

Área de procesamiento digital de señales e imágenes Biomédicas.

Resumen histórico

Joaquín Azpiroz Leehan

Recibido: 6 de junio 2007

Aceptado: 12 de junio 2007

Antecedentes

El antecedente directo de la formación del Área de Procesamiento Digital de Señales e Imágenes Biomédicas es la división del trabajo del Área de Ingeniería Biomédica en laboratorios en el año de 1983. En esa época se reorganizó el trabajo de las distintas Áreas de investigación del Departamento de Ingeniería Eléctrica con el motivo de la ocupación de nuevos espacios en el recientemente inaugurado edificio T. Las dos áreas existentes en esa época: Ingeniería Electrónica e Ingeniería Biomédica siguieron distintas políticas para la división del trabajo y la ocupación de espacios.

El Área de Ingeniería Electrónica se organizó de acuerdo a las líneas y necesidades de los profesores de mayor jerarquía en el Área, de tal manera que los líderes de proyectos tenían a su cargo laboratorios hechos a su medida.

El Área de Ingeniería Biomédica, bajo la jefatura del M. En C. Miguel Cadena Méndez, se reorganizó bajo el concepto de Laboratorios de Investigación divididos en disciplinas asociadas a la IB, pero distintas entre ellas. De esta manera se fundaron los laboratorios de investigación en:

- Instrumentación Médica Electrónica
- Procesamiento digital de señales (LICPOS)
- Desarrollo tecnológico en audiolología (LIDTA)
- Fenómenos fisiológicos (LIFF)
- Biofísica

En LICPOS, los miembros fundadores fueron:

- Joaquín Azpiroz Leehan

- Miguel Cadena Méndez
- Sonia Charleston Villalobos
- Verónica Medina Bañuelos
- Jesús Mondragón Solís

El trabajo se orientó a las aplicaciones de computadoras y microprocesadores en la instrumentación biomédica, notablemente bajo el concepto de obtener mayor información a partir de señales biomédicas convencionales, aplicando algoritmos de procesamiento digital de señales. Estos temas, que a nivel mundial se estaban desarrollando de la misma manera, pudieron explotarse con mayor facilidad a partir del desarrollo de la computadora personal IBM-PC en 1982-1983.

Algunos de los desarrollos notables en los primeros años fueron:

- Microcomputadora Modular para Aplicaciones Biomédicas (Escandón, Velasco, Azpiroz)
- Medidor de gasto cardiaco con el método de Fick y graficación en pantalla LCD (Yáñez, Carrasco, Medina)
- Análisis de señales de gasto cardiaco por impedanciometría transtorácica (Charleston, Cadena)
- Coprocesador para el cálculo de la transformada rápida de Fourier (Azpiroz, Lindig, DeLuca)
- Sistema de programación de procesamiento de señales (Medina, Cadena)
- Sistema de conversión A/D de 16 canales de 12 bits para computadora PC (Azpiroz *et. al*)

Una aplicación conjunta de los dos últimos desarrollos se presentó al Concurso de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas en



Figura 1. LICPOS en 1983



Figura 2. Sistema de conversión analógico-Digital de 16 canales, 12 bits.

1987, donde ganó el 1er. lugar. Adicionalmente, se inició la costumbre de presentar los resultados de los trabajos desarrollados en foros internacionales como la Conferencia Anual de la Sociedad de Ingeniería Médica y Biológica de la IEEE (EMBS) y el Congreso Mundial de Ingeniería Biomédica y Física Médica.

A final de la década de los 80s, el desarrollo alcanzado por el laboratorio era ya importante. Los proyectos desarrollados tenían ya una complejidad importante. Se concluyeron proyectos como:

- Sistema de mapeo de señales electroencefalográficas (Muñoz, Azpiroz, Medina, Saldivar)
- Ventilador volumétrico controlado por microprocesador (Jiménez, Martínez,)
- Sistema de monitoreo continuo del ECG (Yáñez, Martínez, Jiménez)

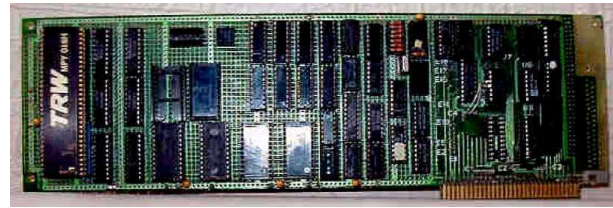


Figura 3. Sistema de cálculo de la multiplicación compleja por hardware.

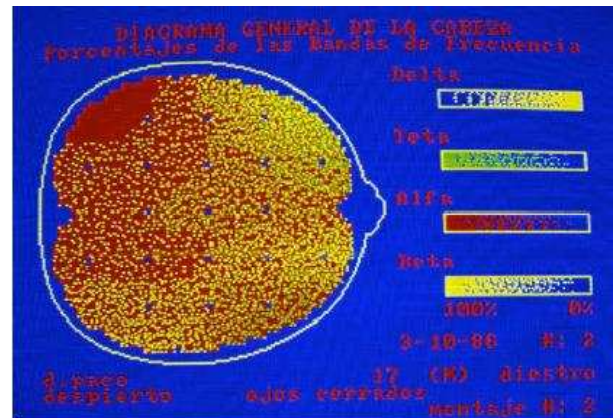


Figura 4. Sistema de mapeo cerebral basado en una PC y un convertidor A/D desarrollado en LICPOS.

Los dos primeros obtuvieron el 1er. y 2º lugar respectivamente en el Concurso de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Ciencias Fisiológicas en 1988, mientras que el tercero fue el primer proyecto del grupo que fue financiado por las convocatorias de CONACYT.

En esta época, cuando la primera generación obtenía sus grados de maestría en IB dentro del programa de posgrado del Departamento, se contrató a la segunda generación de profesores asistentes para el laboratorio. Oscar Yáñez, Juan Ramón Jiménez y Alfonso Martínez M. se incorporaron al laboratorio. Se fomentó la misma filosofía que para la primera, donde se fomentó que los profesores iniciaran sus estudios de posgrado. A finales de los 80s, los profesores de la primera generación iniciaron sus estudios de doctorado en el extranjero (Université de Technologie de Compiègne, Francia y Colorado State University, E.U.A.), mientras que los profesores de la segunda se hicieron cargo del laboratorio, dirigieron los proyectos de investigación del grupo y concluyeron los proyectos pendientes, como el Holter que había sido financiado por el CONACYT.

Fundación del Área de Procesamiento Digital de Señales e Imágenes Biomédicas

Ya en 1987, el grado de consolidación del grupo de profesores-investigadores había permitido que el laboratorio se administrara de manera casi-independiente del Área de Ingeniería Biomédica. Los programas de desarrollo, la administración de proyectos y la escritura de informes de resultado se hacía de manera separada y se anexaba a las planeaciones de los grupos de IB. El regreso de varios profesores con doctorado en 1992, junto con la promoción de otros a profesores titulares y el ingreso de otros más, permitió cumplir con los requisitos del Consejo Divisional para la transformación del grupo de profesores-investigadores en Área de Investigación. La aprobación se obtuvo en diciembre de 1992, diez años después de la fundación del laboratorio.

El desarrollo de LICPOS desde su creación como Área de Investigación a la fecha tiene dos etapas bien definidas: 1993-1998 es su etapa de crecimiento, mientras que la fase 1999-2004 es la fase de consolidación. Una mirada a una tabla que muestra las principales aportaciones en publicaciones, congreso, formación de recursos, financiamiento y categoría académica muestra claramente la división. En la primera etapa, se cumplen apuradamente los criterios para aceptarse al grupo de profesores como área. Es decir, cinco profesores titulares y tres doctores. La mayor parte de la planta está en proceso de formación. Los proyectos son de menor alcance y las publicaciones y presentaciones en congresos son predominantemente nacionales.

En la segunda etapa, se incorporan dos nuevos profesores con doctorado (Alejandro Guzmán de León y Alfredo Rodríguez a mediados 1988, casi todos los profesores en formación terminan sus estudios doctorales y a finales de 2003 se incorpora un tercer profesor (Emilio Sacristán) e instala su laboratorio en un nuevo edificio dedicado a proyectos de investigación en instrumentación e imagenología médica.

1993-1988

A partir de la formación del Área en 1993, los proyectos fundamentales de la misma fueron derivados de las tesis doctorales de varios de sus profesores, junto con proyectos pendientes que estaban en proceso. Así, se concluyó el proyecto de Electrocardiografía Ambulatoria (Holter), que había sido apo-

yado por CONACYT y se establecieron proyectos como:

- Análisis de Ruidos Respiratorios
- Mapeo Cerebral
- Procesamiento de imágenes

Además de seguir con la aplicación de herramientas tanto de hardware como de software para el análisis de señales enfocado al estudio de distintas señales fisiológicas (por ejemplo, aplicaciones de procesadores de señales, análisis de señales, aplicaciones con circuitos EPLD). En general, estos últimos proyectos se hicieron en conjunto con colegas de los distintos laboratorios del Área de Ingeniería Biomédica, principalmente para apoyar su formación académica. Otra colaboración importante fue con el laboratorio de fisiología del ejercicio del Departamento de Ciencias de la Salud de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la misma unidad de la UAM.

Es importante hacer notar que las distintas líneas de investigación se desarrollaron en colaboración con distintas instituciones de salud y con algunas empresas. Es notable la colaboración con el Instituto Nacional de Neurología, el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias, el Instituto Nacional de la Comunicación Humana y la compañía Digimed, de Montreal, Canada.

La infraestructura física del Área mejoró sustancialmente cuando CONACYT financió el proyecto "Laboratorio de procesamiento digital de imágenes biomédicas" en 1993-1994, cuando se adquirió un servidor Challenge y tres estaciones de trabajo Indigo2 de Silicon Graphics. Un programa de apoyo al Departamento de Ingeniería Eléctrica por parte de la Rectoría de Unidad permitió complementar esta infraestructura con nuevas computadoras personales tipo Pentium, de tal manera que en lo general, las mayores necesidades estaban cubiertas y la parte correspondiente a la adquisición propia de las señales se hizo dentro de las instituciones de salud donde se establecieron los proyectos de colaboración.

Línea de Investigación de mapeo cerebral

La figura 5 (pág. 10) muestra la aplicación del mapeo cerebral y el análisis estadístico de información electroencefalográfica. Una comparación cualitativa por medio del análisis de los trazos del electroencefalograma en bruto es imposible, ya que no

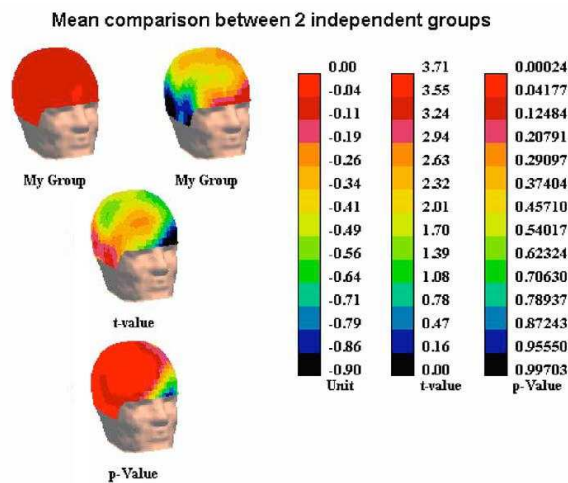


Figura 5. Mapeo cerebral estadístico entre dos poblaciones diferentes.

se puede tener una señal promedio típica. En cambio, el mapeo del EEG presenta la actividad eléctrica en forma más comprensible y los mapas de información estadística sí ofrecen información visual de relevancia.

La aportación del mapeo en este proyecto es la generación de mapas en tres dimensiones, que facilitan la localización de fenómenos eléctricos como puntas epilépticas o alteraciones de los patrones normales. Una visualización bidimensional, que era común en la época tiene el problema de distorsiones importantes en las partes muy curvas del cráneo (lóbulos temporales y occipital). En este caso se muestra las diferencias entre dos grupos de poblaciones independientes. Este programa permitía presentar información entre grupos de poblaciones (por ejemplo un grupo de pacientes con la enfermedad de Alzheimer contra una población normal) o bien los resultados de un paciente contra su población de referencia. Este proyecto se desarrolló junto con la compañía Digimed Inc. de Montreal, Canada.

La contribución de la UAM fue toda la programación de los mapeos en tres dimensiones de las señales electroencefalográficas, mientras que la compañía Digimed aportó los módulos de procesamiento estadístico de la información.

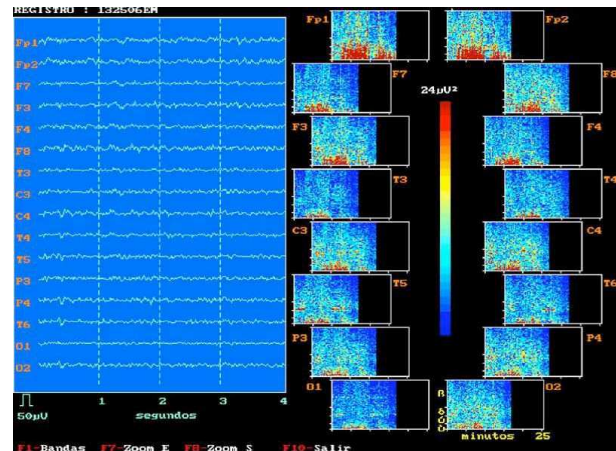


Figura 6. Análisis de cambios en el espectrograma del EEG durante un proceso de transebolización.

Las líneas de procesamiento de señales electroencefalográficas y de electrocorticografía se hicieron en conjunto con el Instituto Nacional de Neurología. La figura 6 muestra un sistema para el análisis de la profundidad de anestesia y para otros procedimientos tales como una transebolización. A la izquierda se muestra el electroencefalograma completo, mientras que a la derecha se muestra un espectrograma para cada localización de electrodos. La variación del espectrograma corresponde a una variación en el estado de activación cerebral. La conjunción de los elementos desarrollados anteriormente, junto con nueva información anatómica proporcionada por una tomografía, permite correlacionar anomalías funcionales con hallazgos anatómicos, tal y como lo muestra la figura 7 (pág. 11), donde se mapea la actividad eléctrica cerebral por bandas de potencia. Los asteriscos en las imágenes muestran las anomalías tanto anatómicas como funcionales. Este trabajo se efectuó en colaboración con Josefina Gutiérrez del Instituto Nacional de Neurología.

Una de las líneas de investigación que inició fuertemente su desarrollo fue la segmentación de imágenes biomédicas y en particular cortes de resonancia magnética cerebral. A partir de la segmentación efectuada, se desarrollaron algoritmos para la reconstrucción en tres dimensiones de las imágenes segmentadas y su sombreado. La imagen siguiente ejemplifica el proceso: a la izquierda se muestran cuatro cortes de IRM. A partir de los cortes, se segmenta la imagen y se conserva la materia gris, que después de un procesamiento para la reconstrucción y un sombreado adecuado, presenta una imagen tri-

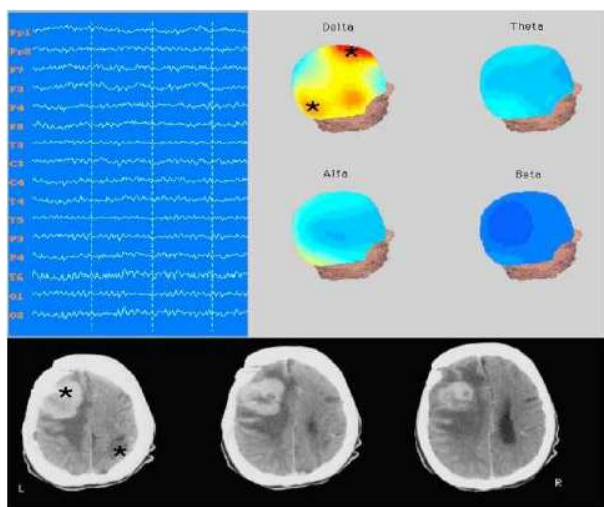


Figura 7. Despliegue de las señales EEG en bruto junto con su mapeo en bandas de potencia junto con información anatómica obtenida por Tomografía.



Figura 8. Obtención de una imagen 3D a partir de la segmentación de la materia gris de varios cortes de IRM.

dimensional de las estructuras de interés. Si se segmenta la piel y se efectúa el mismo proceso, se obtendrá la imagen final de la cabeza del paciente.

Resumen

Haciendo un resumen de los logros de estos primeros años después de la fundación del Área, se puede mencionar el hecho de que presentar los trabajos en conferencias internacionales se hizo costumbre, aún cuando la mayoría de los trabajos presentados eran nacionales. Lo mismo sucedió con las publicaciones. En esta época se publicaron los primeros artículos internacionales por el área, pero en general la publicación era en revistas nacionales. La mayor parte del personal del área se encontraba en proceso de formación y hubo muchos casos de ausencias por licencias, sabáticos y los mismos estudios de posgrado de los profesores. Se puede decir que los re-

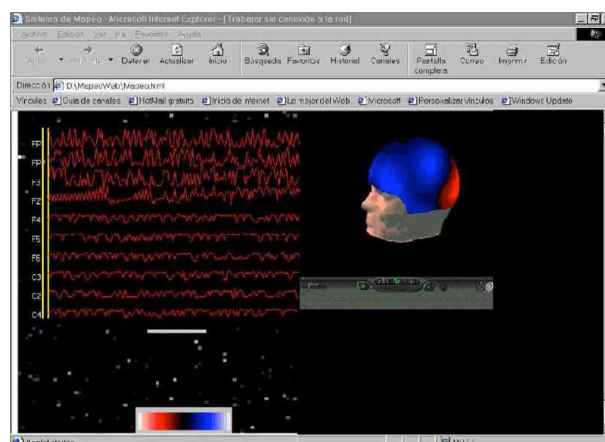


Figura 9. Sistema remoto para mapeo cerebral de EEG y potenciales evocados. El cliente manda los datos al servidor y éste envía un mapa 3D como un applet en Java.

sultados son satisfactorios, sobre todo si se considera que se trata evidentemente de años de formación para todos. La filosofía de trabajo se estableció, donde se hacía evidente la necesidad de trabajar en colaboración estrecha con instituciones dedicadas a la salud para desarrollar soluciones para problemas reales.

1999-2002

Estos son años que se pueden considerar como años de consolidación, donde las líneas de investigación se definen claramente, la metodología de trabajo se establece de distintas maneras para diferentes grupos de trabajo y los resultados también son de mayor relevancia. Las líneas y grupos de trabajo se definen claramente en Sonidos Respiratorios, Neuroimagenología, Computación y Reconocimiento de Patrones y Procesamiento de imágenes biomédicas.

Neuroimagenología

Como un grupo de investigadores dentro del área se había dedicado a cuestiones tanto de mapeo de señales electroencefalográficas y electrocorticográficas como a la segmentación y visualización de imágenes cerebrales (sobre todo IRM), resultó fácil definir una línea que se dedicara exclusivamente a estos aspectos. Se desarrollaron varias aplicaciones tales como el mapeo cerebral en 3 dimensiones para EEG y potenciales evocados bajo un servidor de internet, que fue dirigido por Alfonso Martínez M. y Verónica Medina, con colaboración con la Facultad de Psicología de la UNAM.

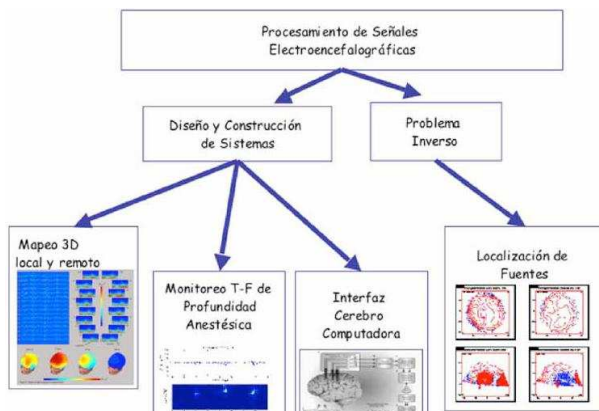


Figura 10. Proyectos derivados del análisis de señales para el laboratorio de neuroimagen.

Las aplicaciones recientes de esta línea de investigación se resumen en la gráfica siguiente: a partir del procesamiento de señales de EEG y ECoG se ha estado trabajando en proyectos tales como el mapeo que ya fue mencionado, un estudio sobre la localización de fuentes (el llamado problema inverso) y aplicaciones al análisis de las señales.

La línea de investigación de señales cerebrales tiene varias aplicaciones en desarrollo que van desde el mapeo de 3D, el análisis de la profundidad de anestesia, Interfases cerebro-computadora para aplicaciones de rehabilitación y localización de fuentes.

El monitoreo de la profundidad de anestesia es un proyecto que estará asociado al laboratorio de Instrumentación del Centro de Imagenología (CI3M), donde se están iniciando los trabajos para un prototipo de una máquina de anestesia, donde se desea contar con la posibilidad de mantener un control de la profundidad anestésica por medio de un lazo cerrado.

Otro proyecto con buen grado de avance es el de análisis de la onda P100 de potenciales evocados para el desarrollo de una interfase cerebro-computadora con fines de facilitar la escritura de textos para pacientes cuadripléjicos. Al momento, se pueden identificar los potenciales con alrededor de un 90 % de certidumbre.

La otra gran línea general de desarrollo del grupo de neuroimagen es el procesamiento de imágenes biomédicas y en particular de imágenes cerebrales. Esta línea estaba ya activa desde la fundación del Área y durante estos últimos años se ob-

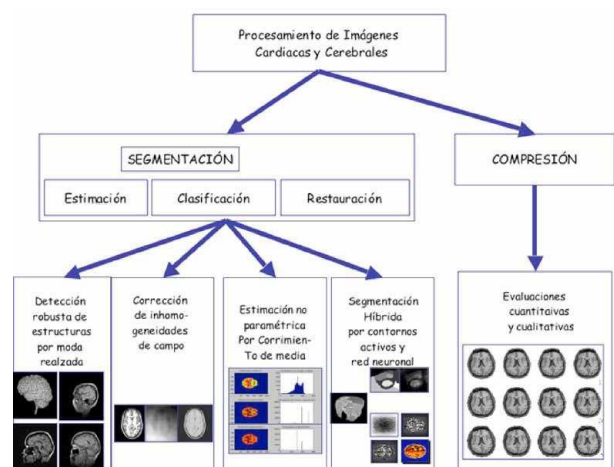


Figura 11. La línea de investigación de procesamiento de imágenes tiene una componente muy importante en la segmentación de las imágenes.

serva cómo sus resultados son cada vez más robustos. En esta línea, el grupo de neuroimagen se ha transformado en un grupo líder a nivel mundial en la segmentación de imágenes cerebrales. En la actualidad se ha iniciado el estudio de imágenes cardíacas, gracias a una colaboración con el Laboratorio Franco Mexicano de Informática y la Universidad de Compiegne, Francia.

La figura 11 muestra resumidamente los tipos de procesamiento que se han empleado. Algunas aplicaciones de la segmentación han seguido hacia la reconstrucción 3D de cortes de IRM, mientras que se trabaja en métodos estadísticos y métodos híbridos para mejorar la calidad de las segmentaciones. Como proyectos asociados a estos, se han desarrollado aplicaciones para corregir las inhomogeneidades del campo magnético en imagenología por resonancia magnética. Estos resultados complementarán a los desarrollos de tecnología para IRM, en particular el desarrollo de antenas para imagenología que se hace por el grupo encabezado por el Dr. Alfredo Rodríguez.

Otra línea asociada al procesamiento de imágenes cerebrales es la compresión de imágenes de IRM empleando la técnica de Wavelet Packets, con la que se ha podido llegar a una tasa de compresión de 50:1 (retención del 2 % de la información únicamente) sin distorsiones visibles. Este proyecto se liga también al desarrollo de PACS antes mencionado.

2003

El año de 2003 es especial, ya que se desarrollaron va-

rios eventos de distintos tipos que fueron relevantes para el Área. En primer lugar, la composición del área alcanza prácticamente su máximo desarrollo académico. Pilar Castellanos y Raquel Valdés obtienen sus doctorados.



Figura 12. El comité organizador del 25 Annual International Conference of the IEEE-EMBS, donde están Javier Pinzón, Emilio Sacristán, Verónica Medina, Ron Leder, Raquel Valdés, Martha Ortiz y Juan Ramón Jiménez (no están visibles Oscar Yánez y Joaquín Azpiroz).

Debido a conflictos por espacios, equipos y metodologías de trabajo, el Área se divide en tres laboratorios diferentes: uno, orientado a neuroimagenología, uno que se dedica al procesamiento de señales e imágenes y otro es empleado para proyectos de computación. Esta situación parece reproducir el patrón donde a partir de un área de Ingeniería Biomédica se generan distintos laboratorios (como LICPOS), que después se transforman en Áreas independientes.

Un evento importante, no sólo a nivel local, sino con relevancia internacional es la celebración de la 25ª conferencia anual de la Sociedad de Ingeniería en Medicina y Biología del IEEE (EMBS) en Cancún en este año. Es la primera vez que se lleva a cabo una conferencia de este tipo en Latinoamérica. Esta conferencia reunió a alrededor de 1400 asistentes y se presentaron 1200 trabajos. Prácticamente todos los puestos del comité organizador del evento fueron ocupados por miembros del Área, que recibió felicitaciones oficiales por parte del comité de administración de EMBS por haber organizado un evento que fue exitoso tanto académica, social y financieramente.



Figura 13. Vista exterior del CI3M.



Figura 14. Interior del laboratorio de tomografía dentro del CI3M.

2004

Este año también fue marcado por varios acontecimientos relevantes. En mayo se inaugura el edificio A-I, donde se albergan dos laboratorios: el laboratorio de nanotecnología del Departamento de Química y el Centro de Investigación en Instrumentación e Imagenología Médica (CI3M), que es administrado por cuatro profesores del área y un profesor del Área de Ingeniería Biomédica. Conjuntamente con este evento, se incorpora al Área el profesor Emilio Sacristán, quien agrega la línea de órganos artificiales e instrumentación para terapia intensiva a las anteriormente existentes. La nueva conformación del área permite contar con el núcleo de profesores con mayor solidez en Latinoamérica dentro de las disciplinas de Ingeniería Biomédica.

Al interior del CI3M se cuenta con dos laboratorios para equipos de imagenología por resonancia

magnética, un laboratorio para tomografía y Rayos-X, un laboratorio de instrumentación y un quirófano para experimentación animal.

Este centro es en gran medida una extensión de los desarrollos del grupo de neuroimagen y el grupo del Prof. Sacristán (a partir de ahora denominados G7). Permite entonces considerarse como un verdadero centro de transferencia tecnológica, donde los diversos proyectos de investigación pueden encontrar apoyo para transformarse en aplicaciones industriales.

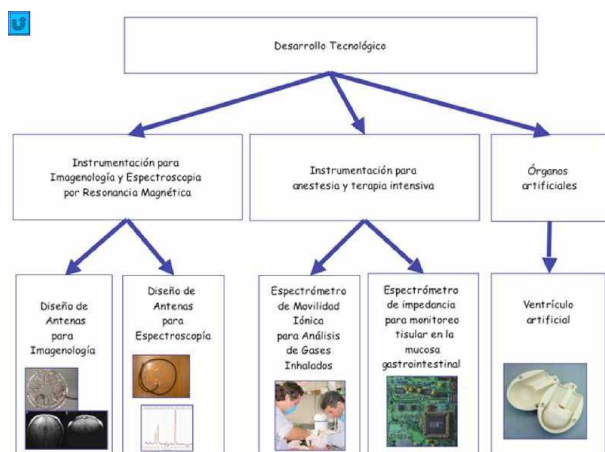


Figura 15. Líneas de investigación y desarrollo tecnológico dentro del CI3M asociadas al G7.

Algunos de los proyectos en curso son: el desarrollo de antenas para imagenología y para espectroscopia por resonancia magnética, por el grupo encabezado por el Dr. Alfredo Rodríguez. En la actualidad se tiene un buen grado de avance en los diversos proyectos. En Instrumentación, los dos proyectos principales, son: un espectrómetro de impedancia, que está orientado a efectuar una terapia guiada por computadora para pacientes críticos y una asistencia ventricular implantable.

El espectrómetro de impedancia, se desarrolló en conjunto con una empresa de desarrollo tecnológico, Innovamédica, quien se ha encargado de amueblar y equipar al laboratorio de instrumentación y que ha financiado al proyecto. Este equipo se encuentra ya en pruebas con pacientes, gracias a una colaboración importante con el Instituto Nacional de Cardiología. A partir de esta primera fase de estudio será posible diseñar al sistema final, aunque a estas alturas los resultados iniciales ya son positivos.

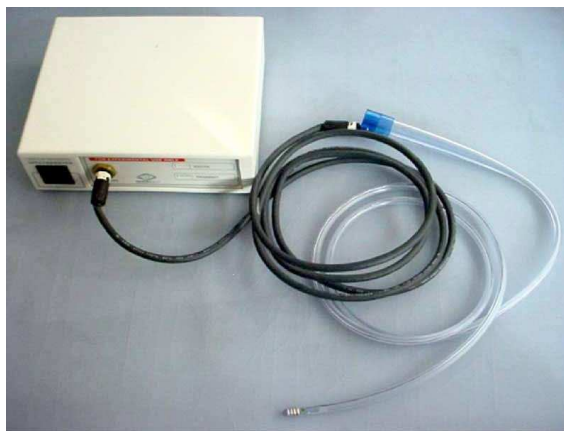


Figura 16. Espectrómetro de impedancia y la sonda asociada a su uso.



Figura 17. Prototipo de la asistencia ventricular implantable y de su unidad de control.

El otro proyecto, que es efectivamente un ventrículo implantable para usarse como asistencia ventricular tanto en un periodo transoperatorio como para soporte en espera de un trasplante, también se encuentra en un estado satisfactorio de avance. La construcción del dispositivo está completa, así como su unidad de control y alimentación. Se espera efectuar algunos experimentos animales agudos antes del fin del presente año.