrico como estimulador.

Se define la función de sensibilidad táctil a partir de la respuesta umbral tomada a un grupo de personas dentro de la ventana de interés 25-700 Hz. En el Anexo1 se muestra un diagrama físico del sistema de estimulación y medición utilizado. En el Anexo2 se especifica el circuito utilizado.

Además del filtro correspondiente a la sensibilidad táctil se debe incluir en los cálculos de razón de potencia el filtro mecánico asociado al piezoeléctrico. Se mide la respuesta de frecuencia, que experimentalmente se obtiene de medir la amplitud del movimiento v/s frecuencia manteniendo el voltaje máximo de entrada constante. Manteniendo una carga constante (el pulpejo del dedo apoyado en el piezoeléctrico) sobre el transductor. Como la respuesta de frecuencia de un piezoeléctrico varía según sus dimensiones se selecciona un piezoeléctrico con respuesta de frecuencia lo más plana posible dentro del rango de frecuencias de interés 25-700 Hz. Según el largo del piezoeléctrico y la precisión del corte se puede obtener una respuesta de frecuencia como la que se muestra en la figura 7 (b). La respuesta de frecuencia de los dos filtros componen el filtro completo que se obtiene al ponderar las dos respuestas de frecuencia Figura 7 (a) y (b), luego se normaliza al valor uno obteniéndose la Figura 7 (c). Esta curva se normaliza respecto del valor máximo y se incluye en la ecuación (II.3-3). Finalmente se realiza la optimización de la razón de potencia considerando estos dos filtros para el rango de frecuencias 60-500 Hz y se mantiene las amplitudes del tren de pulsos constante durante el período de estimulación  $T_0$ .

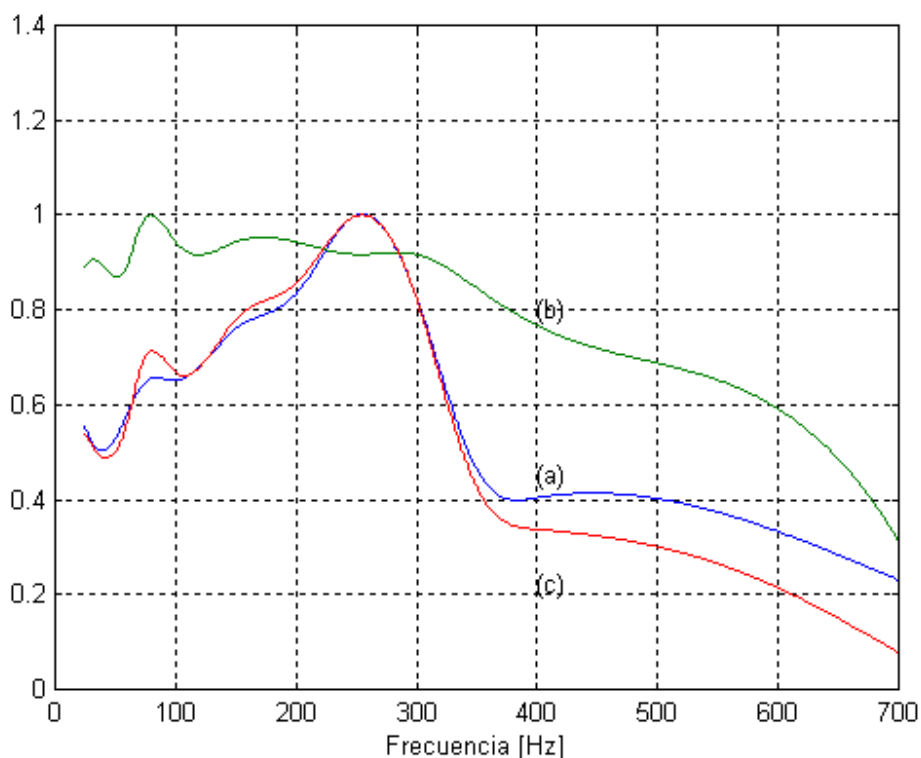




Figura 7: Se muestra la respuesta de frecuencia de (a) sistema táctil, (b) del piezoeléctrico y (c) sistema completo que incluye (a) y (b).

Incorporando a los cálculos el filtro completo variando el ancho de pulso y manteniendo fija la envolvente de la forma de onda a una rectangular se obtiene una matriz de resultados de razones de potencia como se observa en la figura 8, donde se presenta la matriz de resultados de razón de potencia  $Q/P$ , considerando el filtro completo en excitación perpendicular de la piel. Este se compone del filtro de respuesta del piezoeléctrico con carga, más el filtro de sensibilidad de la piel. Se observa que para cada frecuencia de pulsos se puede seleccionar un ancho de pulso óptimo que maximiza la razón de potencia  $Q/P$  para una envolvente de pulsos rectangular.

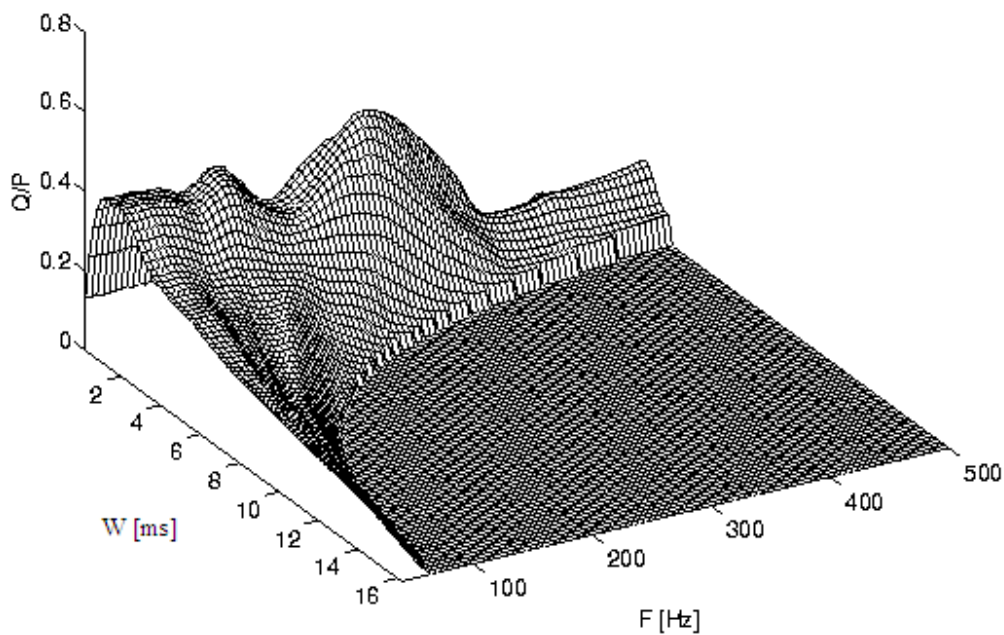


Figura 8: Razón de potencia para el rango de ancho de pulso  $W \in [0.2-16]$  ms y el rango de frecuencia de pulsos  $F \in [60-500]$  Hz, con envolvente rectangular utilizando el filtro completo para el caso de excitación perpendicular con un piezoeléctrico.

### II.5.1 Resultados

De la matriz de la figura 8 para cada frecuencia dentro del rango 25-500 Hz se obtiene una curva de razón de potencia de la cual es posible seleccionar el ancho de pulso óptimo que maximiza la razón de potencia para una envolvente rectangular cuando se utiliza estimulación perpendicular. En la Tabla II.4 se presentan los anchos de pulso óptimo que maximizan la razón de potencia para algunas de las frecuencias dentro del rango de interés, considerando el filtro completo para el caso de excitación perpendicular.

Tabla II-4: Anchos de pulso óptimo para excitación perpendicular utilizando envolvente rectangular.

Frecuencia [Hz]	Ancho de pulso Óptimo [ms]	Razón de Potencia Q/P
60	1.9	0.423
100	1.3	0.388
150	1.2	0.39
200	1.1	0.35
250	1.3	0.482

300	0.9	0.397
400	1.0	0.136

### II.5.2 Optimización de potencia en función de la envolvente para el caso excitación perpendicular

Seleccionando el ancho de pulso óptimo para cada frecuencia de pulsos, que maximiza la razón de potencia  $Q/P$  en una envolvente de pulsos rectangulares, se calcula la razón de potencia en función de la envolvente de la forma de onda.

Considerando una frecuencia de pulsos fija, el ancho de pulso óptimo que maximiza la razón de potencia  $Q/P$  en una envolvente de pulsos rectangulares y los demás parámetros constantes, se hace variar la envolvente del tren realizando todas las combinaciones posibles de amplitudes de los pulsos  $A_k$  con un paso de 0.1. Se toma como máxima amplitud la unidad. De esta manera se calcula la razón de potencia en función de la envolvente de la forma de onda.

### II.5.3 Resultados

Los resultados finales del cálculo computacional donde se maximiza la razón de potencia en función de la envolvente del tren de pulsos con un ancho de pulso óptimo se presentan en la Tabla II-5. Se observa que para casi todas las frecuencias de pulso la razón se puede maximizar por sobre el valor 0.4 alcanzando un máximo de la razón de 0.48 para el valor 250 Hz. En este caso el 48 % de la potencia total es entregada al sistema táctil, mientras que para la frecuencia de

400 Hz se entrega un 36% de la potencia total al sistema táctil. Se observa que para cada frecuencia existe una envolvente óptima que consta de 5 valores de amplitud, que corresponden a la mitad de los pulsos, dado que se supuso inicialmente una envolvente de forma de onda simétrica considerando diez pulsos.

La mejora de la razón de potencia con envolvente óptima y ancho de pulso óptimo con respecto del caso de un tren de pulsos con envolvente rectangular se presenta en la gráfica de la Figura 9.

Tabla II-5: Envolventes óptimas y razones de potencia para frecuencias de interés en el caso de excitación perpendicular.

Frecuencia [Hz]	W óptimo [ms]	Q/P	Amplitudes de los pulsos
60	1.9	0.42790	1.0 0.1 0.9 0.1 0.4
100	1.3	0.41880	1.0 0.10.1 1.0 0.1
150	1.2	0.41499	1.0 0.1 0.1 0.1 0.4
200	1.1	0.40208	1.0 0.1 0.1 0.1 0.1
250	1.3	0.48371	0.6 0.9 1.0 0.9 0.8
300	0.9	0.41943	0.8 1.0 0.6 0.1 0.1
400	1.0	0.36947	1.0 0.1 0.1 1.0 0.1

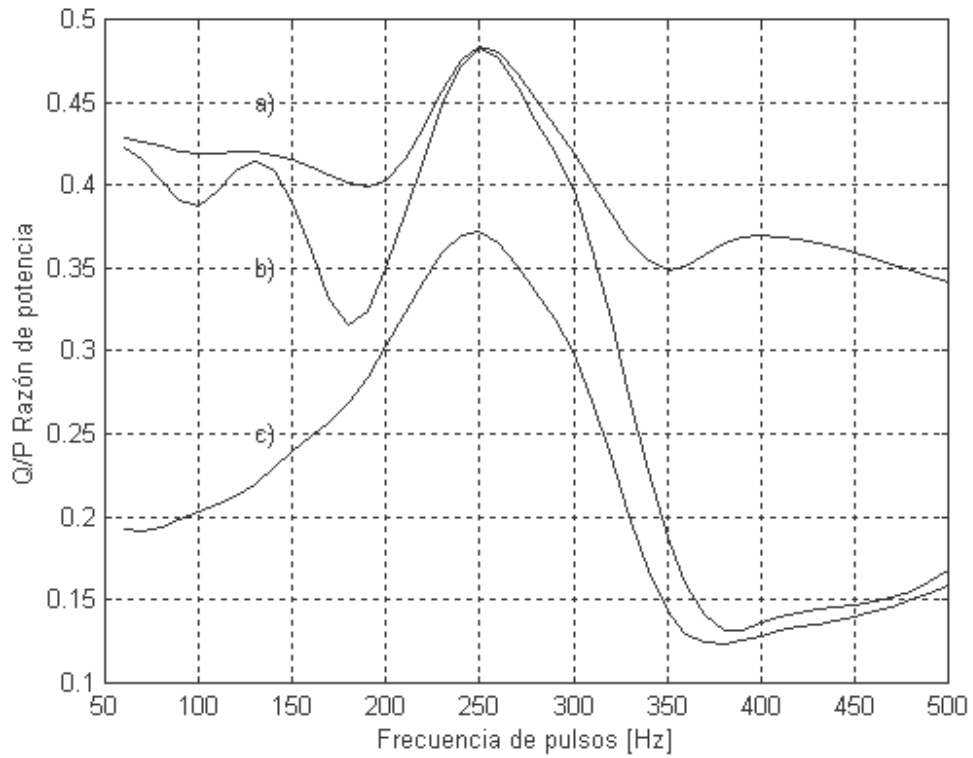
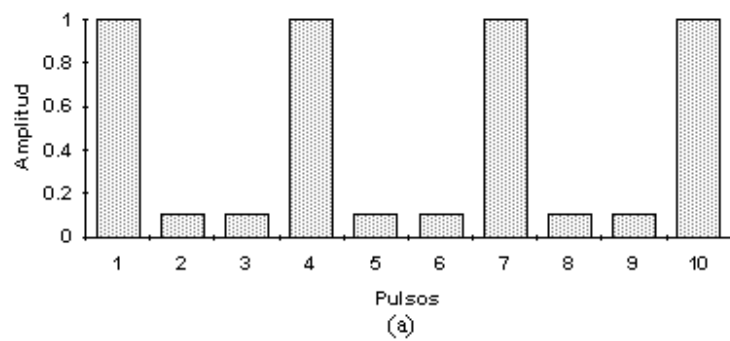


Figura 9: Comparación teórica de las razones de potencia de entrega dentro del rango de frecuencias de interés 25-700 Hz, para el caso a) envolvente óptima y ancho de pulso óptimo, b) ancho de pulso óptimo con envolvente rectangular y c) ciclo de trabajo de un 50% con envolvente rectangular.



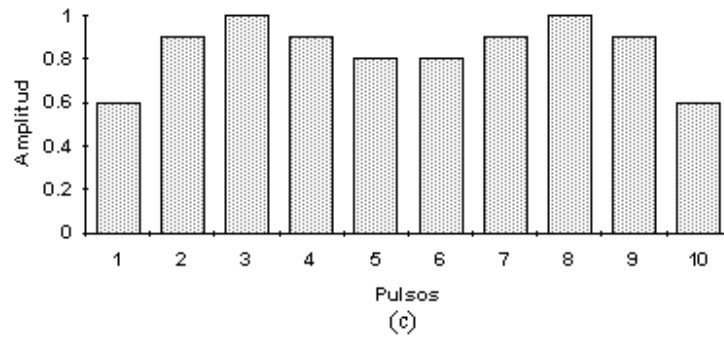
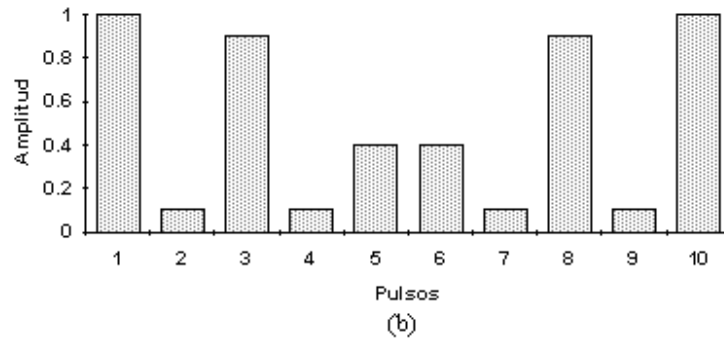


Figura 10: Formas de onda de las envolventes que optimizan la razón de potencia para una secuencia de diez pulsos como señal de excitación táctil. Se consideran frecuencias de pulsos de (a) 400 Hz, (b) 60 Hz y (c) 250 Hz.

En la tabla II-6 se presentan los porcentajes de mejora para distintas frecuencias de pulso, considerando una envolvente óptima respecto de una envolvente rectangular con el 50% de ciclo de trabajo. Caso donde se utiliza un piezoeléctrico con excitación perpendicular al pulpejo del dedo medio.

Tabla II-6: Porcentajes de mejora en la potencia utilizando una envolvente óptima respecto de una envolvente rectangular con 50% de ciclo de trabajo.

Frecuencia [Hz]	% Mejora $\Delta Q/P$
250	30.1
200	32.7
280	34.7

300	40.4
180	49.3
150	73.0
120	98.2
100	105.7
500	115.0
60	121.7
350	143.1
450	156
400	187.3
380	194.6

#### II.5.4 Discusión

Considerando el filtro completo y optimización en función de la envolvente para la estimulación perpendicular, se estima una mejora de la razón de potencia Q/P de un 30% para la frecuencia de 250 Hz que corresponde al punto más sensible de la piel cuando se tiene una estimulación mecánica perpendicular, respecto de una estimulación de pulsos con envolvente rectangular y un ciclo de trabajo del 50%. La mayor mejora se obtiene para la frecuencia 380 Hz con 194 % de aumento en la razón de potencias, en comparación con una envolvente de pulsos rectangulares y un ciclo de trabajo del 50%.

## II.6 Optimización de potencia para el caso de un transductor con respuesta no plana, considerando la respuesta de frecuencia humana para el caso de movimiento tangencial

Se define la función de sensibilidad táctil a partir de la respuesta umbral tomada a un grupo de personas dentro de la ventana de interés 25-700 Hz. Se toma esta muestra utilizando el circuito del Anexo 1 donde se utiliza un piezoeléctrico con respuesta plana apropiado físicamente para la obtención de una estimulación tangencial (ver Figura 17 del capítulo III.1). Además del filtro correspondiente a la sensibilidad táctil se debe incluir en los cálculos de razón de potencia el filtro mecánico asociado al piezoeléctrico. Experimentalmente se obtiene esta curva por medio de una toma de datos al transductor. Manteniendo una carga constante (el pulpejo del dedo apoyado en el piezoeléctrico) sobre el transductor se mide la respuesta de frecuencia, que experimentalmente se obtiene de medir la amplitud del movimiento v/s la frecuencia, manteniendo el voltaje máximo de entrada constante. La respuesta de frecuencia de un piezoeléctrico varía según sus dimensiones. Esta curva se normaliza a un valor máximo de 1 para poder incluirlo en el filtro completo de la ecuación (II.3-3).



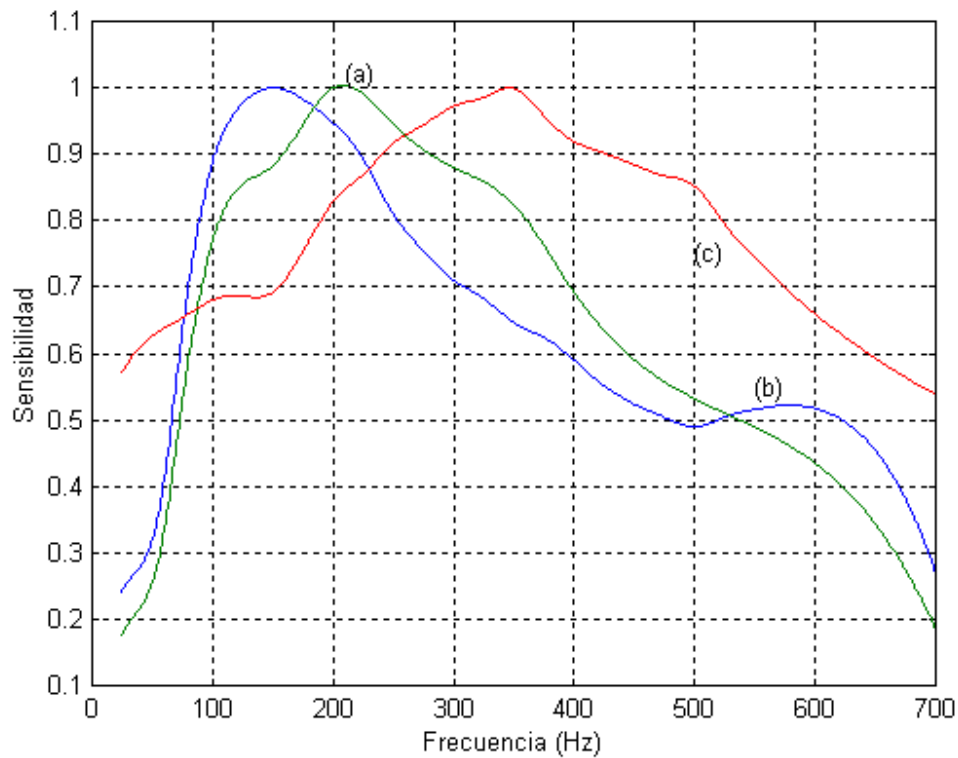


Figura 10: Respuesta de frecuencia piezoeléctrico para excitación tangencial. Se incluye respuesta de frecuencia mecánica y táctil. Donde el gráfico a) presenta la suma de los dos filtros el humano más el mecánico, b) es la curva del filtro del transductor para estimulación tangencial y c) la curva del filtro humano.

Finalmente se realiza la optimización de la razón de potencia considerando estos dos filtros (Fig.10) para el rango de frecuencia 60-500 Hz y se mantiene las amplitudes del tren de pulsos constante durante el período de estimulación  $T_0$ . De esta manera buscamos los anchos óptimos de los pulsos que maximizan la entrega de potencia dentro del rango de sensibilidad táctil para la excitación tangencial a la piel.

En la Figura 11 se presenta la matriz de resultados de la razón de potencia Q/P donde la envolvente de los pulsos es de forma rectangular y se considera la respuesta de frecuencia del movimiento tangencial del piezoeléctrico, junto con la respuesta de sensibilidad de la piel.

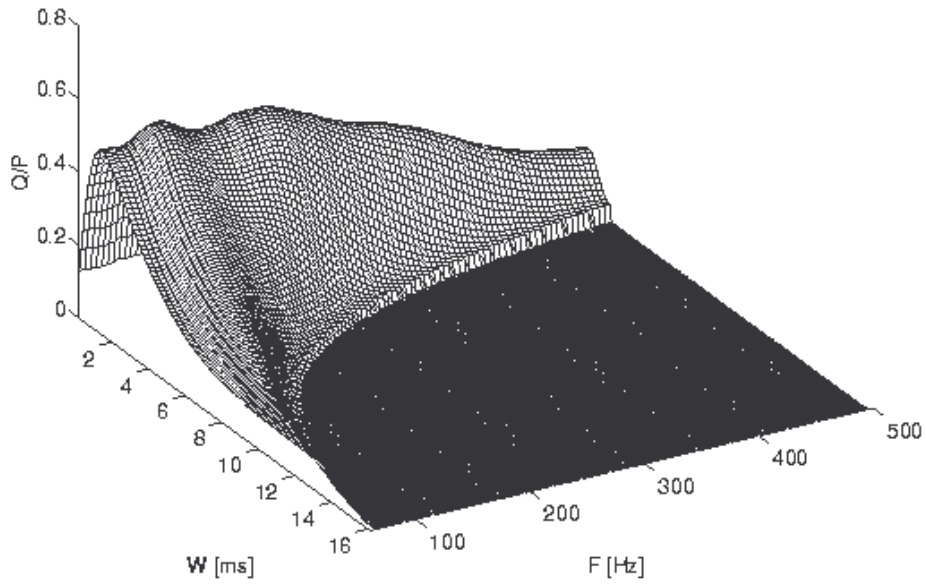


Figura 11: Razón de potencia para el rango de ancho de pulso  $W \in [0.2-16]$  ms, con envolvente rectangular y el rango de frecuencia de pulsos  $F \in [60-500]$  Hz, utilizando el filtro completo para el caso de excitación tangencial con un piezoeléctrico.

## II.6.1 Resultados

De la matriz de la Figura 11 para cada frecuencia dentro del rango 25-500 Hz se obtiene una curva de razón de potencia de la cual es posible seleccionar el ancho de pulso óptimo que maximiza la razón de potencia para una envolvente rectangular cuando se utiliza estimulación tangencial. En la Tabla II-7 se presentan los anchos de pulso óptimo que maximizan la razón de potencia para algunas de las frecuencias dentro del rango de interés, considerando el filtro completo para el caso de excitación tangencial.

Tabla II-7: Anchos de pulso óptimo para excitación tangencial utilizando envolvente rectangular.

Frecuencia [Hz]	Ancho de pulso Óptimo [ms]	Razón de Potencia Q/P
60	1.5	0.505
80	1.5	0.501
100	1.6	0.54
120	1.5	0.547
180	1.4	0.506
200	1.4	0.515
250	1.3	0.463
300	1.2	0.399
400	1.0	0.267
500	0.8	0.163

## II.6.2 Optimización de potencia en función de la envolvente para excitación tangencial

Considerando una frecuencia de pulsos, el ancho de pulso óptimo fijo calculado anteriormente en la sección II.6.1 y los demás parámetros constantes, se hace variar la envolvente del tren realizando todas las combinaciones posibles de amplitudes de los pulsos  $A_k$ . Se toma como máxima amplitud la unidad, donde se escoge un paso de 0.1 para variar diferentes combinaciones de amplitudes.

## II.6.3 Resultados

En la tabla II-8 se presentan los resultados obtenidos de los cálculos de razón de potencia para algunas frecuencias utilizando un ancho de pulso óptimo y una envolvente de pulsos óptima para el caso de excitación tangencial.

Tabla II-8: Envolventes y razones de potencia óptimas para frecuencias de interés para el caso excitación tangencial.

Frecuencia [Hz]	W óptimo [ms]	Q/P	Amplitudes de los pulsos
60	1.5	0.5076	1.0 0.2 0.2 0.2 0.2
80	1.5	0.5069	1.0 0.2 1.0 0.2 0.2
100	1.5	0.5415	0.4 0.6 0.8 1.0 1.0
120	1.5	0.5377	0.2 0.4 0.6 0.8 0.8
180	1.4	0.5139	0.8 0.2 1.0 0.4 0.8
200	1.4	0.5223	0.8 0.2 1.0 0.2 0.6
250	1.3	0.4934	0.2 0.6 0.2 1.0 0.2
300	1.2	0.4713	1.0 0.2 0.2 1.0 0.2
400	1.0	0.3954	1.0 0.2 0.2 0.2 0.2
500	0.8	0.3320	1.0 0.2 0.2 0.2 0.2

En la Figura 12 se grafican los resultados de las razones de potencia óptima en función de la frecuencia para los tres tipos de optimizaciones diferentes, la razón Q/P para la figura (c) con un

ciclo de trabajo del 50% y envolvente rectangular, la razón Q/P para la figura (b) utilizando un ancho de pulso óptimo con envolvente rectangular y la razón Q/P para la figura (a) con optimización respecto del ancho de pulsos y de una envolvente óptima.

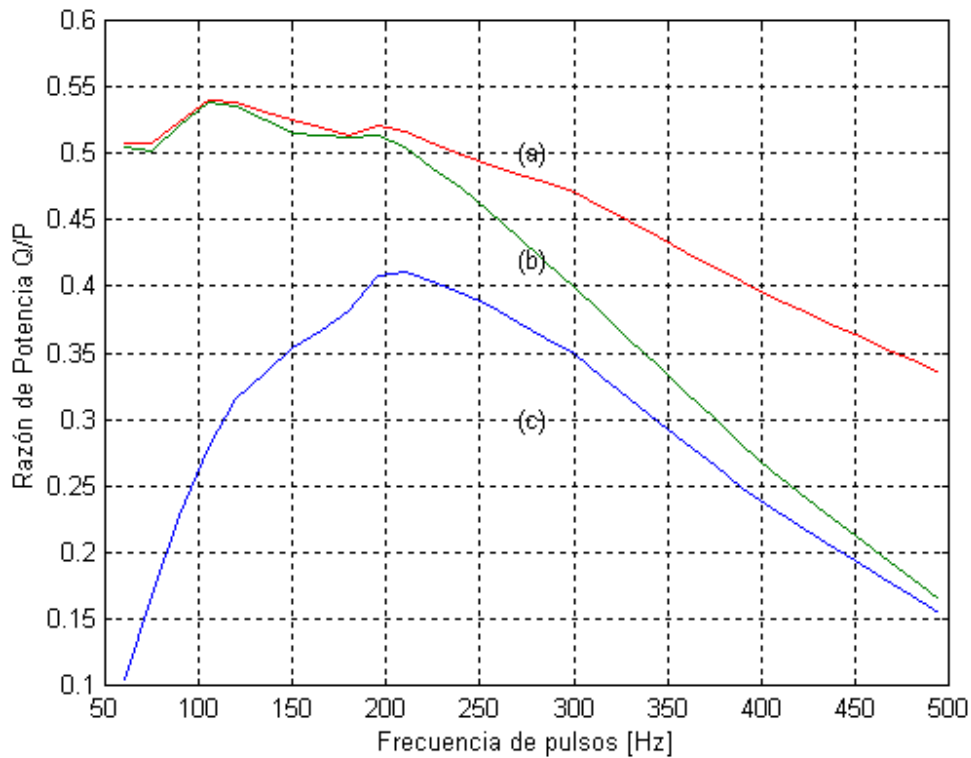


Figura 12: Comparación teórica de las razones de potencia de entrega dentro del rango de interés 25-700 Hz para excitación tangencial, para el caso (a) envolvente óptima y ancho de pulso óptimo, (b) ancho de pulso óptimo con envolvente rectangular y (c) ciclo de trabajo de un 50% con envolvente rectangular.

La Tabla II-9 muestra las mejoras de razón de potencia al utilizar un ancho de pulso óptimo, una envolvente óptima en excitación tangencial respecto de la razón de potencia al utilizar una onda del 50% de ciclo de trabajo y una envolvente rectangular.

Tabla II-9: Porcentaje de mejoras de potencia con envolvente óptima respecto del 50% de ciclo de trabajo en envolvente rectangular para estimulación tangencial.

Frecuencia [Hz]	% Mejora $\Delta Q/P$
200	25.3
250	26.7
180	34.9
300	35.2
150	42.6
400	66.6
120	70.5
100	102.4
500	121.2
80	168.5
60	386.2

La Tabla II-10 presenta la mejora de razón de potencia en excitación tangencial respecto de la excitación perpendicular en función de la frecuencia de pulsos, considerando parámetros óptimos en ancho de pulso y envolvente óptima.

Tabla II-10: Porcentaje de mejoras de potencia al utilizar envolvente óptima en estimulación tangencial respecto de una envolvente óptima para estimulación perpendicular.

Frecuencia [Hz]	% Mejora $\Delta Q/P$	% Disminución $\Delta Q/P$
500	-	2.92
250	1.92	-
400	6.93	-
300	12.30	-
60	18.72	-
80	19.86	-
120	27.79	-
180	27.86	-
100	29.42	-
200	29.85	-

Se observa que para la frecuencia 500 Hz existe una disminución de la razón de potencia al utilizar estimulación tangencial respecto de estimulación perpendicular.

El gráfico de la Figura 13 presenta una comparación entre razones de potencia de entrega en la ventana de sensibilidad táctil para el caso de optimización de razón de potencia en estimulación tangencial y perpendicular a la piel. El gráfico (a) corresponde a la razón de potencia para el caso tangencial y el (b) para el caso perpendicular.

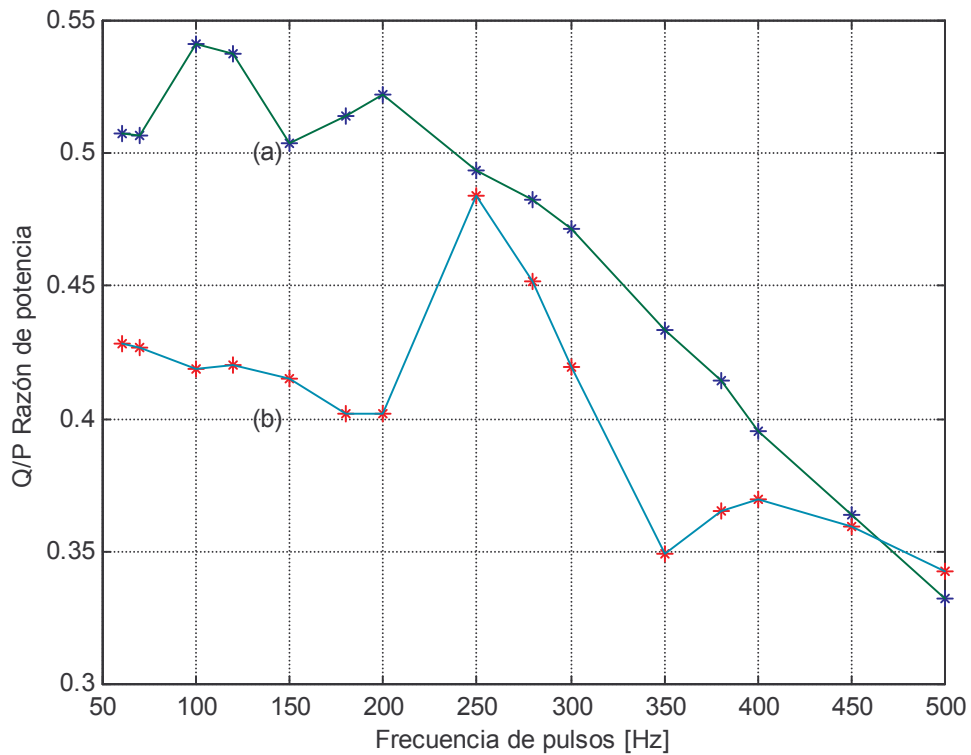


Figura 13: Comparación teórica entre razones de potencia de entrega para la estimulación mecánica (a) tangencial y (b) perpendicular considerando optimizaciones de ancho de pulso y envolventes óptimas para algunas frecuencias seleccionadas.

#### II.6.4 Discusión.

Analizando los resultados de estimulación tangencial se tiene que la mayor eficiencia de potencia se obtiene para la frecuencia 100 Hz, con un 54% de potencia generada dentro del rango de sensibilidad táctil. A medida que aumenta la frecuencia el porcentaje de entrega de potencia es



menor. Para la frecuencia de interés de 250 Hz donde el umbral de sensibilidad táctil es menor se obtiene una eficiencia de potencia del 49%. Comparando las eficiencias de potencia entre la optimización por ancho de pulso y la optimización por envolvente óptima se obtiene un aumento en la eficiencia de potencia a partir de los 250 Hz, donde la mejora es de 6.5% , luego para los 300 Hz la mejora aumenta a 18% , obteniéndose una mejora de aproximadamente un 103% para la frecuencia de 500 Hz. Por debajo de 250 Hz la diferencia bordea entre el 0 y el 1% . Comparando la eficiencia de potencia entre la optimización de potencia al 50% de ciclo de trabajo y la optimización por envolventes óptimas se observa que la mayor mejora de eficiencia de potencia se obtiene a los 60 Hz con un 386 % . Se observa que la mejora disminuye al acercarnos a la frecuencia de interés 250 Hz a 26.7% . Hacia los bordes de la ventana de frecuencias esta mejora es más considerable.

Al comparar resultados de eficiencia de potencia para la optimización con ancho de pulso óptimo y envolventes óptimas para cada frecuencia entre la excitación tangencial y perpendicular se observa claramente que es posible mejorar la optimización de razón de potencia utilizando una excitación tangencial en vez de una perpendicular a la piel. Para la frecuencia de interés de 250 Hz la mejora en la eficiencia de potencia es sólo del 1,9% al utilizar excitación tangencial frente a la perpendicular. Esta mejora es la menor respecto de otras frecuencias. La mayor mejora se presenta para la frecuencia de 100 y 200 Hz con un 30%. Para los 300 Hz se obtiene un 12% de aumento en la eficiencia de potencia de entrega y para los 60 Hz se obtiene un 19% de mejora. Es posible entonces mejorar la potencia de entrega al considerar un ancho de pulso óptimo, una envolvente óptima y un tipo de excitación a la piel para cada frecuencia.

### Capítulo III. Análisis Experimental

Esta sección está orientada al estudio experimental de los umbrales de sensibilidad para la estimulación mecánica a la piel. En el capítulo II se realizó una optimización de la eficiencia de potencia respecto de los parámetros de una forma de onda. Uno de los parámetros relevantes es el

tipo de estimulación aplicada al pulpejo del dedo. Experimentalmente se pueden medir los umbrales de sensibilidad a un grupo de personas para dos tipos de estimulación mecánica la tangencial y la perpendicular. El objetivo es encontrar si existen diferencias significativas entre estos dos tipos de estimulación táctil. Los umbrales de sensibilidad serán tomados a una muestra de personas para obtener curvas umbrales en los dos tipos de estimulación y realizar un estudio estadístico de las muestras.

Para poder realizar las medidas umbrales se utiliza un sistema de control basado en un microcontrolador que maneja una salida de voltaje. A su vez este voltaje se aplica a un piezoeléctrico que actúa como transductor para la estimulación del dedo medio.

Utilizando un PC convencional con una puerta serial RS232, un microcontrolador I80KB196, y un circuito de amplificación de voltaje se controla el movimiento del piezoeléctrico. Se necesitan diferentes formas de onda para la estimulación del transductor y así poder determinar el umbral de sensibilidad humano en función de la frecuencia. En el capítulo I vimos que la forma de onda que optimiza la eficiencia de potencia es un tren de pulsos como se muestra en la Figura 1 (pág 2). Los requerimientos de la salida de voltaje son una secuencia de pulsos modulada por una onda sinusoidal o rectangular, donde los parámetros dados por frecuencia, ancho de pulso y tiempo de recuperación puedan ser fijados desde el monitor del PC por medio de un software adecuado. Con un programa computacional (lenguaje C) y un programa para el microcontrolador en lenguaje ASSEMBLER se maneja la salida de potencia hacia el piezoeléctrico.

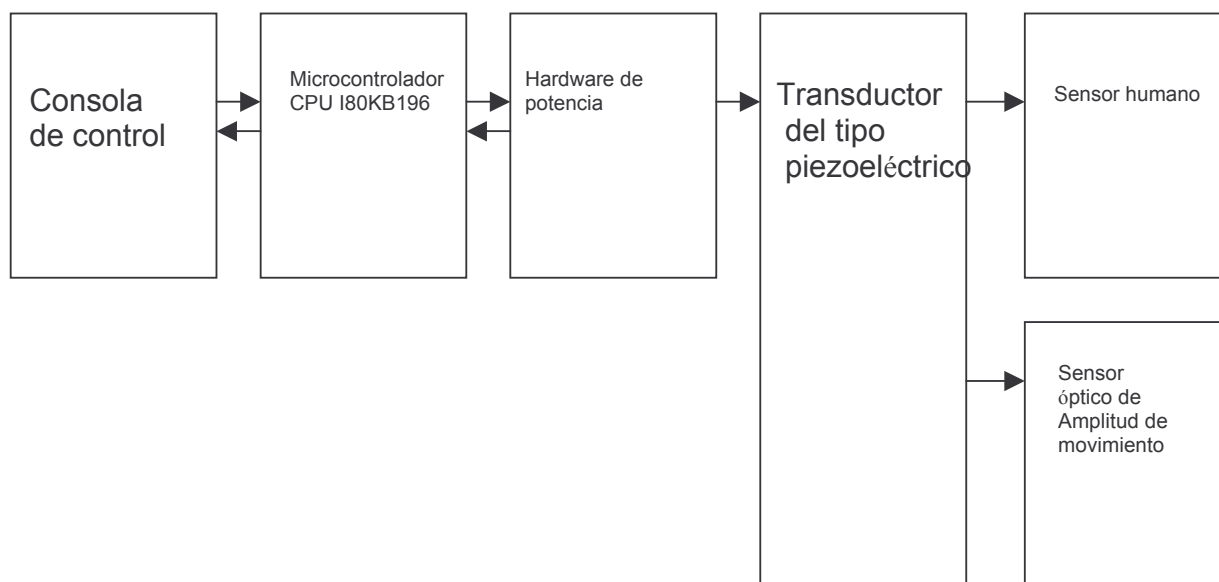


Figura 21: Diagrama en bloques del sistema.

La medición de los umbrales de sensación se hace por medio de un sensor óptico de amplitud del movimiento mecánico, que nos entrega la amplitud del orden de micrómetros de la deflexión del estimulador. Este último actuador está formado por un piezoeléctrico y estimulado por una onda de voltaje para su vibración. Esta onda de voltaje se produce al amplificar la señal de voltaje producida por el microprocesador. Esta señal a su vez puede ser controlada por el programa computacional que controla la salida de la puerta serial hacia el microcontrolador. El diagrama en bloques del sistema se observa en la Figura 21 y el diagrama circuital se presenta en el Anexo II.

En la sección III.1 se describe el sistema físico utilizado para la toma de mediciones. Además se expone la metodología de la toma de datos. Se anexa además una breve reseña explicativa de los circuitos involucrados en la experiencia y el montaje experimental.

En la sección III.2 se realiza una descripción del cálculo estadístico utilizado para generar la curva de respuesta de frecuencia y una breve descripción de la toma de muestras.

En la sección III.3 se presentan los resultados de las respuestas de frecuencia para excitación tangencial y perpendicular.

Además se incluye un estudio estadístico de los umbrales obtenidos en las medidas experimentales del caso tangencial y el caso perpendicular. De tal manera de obtener rangos de confianza y así poder determinar si existen diferencias significativas entre los dos tipos de estimulación anteriormente dichos.

Se pretende también reafirmar experimentalmente la conclusión teórica de la sección II.6.4 respecto de la eficiencia de potencia al seleccionar un tipo de estimulación mecánica ya sea tangencial o perpendicular.

### III.1 Metodología

En esta sección se comparan dos tipos de estimulación al sistema táctil la estimulación tangencial y la estimulación perpendicular. La tangencial es un movimiento de roce aplicado al dedo y la vibración perpendicular un movimiento que provoca presión sobre el dedo. Se quiere determinar si existen diferencias en la sensibilidad táctil entre la estimulación tangencial y la perpendicular.

Se utilizará un piezoeléctrico como transductor para la estimulación táctil. Este elemento vibra al aplicarle un voltaje de forma sinusoidal, entrando en resonancia para frecuencias mayores al límite de la frecuencia de corte determinado por sus dimensiones geométricas. La cerámica piezoeléctrica es moldeable y puede ser cocinada para espesores ( 0.004'' a 0.012'' ). Estas hojas finas son de aproximadamente 2x3'' y pueden ser cortadas en discos, cuadrados o platos rectangulares. Esta hoja fina se usa en conjunto con un sustrato inerte más otra hoja fina para formar el transductor. Estas hojas estándares son suplidas de un estado de polarización en electrodos de níquel. Los piezoeléctricos poseen baja masa, alta eficiencia y son no magnéticos.

Este tipo de materiales tienen dos modos de operación; como generador de energía eléctrica o energía mecánica (motor). En este trabajo se utilizará un piezoeléctrico de forma rectangular que funcione como motor.

Existen dos tipos de conexión para el piezoeléctrico, uno es el serial y el otro el paralelo. Desde un punto de vista energético no existe diferencia entre ellos. La sensibilidad del piezoeléctrico por voltaje aplicado en el tipo paralelo es mayor a dos veces el serial. Sin embargo se acompaña por una reducción de la impedancia de 4:1, por consiguiente mayor potencia de entrada. Ambos, el tipo serial y el paralelo son de campos limitados, es decir la máxima deflexión es la misma en ambos. Es conveniente utilizar la conexión en paralelo por conveniencia de un voltaje aplicado más bajo.

El piezoeléctrico posee una respuesta de frecuencia asociada a su geometría. Se seleccionó un piezoeléctrico plano de forma rectangular donde la longitud, espesor y ancho son las variables de interés. El rango de estudio corresponde al rango de mayor sensibilidad táctil 25-700 Hz. Según las curvas especificadas por el fabricante el ancho está dado por 0.021 pulgadas de espesor, 0.0075 pulgadas de espesor en cerámica y 0.002 pulgadas en paleta de cobre.

La fórmula para determinar el largo está dado por:

$$f_r = 17 \frac{t}{l^2} \quad (\text{III.1-1})$$

donde  $f_r$  es la frecuencia de resonancia,  $t$  el espesor y  $l$  el largo del piezoeléctrico. Necesitamos que la frecuencia de resonancia esté por sobre los 700 Hz, por consiguiente se obtiene un largo  $l = 1.8$  [cms].

La Figura 14 y 15 presentan las respuestas del piezoeléctrico perpendicular y tangencial respectivamente, su obtención se realiza haciendo variar el voltaje continuo y midiendo la deflexión obtenida. Se observa una relación casi lineal entre amplitud y voltaje aplicado.

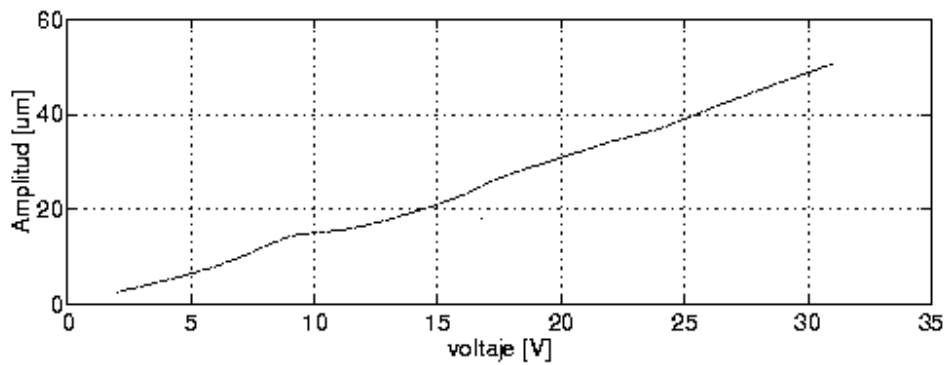


Figura14: Amplitud de desplazamiento del piezoeléctrico para movimiento perpendicular en función del voltaje aplicado.

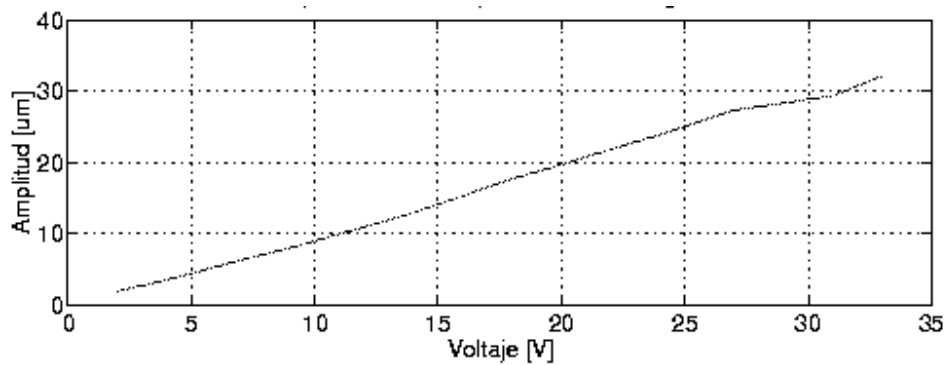


Figura 15: Amplitud de desplazamiento del piezoeléctrico para movimiento tangencial en función del voltaje aplicado.

El montaje físico del piezoeléctrico se observa en el Anexo1. Un soporte metálico junto con material amortiguador del movimiento (goma o madera) sostiene el piezoeléctrico. Una punta fina plástica sobre la superficie del transductor servirá como superficie de contacto con el dedo. Para el movimiento perpendicular la base de la punta plástica se pega a la superficie de la cerámica como se muestra en la figura 16. Para el otro movimiento la punta se pega en el extremo del piezoeléctrico como se muestra en la figura 17.

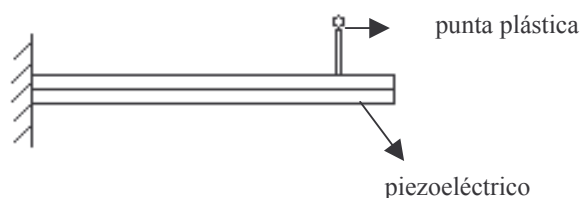


Figura 16: Piezoeléctrico para movimiento perpendicular.

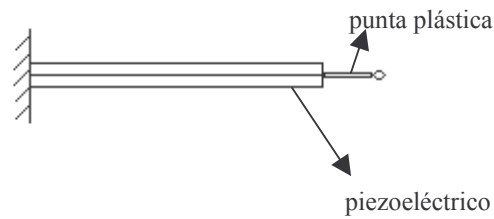


Figura 17: Piezoeléctrico para movimiento tangencial.

Para la toma de datos se hace necesario que la mano de la persona repose cómodamente sobre la superficie metálica. Uno de los métodos ampliamente utilizados para determinar umbrales de sensibilidad es el método de los límites [2]. Este método se inicia con un ascenso de la intensidad en la estimulación hasta que la persona percibe la mínima sensación. Luego se disminuye la intensidad a partir de un punto mayor o igual al umbral ya obtenido hasta encontrar el umbral de bajada, vale decir el punto donde la percepción se pierde. Este proceso se repite varias veces con el fin de obtener un valor medio más exacto.

Para la estimulación perpendicular a la piel se tomó una muestra de cuatro personas para realizar los cálculos. Previo a la toma de datos reales, a cada persona se le hizo un entrenamiento, para no inducir a errores en los datos finales.

### III.2 Cálculo estadístico

Se utilizó el método estadístico ANOVA para establecer la significancia estadística de las diferencias en sensibilidad medidas experimentalmente para distintas frecuencias. Los datos fueron tomados para las siguientes frecuencias 25, 40, 70, 150, 250, 350, 500, 700 Hz.

Se tomaron medidas de umbrales de sensibilidad táctil a 5 personas para el montaje perpendicular de la Figura 16 y a 4 personas para el caso tangencial de la Figura 17. Se midió el umbral para cada una de las frecuencias especificadas. Para cada frecuencia y para cada persona se calcula su promedio umbral. Al grupo de personas con sus umbrales medios se le calculó el promedio umbral y la desviación estándar para cada frecuencia. Una vez determinado el gráfico de promedios con sus parámetros se probó si los datos entre sí eran estadísticamente significativas las diferencias, es decir entre valores umbrales para dos frecuencias diferentes.

### III.3 Resultados

La Figura 18 muestra el promedio de las amplitudes que producen sensación umbral en 4 voluntarios en función de la frecuencia de la onda sinusoidal de estimulación perpendicular, con un intervalo de confianza del 95%. Se observa que los requerimientos mínimos de amplitud para conseguir una respuesta umbral del sistema táctil se obtiene para la frecuencia 250 Hz alrededor de 1.6  $\mu\text{m}$ . Los resultados del análisis estadístico ANOVA indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre la amplitud de excitación para ondas de frecuencias 25, 250, 300, 700 Hz. No existen diferencias significativas entre 25, 40, 70, 100, 150 Hz y tampoco entre 200, 300, 350, 400, 500 Hz.



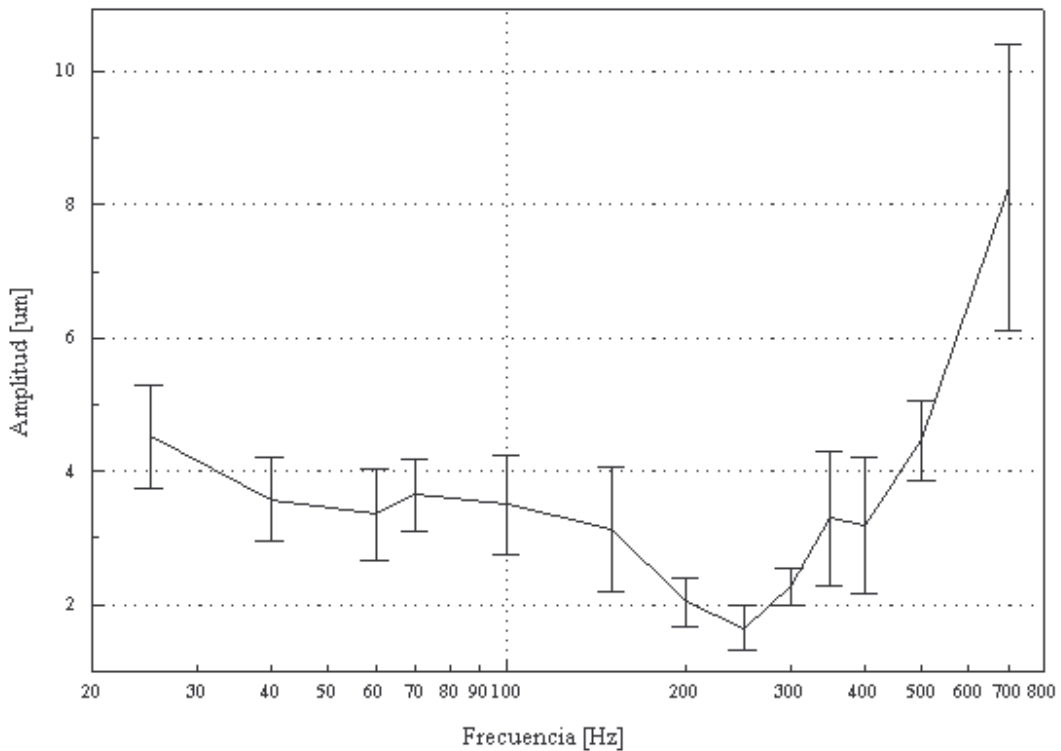


Figura 18: Respuesta de frecuencia a estimulación perpendicular de una muestra de personas.

La Figura 19 muestra el promedio de todas las mediciones de amplitud necesaria para producir sensación umbral en 5 voluntarios en función de la frecuencia de la onda sinusoidal de estimulación tangencial, con un intervalo de confianza del 95%. Se observa que los requerimientos mínimos de amplitud para conseguir una respuesta umbral del sistema táctil se obtiene para la frecuencia 250 Hz alrededor de 0.64  $\mu\text{m}$ . Los resultados del análisis estadístico ANOVA indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre la amplitud de excitación para ondas de frecuencias 25, 150, 250, 500, 700 Hz.

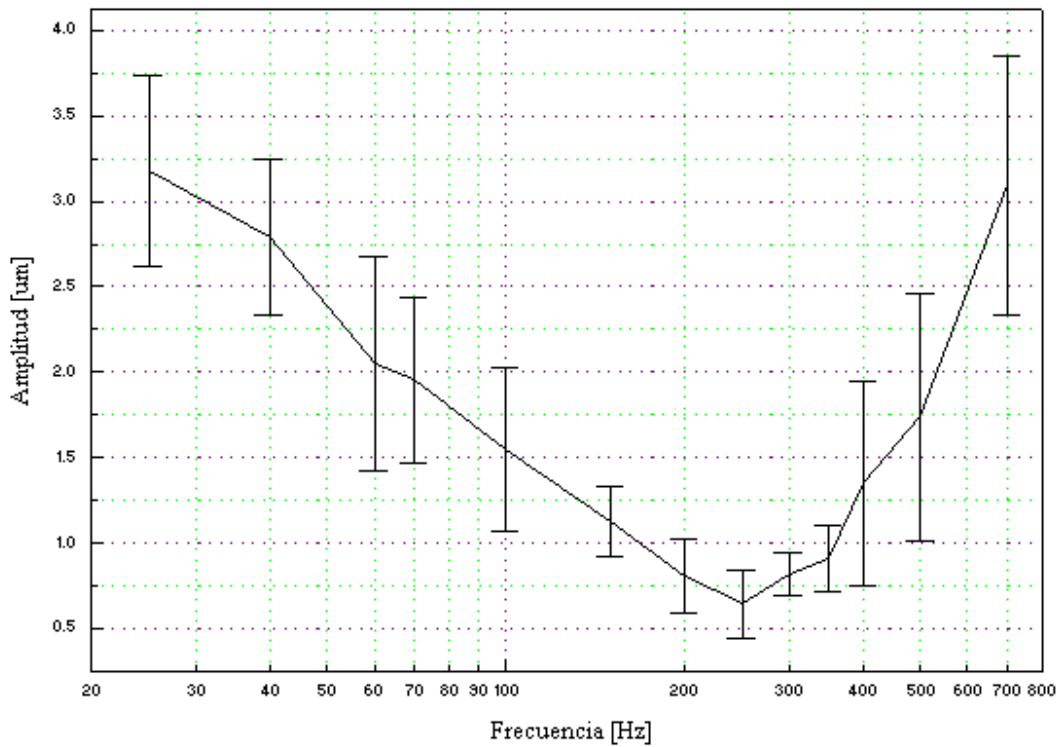


Figura 19: Respuesta umbral de sensibilidad táctil al movimiento tangencial en un conjunto de muestras.

Se realizó un análisis similar al anterior para evaluar la diferencia de las estimulaciones tangencial y perpendicular. Se aplicó el análisis ANOVA entre las dos curvas para frecuencias iguales. Se observó que las dos curvas son significativamente diferentes para determinadas frecuencias. Se determinó que para frecuencias dentro del rango 250-400 Hz no existen diferencias significativas entre los promedios tangencial y perpendicular para con un grado de confianza del 95%, sin embargo para las frecuencias 400-700 Hz sí existen diferencias significativas de las curvas. En la figura 20 se aprecia que la curva tangencial se encuentra por debajo de la perpendicular. En consecuencia el umbral de sensibilidad del tipo tangencial está por debajo del umbral del tipo perpendicular para el rango de frecuencias fuera del rango 250-400 Hz.

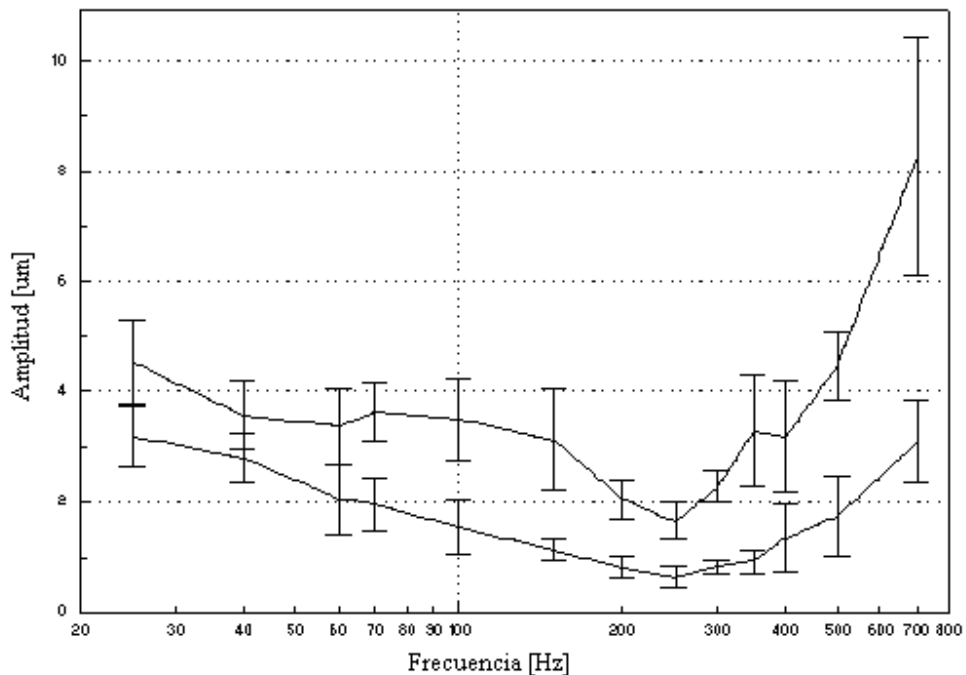


Figura 20: Respuesta umbral de sensibilidad táctil perpendicular y tangencial en un conjunto de muestras.

#### Capítulo IV. Conclusiones

En esta memoria se aborda el problema de reducir el consumo de energía y se comparan las formas de estimulación tangencial y perpendicular en interfaces táctiles que pueden ser utilizadas por impedidos, transmisión de tacto a distancia o realidad virtual. Estas interfaces utilizan un arreglo de transductores que transmiten un patrón espacial a través de la piel. En esta memoria se utilizan transductores piezoeléctricos debido a su alta eficiencia energética comparada a otros de tipo electromecánico.

Debido a que la respuesta de frecuencia del sistema táctil y del transductor filtran las componentes de frecuencia de la onda excitatoria, sólo una parte de la potencia de la onda excitatoria se transmite al sistema táctil. La idea es maximizar la potencia entregada al sistema

táctil y para esto se define una ventana entre 25 y 700 Hz donde el sistema táctil es más sensible. Se definió la razón entre la potencia dentro de la ventana de 25-700 Hz y la potencia total entregada por la onda excitatoria como la eficiencia de la potencia transmitida al sistema táctil.

En este trabajo se realizó un estudio teórico de la potencia entregada por un transductor al sistema táctil en función de los parámetros de la forma de onda excitatoria. Se realizó una simulación computacional del modelo discreto de Fourier de potencia, incluyendo la función de sensibilidad táctil en respuesta a un transductor real de respuesta plana. Se determinó la eficiencia de la potencia en función del ancho de pulso y envolventes del tren de pulsos para cada frecuencia de pulsos. Se puede concluir que la eficiencia de la potencia puede ser mejorada aproximadamente un 17% para pulsos de frecuencia de 250 Hz cuando se usa una envolvente de pulsos óptima y un ancho de pulsos óptimo  $W=1.4$  ms respecto de una forma de onda de la misma frecuencia pero con un ciclo de trabajo del 50% con envolvente rectangular. La mejora alcanza 1632% para pulsos de frecuencia de 120 Hz si se utiliza un ancho de pulso óptimo  $W=1.3$  ms y una envolvente óptima, considerando una respuesta plana del transductor. Este estudio posibilita que, a través de una selección apropiada de parámetros de forma de onda, se pueda encontrar una envolvente óptima y un ancho de pulso que concentre la mayor parte de la potencia en la región de frecuencia de máxima sensibilidad táctil, mientras minimizamos la pérdida de potencia fuera de esta región. Cuando se utiliza un transductor de respuesta no plana también es posible realizar la misma optimización de potencia, incluyendo la respuesta de frecuencia del transductor y la respuesta de frecuencia del sistema táctil en respuesta a este estimulador mecánico. En la sección II.5 se realizó la misma optimización usando un transductor del tipo piezoeléctrico para el movimiento perpendicular obteniéndose que para la frecuencia donde el tacto es más sensible, es decir para 250 Hz, la eficiencia de la potencia mejora un 30% si usamos un ancho de pulsos óptimo  $W=1.3$  ms y una envolvente óptima para el tren de pulsos. Esto último con respecto de la eficiencia de la potencia para un ciclo de trabajo del 50% en envolvente rectangular. Se alcanza un 195% de mejora si optimizamos la eficiencia de la potencia según la envolvente y ancho de pulso para la frecuencia de 380 Hz respecto de una onda con 50% de ciclo de trabajo.

En la sección II.6.2 se realizó la optimización de la eficiencia de potencia usando un transductor del tipo piezoeléctrico para el movimiento tangencial. La optimización se realizó por ancho de

pulso óptimo y envolvente óptima, obteniéndose que para la frecuencia 250 Hz la eficiencia mejora un 26.7% respecto de la eficiencia de la potencia para un ciclo de trabajo del 50% en envolvente rectangular. La máxima mejora se obtuvo para 60Hz con un 386.2%.

Analizando los resultados de optimización de eficiencias de la potencia para los casos de estimulación tangencial y perpendicular, en función del ancho de pulso con una forma de onda del tipo rectangular, es posible comprobar que para el rango de las frecuencias de interés se obtiene una eficiencia de la potencia mayor para la excitación tangencial. El porcentaje de mejora para la frecuencia de 180 Hz es de 60.3%, para 400 Hz se obtiene un 93% de mejora de potencia de entrega, para 200 Hz se obtiene una mejora en la eficiencia de 47.56%. Sin embargo Para 250 Hz se obtiene una disminución de la eficiencia de 3.8% si se utiliza el caso tangencial por sobre el perpendicular.

Si se considera la optimización de la eficiencia por envolvente, además del ancho de pulso óptimo para la estimulación perpendicular y tangencial se obtiene que para todo el rango de frecuencias 25-450 Hz, la eficiencia de la potencia es mayor al utilizar estimulación tangencial respecto de la perpendicular. Para 250 Hz se obtiene una mejora del 1.9% en la eficiencia de la potencia. Para 200 Hz la mejora aumenta a 29% y para 300 Hz la mejora es de 12,3%. La excepción se produce para la frecuencia 500 Hz donde existe una disminución de la eficiencia de 2.92% si se utiliza estimulación tangencial por sobre la perpendicular.

En el capítulo III se estudió las diferencias umbrales para la excitación perpendicular y tangencial midiéndose experimentalmente los umbrales de sensibilidad táctil en un grupo de 5 personas utilizando un sensor óptico para medir la amplitud y se usó un piezoeléctrico como estimulador mecánico. El objetivo de este estudio fue establecer si existen o no diferencias significativas entre estos dos tipos de estimulación mecánica. Los resultados muestran que los umbrales de sensación están dentro del rango 1.8-3.1  $\mu\text{m}$  para excitación tangencial y entre 2.0-5.3  $\mu\text{m}$  para excitación perpendicular. Como se esperaba para ambos modos de excitación, el mínimo umbral resultó para la frecuencia de 250 Hz. En general los umbrales de sensación fueron más pequeños para la excitación tangencial si se compara a la excitación perpendicular. Se encuentran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para frecuencias de 25, 40, 60, 70, 100, 200, 500, y 700 Hz, cuando se compara la excitación tangencial y la perpendicular. Las diferencias de los umbrales

de sensación resultaron estadísticamente no significativas ( $p > 0.05$ ) para frecuencias de 150, 250, 300, 350, y 400 Hz. Para frecuencias en los dos extremos del rango 25-700 Hz, se requiere una amplitud de movimiento del piezoeléctrico considerablemente menor para cuando se usa excitación tangencial.

Para el rango de mayor interés en torno a 250 Hz no se aprecian diferencias entre los umbrales al comparar estimulación tangencial y perpendicular. Por consiguiente dado la mejora en la eficiencia de potencia al optimizar por ancho de pulso, envolvente de los pulsos y tipo de estimulación, se recomienda utilizar estimulación del tipo tangencial para transmitir información táctil cuando el transductor es del tipo piezoeléctrico.

## Referencias

[1] White BW. Perceptual findings with the vision-substitution system, IEE Transactions on Man\_Machine Systems, 1970; 11(1): 54-8.

[2] White BW, Saunders FS, Scadden LA, Bach-y\_Rita P, Collins CC. Seeing with the skin, Perception and Psychophysics, 1970;7(1):23-7.

[3] Saunders FA. Information transmission across the skin: high resolution tactile sensory aids for the deaf and the blind, Intern. J. Neurosciense, 1983; 19:21-8.

- [4] Brabyn JA. Developments in electronics aids for the blind and visually impaired, IEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1985; 4(4):33-7.
- [5] Craig JC, Sherrick CE. Dynamic Tactile Displays, in Tactual Perception: A Sourcebook, Cambridge University Press, 1982: 209-33.
- [6] Coren S, Ward LM Psychophysics, in Sensation and Perception, HBJ Editions, 1989: 17-9.
- [7] Kaczmarek KA, Bach-y-Rita P, Tompkins WJ, Webster JG. A Tactile vision substitution system for the blind: computer-controlled partial image sequencing, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1985; 32(8):602-8.
- [8] Kaczmarek KA, Webster JG, Bach-y-Rita P, Tompkins WJ. Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1991; 38(1):1-16.
- [9] Nunziata E, Perez CA, Jarmul E, Lipetz L, Weed H. Effect of tactile stimulation pulse characteristics on sensation threshold and power consumption, Annals of Biomedical Engineering, 1989; 17:423-35.
- [10] Perez CA. Parameter optimization and system miniaturization for vibrotactile information transfer, Annals of Biomedical Engineering, 1991; 19(4):522-3.
- [11] Muñoz P. Optimización de los parámetros de la onda excitatoria en estimulación táctil para maximizar sensibilidad y minimizar la potencia entregada. Tesis (Magíster en Ingeniería Biomédica). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1994. 59p.
- [12] Verrillo RT, Fraioli AJ, Smith RL. Sensation magnitude of vibrotactile stimuli, Perception and Psychophysics, 1969; 6 (6A): 366-72.

[13] Pérez C.A., Muñoz P., "Optimization of the Power Targeted to the Frequency Region of Maximum Tactile Sensitivity", *Medical Progress through technology*, 1995, 21(2): 67-76.

[14] Pérez CA, Weed HR. Optimization of the relationship between pulse width, pulse frequency and sensation thresholds for vibrotactile information transfer, *Proceedings of the Annual Int. Conference of the IEEE/EMBS*, 1991; 13:1805-6.

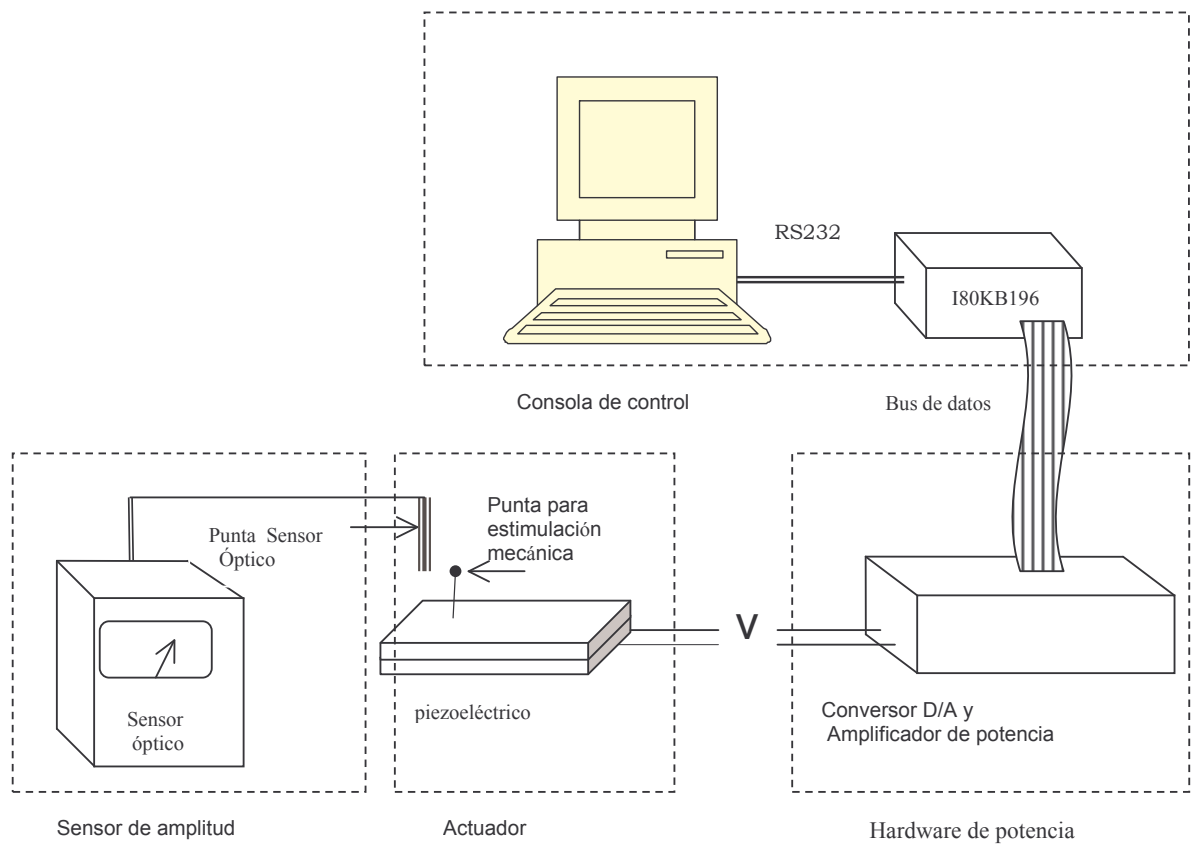
[15] A. Gallace, H. Z. Tan, & C. Spence. "Tactile change detection". *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05)*, 2005:12-16.

[16] Perez, CA; Santibanez, AJ; Holzmann, CA; Estevez, PA; Held, CM.. Power requirements for vibrotactile piezo-electric and electromechanical transducers. *MEDICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING & COMPUTING*, 2003, 41 (6): 718-726.

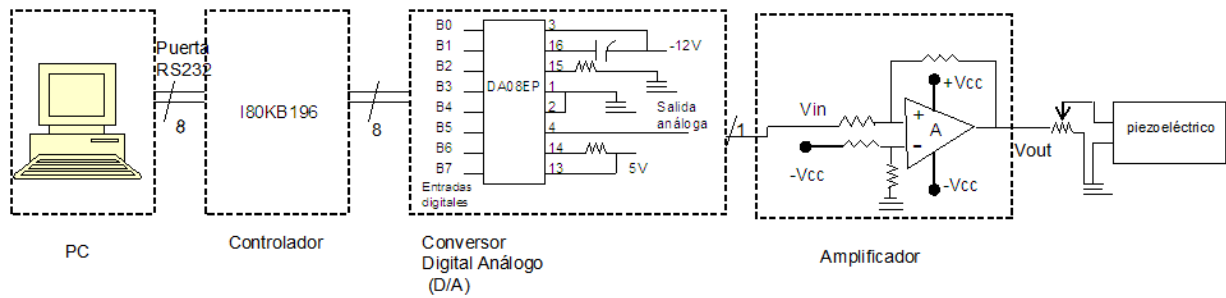
[17] Perez, CA; Holzmann, CA; Jaeschke, HE. Two-point vibrotactile discrimination related to parameters of pulse burst stimulus. *MEDICAL & BIOLOGICAL ENGINEERING & COMPUTING*, 2000; 38 (1): 74-79.

Anexo I      Montaje Físico





Anexo 2 Diagrama circuital



### Hardware de excitación.

El Hardware del sistema se compone de un microcontrolador basado en la CPU I80KB196 (FX\_97 Single Board Computer), y un hardware de potencia, que consta de un circuito conversor digital análogo y otro circuito amplificador de voltaje. El microcontrolador maneja la salida de voltaje hacia el hardware de potencia por medio de comandos ingresados al PC por el usuario. A través de la puerta serial RS232 del PC se envían comandos y parámetros de la forma de onda deseada hacia el microcontrolador. La velocidad de transmisión es de 9600 baudios, 8 bits de datos, sin chequeo de errores. El microcontrolador envía amplitudes digitales de las señales temporizadas al hardware de potencia y éste las convierte a su valor análogo para la excitación del transductor. El microcontrolador se comunica con el hardware de potencia por medio de su puerta paralela de 8 bits más dos líneas de HANDSHAKE. El hardware de potencia consta de un conversor digital análogo (DAC08EP), más un circuito de amplificación de la señal de voltaje.