

Diseño de válvula compacta para humidificador de oxígeno medicinal

Ings. Fernando Bosch y Sebastián Martínez
Facultad de Ingeniería
Universidad de Montevideo

1. Introducción

Proyecto desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Pittsburgh como parte del curso Product Realization¹. Se desarrollo en conjunto con el Swanson Institute for Technical Excellence², profesores de la Universidad y empresarios que patrocinaron el proyecto.

El equipo interdisciplinario estuvo formado por dos estudiantes de ingeniería mecánica y dos de ingeniería industrial con un tutor especializado en el diseño de piezas mecánicas y moldeo.

Los patrocinadores Nick Coniglio y Harry Mellon pertenecen a una empresa dedicada a la producción, venta y alquiler de equipos de asistencia para personas afectadas por problemas respiratorios. Disponían de una patente para desarrollar un humidificador de oxígeno que no precisara el desarme del sistema para la reposición del agua en el interior del vaso. Con esta solución se buscaba solucionar el problema de las llamadas al servicio técnico, ya que más de la mitad de ellas se debían a reclamos en aparatos que fueron desarmados para

¹ El curso formaba parte del Programa de Intercambio Universidad de Pittsburg, Universidad de Montevideo, realizado por los autores en el décimo semestre de la Carrera de Ingeniería Industrial. Integra el plan de estudios del Master en Ingeniería Industrial, y consiste en desarrollar un proyecto de diseño en el que un patrocinador desea llevar al mercado un producto nuevo, o mejorar uno ya existente, pero carecen de los recursos técnicos para su diseño detallado.

² Centro que ofrece soluciones integrales de diseño y desarrollo de productos. Perteneció a la Universidad de Pittsburgh y ofició como un nexo entre la industria y la tecnología de punta en el desarrollo de productos. El centro trabaja en cuatro áreas: Bioingeniería, Diseño, Procesos de Manufactura y MEMS (Sistemas micro-electromecánicos.)

rellenar el recipiente con agua, y al cerrarlo de nuevo quedaba mal tapado, perdiendo presión y, por consiguiente, funcionando inadecuadamente. Además se buscaba lograr un mecanismo que impida rellenar en exceso el recipiente de agua, ya que en este caso se puede provocar que el oxígeno arrastre gotas de agua, lo que perjudicaría al enfermo.

1.1 Descripción del equipo

El humidificador de oxígeno es un pieza diseñada para establecer y mantener un nivel adecuado de humedad en el suministro de oxígeno a pacientes con enfermedades y problemas respiratorios. El recipiente se conecta a un tanque de oxígeno mediante un tubo plástico y una válvula. El oxígeno pasa por la válvula de entrada y al barbotar en ella adquiere el porcentaje requerido de humedad por adsorción. El oxígeno, una vez humidificado, pasa por la válvula de salida directamente a la máscara usada por los pacientes. A medida que pasa el oxígeno, el nivel de agua baja y cuando el nivel alcance el mínimo permitido, el recipiente debe ser destapado y rellenado con agua.

1.2 Requerimientos y restricciones

Manteniendo el principal objetivo de mantener el uso lo más simple y funcional posible, varias son las restricciones que se deben tener en cuenta:

- 1º) Que el recipiente humidificador se mantenga conectado al tanque de oxígeno en todo momento durante el proceso de llenado. Los problemas principales se originan en el hecho de que los usuarios deben retirar el recipiente para llenarlo, por lo que este es el requerimiento principal.
- 2º) El orificio por donde pasa el agua debe ser lo suficientemente grande como para evitar derrames y salpicaduras al llenar el humidificador. Si bien es casi imposible eliminar por completo las salpicaduras, es necesario que se reduzcan al mínimo, para evitar que el usuario se sienta inclinado a desconectar el recipiente.
- 3º) El flujo de agua debe ser tal que permita un llenado normal (desde una botella o un grifo por ejemplo). Estas dos características son importantes porque el usuario no va a aprovechar la mejora en

el diseño si le resulta engorroso o complicado de usar.

- 4º) Debe incorporarse un sello en la válvula para evitar que el oxígeno escape por ella. La presión dentro del recipiente debe mantener 6 psi en todo momento.

Además de estos requerimientos funcionales, dado que el objetivo final de los patrocinadores es su comercialización, se debieron incorporar en el diseño aspectos de mercado como:

- 1º) Una vez alcanzado el nivel máximo de agua, sellar la válvula automáticamente. Esta característica es muy útil porque el usuario no necesitará prestarle atención al nivel del agua mientras rellena el recipiente.
- 2º) El diseño deberá tener en cuenta el aspecto estético inherente a cualquier producto que será lanzado al mercado.

2. Descripción del Problema

Los humidificadores deben ser rellenados periódicamente para mantener el agua entre los niveles adecuados. Si el nivel del agua cayera por debajo del mínimo permitido, no se alcanzaría la humedad necesaria en el oxígeno. Si, por el contrario, subiera por encima del máximo, podría darse el caso en que el agua pasara a la máscara y llegara a ser aspirada por el usuario.

Estos aparatos son utilizados principalmente por adultos mayores. Esto provoca dos problemas al rellenar el recipiente con agua. El método empleado actualmente requiere que el usuario desenrosque la tapa y, cuando la enrosca de nuevo, es muy frecuente que quede mal tapada, lo que hace que la presión de oxígeno disminuya, ocasionando problemas respiratorios al paciente. Otro problema es que en general estos usuarios tienden a rebasar los niveles permitidos de agua.

Los equipos respiratorios actualmente usados en domicilios requieren ser desarmados para rellenar el recipiente humidificador. Eliminando esa necesidad, se resuelven a su vez los demás problemas.

3. Metodología usada

3.1 Objetivo

Diseñar e implementar una válvula de una vía para reemplazar las tapas actuales de humidificadores de oxígeno manteniendo la compatibilidad con las características principales del sistema actual. La válvula debe permitir la entrada de agua con un flujo adecuado sin tener que retirarle la tapa al recipiente. El objetivo último del proyecto es rediseñar el proceso de llenado para hacerlo más funcional y seguro al usuario.

3.2 Metodología

Los pasos necesarios a seguir para completar el proyecto con éxito fueron:

- Iniciación del proyecto:
 - Reuniones con la empresa patrocinadora y los tutores de la Universidad.
 - Definición detallada del problema y los objetivos.
- Investigación de usuarios finales y especificaciones necesarias
 - Teniendo en cuenta los requerimientos funcionales y de mercado, se establecieron las especificaciones para el diseño.
- Estudio detallado de la tapa actual.
 - Analizar la tapa tal como era, mediante el uso de aparatos que pasaron su diseño a programas informáticos de diseño, utilizando mapeo tridimensional con rayos infrarrojos.
- Análisis de alternativas y soluciones potenciales
 - Estudio de diseños con válvulas de membrana y bisagra.
 - Se eligió la válvula de bisagra para el diseño detallado por ser la alternativa más viable.
- Diseño de la válvula
 - Diseño General: Estudio de las principales características como: la posición del resorte, el orificio de entrada y la tapa.
 - Diseño Mecánico: Elección de materiales con la condición que puedan soportar la presión del recipiente. El resorte se eligió para que fuera capaz

de entregar el torque necesario para mantener la sellada la válvula cuando el aparato estuviera en uso.

- o Diseño detallado: Los ajustes más finos y requerimientos secundarios fueron estudiados e incorporados al diseño.
- Test de Prototipos
 - o Se crearon prototipos del diseño final para ser testeados.
 - o Se hicieron modificaciones en el diseño en base a los resultados
 - o Nuevos prototipos fueron creados y testeados.
- Finalización del Diseño.
 - o Una vez finalizado el diseño, se procedió a validar los resultados con los patrocinadores del proyecto.

4. Alternativas exploradas

4.1 Descripción general

La válvula fue diseñada, componente por componente, tomando en cuenta los requerimientos de cada pieza para luego proceder al armado y estudiar el conjunto. El primer paso fue estudiar como entraría el agua al recipiente para evitar que éste tuviera que ser desarmado. El segundo fue diseñar la válvula para garantizar un sellado adecuado. Finalmente se diseño el sistema de cierre automático.

El primer componente o sistema de llenado, común a todas las alternativas, se diseño como sigue:

Como se ha dicho, el requerimiento principal era que no hubiera que desconectar el recipiente del tanque para rellenarlo de agua. A tales efectos, se incorporó un embudo cilíndrico a la tapa del humidificador. Se diseñó un orificio en la tapa al que se anexó el cilindro mediante soldadura ultrasónica. Se soldó también otra pieza que consistía en un cilindro al que estaba conectada la válvula.

Al orificio en la tapa se le dio forma de embudo para evitar el volcado y las salpicaduras al verter el agua.

Para el resto de la válvula, se consideraron dos ideas:

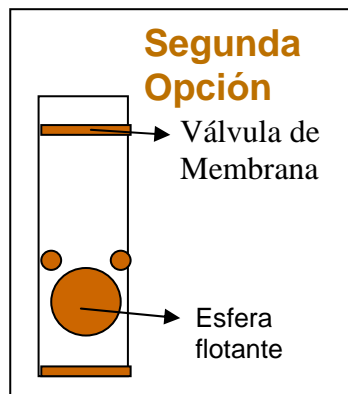
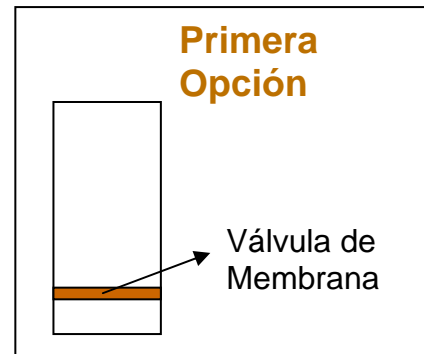
- Una válvula de membrana.
- Una válvula de bisagra.

4.2 Válvula de Membrana

La válvula de membrana consiste en una membrana flexible

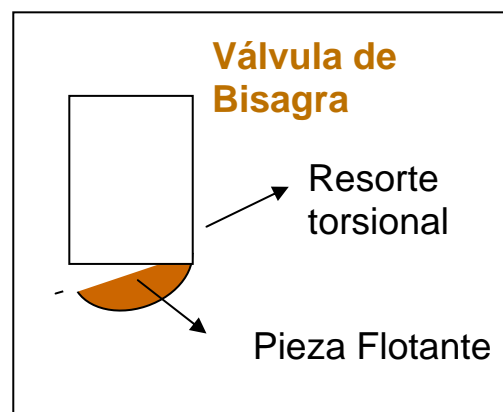
colocada al final del cilindro. Esta puede girar en un sentido, permitiendo la entrada del agua, pero sella

cuando la presión en el recipiente se vuelve positiva y evita el escape de oxígeno, y la consecuente pérdida de presión dentro del humidificador. Esto se logra fácilmente colocando la membrana sobre un disco cuya superficie sea una grilla evitando así que se doble en un sentido pero permitiendo el pasaje del agua sin ofrecer resistencia al mismo. Simplemente es necesario unir también mediante soldadura ultrasónica la membrana al segmento en el medio de la grilla.



Este diseño dio lugar a dos posibilidades muy sencillas para lograr el sellado automático una vez que el agua llegara al nivel máximo permitido. El primero, colocaría la válvula al nivel máximo

permitido, de manera tal, que una vez alcanzado el mismo, el agua contenida en el recipiente levantaría la membrana e impedirían que ingresara más cantidad de líquido. Este diseño presenta el serio



inconveniente de que en el caso de que el humidificador estuviera inclinado o la velocidad de ingreso del agua fuera suficiente para crear ondas en la superficie del agua.

Para evitar estos problemas, una segunda alternativa incorporó el uso de un elemento flotante esférico. La esfera flotaría entre dos anillos de goma. Cuando baja el nivel del agua, la esfera descansa sobre el anillo inferior. Al subir el nivel, la esfera sube con él hasta sellar contra el anillo superior, evitando así el ingreso de más agua.

4.3 Válvula de bisagra

La válvula de bisagra utiliza el mismo cilindro al que se le coloca una bisagra, y una pieza que gira sobre el eje de la bisagra. En el eje se coloca un resorte de torsión de acero inoxidable que estará conectado a la pieza móvil. Al verter el agua, se producirá un torque en la pieza de la válvula que vencerá al resorte permitiendo el ingreso del agua. Cuando no está siendo llenado, el resorte mantendrá la válvula sellada evitando así la pérdida de presión.

La constante del resorte se calculó para asegurar que sea capaz de mantener la válvula sellada, pero que cediera con la presión ejercida por la columna de agua contenida en el cilindro de la tapa.

La pieza móvil, consiste en un disco chato con una capa de silicona para lograr un mejor sellado. Para que la válvula sellara cuando el agua alcanzara el nivel máximo, se le agregó a la cara inferior una pieza flotante. Esta pieza consistía en un cuerpo hueco hecho del mismo material de la válvula. El aire contenido en el mismo alcanza para que se cierre cuando se llega al nivel deseado.

Este diseño tiene la ventaja de ser más simple para un proceso de fabricación por moldeo a gran escala. Tiene menos partes al combinar en una sola pieza el sello y el sistema de sellado automático. Las partes que lo componen también se diseñaron para que pudieran ser moldeadas por separado, reduciendo de esta manera los costos de fabricación. A su vez, el armado de las partes es en extremo sencillo por lo que estos pasos adicionales en la fabricación no inciden en el costo.

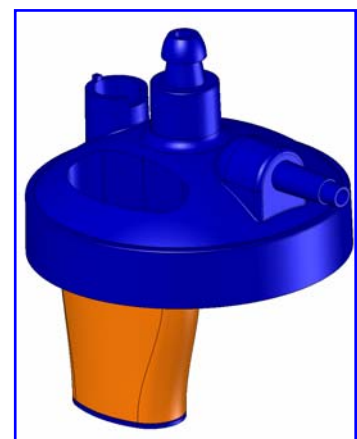
5. Diseño detallado de la alternativa elegida

Habiendo considerado todos los requerimientos tanto funcionales como estéticos y económicos (costos de manufactura, materiales, etc.), las siguientes especificaciones fueron definidas:

- 1º) Sección transversal del orificio de entrada lo suficientemente grande como para permitir un flujo adecuado de agua. (300 mm²)
- 2º) Altura del cilindro tal que cierre en el nivel máximo permitido y que la columna de agua dentro del mismo sea suficiente para vencer al resorte. (55 mm)
- 3º) Geometría y peso de la pieza flotante para garantizar que cierre debidamente.
- 4º) Se eligió como material un plástico ABS debido a su bajo costo y peso y su gran dureza y resistencia.
- 5º) Constante del resorte para que mantuviera la válvula sellada cuando bajara el nivel del agua.
- 6º) El material seleccionado para el resorte fue el acero inoxidable para que no sufriera corrosión durante el tiempo de uso (4 meses aproximadamente.)

6. Fabricación de Prototipos y Testeo

Se utilizó una impresora tridimensional para crear los prototipos en silicona. Se requirieron dos prototipos debido a las mejoras introducidas al primer diseño que se detallan a continuación.

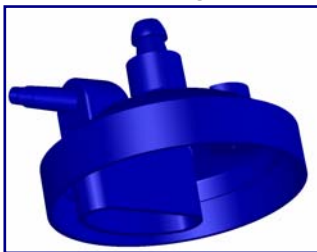


6.1 Primer prototipo

El primer prototipo fue un diseño más sencillo que sirvió para ver en funcionamiento la idea y llegar a conclusiones en cuanto a dimensiones y geometría.

Este primer prototipo se creó con una resolución baja en la impresora para reducir el tiempo de producción. Se encontraron que eran necesarias varias modificaciones y mejoras.

- *Diseño de la Tapa.*- La tapa fue exitosamente analizada por la lectora de rayos infrarrojos. La entrada de oxígeno ("B") y la salida ("C") son de tamaño y geometría prácticamente igual a las tapas ya existentes en el mercado. Sin embargo, se descubrió un problema en el tamaño de la válvula de alivio ("A"). Este fue fácilmente solucionado agrandando su sección. Este prototipo tampoco incluyó el diseño nuevo de la rosca de la tapa ("D").
- *Sello entre la tapa y el recipiente.*- El sellado entre la tapa y el recipiente no es debido a la rosca, si no a un sello de compresión en el perímetro de la tapa. Al enroscar, se aprieta el sello generando una fuerza axial que termina por generar el sellado requerido.
- *Diseño del cilindro.*- Para determinar el tamaño y la geometría del canal de entrada del agua, se consideró el área

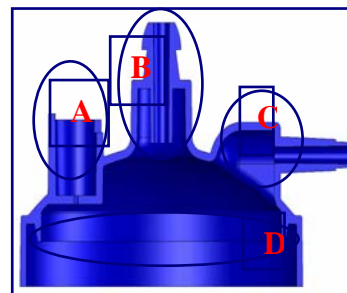
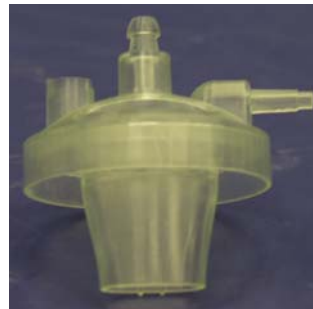


inutilizada de la tapa para maximizar el área de entrada

del agua y las técnicas de moldeo para su producción. A su vez, se debió considerar el aspecto estético, ya que la tapa es la parte más visible del elemento incorporado. La parte más importante del diseño del canal, sin embargo, es el de las bisagras. Aparecieron dos problemas significativos en el primer diseño. No se tuvo en cuenta el ensamblado final de las piezas, por lo que no coincidía perfectamente el canal, y la proyección interior del orificio en la tapa, creando así una vía de escape de oxígeno. El segundo problema estaba relacionado con la bisagra.

- *Diseño de la bisagra.*- El diseño de la bisagra, aparentaba ser

suficientemente robusto y de tamaño adecuado en la computadora, pero al crear el prototipo, se descubrió que en realidad era defectuoso por varios aspectos. El principal problema es que la



bisagra era de tamaño muy inferior al necesario. Aún inferior a la resolución de la impresora tridimensional, por lo que no se llegó a crear el agujero por el que habría de pasar el eje.

- *Flujo.*- El tamaño de la apertura demostró ser suficiente para un flujo equivalente al del vertido desde un grifo común abierto al máximo. Por otro lado, se comprobó que la resistencia del resorte fue adecuada,



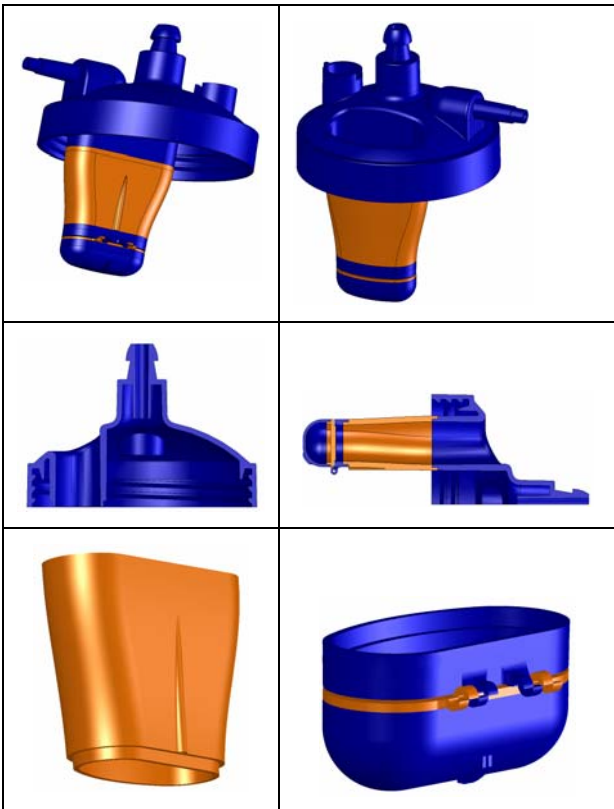
abriendo la válvula lo suficiente como para tener una interferencia mínima en la velocidad de llenado. Se logró un delicado balance entre el peso de la pieza flotante y el torque del resorte, de manera de no entorpecer el flujo.

- *Sellado.*- Debido a que las bisagras resultaron ser defectuosas, no se pudo testear el sellado.

6.2 Segundo Prototipo

El Segundo prototipo incorporó varias modificaciones que apuntaban a hacerlo más robusto. Se utilizó un programa de diseño mecánico, incorporándole las características de los materiales usados, lográndose un diseño más acorde a la calidad y funciones deseadas. Una vez fabricado y ensamblado, se procedió a su testeo, lo que arrojó resultados excelentes. A continuación se detallan las mejoras y sus resultados.

- *Diseño de la Tapa.*- El diámetro de la tapa fue modificado para conseguir un sellado mejor al enroscarla en el recipiente. Se utilizó la máquina de análisis geométrico para estudiar y reproducir la rosca³ de la tapa. Se agregó una canaleta para mantener alineado el resorte al abrir la válvula. También se corrigieron las dimensiones de la válvula de alivio.



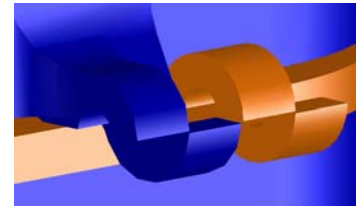
- *Sellado Tapa – Recipiente.*- al variar las dimensiones de la tapa debió

³ al ser un rosca Standard establecida por las regulaciones sanitarias de EE.UU. no se incluyó su modificación en el análisis

cambiarse también el sello que funcionando a la presión de trabajo resulto completamente satisfactorio.

- *Cilindro de Entrada de Agua.*- Se sacaron las bisagras del cilindro para facilitar su producción. Éstas pasaron a estar en un cilindro de muy poca altura y fueron moldeadas por separado. Esto hace que los moldes de ambas piezas sean mucho más simples y el consiguiente ahorro en materiales y tiempo de moldeo es significativamente mayor al aumento en costos que implica el ensamblado de una pieza más.
- *Bisagras.*- El nuevo diseño de las bisagras es una mejora sustancial respecto al primer prototipo. Este sistema en lugar de círculos completos en la pieza móvil y el canal, utilizó semicírculos desfasados, lo que abarata notablemente el moldeo.

- *Velocidad de flujo, sellado automático y sellado bajo presión.*- Como se mencionó



anteriormente, la velocidad de flujo y el sellado dependen directamente del torque proporcionado por el resorte. Se testearon varios resortes y se pudo corroborar que el de menor constante alcanzaba por lo que el costo del resorte se podía minimizar sin sacrificar calidad en el diseño final. El sello en si mismo no fue alterado con respecto al usado en el primer prototipo. Se mejoró el sellado agregando una junta de silicona líquida. El resultado final fue satisfactorio: el oxígeno quedaba contenido en el humidificador cuando operaba a la presión normal de trabajo y se cortó el flujo de agua al cerrar.

Más complicado demostró ser el dispositivo de cierre automático requerido por la empresa. Se logró un sistema en el que el flotador era suficiente como para que se cierre en el nivel requerido pero no sin problemas.

El primer problema fué que si el agua ingresa al recipiente con una velocidad

muy alta, el resorte no alcanza para lograr un sellado perfecto. Se podría dar la situación en la que se supere el nivel máximo permitido de agua. Se ensayo una pieza flotante de mayor porte, pero es una solución limitada también, ya que a partir de cierto tamaño, la geometría misma de la válvula comienza a interferir con el flujo del agua.

En segundo lugar, aunque posiblemente de mayor importancia, es de notar que cuando se corta el flujo de agua, una cantidad significativa de la misma (3 a 5 cc) queda atrapada en el canal. Se incorporó al diseño un sistema por el que apretando un botón se acciona una leva mecánica que abre la válvula para que caiga el agua atrapada en el canal.

Finalmente, sigue existiendo la posibilidad de que el usuario inadvertidamente siga llenando el cilindro una vez que se cierre la válvula, con el consiguiente volcado de líquido. Si bien no se encontró una solución práctica para este problema, no fue incluido por los patrocinadores como requerimiento secundario, por lo que no se estudió en profundidad.

- *Otras mejoras.*- Aún siendo más complejo, y levemente más costoso, se agregó una canaleta cerrada en lugar de abierta, como se consideró inicialmente, para guiar el resorte en el canal.

7. Agradecimientos

Deseamos agradecer encarecidamente a nuestros tutores Andrew Holmes y Frank Marx, cuyos aportes invaluable en gran medida hicieron posibles los resultados que se obtuvieron. También nuestro agradecimiento a los empresarios que patrocinaron el proyecto Harry Mellon y Nick Coniglio que nos dieron aportes que nos fueron importantísimos al momento de considerar aspectos comerciales. Por último debemos también nuestro agradecimiento al Swanson Institute for Technical Excellence por permitirnos el uso de sus equipos y laboratorios.

8. Referencias

- *Swanson Institute for Technical Excellence Journal*
- (www.engr.pitt.edu/SCPI)
- *Product Design and Development* (Karl T. Ulrich y Steven E. Eppinger)
- *Handbook of Materials for Product Design* (Charles A. Harper)