

## **TRAINING IN PROJECTS ENGINEERING: BIOLOGICAL MACHINING OF OXYGEN-FREE COPPER**

Elias , A.; Diaz-Tena, E.; Rojo, N.; Rodriguez Ezquerro, A.; Gurtubay, L.; Barona, A.;  
López de la Calle, N.

Universidad del País Vasco

Project-based learning was proposed as a supplementary activity in the Biotechnology course given in the third course of the Grade in Environmental Engineering at the University of the Basque Country (UPV/EHU). The proposed activities were based on the knowledge acquired during the development of a research Project carried out by the Department of Chemical and Environmental Engineering in collaboration with the Department of Mechanical Engineering of the university named before.

The main objective of this research project was to study the biological machining of highly pure materials, as an alternative to the conventional manufacturing processes. Based on the experience gained during the development of this research work, some group activities were proposed to the students, such as the presentation of a literature review, the selection of the materials needed for the process, or resources optimization, among others. The theoretical concepts learned during these tasks were applied in a laboratory session. The main goal of this experimental part was to carry out two experiments, using both biological machining and conventional chemical machining processes over oxygen free copper samples, and to compare the results obtained using both technologies.

**Keywords:** *Training; Projects; Engineering*

## **TRAINING IN PROJECTS ENGINEERING: BIOLOGICAL MACHINING OF OXYGEN-FREE COPPER**

El desarrollo de un proyecto real desarrollado en colaboración entre los Departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química y del Medio Ambiente de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) ha permitido aplicar la experiencia adquirida en su ejecución en forma de aprendizaje por proyectos. La asignatura seleccionada ha sido la biotecnología, asignatura que se imparte en el tercer curso del Grado en Ingeniería Ambiental, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao.

El objetivo del proyecto desarrollado fue el estudio del proceso de mecanizado biológico de materiales de alta pureza, como alternativa al mecanizado convencional. A partir de la experiencia obtenida por la coordinadora de la asignatura durante el desarrollo del proyecto, se plantearon una serie de actividades grupales a desarrollar por los alumnos (búsqueda bibliográfica, selección de los materiales, optimización de recursos, entre otras). Finalmente, los conocimientos teóricos adquiridos se aplicaron en una práctica de laboratorio, en la que cada uno de los grupos comparó el biomecanizado sobre placas de cobre libre de oxígeno con el mecanizado químico. Los resultados obtenidos tanto en las actividades teóricas como en la práctica de laboratorio fueron muy satisfactorios, y los alumnos valoraron muy positivamente el proceso de aprendizaje.

**Palabras clave:** *Formación; Proyectos; Ingeniería*

Correspondencia: Ana Elias, ana.elias@ehu.es

## 1. Introducción

El cobre fue uno de los primeros metales utilizados por el ser humano en la prehistoria. Se trata de un material económicamente accesible cuyas propiedades físicas como son: resistencia mecánica, conductividad, resistencia a la corrosión, maquinabilidad y ductilidad, han favorecido que sea el tercer metal más empleado en la actualidad (10 a 15 kg/Cu/año/persona), habiéndose observado un crecimiento considerable en los últimos 5 años en la producción mundial (superior a las 18 millones de toneladas por año) (International Copper Study Group, 2012).

En los últimos años, la demanda del cobre para empleo de equipamientos en temas de I+D, en electrónica y en equipamiento médico ha crecido, y se espera un crecimiento exponencial en un futuro próximo; uno de los tipos de cobre con mayor auge en la actualidad es el cobre libre de oxígeno (OFC), caracterizado por su alto nivel de pureza (mín. 99.999 %Cu) y su elevada conductividad eléctrica.

Algunos proyectos actuales como es el acelerador de iones, cuyos componentes funcionales son mayoritariamente fabricados en cobre, son un ejemplo claro de la necesidad de controlar el mecanizado de este material. La fabricación de componentes para instalaciones científicas y para equipamiento médico-quirúrgico requiere de operaciones de gran precisión que minimicen el daño térmico y estructural en el material.

En el campo empresarial, el mecanizado biológico representa una alternativa a los procesos convencionales como es el mecanizado químico o micro EDM, ya que debido a los problemas ambientales las empresas deben adecuarse a nuevas ecotasas y por tanto hacer frente a posibles competidores a través de la eficiencia, orientando sus procesos hacia el 'Green Manufacturing' o Mecanizado Ecológico (Istiyanto, 2010).

El proceso base de esta experiencia es el biomecanizado, proceso ecológico basado en el empleo de bacterias, caracterizado por ser menos agresivo con el medio ambiente que los mecanizados estrictamente químicos, y que destaca por su bajo consumo de energía, alta eficiencia energética y bajo coste (Chang, 2008).

El uso de procesos biológicos en el ámbito del mecanizado sigue siendo limitado, por lo que en el presente trabajo se ha tratado de desarrollar un proyecto con miras a la aplicación industrial de esta tecnología, caracterizada por no provocar daño superficial o térmico alguno en la superficie mecanizada (Johnson, 2007).

A partir de la experiencia obtenida en el desarrollo del proyecto, y con una gran inquietud en conseguir mejoras en la actividad docente, se ha diseñado un proyecto docente que se ha implementado en el campo universitario, más específicamente en el campo ingenieril. El entorno ha sido el Grado en Ingeniería Ambiental, más específicamente en la asignatura de Biotecnología, asignatura cuatrimestral que se imparte en el tercer curso de la titulación universitaria.

El profesor, consciente de la necesidad de transmitir no solo los conocimientos propios de las asignaturas, puede despertar la inquietud por el conocimiento y la satisfacción del aprendizaje. Directa o indirectamente, nuestra labor está ligada a nuestra investigación. Y debemos aprovechar el hecho de que realizamos investigación en aquello que nos apasiona para despertar en los alumnos la misma inquietud. La experiencia que el profesorado ha adquirido a través del desarrollo de proyectos de investigación, así como el material utilizado, se han podido utilizar en el diseño de esta actividad docente, consiguiéndose un uso eficiente de los recursos en un contexto de recortes como en el que ahora estamos padeciendo.

La Universidad, motor ineludible de la formación y generación de capital humano, debe dotar a nuestros estudiantes de las destrezas necesarias para hacer frente a los cambios tecnológicos que están sucediendo y que se acelerarán en el futuro. Debemos desarrollar en el alumno actitudes favorables al esfuerzo, satisfacción en lo aprendido y motivación en la búsqueda de conocimiento. El papel del profesor en la transmisión de estas inquietudes es fundamental para que los alumnos adquieran estos valores; el aprendizaje en proyectos es especialmente aconsejado para lograr estos objetivos, consiguiendo paralelamente que la universidad y el mundo de la empresa vayan de la mano.

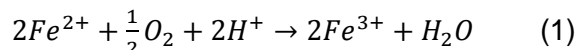
## 2. Metodología

El mecanizado mediante bacterias (también conocido como biomecanizado) no trata de sustituir a los procesos mecánicos tradicionales, sino constituirse como un nuevo proceso que permita resolver casos de fabricación de formas complejas, siendo respetuoso con el medio ambiente.

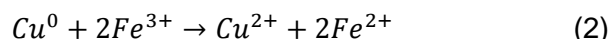
Desde los años noventa, China ha sido un país precursor del biomecanizado (Zhang, 1998). A través de la información publicada, y de cara al desarrollo e implantación de un sistema de biopulido, las primeras experiencias del proyecto se llevaron a cabo en el entorno del Río Tinto en Huelva. Este río ha sido ampliamente estudiado y caracterizado por lo que ha llevado a pensar que su cauce podría constituir un biorreactor inagotable, sobre el que se podría llevar a cabo una serie de ensayos previos a partir de los cuales se establecerían unas bases serias en la experimentación. Su alta diversidad biológica y el pH medio de 2.3 hacen posible que bacterias oxidantes del hierro convivan en ese ecosistema inusual

En el biomecanizado, la bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans* (A.F.) es la bacteria responsable del proceso. Se parte de una disolución con la citada bacteria, en la que entre otras especies químicas presentes se encuentra el catión  $Fe^{2+}$ .

En su proceso metabólico la bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans* oxida el  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  según la reacción (1):



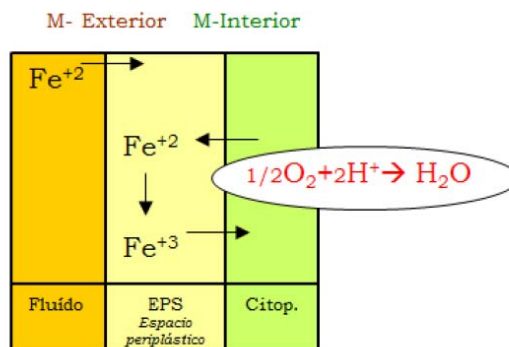
Si se introduce en la disolución una pieza metálica de cobre a estudio, el  $Fe^{3+}$  generado oxida al cobre, que se disuelve como catión  $Cu^{2+}$  y, simultáneamente, se reduce a  $Fe^{2+}$ , según la reacción (2):



El  $Fe^{2+}$  será oxidado de nuevo a  $Fe^{3+}$  por las bacterias, como se ha indicado, continuando así el proceso de biomecanizado.

La representación simplificada del proceso se representa en la Figura 1.

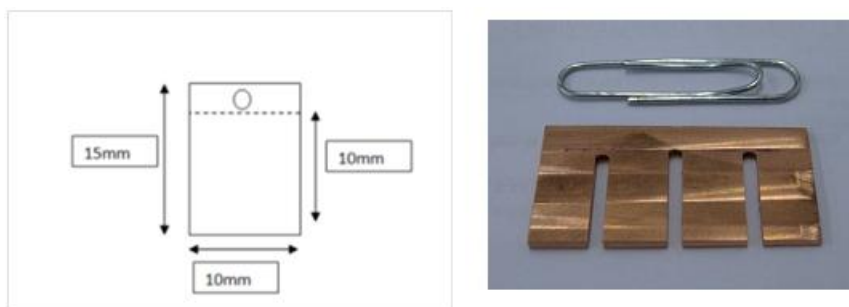
**Figura 1: Representación simplificada del biomecanizado del cobre.**



El objetivo de esta primera etapa fue valorar el efecto de las especies existentes en el Río Tinto en el acabado de las placas de cobre libre de oxígeno. Se trató por tanto de valorar el efecto de un medio natural, rico en bacterias específicas sobre distintos prototipos de probeta de cobre libre de oxígeno diseños recogidos en la Figura 2.

Las probetas se extrajeron cada 15 días, se analizaron vía SEM y se observaron microscópicamente, repitiendo el proceso a lo largo de 2 meses.

**Figura 2: Prototipos de probeta de cobre libre de oxígeno para ensayos de biomecanizado**



Antes de reproducir los ensayos biológicos en el laboratorio, se llevaron a cabo varias series de ensayos de mecanizado tradicional químico de cara a utilizarse como tratamiento de referencia en posteriores comparativas de resultados.

Tanto los ensayos de mecanizado químico como los de biomecanizado se llevaron a cabo en un sistema con agitación orbital (Figura 3) que permitió un buen contacto de los distintos medios con la probeta a estudio y con temperatura controlada.

En dicho sistema se introdujeron los microreactores constituidos por tubos roscados de plástico de 50 mL.

En los tubos se introdujeron las probetas y las respectivas disoluciones, suspendidas mediante hilo de nylon sujeto al tapón del tubo de ensayo.

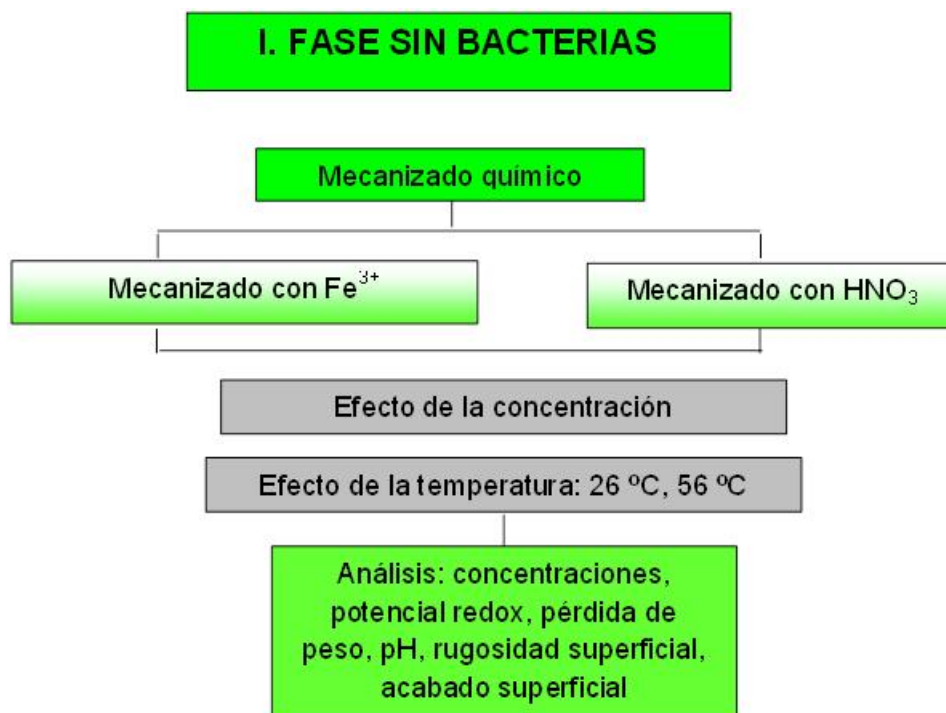
**Figura 3: Sistema de reacción con agitación orbital**



Se trataba de que quedaran suspendidas para que el ataque fuera por toda su superficie. El volumen de disolución en todos los ensayos fue de 20 ml.

Un resumen de los ensayos realizados se recoge en el diagrama que constituye la Figura 4.

**Figura 4: Secuencia de ensayos en el estudio de mecanizado químico de probetas de cobre.**



Tras los ensayos de mecanizado químico se pudo corroborar que:

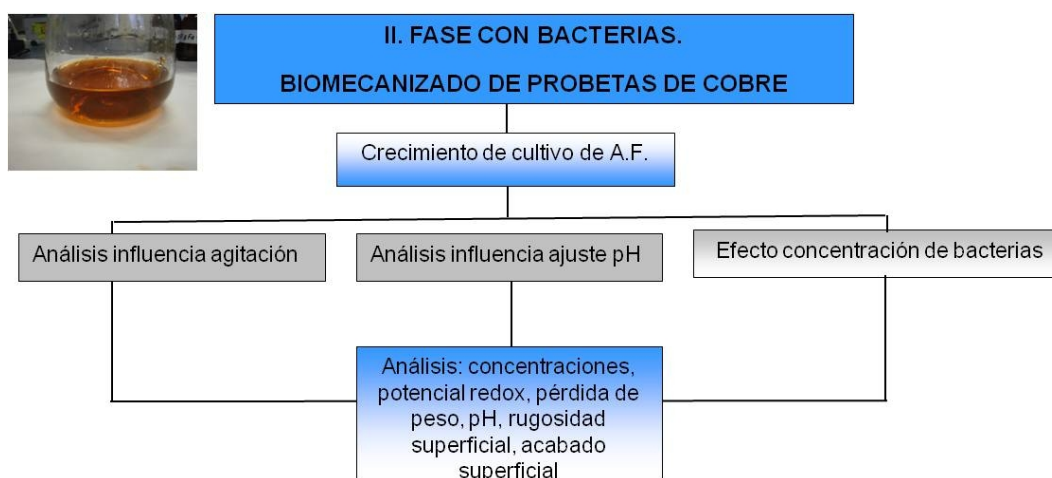
1. El mecanizado químico con disolución de  $\text{HNO}_3$  no generó una tasa apreciable de remoción en las probetas de cobre ensayadas.
2. La tasa de arranque observada fue mayor conforme mayor es la concentración  $\text{Fe}^{3+}$  en la disoluciones de mecanizado químico
3. Conforme mayor fue la  $T^a$  en el medio de ensayo mayor tasa de arranque se observó en las probetas de cobre.

4. En todos los casos la tasa de arranque disminuyó con el tiempo, pero no de forma lineal.
5. Tras el ensayo de mecanizado químico se observó un incremento en la rugosidad de las piezas.

La introducción de cultivo bacteriano en los ensayos realizados en nuestro laboratorio constituyó la tercera etapa del proyecto, evaluándose, como en los casos anteriores, tanto la tasa de arranque como la evolución de la calidad superficial de las piezas.

Las fases que constituyeron esta etapa de biotratamiento se recogen en el diagrama de la Figura 5.

**Figura 5: Secuencia de ensayos en el estudio de biomecanizado de probetas de cobre.**



Tras los ensayos de biomecanizado químico se pudo corroborar que:

1. La agitación del medio de ensayo favoreció la tasa de remoción obtenida.
2. El ajuste de pH no generó mejoras en la tasa de remoción.
3. Las tasas de remoción obtenidas en los ensayos fueron considerablemente mayores a las recogidas en la bibliografía.
4. El biomecanizado de las probetas de cobre no mejoró la rugosidad de las piezas.
5. Se apreció una relación directa entre la concentración de bacterias en el medio y la tasa de arranque
6. En todos los casos la tasa de arranque disminuyó con el tiempo,

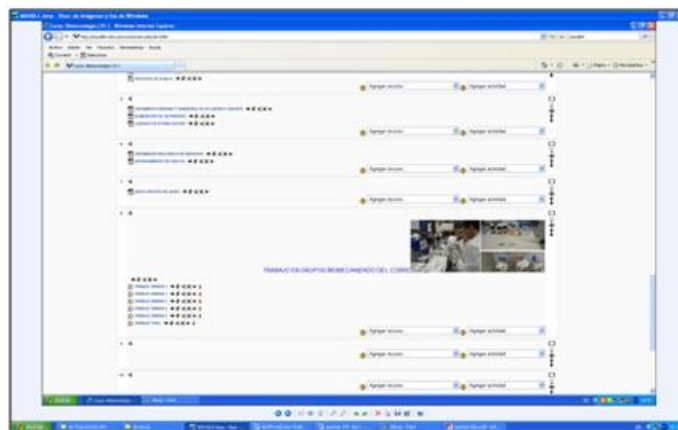
Tras los ensayos llevados a cabo, se planteó aplicar la experiencia obtenida en un proyecto docente de aprendizaje en proyectos en la asignatura de Biotecnología, asignatura de tercer curso del Grado en Ingeniería Ambiental en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao.

### 3. Proyecto de aprendizaje en proyectos

El proyecto se diseñó para aplicar a un grupo de 12 alumnos subdividido en 4 grupos. La duración del proyecto fue de cuatro meses, describiéndose al inicio del curso el contenido del mismo, así como las etapas, periodos de desarrollo, evaluación, etc.

Toda la información referente al proyecto estuvo disponible en la plataforma Moodle (Figura 6), recurso que los alumnos utilizaron para comunicarse tanto con los compañeros como con el profesorado.

**Figura 6: Descripción del proyecto en la plataforma Moodle**



Las etapas del proyecto abarcaron las etapas tradicionales que se desarrollan en la ejecución de un nuevo proyecto.

- Estado del arte
- Importancia del tema en el campo de la biotecnología
  - Importancia en el sector mecánico
  - Investigaciones desarrolladas
- Materiales y métodos
  - Diseño de experimentos
  - Ensayos previos con base físico-química
  - Técnicas analíticas e instrumentales
  - Control y seguimiento de ensayos
  - Diseño de sistema de biomecanizado
- Propuesta de ensayos
  - Material necesario
  - Presupuesto
  - Optimización de ensayo

Los resultados obtenidos para cada una de las etapas se expusieron en clase por todos los alumnos, llevándose a cabo una evaluación tradicional por el personal docente, y simultáneamente, una evaluación por pares en la que participó el resto de los grupos del aula (Figura 7).

**Figura 7: Exposiciones de los alumnos en las distintas etapas del proyecto.**



Tras la ejecución de las dos primeras etapas del proyecto, se llevó a cabo la puesta en común de propuestas de ensayos, a partir de la cual se realizó experimentalmente una serie de ensayos con los que se concluyó el proyecto.

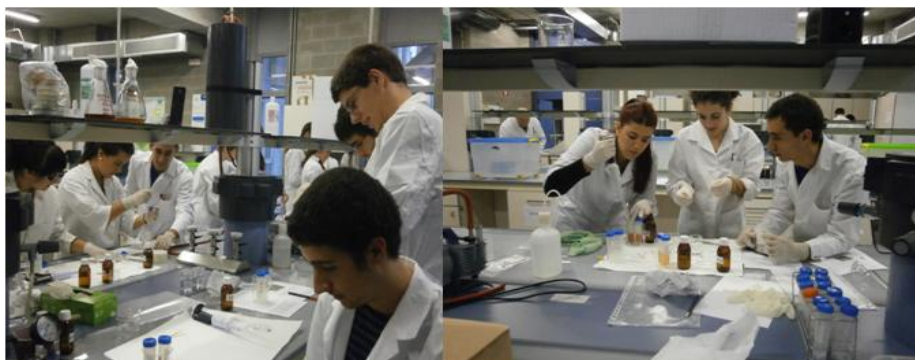
Para ello se redactó un guión de prácticas (Figura 8) que recogió tanto las etapas de mecanizado químico, como las de biomecanizado.

**Figura 8: Guión de laboratorio redactado en colaboración con los alumnos**



Los alumnos siguieron las experiencias diseñadas en el proyecto (Figura 9). Se desarrollaron tanto los ensayos de mecanizado químico como de biomecanizado, estos últimos a partir del medio de cultivo bacteriano crecido como una etapa más del proyecto realizado.

**Figura 9: Desarrollo experimental final diseñado por los alumnos.**





Cabe remarcar que en la presente experiencia la participación del alumnado fue del 100% siendo muy alto el grado de satisfacción del alumnado (5 sobre 5).

Los buenos resultados obtenidos en la experiencia llevada a cabo nos han permitido establecer, de cara al futuro, este tipo de trabajo con un porcentaje del 30% en la evaluación de la asignatura, ya que este tipo de proyectos ha permitido aplicar directamente gran parte de los conocimientos teóricos de la asignatura en aplicaciones reales.

El proyecto despertó la inquietud por el conocimiento en el grupo y favoreciendo la satisfacción por el aprendizaje, consiguiéndose paralelamente un uso eficiente de los recursos.

La experiencia abre las puertas hacia la interacción investigación-docencia optimizando el potencial tanto del cuerpo docente como del alumnado.

#### **4. Referencias**

Chang, J.H., Hocheng, H., Chang, H.Y., Shih, A. Metal Removal rate of Thiobacillus thiooxidans without pre-secreted metabolite. *Journal of Materials Processing Technology*, 201 (2008), pp. 560-564.

International Copper Study Group, <http://www.icsg.org> (Último acceso Diciembre 2012).

Istiyanto, J., Jo Ko, T., Yoon, Il-C. A Study on Copper Micromachining Using Microorganisms. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11 (2010), pp. 659-664.

Johnson, D., Warner, R., Shih, A. J. Surface Roughness and Material Removal Rate in Machining Using Microorganisms. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129 (2007), pp. 223-227.

Zhang, D., Li, Y. Possibility of biological micromachining used for metal removal. *Science in China, Services C Life Sciences* 42 (1998), pp. 151-156.