

03-051

MASS CUSTOMASING THROUGH DESIGNS PARAMETRISATION

García Domínguez, Amabel⁽¹⁾; Claver Gil, Juan⁽¹⁾; Sebastián Pérez, Miguel Ángel⁽¹⁾

⁽¹⁾UNED

Parametric designs allow to modify the geometry of the designed pieces by changing the values of the considered parameters. Thus, in comparison with traditional CAD models, they open several new work lines, such as the optimisation of certain key features for the final product.

This work explores another field of possibilities allowed by this type of models. Thus, this study is focused on the opportunities that parametric models offer to final users in a scenario where they can modify some parameters, thereby including certain level of customisation to the final product. By using Grasshopper, a graphic programming language included in Rhinoceros, adaptable designs are developed. Then, the customised models can be obtained by additive manufacturing without loss of productivity with respect to totally standardised approaches.

Keywords: *additive manufacturing; parametric design; customisation*

CUSTOMIZACIÓN EN MASA A TRAVÉS DE LA PARAMETRIZACIÓN DE LOS DISEÑOS

Los modelos paramétricos permiten modificar la geometría de las piezas diseñadas modificando valores de los parámetros considerados. Esto, frente a los modelos CAD tradicionales, abre muchas líneas de desarrollo, como por ejemplo la optimización de los diseños de cara a determinadas características que se quieran potenciar en el producto final.

Este trabajo explora otra línea de posibilidades de este tipo de modelos, explorando las posibilidades de que los usuarios finales del producto actúen sobre determinados parámetros, aportando cierto grado de personalización al diseño. Mediante Grasshopper, un lenguaje de programación visual adherido al software de Rhinoceros, se realizan diseños flexibles que se adaptan a esta personalización para ser producidos por fabricación aditiva sin que los tiempos de producción pierdan competitividad frente a la estandarización total.

Palabras clave: *fabricación aditiva; diseño paramétrico; customización*

Correspondencia: jclaver@ind.uned.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción y objetivos

El uso de herramientas de Diseño Asistido por Ordenador o CAD hace tiempo que dejó de ser una novedad. Hoy en día cualquier profesional involucrado en el diseño de cualquier tipo de productos emplea este tipo de herramientas para concebir y definir la geometría de las piezas. Así las ventajas a nivel de representación de los diseños están claras, aportando mayor agilidad y precisión en el trazado, mayor capacidad de introducir modificaciones, capacidad ilimitada de reproducción y posibilidad de enviar digitalmente los documentos o consultarlos en formato digital. Además, las herramientas de modelado 3D cambian la metodología de diseño y representación gráfica, siendo habitualmente los modelos virtuales en tres dimensiones la referencia sobre la que se va definiendo la solución final y partir de la cual se obtendrán todas las vistas diédricas necesarias.

Sin embargo, no todas las posibilidades del empleo de herramientas CAD están igualmente explotadas. Al construir los modelos 3D de los diseños se pueden identificar dos planteamientos iniciales bien diferenciados. Por un lado los modelos mallados y por otro los modelos paramétricos. Frente a los modelos 3D tradicionales, en los modelos paramétricos la geometría final se genera en base a unos parámetros definidos de inicio, de manera que la modificación de los valores de estos parámetros provoca la modificación de la geometría resultante.

Es ese contexto, los diseños paramétricos abren distintas líneas de trabajo de interés en el ámbito del diseño de los productos y de su fabricación. Por un lado, es posible desarrollar metodologías de trabajo que incorporen la optimización de los diseños en base a distintos objetivos, como puede ser la resistencia, la cantidad de material o el tiempo de fabricación. Esta línea fue objeto de desarrollo de un trabajo inicial sobre el diseño de metodologías de optimización multiobjetivo de piezas obtenidas por impresión 3D presentado en el Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos celebrado en Cádiz en 2017 (García-Domínguez et al., 2017). Por otro lado, los modelos paramétricos permiten obtener variaciones a partir de un modelo base o de referencia, actuando sobre los valores de algunos de los parámetros. Esto ofrece posibilidades de personalización de un diseño base sin necesidad de redefinir la malla del modelo, simplemente actuando sobre los valores de los parámetros que interese, dotando al proceso de customización de la agilidad necesaria para que sea factible. La optimización vuelve a ser clave en este sentido, ya que se deberán definir flujos de trabajo continuos que permitan validar los modelos modificados a través de su optimización.

Todos estos enfoques requieren a su vez de una tecnología de fabricación que haga viable la obtención de productos no estandarizados, sino personalizados. En este sentido, el desarrollo de las nuevas tecnologías de Fabricación Aditiva representa el pilar tecnológico imprescindible para hacer posible la materialización de los diseños obtenidos.

Con todo ello, el presente trabajo expone una aproximación inicial a la customización de productos no como situación puntual, sino como estrategia productiva general soportada por las posibilidades del diseño paramétrico y las tecnologías de fabricación aditiva.

2. Metodología

En este apartado se describen los tres pilares del planteamiento expuesto en este trabajo para la customización en masa de productos; la parametrización de los diseños, la optimización de los mismos, y su fabricación final mediante tecnologías de fabricación aditiva. Se apuntan los aspectos clave de cada uno de ellos, aspectos que justifican su consideración en este trabajo, y la manera en que se incorporan al proceso de diseño y obtención de los productos.

2.1 Parametrización de los modelos

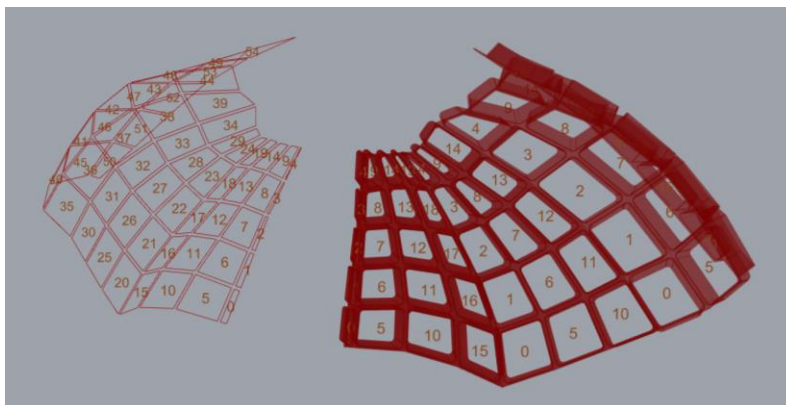
El concepto de modelo paramétrico engloba distintas variantes. No hay una única forma de parametrizar los modelos y esto deriva en distintas propuestas de clasificación de los tipos de modelos paramétricos existentes, una realidad en todo caso que está en continua evolución de la mano del desarrollo de nuevos software. Uno de los trabajos que abordan este tema y que puede servir de referencia a la hora de identificar las distintas opciones de modelado paramétrico es el desarrollado por Jenssen y Stouffs (2015).

Centrando la cuestión en un primer nivel, no en las posibles variantes identificables, los modelos paramétricos podrán representarse en un grafo general con un conjunto de nodos, tanto de operación (geométrica o de otro tipo) como de información, conectados entre sí mediante flechas que establecen un flujo de trabajo (Jenssen & Stouffs, 2015).

Este planteamiento permite actuar sobre el diseño desde las distintas variables consideradas, introduciendo modificaciones al alterar sus valores de partida. De este modo a partir de una solución general representada en un modelo tridimensional podrían obtenerse variaciones de la misma, consecuencia de la elección de actuar sobre una variable en concreto de las consideradas o sobre varias de ellas. La solución obtenida sería resultado de la variación introducida en el valor o valores de los parámetros afectados y su efecto dentro del flujo de información dentro de la programación gráfica del modelo, esto es a través de sus nodos y de las relaciones existentes entre ellos.

Esta concepción puede ser de interés en distintos escenarios en los que es valioso tener un control de la malla del modelo tridimensional en base a una serie de parámetros en función de la variación de sus valores (Park, 2005; Seffer & Ungor, 2001). Derivada de esa idea surge la oportunidad de, sin descartar la solución obtenida y representada en el modelo tridimensional inicial obtenido a partir de las premisas y objetivos del diseño, variar la respuesta del modelo respecto a determinada variable sin necesidad de redefinir el modelo tridimensional.

Figura 1: Ejemplo de modelo paramétrico realizados en Grasshopper de Rhinoceros

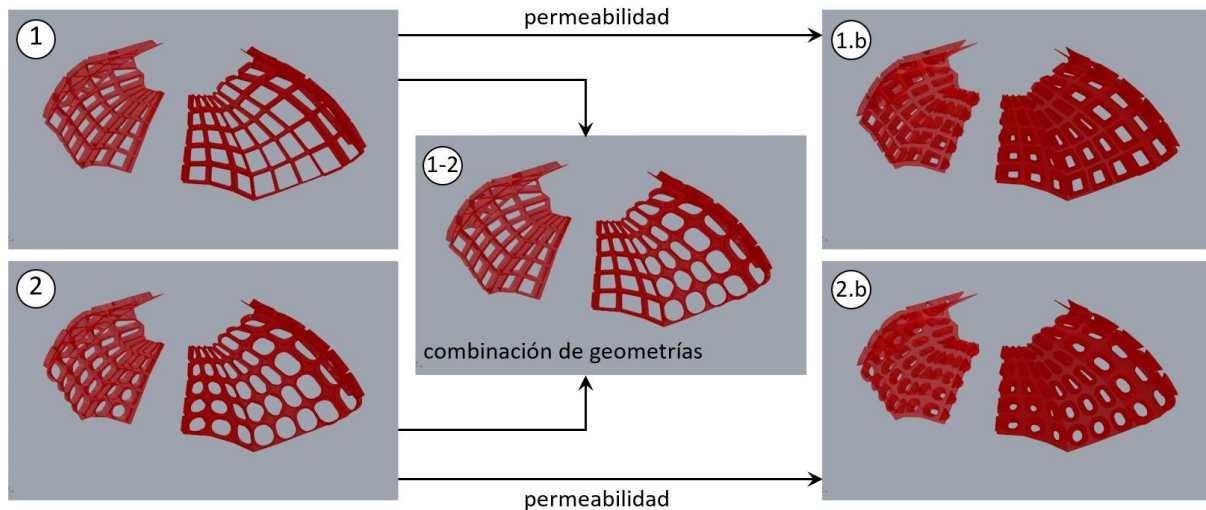


En la Figura 1 se muestra un ejemplo de un diseño basado en un modelo paramétrico. En este caso se pueden modificar aspectos como la geometría de los huecos, por ejemplo rectangular o circular, o la permeabilidad de la pieza según el tamaño de los mismos. Estas actuaciones de sobre la pieza pueden dirigirse a la totalidad de los huecos, pero también a huecos concretos. En la Figura 1 puede observarse como cada hueco es identificado con un número. De este modo el diseñador puede orientar la acción a un elemento concreto de la malla o a un conjunto de ellos, por ejemplo los identificados con un número par.

En la Figura 2 se muestran algunos ejemplos de las posibles variaciones comentadas. Con los números 1 y 2 se identifican dos versiones de la misma pieza con huecos de geometría

rectangular y circular respectivamente. En el centro de la figura se muestra la combinación de ambas geometrías asociándolas a distintas partes de la pieza. En la parte derecha se muestran variaciones de las dos primeras alternativas modificando la permeabilidad de la pieza al variar el tamaño de los huecos.

Figura 2: Ejemplos de variaciones del modelo paramétrico



2.2 Optimización de los modelos

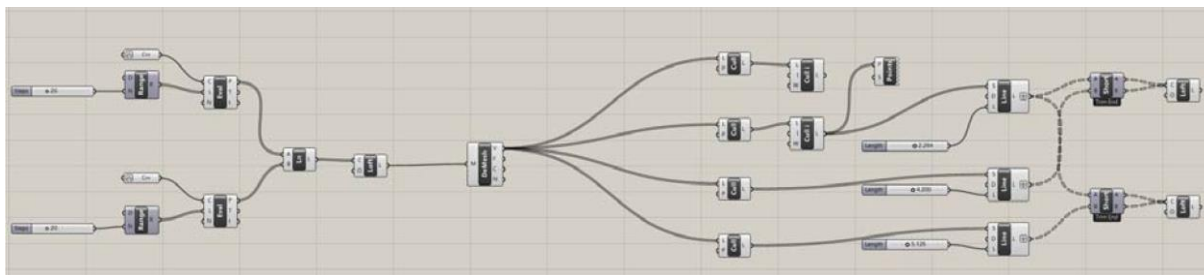
La optimización de los modelos busca, dentro de todas las posibles, las alternativas de diseño o soluciones que mejor responden a los objetivos establecidos por el diseñador. Dentro de este tipo de procesos la optimización topológica es una de las líneas de mayor desarrollo y difusión, buscando la mayor resistencia mecánica posible de la pieza al ser sometida a determinados esfuerzos y con el menor material posible. Pero a este objetivo inicial se le pueden sumar otros, como el tiempo de fabricación o el coste.

La optimización topológica se realiza a través de análisis de elementos finitos (FEM) que se aplican a la estructura mallada del modelo, y a partir de cuyos resultados se redefine la estructura. Para este tipo de optimización mono-objetivo, los modelos discretizados son adecuados, pero de cara a incluir más variables en procesos multiobjetivos es necesario establecer flujos de trabajo entre estos modelos y modelos paramétricos (García-domínguez et al., 2018), siendo esta conexión entre modelos un aspecto clave y de dificultad (Olason & Tidman, 2010; Blattman, 2008; Sheffer & Ungor, 2001).

En trabajos previos los autores exponen el desarrollo de metodologías de optimización multiobjetivo mediante programación visual con el software Grasshopper que opera en Rhinoceros (García-Domínguez et al., 2018). La selección del software más adecuado para los objetivos de la metodología de optimización a desarrollar también fue objeto de estudio (García-Domínguez et al., 2017), siendo seleccionado el software Grasshopper que opera desde Rhinoceros.

En la Figura 3 se muestra una captura de pantalla de un ejemplo de programación gráfica en Grasshopper en la que se definen los correspondientes nodos y las relaciones entre ellos que derivan en la obtención de una geometría determinada.

Figura 3. Ejemplo de programación visual de geometría a través de relaciones matemáticas en Grasshopper



De este modo, desde el punto de vista de la optimización de los diseños, los modelos paramétricos ofrecen mucho mayor potencial de cara a su depuración a través de metodologías de optimización multiobjetivo. Tanto de cara a la optimización de los diseños para su obtención por una determinada tecnología como puede ser la fabricación aditiva, como es el caso de las propuestas desarrolladas por los autores en trabajos anteriores (García-Domínguez et al., 2017; García-Domínguez et al., 2018), como orientadas a la optimización de los diseños de componentes en aplicaciones y sectores concretos (Lee et al., 2018; Meng et al., 2018; Zhang et al., 2018).

2.3 Oportunidades de la fabricación aditiva en la obtención de los productos

La Fabricación Aditiva, en sus distintas formas y desarrollos tecnológicos, supone un cambio de escenario a la hora de concebir los productos, dado que la fabricación por adición de material capa a capa elimina restricciones geométricas propias de los procesos de fabricación tradicionales; conformado por colada, por deformación plástica y por eliminación de material. Geometrías antes imposibles pueden ahora obtenerse, muy especialmente si pensamos en cavidades interiores (Tofail et al., 2017).

Pero además, otras geometrías si bien serán factibles con las tecnologías tradicionales, podrán resultar muy caras de producir, ya que en general a mayor complejidad de la geometría de la pieza más caro resultará su proceso de fabricación. Sin embargo la fabricación aditiva también actúa sobre ese escenario (D'Aveni, 2015; Minguella-Canela et al., 2017). La adición capa a capa elimina la complejidad de la pieza. No es necesario partir de una preforma, la fabricación aditiva parte de cero, y ese contexto el principal impacto en el tiempo de fabricación y en el coste lo tendrá la cantidad de material que demanda la pieza final y las trayectorias necesarias para depositarlo en las sucesivas capas, no tanto la complejidad misma de la geometría.

Desde esa perspectiva, y siempre con el soporte de las tecnologías aditivas de fabricación, la posibilidad de ofrecer diseños personalizados deja de ser una utopía técnica y económica. La sistematización del proceso de cara a maximizar su eficiencia y productividad condiciona el diseño de los productos, ya que depende de que éstos permitan esa estandarización. Así, durante décadas la tendencia fue maximizar esa estandarización a través de filosofías productivas como el Taylorismo o el Fordismo. Pero a partir de los 70 la carrera hacia la flexibilización de los procesos y de las instalaciones ha sido una constante, asumiendo que ya no era posible poner en el mercado grandes stocks de productos seriados esperando ser consumidos, y que los nuevos consumidores demandaban cambios constantes en los diseños y respuestas inmediatas a sus demandas, lo que supone unos primeros pasos hacia el reto de la customización en masa.

Sin embargo, la flexibilización de los sistemas productivos se ha basado sistemáticamente en aspectos estratégicos y logísticos de las instalaciones. Si bien los medios tecnológicos

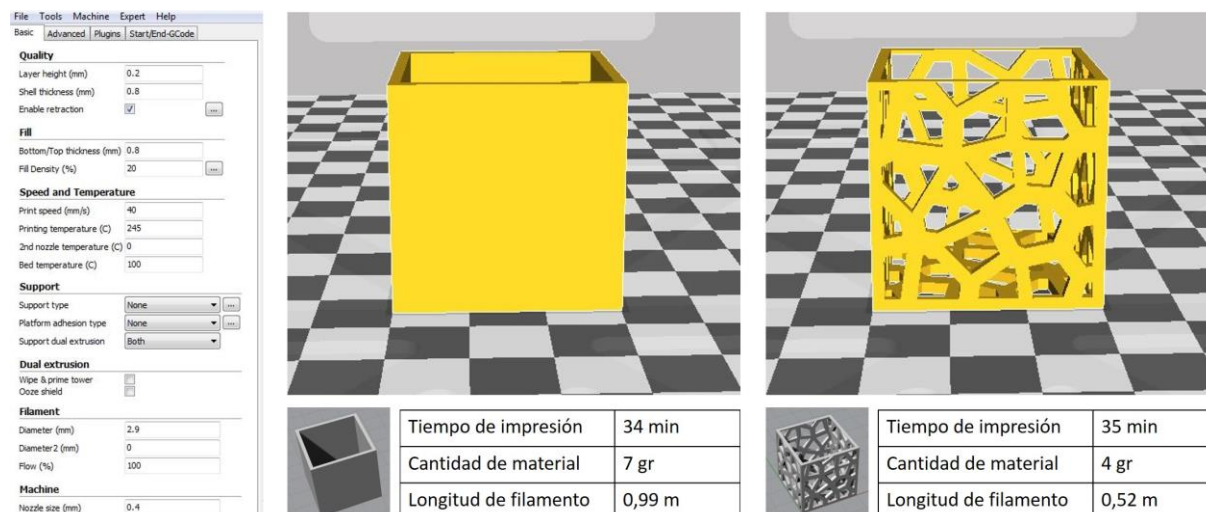
han evolucionado, por ejemplo con la aparición de procesos de Mecanizado No Convencional como el Mecanizado por Chorro de Agua Abrasivo (Abrasive Water Jet Machining) o el corte láser, no dejan de ser evoluciones de la tecnología, no de la filosofía del proceso, en este caso conformado por eliminación de material en la pieza sobre la que se actúa.

Sin embargo la Fabricación aditiva, quizás todavía no en la actualidad ni de forma masiva, pero sí de cara a un futuro cada vez más cercano, ofrece una verdadera revolución en la manera de obtener los productos. Desde la misma libertad a la hora de diseñar soluciones sin restricciones geométricas, a la obtención de la pieza final en un único proceso y sin que el grado de complejidad implique obligatoriamente un gran incremento del coste o de los tiempos de fabricación.

La Figura 4 ilustra esta idea. Usando el software Cura 15.04 de generación de g-code para la conversión de los modelos tridimensionales a estructuras por capas para su impresión 3D, se estiman los tiempos de impresión de dos piezas propuestas como ejemplos, cuyas geometrías se definen mediante modelos paramétricos elaborados en Grasshopper. En ambos casos se consideran los mismos parámetros de impresión, que en este caso son los que el programa establece por defecto para impresión con ABS en calidad estándar y que se muestran en la parte izquierda de la imagen.

La primera geometría considerada define un volumen cúbico hueco con 5 caras construidas dejando abierta la cara superior. La segunda geometría tiene las mismas dimensiones generales y sus caras el mismo espesor, si bien quedan perforadas según un patrón no ortogonal definido por los diagramas de Voronoi, debido a lo cual puede observarse que la cantidad de material empleado es menor.

Figura 4: Relación complejidad-tiempo-coste en fabricación aditiva



En procesos de fabricación tradicionales la complejidad de la pieza tendría un gran impacto en el coste, y el segundo ejemplo sería mucho más complicado de fabricar, más costoso y requeriría mayores tiempos. Sin embargo, a través de este sencillo ejemplo, se puede observar que esta lógica no es de aplicación directa al hablar de fabricación aditiva. Se observa como la mayor complejidad de la segunda geometría no supone apenas incremento del tiempo de fabricación y sin embargo al consumir mucho menos material, gracias a que la fabricación aditiva no elimina material para generar las perforaciones sino que lo ahorra, resultará más barata de fabricar. Por otro lado, se puede observar que el tiempo de fabricación no sólo depende de la cantidad de material a depositar, sino también de las trayectorias que debe definir el cabezal. En este sentido la complejidad podría tener o no

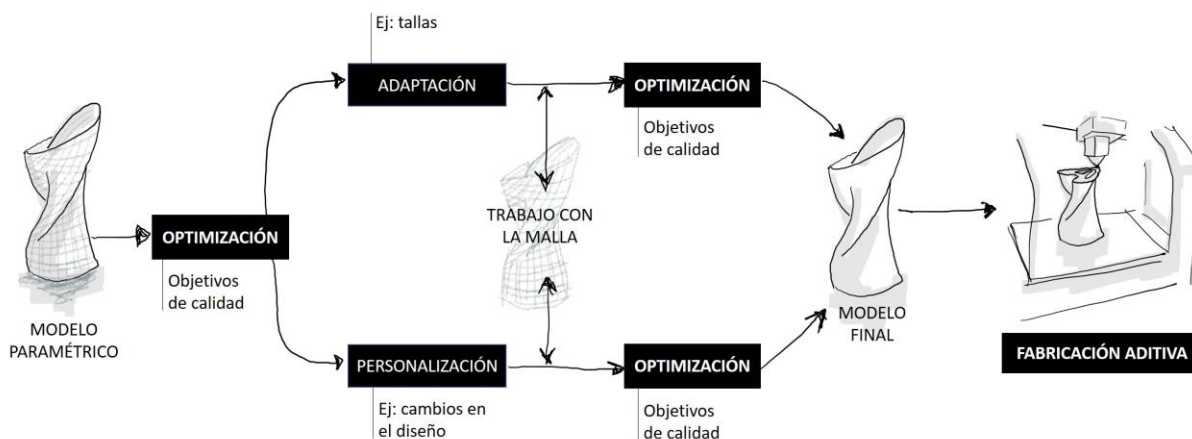
impacto en el incremento de los posibles tiempos de espera de las siguientes piezas, y en general en la productividad del sistema, según el equilibrio que exista entre la demanda y el número de equipos de impresión de los que se disponga.

2.4 Estructura metodológica

Las tres dimensiones o líneas de trabajo descritas, esto es diseño paramétrico, optimización y fabricación aditiva, ofrecen importantes sinergias que invitan a su integración dentro de metodologías de trabajo que exploten sus posibilidades. Cada una de estas dimensiones se ve potenciada al combinarse con las otras. Así la libertad geométrica que ofrece la fabricación aditiva de cara a la fabricación final del producto permite que desde la optimización del diseño se puedan buscar las soluciones más óptimas sin restringir las posibles soluciones a las geometrías obtenibles con los procesos de fabricación tradicionales. Y, a su vez, los modelos paramétricos permiten extender el proceso de optimización a la consideración de múltiples variables en un proceso de optimización multi-objetivo. En ese escenario distintos autores desarrollan su investigación integrando algunas de estas tres líneas de trabajo (García-Domínguez et al., 2018; Strano, 2012)

La Figura 5 representa de forma esquemática el planteamiento expuesto en este trabajo. Así, a partir de un modelo paramétrico y una vez definida y optimizada la geometría de la solución final se admiten ciertas variaciones respecto de esta solución bien por adaptación del diseño a unas necesidades, como podría ser la talla en el caso de productos vinculados a la geometría corporal del cliente, como son los productos del mundo de la moda, o bien por criterios personales del consumidor que quiere personalizar el producto a partir del diseño que se le ofrece. Ambos tipos de modificaciones se canalizan a través de las variables consideradas en el modelo paramétrico y el resultado obtenido volvería a ser optimizado para garantizar la solución más óptima con los nuevos valores de las variables. Obtenida la solución final del producto en una de sus versiones customizadas sería el momento de materializar la solución final mediante fabricación aditiva.

Figura 5: Esquema de la metodología de customización



La customización masiva deberá aceptar que cualquier cliente efectúe estos dos tipos de modificaciones al producto base que se le ofrece. Y además, debe poder hacerlo sin que ello tenga un impacto significativo en el precio final del producto, como sí pasaría en los modelos productivos tradicionales cuando se solicita un producto customizado. Los productos customizados se encarecen porque a diferencia del producto estandarizado tienen características exclusivas que implican que no puedan seguir el mismo proceso productivo que siguen los productos estandarizados. No pueden seguir la misma secuencia de operaciones que estos productos porque esas características especiales se obtienen a

través de ciertas operaciones que han de realizarse sobre esas piezas y que no se incluyen en la secuencia de operaciones del producto estandarizado. Esa ruptura con el proceso estandarizado de la planta productiva en cuestión implica una pérdida de eficiencia en el proceso y un sobre coste en el producto, pero algunos clientes están dispuestos a asumir ese coste a cambio de un producto exclusivo con características específicas.

La combinación de los diseños paramétricos y los procesos de optimización en la fase de diseño, junto con la fabricación aditiva en la fase de fabricación, permiten romper con ese modelo y democratizar el acceso a los productos customizados. Pero en última instancia es la fabricación aditiva la que permite romper con el modelo anterior. En los modelos tradicionales, ya hablemos de configuraciones productivas por lotes de tipo Job-Shop, de configuraciones en línea, o de configuraciones flexibles, la secuencia de operaciones que los productos han de seguir implica pasar por distintos equipos, y esto requiere una adecuada planificación de la producción y una distribución de las instalaciones óptima, tratando de evitar tiempos muertos y otros problemas logísticos que hacen inviables escenarios de customización masiva. La fabricación aditiva elimina estos problemas, dado que la pieza, independientemente de las variaciones que se hayan introducido respecto del modelo inicial, se elabora en un único equipo que permite obtener la geometría final en un único proceso.

Solventado el principal problema logístico de este enfoque productivo, la customización en masa puede ser abordada desde el punto de vista del fabricante y los posibles costes extra que deba asumir el cliente quedarán vinculados a aspectos directamente ligados a las características de la pieza que quiere, en función por ejemplo de la cantidad de material que sea necesaria, no tanto a la capacidad de las tecnologías de fabricación implicadas y del sistema productivo en el que se insertan.

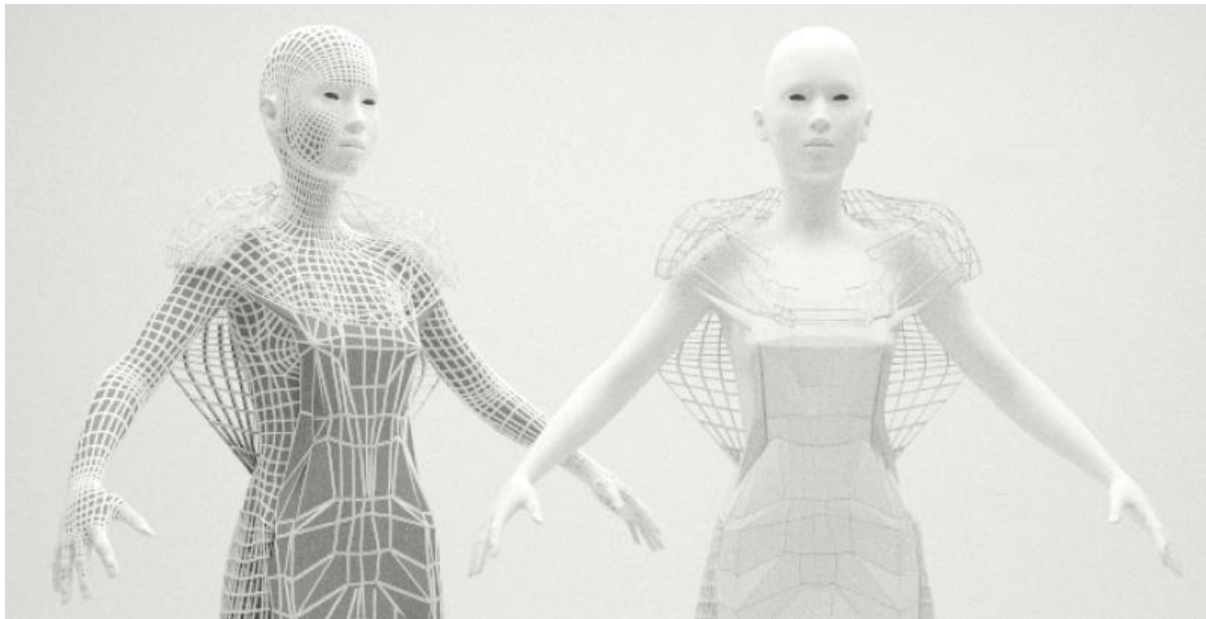
4. Resultados

La aplicación de los enfoques metodológicos expuestos en este trabajo se materializa en la actividad profesional de la primera autora como diseñadora de producto y de moda. Las metodologías de optimización multiobjetivo de piezas modeladas paramétricamente para su fabricación por impresión 3D, que desarrolla en su Tesis Doctoral bajo la dirección de los otros dos autores de este trabajo, son aplicadas en el diseño de productos en los campos indicados. En este apartado se expone, a modo de ejemplo una de estas experiencias, que permite ilustrar el potencial de estos enfoques productivos.

En la Figura 6 se muestra el diseño inicial de una pieza concebida como una malla cuyos nodos se separan o no de la superficie de un maniquí digital. De este modo el diseño tiene una relación directa con la volumetría corporal, actuando como una envolvente en torno a una parte de la misma.

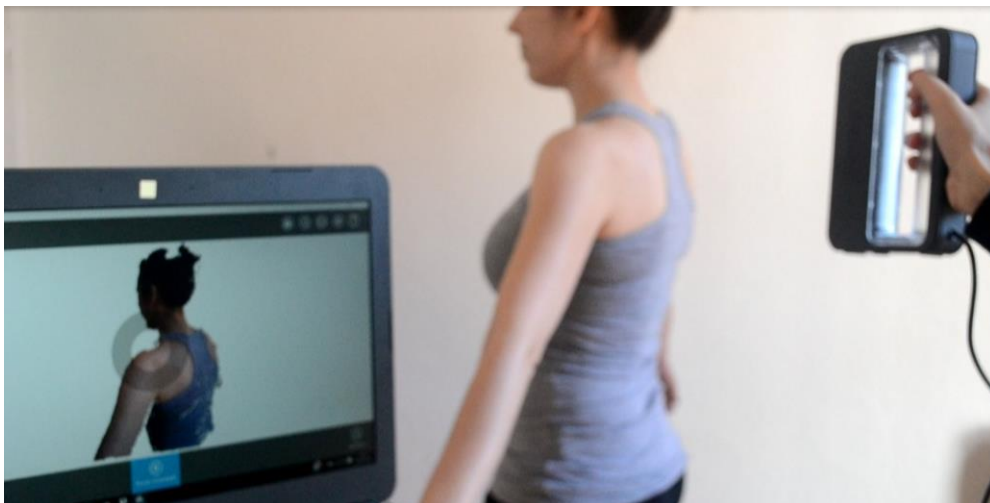
Sin embargo, al llevar este diseño a la práctica la referencia inicial de la volumetría corporal del maniquí no siempre será de aplicación. Las distintas medidas a considerar en la caracterización del cuerpo de un individuo, variarán de un usuario a otro, así como las relaciones entre ellas. Por tanto, la geometría del diseño inicial no se adaptará a la volumetría corporal de todos los posibles usuarios. Responder a esta situación correspondería al concepto de adaptación incluido en el esquema de la Figura 5.

Figura 6: Envolvente paramétrica en torno al volumen corporal (Amabel García)



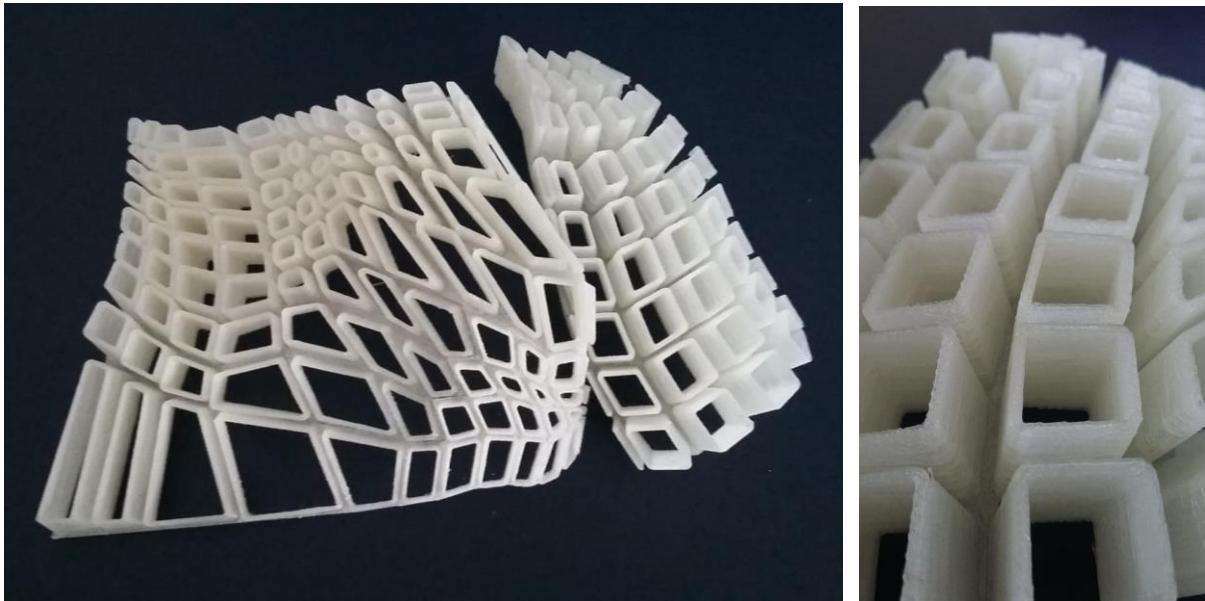
Para ello, en la Figura 7 se muestra el proceso de escaneado de una persona. A partir de la volumetría corporal obtenida para ese usuario concreto, la superficie del modelo paramétrico inicial se redefine realizando las aproximaciones y los alejamientos previstos pero actualizando la información de la volumetría corporal sobre la que operan.

Figura 7: Escaneado de la volumetría corporal de un usuario (Amabel García)



A su vez, el cliente podrá actuar sobre algunos aspectos del diseño, correspondiendo con el concepto de personalización incluido en el esquema de la Figura 5. Algunos de esos posibles aspectos podrían ser la geometría de los huecos de la malla o el tamaño de sus huecos, como se ilustraba en la Figura 2. En la Figura 8, en la parte izquierda, se muestra la impresión de dos partes de una pieza obtenida a partir del diseño ilustrado en la Figura 6. En la parte derecha se muestra con mayor detalle la profundidad de las paredes que limitan los huecos, aspecto también parametrizado en el diseño y sobre el que el usuario también podría actuar.

Figura 8: Ejemplos de impresión de las piezas obtenidas por aplicación de las metodologías propuestas (Amabel García)



5. Conclusiones

Los enfoques productivos descritos en este trabajo se consideran de interés para determinados tipos de productos en los que la customización de los diseños es demandada por el cliente. La combinación de la parametrización de los diseños, la optimización de los mismos y la selección de la fabricación aditiva como tecnología de fabricación, hace viables escenarios en los que la customización no quede asociada a una pequeña parte de la producción, sino que se pueda extender a porcentajes mucho mayores y entenderse como una estrategia productiva de aplicación general. Todo gracias a la reducción de los principales costes de producción asociados en los productos customizados obtenidos en esquemas productivos tradicionales.

Las metodologías de optimización de los diseños a partir de modelos paramétricos desarrolladas en trabajos anteriores por los autores, y que actualmente siguen definiéndose y completándose, junto con la aplicación de las mismas en el diseño de productos dentro de la actividad como diseñadora de la primera autora, permiten apreciar la utilidad y el potencial de estos enfoques.

6. Agradecimientos

Este trabajo se desarrolla en el marco de las actividades que la primera autora realiza en el desarrollo de su Tesis Doctoral, dentro del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Nacional de Educación a Distancia. Por ello los autores quieren expresar su agradecimiento a dicha entidad por el soporte prestado durante la realización del mismo.

7. Referencias

- Blattman, W. Generating CAD parametric features based on topology optimization results. *Thesis*. Department of Mechanical Engineering, Birgham Young University. 2008.
- D'Aveni R. The 3D printing revolution. *Harvard Business Review*. Vol. 93 (5), p. 40-48, 2015.

- García-Domínguez, A. Metodología para la optimización del diseño de piezas para la fabricación con impresión 3D. *Tesina Fin de Máster*. ETS de Ingenieros Industriales, UNED. 2015.
- García-Domínguez, A., Claver, J. y Sebastián, M.A. Aproximación metodológica a la optimización multiobjetivo de piezas obtenidas por impresión 3D. *Proceedings of the 21th International Congress on Project Management and Engineering*. Cádiz (Spain), 2016.
- García-Domínguez, A., Claver, J. y Sebastián, M.A. Propuestas para la optimización de piezas para fabricación aditiva. *DYNA*. DYNA ACELERADO(0). 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8585>
- Janssen, P., Stouffs, R. Types of parametric modelling. *Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA 2015*. Hong Kong, 2015
- Lee, S., Kim, T. & Srivastava, S. Efficiency Enhancement of Aeroelastic optimization process using Parametric Reduced-Order Modeling. *Journal of Aerospace Engineering*. 31(2), 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000805
- Meng, Z., Hu, H. & Zhou, H. Super parametric convex model and its application for non – probabilistic reliability-based design optimization. *Applied Mathematical Modelling*. 55, 354-370, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.11.001>
- Minguella-Canela J, Muguruza A, Lumbierres DR et al. Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating additive manufacturing to product supply chains. *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress*. Vigo (Spain), 2017.
- Olason, A., & Tidman, D. Methodology for Topology and Shape Optimization in the Design Process. *Tesina Fin de Máster*. Chalmers University of Technology. Göteborg (Sweden), 2010.
- Park, H & Lee, K.H. A new parametric control method for freeform mesh models, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005, 248-257.
- Rhinoceros Sitio Web. Grasshopper. Obtenido el 10 de abril de 2018 desde <https://www.rhino3d.com/es/6/new/grasshopper>
- Sheffer, A. and Unger, A. Efficient Adaptive Meshing of Parametric Models. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(4), 366- 375, 2001.
- Strano, G. Multi-objective Optimisation in additive Manufacturing. *Thesis*. College of Engineering, Mathematics and Physical Science, University of Exeter. 2012
- Tofail, S.A.M., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*. July 2017. Vol 00(00). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Tomilov, I.N., Grudin, S.N., Frolovsky, V.D., & Alexandrov, A.A. Parametric Modeling as a technology of Rapid Prototyping in Light Industry. *Material Science and Engineering*. 127, 1-6, 2016. DOI:10.1088/1757-899X/127/1/012028
- Zhang, W., Lv, S. & Ni, Y. Parametric aeroelastic modeling based on component modal synthesis and stability analysis for horizontally folding wing with hinge joints. *Nonlinear Dynamics*. Vol. 92 (2), 169-179, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3956-5>