



Comunicaciones del CIMAT

LA DISIMULADA RELACIÓN Y TRANSITIVIDAD ENTRE
MATEMÁTICA, TECNOLOGÍA E INDUSTRIA

Jesús Cervantes Servín

Comunicación del CIMAT No D-13-02/18-09-2013
(MB/CIMAT)



CIMAT

LA DISIMULADA RELACION Y TRANSITIVIDAD ENTRE MATEMÁTICA, TECNOLOGIA E INDUSTRIA

Jesús Cervantes Servín

CIMAT
Calle Jalisco s/n, Valenciana
Guanajuato, Gto. México
jcervan@ciamat.mx
Coordinación de Servicios Tecnológicos

Resumen

Bajo el contexto y las circunstancias del mundo actual, el propósito de esta comunicación técnica es discutir la conexión entre la matemática y la industria mediada por la tecnología y la ingeniería. Si bien, se ha dado por sentado en la sociedad que la matemática se encuentra siempre latente en cualquier ámbito de la naturaleza y de la actividad humana, en particular en la industria, esta idea tácita no escudriña el sentido efectivo y real de la conexión y sentido de influencia entre estas actividades.

Palabras clave: Manufactura, Tecnología, Ingeniería, Control, Matemáticas.

“La matemática tiene la vieja misión de unificar la ciencia y la tecnología”, Avner Friedman

“Hasta donde las leyes de la matemática se refieren a la realidad, no son exactas; y en cuanto son exactas no se refieren a la realidad”, Albert Einstein

“Sabemos cómo construir aeroplanos.

Sabemos cómo construir motores. El no saber cómo equilibrar y maniobrar aún desafía a los estudiantes del problema de vuelo. Cuando esta única dificultad sea resuelta, la era del vuelo habrá arribado, ya que todas las demás dificultades son de menor importancia”, Wilbur Wright

Introducción

Si bien para cualquier persona educada suenan tan contundentes las siguientes tres afirmaciones complementarias “la matemática es la piedra angular de las ciencias”, “las ciencias resultan factor básico de la tecnología” y “la tecnología factor de la industria”, que parece entonces que toda la maquinaria está bien aceiteada entre ellas y funciona bien. Sin embargo, en la medida en que desconoce la larga y sinuosa historia de estas afirmaciones y a fuerza de oírlas muchas veces, se vuelven un lugar tan común que para efectos prácticos el significado de esta relación pasa a ser superficial o incluso inútil. El supuesto carácter omnímodo que pudiera desprenderse de ello en el sentido de que la matemática al final se encuentra en todo, incluido el sector industrial, puede complacer el ánimo de los matemáticos pero no es suficientemente comprensible para el gran público y sobre todo para los industriales, en esta época en la cual la tecnología es verdaderamente contundente para la sociedad y la producción industrial, pero que también paradójicamente a la par de ello, el estado de abstracción que ha alcanzado la matemática resulta tan extraño y ajeno a la sociedad en su conjunto.

Se pueden encontrar algunos excelentes estudios en los que se detalla la historia no lineal y apasionante de estas relaciones y otros en los que se puede encontrar una justificación de la importancia fundacional que tiene la matemática para las ciencias y de estas a su vez con la tecnología, sin embargo, una comprensión ostensible y cotidiana entre ellas pasa desapercibida en general para el público. Obras como “The mathematical tourist” ⁽¹⁾ trata de reflexionar alrededor de este asunto. Por otra parte, al final del día se diluye el cómo y por qué de la intervención de la matemática en la industria, de su conexión con los intereses directos de ésta y mucho menos se visualiza la influencia e importancia en el sentido inverso, de la industria, la tecnología e ingeniería hacia la generación de conocimiento matemático mismo.

Recientemente, una serie de documentos desde los 80's a la fecha elaborados por comités de expertos, se están volviendo referencias detalladas y orientadoras acerca del papel de lo que ha llegado a llamarse las “ciencias matemáticas”, su relación interdisciplinaria con una múltiple lista de áreas científicas, con la ingeniería y de su intervención en la industria. Estos estudios explican de forma sistémica y particularizando hechos, el papel de la matemática en la tecnología

moderna pretendiendo aclarar la afirmación, en un reporte de la OECD, en el sentido de que la matemática puede ser “el marco coherente y lenguaje universal para el análisis, optimización y control de los procesos industriales”⁽²⁾.

Tomando en cuenta lo anterior, este reporte propone un análisis compuesto por tres segmentos, cada uno con su significado y aporte propio y con una relación estrecha entre ellos. Se pretende explicar el marco de los nexos directos e indirectos y la mediación que tiene la matemática en lo que se refiere a la tecnología y su efecto final en la producción industrial dentro del marco de cosas y circunstancias por los que pasa actualmente la sociedad del siglo XXI.

La idea central del reporte es buscar una matriz operativa conformada por estos segmentos que lleve a levantar un puente apreciable para detallar la línea de continuidad y de identificación práctica y sistemática de la matemática con la industria y la tecnología actual, mostrando el papel efectivo y explícito que juega y procurando ir más allá de la afirmación siempre señalada de que es la “caja negra”, pero que al final de cuentas nadie entiende su existencia. La “doble invisibilidad” de la matemática como lo llama el reciente reporte de SIAM (2002)⁽³⁾.

Cada segmento se sustenta en la lectura de una bibliografía actualizada sobre el tema.

Antecedentes

Existen dos sectores económicos vitales en los cuales situar la presencia de la matemática, en la industria y en el sector terciario llamado también de servicios.

La manufactura en términos porcentuales ha disminuido su participación en el PIB pero sus efectos multiplicadores y de arrastre resultan vitales para la sociedad ya que los productos manufacturados sigue siendo la base de la actividad económica. Por su parte, el sector de servicios con el uso de la computadoras y el manejo de grandes bases de datos, ha incorporado a la planeación estratégica de las empresas, la llamada inteligencia de negocios que ha dado paso a la formación de empresas de servicios que por sí mismas constituyen negocios, con su propia lógica y en apoyo a la misma industria.

En este reporte se aborda solamente el sector de manufactura. En un reporte posterior, se analizará el de servicios y la sinergia que mantiene con el primero.

Los segmentos que enseguida se presentan, forman un tejido en el cual se intenta mostrar como la matemática resulta un agente importante de la producción industrial y a su vez la influencia de esta hacia la propia matemática.

1. La lógica y perspectivas de evolución de la manufactura industrial actual y el sentido e importancia en esta época, de la innovación tecnológica
2. La conexión entre la industria con la ingeniería, que históricamente ha sido la relación vital de la manufactura con la tecnología
3. La relación de la matemática con la ingeniería, cuya influencia ha ocurrido en ambos sentidos. Un argumento de jerarquía de una sobre otra, no tiene sentido ya que tiene contenidos propios cada una de ellas y entre ambas se complementan. El silogismo de que la matemática puede ser absolutamente ajena a la ciencia y la tecnología, es falso.

1. Industria manufacturera y la tecnología en el momento actual

La globalización de la manufactura frente a un medio financiero incierto y complejo que domina actualmente la economía, impacta en este momento el desarrollo de cualquier empresa manufacturera, ya no solo las que tienen un carácter transnacional sino las que participan en cualquier economía local, que independientemente de su tamaño viven riesgos e incertidumbres frente a los movimientos de precios y demanda. No solo la demanda personalizada crece sino también, a medida que la variedad de funciones y características de los productos aumenta, crece el hecho de mantener los precios de la producción en masa estables o en decrecimiento pero aumentando la calidad y diversificación de los productos ⁽⁴⁾.

El control de costos es un aspecto que siempre ha resultado vital para la empresa capitalista. En el contexto económico mundial actual, aún inestable por la recesión de 2008, la producción manufacturera enfrenta incertidumbres en un marco de competitividad global entre empresas, que las obliga a buscar exhaustivamente estructuras de costos aún más competitivas ⁽⁵⁾⁽⁶⁾. Una componente que históricamente ha participado en la transformación de los costos es la tecnología que determina procesos y productos en la manufactura. A su vez, la acelerada evolución en esta época de los procesos y productos transforma de forma constante las cadenas de valor ⁽⁷⁾ y reorganiza las cadenas de suministros ⁽⁸⁾, apremia la

creación de nuevas formas de valor y la diversificación o reconfiguración hacia nuevos clientes o sectores de consumo.

El análisis de la manufactura tanto a nivel global como por los diferentes segmentos de inserción en la economía y el tipo de mercados, muestra que ella está adoptando nuevos enfoques “granulares” en lo que se refiere a los factores fundamentales de capital, el trabajo, la investigación y desarrollo, la energía, el comercio y el valor. Estos sucesos en la industria manufacturera marcan y definen los nuevos rumbos y enfoques de sus rasgos y requerimientos para los próximos 20 años en lo que se refiere a las ventajas competitivas, los factores de producción y las cadenas de valor que se vuelven más complejas, en particular aun en aquellos segmentos industriales que se consideran tradicionales. El análisis de fuerzas debido a Michael Porter, en estudios detallados que se pueden hacer ya sea por empresa, un conjunto de ellas, los denominados clusters o bien a nivel de una región o país es siempre un referente vital en este contexto, así como también desde un punto de vista sistémico en lo que se refiere a las tres patas reconocidas de la productividad: el uso de activos, el rendimiento operativo y la calidad del producto.

La industria manufacturera está enfrentando los cambios en la estructura de costos con la incorporación gradual pero constante de los conceptos definidos como: reconfigurabilidad, adaptabilidad, flexibilidad, esbeltez o concurrencia operativa ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾. Estos contemplan la integración múltiple de procesos paralelos, de procesos nuevos, de estándares de control de contaminación, de manejo de desperdicios, de estructuras diferentes de consumo energético, de emisión de contaminantes y consumo de nuevos materiales y de la reusabilidad de los mismos. Todo ello se orienta en particular a la reducción a tiempo de llegada al mercado de sus productos, ya sean estos intermedios o finales, y en última instancia al factor tecnológico fuertemente influenciado por la innovación. La I+D se convierte en un factor importante y decisivo ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾.

A mediano y largo plazo estos conceptos se impondrán en las líneas de producción y el layout de las plantas industriales y tendrán que ajustar sus conceptos y tecnologías para responder a la demanda creciente de los consumidores y la reestructuración de las cadenas de valor ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾. Cabe señalar que cualquiera de estos cambios se impondrá finalmente cuando estén claramente incorporados y asimilados en la lógica de maximización de las ganancias que la empresa

capitalista requiere. Estos cambios están ocurriendo de manera generalizada, no solo en los gigantes de la industria manufacturera (Siemens, Toyota, IBM, Mitsubishi, etc.) sino también por las empresas emergentes de base tecnológica y las empresas de los sectores tradicionales.

Estos fenómenos por supuesto están ocurriendo en México, independientemente de las condiciones históricas que dieron forma a su estructura productiva y a pesar de la desarticulación de cadenas de valor que ha ocasionado la política neoliberal de las última tres décadas.

Para pasar al siguiente segmento la pregunta es ¿qué significan estos hechos en relación a la ingeniería que sustenta a la tecnología actual?. La traducción de estos nuevos rumbos y rasgos deben observarse con la intervención de la ingeniería misma.

2.La Ingeniería, su relación con tecnología y la industria en el momento actual

Si bien, se han definido en un foro de la National Academy of Engineering de los EUA, 14 grandes desafíos para la ingeniería del siglo XXI ⁽¹⁹⁾, a saber:

- Suministrar energía a partir de la fusión
- Conseguir que la energía solar sea accesible
- Desarrollar métodos de secuestro del carbono
- Gestionar el ciclo del nitrógeno
- Suministrar acceso al agua potable
- Restaurar y mejorar las infraestructuras urbanas
- Avanzar en la informática para la sanidad
- Diseñar mejores medicamentos
- Hacer ingeniería inversa del cerebro
- Prevenir el terror nuclear
- Proteger el ciberespacio
- Enriquecer la realidad virtual
- Avanzar en el aprendizaje personalizado
- Diseñar herramientas para el descubrimiento científico

En esta lista, brilla por su ausencia, la relación de la ingeniería con la industria manufacturera que siempre ha sido una constante y una exigencia permanente. Los ingenieros cubren las demandas de efectividad operativa en la solución de problemas inmediatos pero también en la planeación de los cambios tecnológicos a

mediano y largo plazo de tal forma que participan en el desarrollo de nuevos conceptos de control descentralizados/distribuidos que determinan los paradigmas manufactureros actuales de sistemas smart y organizacionales complejos tales como los Sistemas Manufactureros Flexibles o Reconfigurables ⁽²⁰⁾ que son decisivos para identificar y manejar los retos ya presentados que están marcando el futuro inmediato y largo plazo.

La investigación y la pericia de la ingeniería se agitan entonces de manera muy dinámica como efecto de esta reconfiguración de la industria manufacturera y las tecnologías. Desde el diseño del layout de una planta pasando por la automatización de esta y sus consecuentes ritmos y movimientos, obligan a la práctica ingenieril al desarrollo de visiones nuevas para las líneas de producción, en la logística de entrada y salida de una planta, así como en el transporte materias primas y productos. La ingeniería evoluciona de la ejecución de una fase de “despliegue” a una ejecución de fases de “diseño-prototipo-desplegado”. La fase de diseño contiene la simulación de características mecánicas, térmicas y de flujo de los dispositivos del hardware en el sistema ⁽²¹⁾. Adicionalmente los algoritmos y lógica que los controlarían se vuelven más complejos, resultado del poder computacional. Por ejemplo, LabVIEW, Rockwell, Siemens y una sinnúmero de empresas ofrecen un solo ambiente de software, el manejo de sistemas gráficos para el diseño, la creación de prototipo, hasta el despliegue del sistema final.

El eje tecnológico tiene rasgos de innovación específicos en cada segmento industrial pero todos ellos incorporan de manera sistemática la simulación numérica de procesos y productos bajo lo que se denomina el “computer aided design/computer engineering”, e intensifican el desarrollo de la ingeniería denominada esbelta, concurrente que se conectan a nuevos conceptos y herramientas de la gestión de operaciones tales como: Calidad Total, Just in Time, Reingeniería de Negocios, Manufactura racionalizada ⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾.

El diseño concurrente e ingeniería simultánea, cuyo propósito en el diseño real en el montaje y mecánico, se expresa de forma excelente en la industria automotriz, muestra la interrelación e integración de herramientas informáticas que conducen a escenarios de simulación y sistemas informáticos que sustentan prototipos virtuales que sirven para adecuar condiciones, funcionalidad y coherencia intrínseca. Este prototipado acelera ya la construcción de una máquina de cualquier tipo en solo

tres semanas. Se busca con la investigación e invención, desde la ingeniería, mejorar la eficiencia de los procesos el diseño de nuevos productos o reenfocar capacidades.

Desde la aparición del control numérico, los constituyentes que participan en la automatización de la maquinaria están en constante cambios y cada año se presentan nuevas generaciones. Los PLC's (programmable logic controller), el diseño y utilización más sistemática de MEMS (microelectromechanical systems), RFID's radio frequency identification) se perfeccionan. Siemens, un gigante de la industria manufacturera dice que cada paso de los procesos de producción debe estar optimizado mediante software de innovación que se concreta en hardware de automatización, buscando la máxima velocidad y eficiencia. Así, la automatización que es inseparable en la manufactura y ha evolucionado desde siempre con ella, bajo los rasgos señalados arriba lleva a nuevas ideas en el diseño de maquinaria en la cual la robótica se incorpora de forma más sistemática e integral, incorporando los aspectos de visión que son determinantes para su capacidad de operación. Los sistemas de automatización de mañana desempeñarán tareas complejas en una variedad de productos con frecuencia de manera simultánea.

La competencia global actual obliga a los constructores de máquinas a diseñar máquinas con mayor rendimiento, menor costo operativo y más características que mejoren la productividad, incrementen la eficiencia y además diferenciar sus máquinas de la competencia. Los constructores de máquinas de hoy en día diseñan máquinas con las características de que sean de usos múltiples, flexibles y altamente efectivos al adoptar e integrar sistemas de control modernos, algoritmos sofisticados y partes electrónicas. La reducción en el tiempo de fabricación de estas también es un objetivo con las tecnologías actuales, por ejemplo National Instruments afirma hacer una en tres semanas.

Por otra parte, la relación más estrecha entre la ingeniería y la formación de ingenieros con las disciplinas de la física, biología y química, está produciendo cambios en la industria manufacturera mediante la incorporación de procesos y nuevos productos basados en nuevos materiales, nanociencia, biotecnología y genómica que producen nuevas formas de prototipado, proceso y productos que se están llevando a una escala industrial.

La enorme literatura existente sobre conceptos de manufactura y sus desafíos ilustra que tan complejo es el tema. Existe una enorme cantidad de journals de

ingeniería sobre cualquier tema que contempla la diversidad de ideas e iniciativas e ideas de innovación que necesariamente se alinean a las tendencias tecnológicas la investigación. Los staffs de ingeniería actuales son totalmente manejados bajo una dinámica corporativa en lo que se refiere a recursos humanos y equipo complejos (25)(26).

Es importante, concluir este apartado haciendo un puente con el siguiente apartado, mencionando un tema central para la ingeniería, la teoría de control ⁽²⁷⁾.

El término control puede tener varios significados, sin embargo, todos ellos apuntan a obtener un comportamiento deseado de un mecanismo o medio. Los conceptos de retroalimentación (feedback) y optimización son parte indisoluble de este. Todo ello ha generado materiales propios que se resume en las denominadas “funciones de transferencia” con toda la herramienta alrededor de la nociones temporales y de frecuencias, que han generado una impresionante cantidad de conceptos e ideas. Por ejemplo, el concepto de equilibrio es central para entender el comportamiento de los objetos y su control.

En todo ello, la matemática ha intervenido de manera importante. Desde la Grecia antigua hasta nuestros días, los matemáticos han contribuido a focalizar los conceptos fincados en la ingeniería. El cálculo aplicado al movimiento llevó a establecer una conexión entre el experimento físico y la modelación matemática generando una fuerte convicción determinista de la naturaleza.

3.La matemática y la ingeniería en el momento actual

La retroalimentación entre la ingeniería con la física, la química y recientemente la biología ha sido siempre una constante que ha moldeado la tecnología a lo largo de la historia. Por su naturaleza ambas buscan resolver problemas expresando sus conceptos mediante la medición, la cuantificación y relación entre observables. Es con ellas que manipulan, diseñan, inventan y construyen soluciones y artefactos que se materializan en los “tornillos y tuercas” que determinan la tecnología. A la par construyen también un lenguaje y herramientas conceptuales cuya intención primordial es responder a la solución de sus problemas.

La relación de estas disciplinas con la matemática tiene una variedad de historias de transformación de estas hacia el lenguaje propio de la matemática. La formalización de múltiples conceptos surgidos desde la física, la química y la

ingeniería, producen en la matemática el desarrollo de estructuras complejas. Sin embargo, también en esta época, la “vitalidad” de nuevas estructuras matemáticas y su aplicabilidad que genera tecnologías complejas, ocurre de manera más frecuente y comienza una matematización extendida dentro de las ciencias. Esta relación bidireccional es cada vez más importante para el propio desarrollo de procesos y productos ⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾.

La ingeniería, que desarrolla sus propios métodos de solución cuantitativa y analítica, transita hacia enfoques más complejos de modelación y simulación con mayor resolución utilizando computadoras más poderosas que requieren ahora del cómputo matemático y el manejo de la incertidumbre. Las máquinas de control CNC, PLCs o los sistemas integrados SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) y la producción del “big data” que generan, se analizan en tiempo real mediante modelos matemáticos que constituyen experimentos virtuales. Esto representa ventajas sobre el hecho de realizarlos de manera real que resulta costoso o bien peligroso. La complejidad de los modelos produce problemas fundamentalmente formidables hacia la matemática.

Como se señaló, la teoría de control y la modelación matemática que la acompaña es un área muy activa de investigación multidisciplinaria de la ingeniería en su trabajo con la manufactura. En esta área, la aproximación geométrica y algebraica ha sido una vía muy utilizada por los ingenieros, aproximación que lleva a la aplicación de la geometría diferencial, los sistemas dinámicos, la topología pero de manera más reciente también la geometría algebraica. Por su parte la robótica que cada vez se integra a las líneas de producción para una etapa de automatización más compleja también requiere de áreas de la matemática abstracta. Todo ello, es también indisociable de la capacidad de cómputo en constante evolución.

En particular, la importancia de las simulaciones computacionales lleva a reconocer la necesidad de entender la incertidumbre en sus resultados, lo cual requiere también de matemáticas mediante la verificación, validación y cuantificación de la incertidumbre (VVIC) ⁽³¹⁾.

Un nuevo fenómeno de producción y su efecto en la industria manufactura está surgiendo con los resultados de investigación en nuevos materiales, nanociencia ⁽³²⁾, biotecnología y genómica, en productos que ya se fabrican y que incorporan estos resultados. Producen nuevas tendencias tecnológicas que alcanzan cualquier sector económico y le plantean a la ingeniería retos para desarrollar los layouts y

líneas de producción de plantas industriales nuevas y sofisticadas. La matemática incorpora cada vez más diferentes áreas que son imprescindibles para el diseño virtual de productos antes de pasarlos a la producción, debido al complejo manejo de la materia orgánica e inorgánica. Incidentalmente, han dado paso a crear nuevas demandas y un emprendedurismo activo.

La modelación multiescala en el espacio y el tiempo implicando conceptos físicos, químicos y biológicos, se implementa cada vez más como un procedimiento de análisis para formular y encontrar explicaciones científicas de los fenómenos y estructuras de sistemas complejos, con ello la ingeniería puede desarrollar las tecnologías de productos y los procesos que están detrás de ellos ⁽³³⁾. La multiescala, le plantea a la matemática y el cómputo retos interesantes de investigación y conceptualización ⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾. SIAM edita el journal *Multiscale Modeling & Simulation* que presenta siempre resultados importantes de la ingeniería y la matemática.

Los sistemas SCADA desarrollados por la ingeniería abren un panorama amplio para el análisis de datos mediante la estadística, los sistemas expertos y su interacción con la teoría de control.

En resumen, la lista de áreas de la matemática mencionadas en párrafos anteriores no es exhaustiva ya que el análisis fractal, la teoría de grafos, combinatoria, etc., participan en la ingeniería asociada a la manufactura. La publicación de journals matemáticos en estos temas, en particular la tradición iniciada por el SIAM, han incorporado un mayor número de series en el terreno de las matemáticas aplicadas que son ejemplo de la participación de la matemática en los problemas de la ingeniería y la industria.

Conclusiones

La diversificación de la matemática y el crecimiento del número de investigadores en matemáticas durante el siglo pasado y lo que va del actual ha sido enorme y el entrecruzamiento de programas de investigación internos de la matemática abstracta ha producido y produce nuevos e interesantes problemas, algunos de ellos ligados a los problemas aún no resueltos de Hilbert o los del nuevo milenio recién propuestos por el instituto Clay. Pero también, simultáneamente – seguramente con el regocijo de Poincare y otros matemáticos notables desde Arquímedes – se amplía el número de aéreas abstractas de la matemática que se incorporan a la

investigación interdisciplinaria y de ingeniería de manera fructífera, en aéreas como la computación, nanociencia, genética, medicina, biología y economía, permitiendo que el tránsito entre lo abstracto irremediablemente asociado al pensamiento matemático, sea un apoyo para la solución y comprensión teórica de lo concreto aplicado en la innovación y sus repercusiones para la industria.

Incidentalmente, un detalle significativo de este estado de cosas lo es el hecho de que en el Congreso Mundial de Matemáticas se ha instituido recientemente la medalla Gauss para el reconocimiento de aquellos avances matemáticos más importantes en la industria.

Es importante seguir elaborando estudios o reportes más específicos de como las ciencias matemáticas están aplicándose en la industria y sobretodo, ubicados en nuestro país, que aunque sus características de industrialización no son las mejores, comenzaba a participar de esta dinámica mundial.

Bibliografía

1. I. Peterson. The Mathematical Tourist: New and Updated Snapshots of Modern Mathematics. Copyrighted material, Amazon, 1998
2. Reports on mathematics in industry. OECD, 2008
3. Mathematics in industry. SIAM, 2012
4. KPMG. Global Manufacturing Outlook: Fostering Growth through Innovation. 2012
5. World Economic Forum-Deloitte. The Future of Manufacturing Opportunities to drive economic growth, 2012
6. The President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST). Report to the president on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing. 2012
7. IMA. Value Chain Analysis for Assessing Competitive Advantage, 1996
8. D. Lu. Fundamentals of Supply Chain Management. VENTUS Publishing Aps, 2011
9. K. Bozdogan. Evolution of the lean enterprise system: a critical synthesis and agenda for the future. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley &, 2010

10. NRC. Novel Processes for Advanced Manufacturing: Summary of a Workshop. National Academic Press, 2013
11. B. Romanow, M. Gustafsson, K. Dinnetz, E. H. Wright. Strategy Definition and Road Mapping for Industrial Technologies to Address Grand Challenges. RTD Publications, 2013
12. R. Hadar, A. Bilberg. Manufacturing Concepts of the Future – Upcoming Technologies Solving Upcoming Challenges, 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011), Montreal, Canada 2011
13. The Manufacturing Institute. The Facts About Modern Manufacturing. 2009
14. McKinsey Global Institute. Manufacturing the future: the next era of global growth and innovation. 2012
15. McKinsey Global Institute. Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. 2013
16. KPMG, Telstra Corporation Limited. Cross industry innovation 2012 –the secret may well be in another industry. 2012
17. NRC. Visionary Manufacturing Challenges for 2020. National Academies Press, 1998
18. G. Roth, J. Srinivasan. Enterprise Transformation at Rockwell Collins. LAI Series, MIT, 2009
19. NAE. Grand Challenges for Engineering. National Academic Sciences, 2008
20. Implementing 21st Century Smart Manufacturing. Workshop summary report, SMLC, junio, 2011
21. NSF. Revolutionizing Engineering Science through Simulation. 2006
22. L. Ciprian, M. Vistrián, B. Radu, H. Olimpiu. Modeling and simulation methods for designing mechatronic systems. Journal of Engineering Studies and Research, Volume 16, pp. 20-24, No. 4, 2010
23. Control in an Information Rich World. SIAM, 2003
24. R. Sinha, V.C. Liang, C.J.J. Paredis, and P.K. Khosla. Modeling and simulation Methods for Design of Engineering Systems. Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 1, pp. 84-91, 2001
25. J. Oehmen, E. Rebutisch, K. Kinscher. Program Management for Large Scale Engineering Programs. LAI Whitepaper Series, MIT, 2011
26. S. Kalpakjian, S. R. Schmid. Manufacturing Processes for Engineering Materials, Prentice hall, 2008

27. R. M. Murray. Future Directions in Control, Dynamics, and Systems: Overview, Grand Challenges, and New Courses. European Journal of Control, Volume 9, pp. 144-158, 2003
28. NRC. The Mathematical Sciences in 2025. National Academic Press, 2013
29. NRC. Fueling Innovation and Discovery: The Mathematical Sciences in the 21st Century. National Academic Press, 2012
30. An industrial roadmap for mathematics and computing. Smith Institute, 2002
31. NRC. Assessing the Reliability of Complex Models: Mathematical and Statistical Foundations of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification. National Academic Press, 2012
32. Nanotechnology : Innovation and Technology Trends. ReportLinker, 2012
33. Multiscale Strategy for Solving Industrial Problems. III European Conference on Computational Mechanics, 2006
34. Dolbow J., Khaled M.A., Mitchell J. Multiscale Mathematics Initiative: A Roadmap. U.S. Departmente of Energy, 2004
35. Laitinen T., Wallin K. Ed. Multiscale modeling and design for engineering application. VTT, 2013
36. Aiichiro N. et al. Multiscale Simulation of Nanosystems. Computing in Science and Enineering, 14, pp. 56-66, 2009

Septiembre 2013

CIMAT