

# La Metalurgia del futuro

**Juan E. Joffré Encinas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México  
joffreju@uslp.mx

## Resumen

Los desafíos que enfrentan las industrias minero-metalúrgicas son agua, energía y leyes de cabeza. Será necesaria la cogeneración de tecnologías sustentables en cada operación minera. La incursión de la robótica en la explotación minera, conducirá a realizar operaciones de mayor capacidad y mayor profundidad, disminuyendo los riesgos para la seguridad de los mineros.

La “Mineralogía avanzada”, basada en la avanzada capacidad de los analizadores QEM\*SCAN y MLA, ligada a tecnologías de molienda ultra fina, produce sinergia entre tecnologías de punta. Así las plantas piro e hidrometalúrgicas volverían a recibir concentrados de alta ley.

La Metalurgia Extractiva va a cambiar drásticamente en el futuro, en base en los dramáticos desarrollos en la tecnología de la comunicación, gracias a la revolución microelectrónica. Nos está tocando vivir en dos eras a la vez: la era electrónica y la era del conocimiento, y el impacto que éstas tienen en nuestras vidas es enorme.

Los formidables avances en la electrónica han provocado dramáticos avances en instrumentación y control de procesos metalúrgicos. Ahora las empresas pueden operar a sus óptimos niveles cuando se les instalan Sistemas Expertos que emulan a la toma de decisiones de un experto humano.

La metalurgia ya ha experimentado el impacto de la biología y de tecnologías como laser, micro ondas, ultrasonido y plasma; y se espera que estas también darán muchas más “ventanas de oportunidad” en el futuro.

Según Rupendra, las áreas que probablemente tengan mayor desarrollo en el futuro serán:

1. Aleaciones ferrosas y no ferrosas de alta resistencia y alto rendimiento.
2. Incremento en los tamaños, formas y resistencia para las piezas fabricadas mediante metalurgia de polvos.
3. Cerámica estructural avanzada, para aplicaciones a altas temperaturas.
4. Mejores métodos de preparación de materiales para la extracción de metales ferrosos y no ferrosos.

Ya ha comenzado la era de la nano ciencia y la aplicación de nano tubos, nano hojas de carbón y recubrimientos de grapheno hasta en medicina. Se han creado circuitos integrados usando láminas de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), alcanzándose elevados niveles de conductividad sin restricciones de tamaño, lo que permite producir dispositivos electrónicos más pequeños y más potentes.

El ingeniero metalurgista del futuro, cualquier ingeniero del futuro, va a tener que lidiar con las escalas a las que está avanzando la comunicación: tera escala y nano escala. También tendrá que lidiar con la complejidad. Cuando se agotan los recursos naturales no renovables, acudimos a los materiales más complejos y usamos procesos más complejos y trabajamos “al borde del caos”. Joseph Bordogna dice: “...todo se reduce a administrar el orden y el desorden, todo a la vez. Y si le tenemos que poner un nombre a eso, éste sería Ingeniería caótica”.

**Palabras clave:** agua, energía, materiales, tera, nano, complejidad.

## Metallurgy of the future

### Abstract

The challenges that face the mining and metallurgical industries are: Water, energy and feed grade. It will be necessary to develop sustainable co generation technologies in every operation. The use of robotic in mining will help to operate at very high capacities and to very low levels, diminishing risks for miners.

“Advanced mineralogy”, based on advanced capabilities of QEM\*SCAN and MLA analyzers, coupled to ultrafine grinding technologies, produce synergy between frontier technologies. Hence, pyro and hydrometallurgical plants would again receive high grade concentrates.

Extractive Metallurgy will change drastically in the future based in the dramatic technological development in communications, thanks to the microelectronic revolution. We are living at the same time in two eras: the electronic era and the knowledge era, and the impact of them in our lives are paramount.

The formidable technological advances in electronics have had dramatic advances in instrumentation and process control in metallurgy. Now companies can operate at their optimum levels when they use Expert Systems which emulate expert human decision making.

Metallurgy has already experienced the impact of biology and technologies such as laser, micro wave, ultrasonic, and plasma, and it is expected that they would represent many windows of opportunity in the future.

According to Rupendra, the areas that would probably have higher development in the future will be:

1. High resistance and high performance ferrous and non ferrous alloys.
2. Increment in size, shape and resistance for pieces fabricated by powder metallurgy.
3. Advanced structural ceramics for applications at high temperatures.
4. Better preparation of materials methods for the extraction of ferrous and non ferrous metals.

The era of nano science has been initiated, and the application of carbon nano tubes, nano sheets, and graphene coatings even in medicine. Integrated circuits using molybdenite ( $\text{MoS}_2$ ) films have been created, reaching a high level of conductivity without restrictions of size, enabling to produce smaller and powerful electronic devices.

The metallurgical engineer of the future, any engineer of the future, will have to deal with scales at which is advancing communication: tera scale and nano scale. He will also have to deal with complexity. When non renewable natural resources deplete, we go to complex materials, use complex processes and work on the verge of chaos. Joseph Bordogna says: “...everything reduces to manage order and disorder, everything at the same time, and if we have to put a name to it, it will be chaotic engineering”.

Key words: water, energy, materials, tera, nano, complexity.

## A metalurgia do futuro

### Resumo

Os desafios para as indústrias de mineração e metalurgia são os água, energia, e leis de cabeça. A cogeração de tecnologias sustentáveis será necessária em cada operação de mineração. A incursão da robótica na mineração permitirá operações de maior capacidade e de maior profundidade, reduzindo os riscos para a segurança dos trabalhadores mineiros.

A “Mineralogia avançada”, com base na capacidade avançada dos analisadores QEM \* SCAN e MLA, ligada à tecnologia ultrafina de moagem, produz sinergia entre as tecnologias. Então as plantas piro e hidrometalúrgicas receberiam novamente concentrados de alta lei.

A Metalurgia extrativa vai mudar drasticamente no futuro, com base nos desenvolvimentos dramáticos na tecnologia de comunicação, graças à revolução da microeletrônica. Está nos tocando viver em duas épocas ao mesmo tempo: a era eletrônica e da idade do conhecimento, e o impacto que têm sobre as nossas vidas é enorme.

Os grandes avanços na eletrônica levaram a avanços dramáticos em instrumentação e controle de processos metalúrgicos. Agora, as empresas podem operar em seus níveis ideais ao instalar sistemas espertos que emulam a toma de decisões de um especialista humano.

A Metalurgia já experimentou o impacto da biologia e das tecnologias como laser, micro-ondas, ultrassom e plasma, e se espera que estas também deem mais “janelas de oportunidade” no futuro.

Segundo Rupendra, as áreas susceptíveis de desenvolvimento no futuro serão:

1. Ligas ferrosas e não ferrosas de alta resistência e de alto desempenho.
2. Aumento do tamanho, forma e resistência dos componentes fabricados por metalurgia do pó.
3. Cerâmica estrutural avançada para aplicações de alta temperatura.
4. Melhoria dos métodos de preparação de materiais para a extração de metais ferrosos e não ferrosos

Já começou a era da nanociência e da aplicação de nanotubos, nano folhas de carvão e revestimentos de grafeno até em medicina. Circuitos integrados foram desenvolvidos utilizando laminas de molibdenita, atingindo altos níveis de condutividade sem restrições de tamanho, o que permite produzir dispositivos eletrônicos mais pequenos e mais potentes.

O engenheiro metalúrgico do futuro, qualquer engenheiro do futuro, vai ter de lidar com as escalas em que a comunicação está avançando: tera-escala e nano-escala. Também terá de lidar com a complexidade. Quando os recursos naturais não-renováveis se esgotarem, voltamos para materiais mais complexos e utilizamos processos mais complexos e trabalhamos "à beira do caos". Joseph Bordogna diz, "se trata de gerenciar a ordem e a desordem, de uma só vez. E se a gente tem que colocar um nome para ele, seria a engenharia caótica"

**Palavras chave:** Água, energia, materiais, tera, nano, complexidade.

Comenzaremos con la Concentración de Minerales:

Según el Dr. José Ángel Delgadillo Gómez, un joven profesional mexicano doctorado en Metalurgia Extractiva en la Universidad de Utah y quién será el que ocupe mi lugar cuando me jubile, los retos que enfrenta la industria de la concentración de minerales, y que en el futuro serán muy críticos son:

1. Abastecimiento de agua.
2. Disponibilidad de energía.
3. Disminución de las leyes de cabeza y aumento de demanda de metales.

Si nos ponemos a pensar en estos recursos, aquí en Bolivia, nos damos cuenta de que esos mismos eran los retos hace 30 años. Y si algunos de los aquí presentes se acuerdan, eso nos decía don Oscar Dávila hace 50 años. Lo que pasa es que esto se viene agravando a pasos agigantados.

Ahora hasta se habla de que la próxima guerra mundial será por agua. Bueno, aquí ya tuvimos una guerra del agua en Cochabamba. Contar con agua que satisfaga las necesidades vitales, sociales e industriales es uno de los mayores desafíos de la humanidad en el corto plazo. En el caso de la minería, que es altamente dependiente de un continuo acceso al agua, será necesario desarrollar técnicas innovadoras, eficientes y económicas que permitan la recuperación, reciclaje o disminución del uso de este valioso líquido mediante el tratamiento de aguas residuales o bien mediante un mejor aprovechamiento en los procesos. Aún no estamos

considerando al agua como un recurso estratégico. Un objetivo importante en el campo de la concentración de minerales debe ser el desarrollo de procesos que utilicen menor cantidad de agua que los procesos actuales.

La minería es intensiva en el consumo de energía eléctrica, que representa hasta un 40% de los costos de producción. La crisis energética que está viviendo el planeta podría limitar el crecimiento de la minería. Por lo que será necesario utilizar innovadores sistemas de reducción de tamaño para reducir los consumos de energía y de agua. Lo ideal será desarrollar tecnologías de co-generación sustentable como parte de cada operación minera.

Por último, los yacimientos cada vez presentan menores leyes de cabeza, lo que está generando que las plantas se diseñen para alta capacidad de procesamiento. En la década de los 90 una operación normal era de 2,000 t/d, ahora se habla de operaciones "normales" hasta de 150,000 t/d, para cubrir con la demanda de metales y minerales en el mercado. Este incremento en la capacidad de procesamiento genera oportunidades y retos para desarrollar nuevos métodos de minado y procesamiento a gran escala que representen menores consumos de energía y de agua.

La incursión de la robótica en las explotaciones mineras ya no es un sueño. Se va a volver una realidad muy pronto y eso conducirá a realizar operaciones de mayor capacidad y mayor profundidad, disminuyendo mucho, o hasta eliminando, los riesgos para la seguridad de los mineros.



**Figura 1.** Gigantesco molino (Internet: "San Cristóbal trip Bolivia", N.N.).

Algo que me ha llamado mucho la atención, ahora que he estado buscando información para esta presentación, es la tecnología que emplea la “mineralogía avanzada”, que se basa en la avanzada capacidad que tienen ahora los analizadores QEM\*SCAN y MLA, que pueden medir exactamente la mineralogía de miles de partículas en una muestra. Con esos resultados se pueden desarrollar diagramas de flujo virtuales con certeza matemática y que identifican los tamaños óptimos de molienda, necesarios para recuperar los metales valiosos en los granos de mena. Ligando esta tecnología con las de molienda ultrafina, pueden optimizarse los rendimientos y los costos de los circuitos de molienda. Ese es un claro ejemplo de sinergia de tecnologías de punta. Así las plantas piro e hidrometalúrgicas volverían a recibir concentrados de alta ley.

Sigamos con la Metalurgia Extractiva:

Los desarrollos en la metalurgia extractiva; pirometalurgia, hidrometalurgia, electrometalurgia, han sido formidables entre 1950 y 1990 aproximadamente. De acuerdo con el recordado profesor Herb Kellogg, el progreso tecnológico se dio en tres categorías: Los procesos mejores y más grandes, los procesos nuevos en virtud del progreso en ingeniería de diseño y los nuevos procesos en virtud de la química novedosa. Y así los nombres de Outokumpu, Inco, Mitsubishi, Kaldor o TBRC, Noranda, Ausmelt, Vanyukov, Kivcet, Contop, Proceso Isa,

Procesos Kidd Creek, Sherritt Gordon, CESL, Asarco, Teniente, etc., se hicieron familiares en el mundo de la metalurgia extractiva, junto con muchos otros más que no pasaron de la escala de laboratorio, o piloto, o que fracasaron a escala industrial, pero dejaron grandes experiencias y enseñanzas para lo que viene.

Vale la pena mencionar que en Bolivia en la década de los '70 se contaba con una formidable capacidad de fundición de concentrados de estaño de alta y baja ley, con una muy interesante y moderna planta de antimonio y a partir de los '80 ya podía haber comenzado operaciones una moderna planta Kivcet en Karachipampa.

Después de más de tres décadas, se tienen noticias de que esa planta por fin está a punto de iniciar operaciones. Esa noticia es muy buena y, si hace falta materia prima en el territorio boliviano, la operación de esa planta podría hacerse muy competitiva en la región y más lejos, como para poder comprar concentrados o maquilarlos a toda su capacidad, tal como lo hacen los japoneses en sus plantas extractivas, sin tener la materia prima en su territorio.

A partir de la década de los '70, Ausmelt desarrolló el proceso más sencillo, eficiente y eficaz para muchos materiales, no sólo concentrados; y por fin, también después de más de 30 años, tendremos un horno Ausmelt en Vinto.



Figura 2. Carcasa del Horno Ausmelt en camino a Vinto, Oruro-Bolivia. Ref: La Patria, 2012.

Así como se dice que la justicia tarda..., pero llega, podemos decir que en Bolivia la tecnología metalúrgica tarda..., pero llega.

Algo que efectivamente está haciendo cambiar drásticamente el enfoque de las empresas y de las instituciones hacia el desarrollo tecnológico, es el dramático desarrollo de la tecnología de comunicación gracias a la revolución microelectrónica, que se ha manifestado en la forma de satélites, celulares, correo electrónico, internet. La tecnología avanza igual que el conocimiento..., se duplica cada doce meses o menos... Nada es imposible... Ahora los sueños de los genios

se realizan con mucha rapidez..., y hasta pasan desapercibidos...y encontramos a cualquier “hijo de vecino”,...a un niño..., usando una laptop, un celular, un iPod, o un iPod nano, un Ipad,... y... quién sabe qué otras cosas más...La globalización de la comunicación..., al alcance de cualquier persona.

El efecto tecnológico se siente más rápido y con mayor intensidad, gracias a la globalización. Muchísimas empresas operan como entidades integradas a nivel global y esto les da la capacidad de desarrollar “conceptos tecnológicos virtuales” y aprovechar la economía de escala. Las capacidades de tratamiento de minerales en las plantas de beneficio crecieron

tanto que lograron bajar los costos de las operaciones más caras de esta industria, minería, trituración y molienda, obligando así a crecer también a las fundiciones y refinерías.



Figura 3. Comunicaciones. Ref: Internet: WMP Network. Svc.

Estamos viviendo a la vez dos eras: la electrónica y la del conocimiento. El impacto que estas tienen en nuestras vidas es

enorme. Los cambiantes estándares globales de la ingeniería pueden implementarse con mucha facilidad en cualquier operación, en cualquier rincón del mundo. La internet nos permite tener acceso a los mismos niveles de información sin importar en qué parte del mundo estamos trabajando.

Por ejemplo: Antes era muy difícil contar con datos termodinámicos para poder analizar procesos y desarrollar algo en base a esa información. Ahora contamos con HSC, MetSim, Aspen Plus, FactSage, Matter, TAPP, etc., para predecir el comportamiento de los materiales y se pueden modelar matemáticamente todos los procesos metalúrgicos.

La información electrónica al alcance de todos, significa que podemos probar o comprobar nuestras ideas termodinámicas, cinéticas, mecánicas y de diseño, antes de efectuar una importante experimentación práctica. Esto significa que se puede combinar todo este conocimiento para lograr enormes efectos y cambios en los procesos. Significa que el diseño de experimentos minimiza costos y maximiza la calidad de la información que se obtiene. Significa que la selección y uso de los materiales se hace mucho más efectiva para el diseño de procesos y ahora hasta podemos hacer consideraciones de mantenimiento y vida útil en nuestros modelos.



Figura 4. Moldeo de ánodos de cobre. Mexicana de Cobre, Grupo México, planta Sonora.

Los formidables avances tecnológicos en la electrónica han tenido también dramáticos avances en la instrumentación y en el control de los procesos metalúrgicos y el uso de sensores, alarmas, controles de nivel, técnicas de análisis multivariables en las plantas de beneficio, en las fundiciones y refinерías, para alertar a los operadores cuando se está por llegar a condiciones de operación indeseables. Las empresas metalúrgicas pueden operar a sus niveles óptimos cuando se les instalan Sistemas Expertos que emulan a la toma de decisiones de un experto humano.

Ya estamos siendo testigos del impacto que tiene la biología en la metalurgia y en la remediación ambiental y se considera que en el futuro ese impacto va a ser más importante.

La metalurgia ya ha incursionado en las tecnologías laser, micro-ondas, ultrasonido y plasma y estas también darán muchas más "ventanas de oportunidad", en el futuro.

¿Qué se puede decir con respecto a la metalurgia de transformación y a los materiales?

Es notorio el avance que están teniendo las aleaciones no ferrosas sobre las ferrosas, especialmente en la industria

automotriz. Según Rupendra, las áreas que probablemente tendrán mayor crecimiento en el futuro, serán:

1. Aleaciones ferrosas y no ferrosas de alta resistencia y de alto rendimiento.
2. Incremento en los tamaños, formas y resistencia para las piezas fabricadas mediante metalurgia de polvos, tales como engranajes para cajas de velocidad y otras aplicaciones en la industria automotriz.
3. Cerámica estructural avanzada, para aplicaciones a altas temperaturas.
4. Mejores métodos de preparación de materiales para la extracción de metales ferrosos y no ferrosos.



Figura 5. Laminación. Ref. internet: 2007 KME Germany AG.

El desarrollo de los nuevos materiales ha partido de los metales, de los cerámicos, de los polímeros, de los materiales compuestos y de los biomateriales. Cuando se trabaja con materiales con medidas extremadamente pequeñas, que permiten manipular las estructuras moleculares y sus átomos, se trata de la nanotecnología y así se descubren fenómenos y propiedades totalmente nuevos y se han llamado nano materiales, materiales inteligentes y materiales biomiméticos.

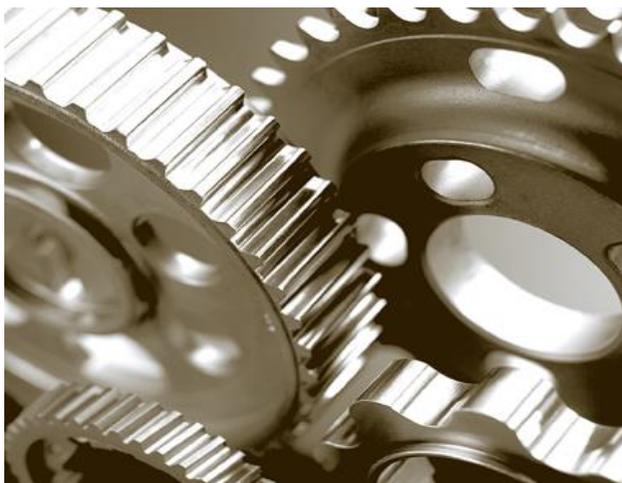


Figura 6. Productos sinterizados. Metalurgia de polvos. Ref. Internet: WMP Network. Svc.

Ya ha comenzado la era de la nano ciencia, y la aplicación hasta en medicina de los nano tubos de carbón, nano hojas de carbón y recubrimientos de grapheno.

Así como lo leí, lo puse: recubrimientos de grapheno. ¿Pero qué es esta cosa?

Resulta que recién el año pasado descubrieron al grapheno dos científicos rusos a partir de la mina de un lápiz (carbón), se dice que sus posibilidades son infinitas por su dureza, su flexibilidad, su elevada conductividad y por su elevadísima resistencia que es 200 veces más que el acero. ¿Se imaginan un teléfono celular que se pueda enrollar? Además, el grapheno cuando recibe luz, genera energía. Por todo esto se dice que éste es el material del futuro.



Figura 7. Tren bala japonés inspirado en el pico de un ave. Ref: Chaparro F., Materiales biomiméticos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para los metalurgistas bolivianos la molibdenita es un mineral conocido,  $\text{MoS}_2$ , este mineral tiene una capacidad para funcionar como conductor o no conductor de la electricidad, que no tiene el grapheno. En Suiza han creado circuitos integrados utilizando láminas de molibdenita, alcanzando un elevado nivel de conductividad sin restricciones de tamaño, lo que les permite convertir en dispositivos electrónicos más pequeños y más potentes.

Cada vez está más cerca la posibilidad de tener carros que pesen menos de 250 kg y que rindan entre 40 y 45 km/litro.

Los avances que se han alcanzado en la tecnología cerámica, han generado importantes aplicaciones en la industria aeroespacial, biomédica, electrónica, óptica, automotriz y en general para cualquier actividad humana, ahora hasta cuchillos se fabrican con cerámicos.

Se considera que la cerámica a altas temperaturas será una excelente opción en el futuro para la industria de la fundición y moldeo.

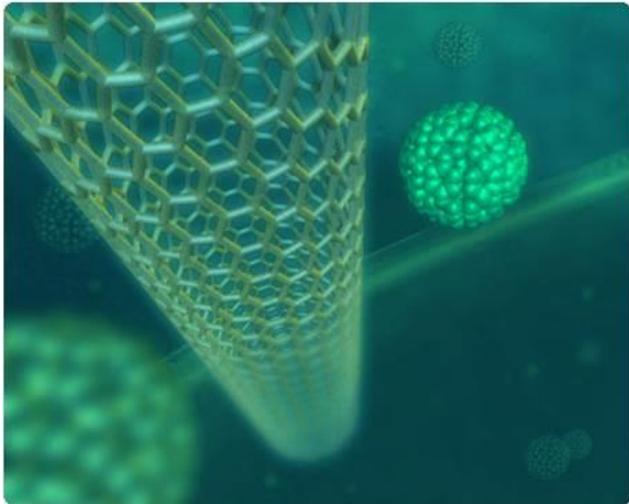


Figura 8. Nanomateriales. Ref. Internet: WMP Network. Svc.

Los desarrollos en materiales compuestos, incluyendo a los polímeros y en la tecnología cerámica a altas temperaturas, están mostrándonos cada día que no hay límites para la creatividad humana y los países altamente industrializados están redoblando esfuerzos para buscar vida, agua, minerales fuera del planeta, esos esfuerzos se basan principalmente en los formidables avances electrónicos y en el desarrollo, la selección y el uso de nuevos materiales, más resistentes, más livianos, más durables, etc.

Algunas de las razones por las que los ingenieros han sido capaces de construir edificios, máquinas, reactores..., cualquier cosa..., más grandes, más fuertes, y capaces de resistir enormes presiones dentro de las naves espaciales o en el fondo del mar, se deben a la resistencia de materiales, misma que se debe en gran manera al trabajo metalúrgico al que son sometidos: endurecimiento, templado..., tratamientos térmicos en general.

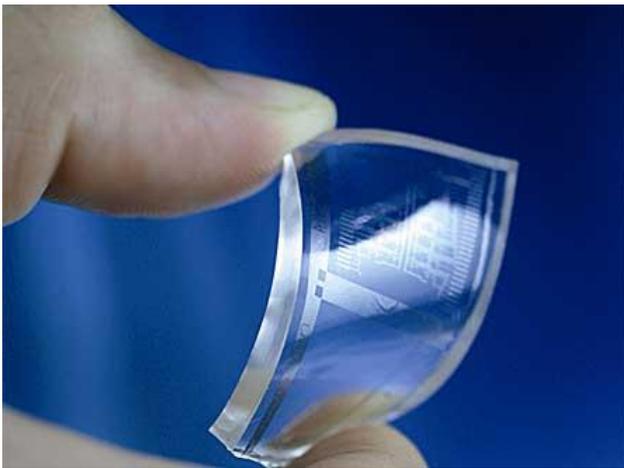


Figura 9. Grapheno. Ref Internet: WMP Network. Svc.

El campo de los Materiales, por definición es una actividad multidisciplinaria, y los metalurgistas bolivianos estamos

tardando en reconocerlo así. Yo creo que en mi patria se ha estancado la Metalurgia de Transformación, la Metalurgia Física, también veo con mucha esperanza que la carrera de Ingeniero Metalurgista de la FNI, ya se está dirigiendo hacia el correcto enfoque contemporáneo: Metalurgia y Materiales. Todas las industrias, ya sean las de construcción, o las electrónicas, o las del transporte, o las de salud, todas, utilizan materiales; y sus aplicaciones se basan en la comprensión fundamental de su estructura, de sus propiedades y comportamientos en variadísimas condiciones. Es por eso que el futuro de la metalurgia está íntimamente ligado al desarrollo y empleo de los materiales.

Para preparar esta presentación, naturalmente ingresé a internet y cuando solicité imágenes de materiales del futuro, mi frustración fue enorme, no porque no había imágenes, sino más bien porque hay tanta, tanta información, que uno se desespera.

El ingeniero metalurgista del futuro, cualquier ingeniero del futuro, va tener que ver con las escalas con las que ahora se desarrolla la comunicación. ¿Recuerdan las computadoras de los años '70 y luego las desarrolladas en los '80 y '90? Todas con capacidades muy bajas y si se requerían computadoras con grandes capacidades, estas también eran unos enormes monstruos que requerían instalaciones especiales y ambientes con temperatura especial. Luego comenzamos a vivir con las computadoras con capacidades de 25 gigas, 50 gigas, 500 gigas. Bueno, pronto vamos a tener que vivir con otra escala: Tera.

Tera escala nos llevará tres órdenes de magnitud más allá de las capacidades de computación que actualmente tenemos en el mundo. Pronto estaremos interconectando millones de sistemas y miles de millones de "herramientas de información" a la internet. Cuando crucemos el límite de tres mil millones de operaciones por segundo vamos a estar frente a nuevas fronteras del conocimiento y de la comunicación. En simulación de procesos, por ejemplo, lo que se tarda meses, podrá lograrse en cuestión de minutos.

Con los nuevos sistemas a tera escala, podríamos ser capaces de reducir mil veces el tiempo de simulación, o sea un día en lugar de tres años. ¿Y quiénes desarrollarán los materiales para esas aplicaciones? – los ingenieros metalurgistas y de materiales del futuro.

Nano escala nos llevará tres órdenes de magnitud por debajo del tamaño de la mayoría de los objetos hechos por el hombre. Las nano estructuras están en la confluencia de la más pequeña de las herramientas hechas por el hombre y las moléculas grandes de sistemas vivos que nos dejan imaginar la conexión de máquinas a células vivas. La nanotecnología nos está conduciendo a insospechados horizontes, por ejemplo a computadora modulares que podrían almacenar el equivalente a todas las bibliotecas de Suramérica en un USB. ¿Y quiénes ya están explorando esas posibilidades? - los ingenieros metalurgistas y de materiales del futuro.

Según Joseph Bordogna el ingeniero del siglo XXI también va a tener que convivir con la Complejidad. Cuando se agotan los recursos naturales no renovables de relativamente fácil

extracción, refinación y transformación, acudimos a los materiales más complejos, con procesos más complejos. Trabajaremos “al borde del caos”. Joseph Bordogna dice: “Cuando observamos a la ciencia y a la ingeniería, vemos a esta zona de transformación en muchas escalas, en muchas disciplinas y en los lugares más inesperados. Por ejemplo, están tratando de casar a los polímeros con el silicio, un matrimonio entre opuestos, porque los plásticos son cadenas caóticas mientras que el silicio consta de cristales ordenados. Los objetos electrónicos resultantes tendrían maravillosa flexibilidad, será más barato hacerlos, y por tanto darán poder a más gente. De nuevo, todo se reduce a administrar orden y desorden, todo a la vez. Y si le tenemos que poner un nombre a eso, éste sería Ingeniería caótica”.

El mismo autor dice que los ingenieros del futuro van a tener que desarrollar estas otras dos capacidades: Cognición y holismo.

Según el diccionario, cognición es conocimiento, acción y resultado de conocer a través de las facultades intelectuales. El proceso mental mediante el cual se adquiere el conocimiento. Debido a los nuevos conocimientos, métodos y herramientas, estamos al borde de una revolución cognitiva (o cognoscitiva) que podría minimizar a la revolución en la información. Estos descubrimientos de frontera serán los fundamentos para el progreso en muchas áreas, desde construir computadoras y robots casi humanos, hasta el diseño de redes y sistemas con capacidades de cognición; desde plantas metalúrgicas totalmente automatizadas, hasta estaciones espaciales.

El concepto de que una entidad es más grande que la mera suma de sus partes es holismo. Se refiere a las nuevas capacidades de poner varias cosas juntas, a cómo integrar cosas que parecen muy disparatadas, en un todo más grande. Esto incluye a los sistemas sociales, físicos y virtuales de ingeniería. El ingeniero moderno va a tener que desarrollar la habilidad de ver conexiones entre componentes aparentemente disparata-

dos e integrarlos de manera tal que excedan a la suma de sus respectivas capacidades.

Juntando tera escala, nano escala, complejidad, cognición y holismo, el Ingeniero Metalurgista y de Materiales del siglo XXI va a necesitar ser un realizador más astuto, un innovador confiable, un agente de cambio, un integrador maestro, un facilitador empresarial, un organizador de tecnología, un maestro en el manejo del conocimiento y un líder basado en principios tales como honestidad, justicia, rectitud, valentía, carácter, honradez. ¿Estamos diciendo que va a tener que ser algo así como superman? Pues así parece.

## Referencias

1. DELGADILLO G., J.A., Facultad de Ingeniería, U.A.S.L.P., México.
2. KING, M.G., Director de tecnología metalúrgica, Xtrata Nickel, U.S.A., Internet.
3. FRAGOMENI, D., *et. al.*, 2005, Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Canada.
4. WINSLOW, L. Metallurgy must continue into the twenty first century to achieve mankind's future, Internet.
5. RUPENDRA, A. en: Metallurgy must continue into the twenty first century to achieve mankind's future, Internet.
6. *The international review of materials, 2008*. International perceptions of the UK Materials Research BA.
7. BORDOGNA, J., U.S. National Science Foundation.
8. CHAPARRO F. *Materiales biomiméticos*, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.