

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

### 6.1. Posibilidades del método y del sistema.

En este punto es posible llegar a un conjunto de conclusiones asociadas con los métodos basados en inducción magnéticas y su aplicación como herramienta en la caracterización de los parámetros eléctricos pasivos de tejido biológico y que se desprenden de los resultados de las pruebas realizadas.

De manera previa se estableció la veracidad del hallazgo de Griffiths y otros (1999), basado en la propuesta de Korjenevsky y Cherepenin de 1997, respecto a que el efecto de la conductividad eléctrica se refleja en la parte imaginaria (o de la fase para conductores muy débiles) de la Relación Señal-Portadora (SCR), definida como  $\Delta B/B_0$  o como  $\Delta V/V_0$ , y se confirmó la viabilidad de discriminación de distintas muestras con la instrumentación comercial disponible, el analizador de impedancia HP4192A, para conductividades similares a las del tejido biológico ( $\sigma < 2$  S/m) y a partir de ciertas frecuencias ( $f > 5-6$  MHz).

Se comprobó la importancia de las pantallas para evitar acoplos capacitivos, así como la necesidad de utilizar demodulación coherente para evitar las interferencias externas.

Se ha deducido una expresión teórica más completa que la propuesta por Griffiths y otros (1999) para el caso de una muestra simple, en la cual queda explícita la dependencia que existe entre las componentes de la SCR y los parámetros eléctricos pasivos. Se tiene, tal como lo establece la ecuación 2.6, que la parte real  $\text{Re}(\text{CSR})$  está afectada por la permitividad eléctrica y susceptibilidad magnética, mientras que la parte imaginaria  $\text{Im}(\text{SCR})$  por la conductividad eléctrica. Además, en ambas componentes aparece la

dependencia con la frecuencia (funcionalmente diferente en cada término) y los parámetros geométricos.

Se estableció la posibilidad práctica real (porque el equipo ya fue construido) de discriminar muestras con diferente conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética, a través de métodos basados en inducción magnética, cuando estas variables físicas se encuentran en un orden de magnitud similar al del tejido biológico.

Por otro lado se logró la confirmación experimental de esta dependencia en los casos de la conductividad y la susceptibilidad magnética en soluciones acuosas no biológicas como las de  $\text{FeCl}_3$  y de  $\text{NaCl}$ . En este sentido es necesario reconocer que las  $\chi_m$  de las soluciones no fueron medidas y tan solo se siguió un razonamiento teórico plausible acerca de la variación de esta magnitud, basado en el aumento de la concentración de sus componentes y en especial del material magnético (hierro). Como una sugerencia a futuro convendría repetir estas experiencias con la correspondiente disponibilidad de un laboratorio capaz de medir este parámetro y lograr así una confirmación comparativa definitiva o con muestras de las que se dispongan las  $\chi_m$ . Respecto a la validez de estos resultados con otras sustancias quizás serían necesarias más pruebas; sin embargo, no existe razón para pensar que esto no se deba seguir cumpliendo.

## **6.2. Determinación de sobrecarga de hierro hepático.**

En cuanto a las medidas en tejido biológico *in vitro* se encontró que este método permite discriminar, en muestras de hígado provenientes de necropsias, distintas cargas de hierro, al menos en casos de sobrecarga media e intensa. Al establecer una correlación entre las concentraciones de hierro medidas por métodos basados en inducción magnética y por métodos bioquímicos queda patente esta posibilidad. Dada la manera como se realizó el experimento parece clara la necesidad de una calibración experimental.

Es de hacer notar que durante las pruebas no se registró la permitividad eléctrica de cada una de las muestras, la cual aparece explícitamente en la ecuación 2.6 afectando a  $\text{Re}(\text{SCR})$  y que, para el caso de tejido biológico, posee una importancia que no tiene en soluciones acuosas. Es probable que parte de la diferencia entre los valores obtenidos por los distintos métodos tenga alguna relación con este hecho.

Por último, se encuentra lo relativo a la aplicabilidad de esta técnica en humanos para evaluar la sobrecarga de hierro en vivo. Es evidente la necesidad de continuar la investigación, sobre todo en el área del análisis de los datos y estudio de los modelos, con el fin de determinar la dependencia entre las variaciones observadas en estos registros y los parámetros del sistema. Además, la extensión del análisis permitiría definir los indicadores capaces de discriminar a distintos sujetos con diferentes sobrecarga de hierro hepático.

Con el fin de mejorar el método se hace indispensable la incorporación de algunas modificaciones en la estructura del sistema que permitan un mayor control de la posición y del movimiento de los sujetos. Así mismo, con el uso de múltiples frecuencias también podría introducirse mejoras.

Los resultados obtenidos en este estudio establecen la viabilidad del uso de los métodos basados en IM para discriminar muestras de diferente conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética, con valores de éstas similares a las del tejido biológico y a frecuencia constante. Resulta más o menos evidente que si se desea utilizar métodos basados en IM para alguna aplicación como espectroscopia o tomografía, no se deben perder de vista las propiedades magnéticas del tejido biológico.

### **6.3. Trabajos futuros.**

Quizás parezca exagerado decir que con este trabajo y estos resultados se abre una puerta inmensa en el campo de la medida de los parámetros eléctricos pasivos ( $\sigma$ ,  $\epsilon$  y  $\chi_m$ )

del tejido biológico y de materiales con características similares, por métodos sin contacto basados en IM. A pesar de eso, lo diremos.

Es evidente que un trabajo para un futuro inmediato tiene que ver con la continuación de la interpretación de los resultados obtenidos en este estudio durante la realización de las medidas en vivo. Es imperioso averiguar el origen de la respuesta observada y su relación con parámetros eléctricos, con su distribución en el sistema y con la geometría. La aplicación de este tipo de técnica en la evaluación de las sobrecargas de hierro hepático (al menos) vendría a satisfacer una necesidad manifestada en Brittenham y Badman (2003). En el reporte allí publicado, se indica la necesidad y la importancia de desarrollar nuevos métodos no invasivos para este tipo de evaluaciones, por lo que este desarrollo adquiriría absoluta pertinencia.

El hecho de haber determinado una expresión, aunque la misma se haya derivado para un caso sencillo, y haber podido verificar al menos en algunas sustancias en soluciones acuosas y también en muestras de tejido hepático *in vitro*, esta última con más problemas, sugiere la posibilidad de la separación de la información asociada con  $\sigma$  y  $\chi_m$ , a través de métodos de IM a frecuencia constante.

Sería interesante realizar medidas a varias frecuencias con el fin de establecer algunos comportamientos. Por una parte verificar los espectros de conductividad para muestras de tejido biológico comparándolo con los obtenidos con métodos basados en el contacto físico a través de electrodos. Por otra, con estas medidas se podrían explorar la posibilidad de determinar valores de permitividad eléctrica con esta técnica y en este tipo de muestras. Como en el caso de la conductividad, las mismas podrían ser comparadas con las obtenidas con métodos con contacto físico.

Sería interesante aplicar las técnicas y métodos desarrollados en estructuras biológicas diferentes como colonias de bacterias u hongos, midiendo tanto a una frecuencia como a varias. De esta manera se podría explorar la posibilidad de utilizar métodos basados en IM para la determinación de las variables eléctricas en estos sistemas.

Una vez caracterizados y explorados estos otros sistemas biológicos, podría ser de gran utilidad la aplicación de estos métodos en tejidos humanos *in vitro* o en vivo, diferente al hepático. Una opción muy útil e interesante puede ser el desarrollo de un sistema capaz de monitorizar la evolución del edema cerebral, debido a la variación en la conductividad eléctrica que se espera ocurra en esa región durante la evolución de esta patología.

Otra aplicación muy interesante sería el examen del desarrollo de injertos, quemaduras y procesos de cicatrización, casos estos en los que las medidas por medio del contacto físico son simplemente imposibles.

Además, sería de gran utilidad el diseño, construcción y prueba de micro bobinas para ser incorporadas en microsistemas, con los que se podrían evaluar las propiedades eléctricas pasivas de pequeñas cantidades de muestras con todos los beneficios que esto trae consigo. Esta sería una aplicación muy útil tanto en el área biomédica como industrial.

Por último es bueno señalar que, basado en las nuevas relaciones descubiertas, es posible plantearse la aplicación de esta información para desarrollar métodos basados en IM para el desarrollo de la Tomografía de Inducción Magnética (TIM), basado en la medida simultánea de la conductividad eléctrica, permitividad eléctrica y susceptibilidad magnética.