

Estrategias aplicadas en el estudio del estado de conservación de la obra *Guernica* de Picasso

Jorge García Gómez-Tejedor

Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía
jorge.garcia@museoreinasofia.es

Resumen: El estado de conservación del *Guernica* de Picasso ha sido siempre una de las principales preocupaciones del Departamento de Conservación-Restauración del Museo Reina Sofía. Es por esto que, desde que la obra entró a formar parte de la colección del museo, se han desarrollado diversas líneas de actuación y de investigación encaminadas a mejorar el conocimiento de los materiales que la conforman, su estado de conservación y la interacción de los agentes medioambientales. En 1998 se publicó un estudio muy exhaustivo sobre el estado de conservación de la obra y, desde entonces, se han venido realizando investigaciones importantes. En 2006 surgió la oportunidad de trabajar con el reverso de la obra, lo que permitió la realización de múltiples análisis. Por ejemplo, se hicieron estudios reflectográficos y de luz ultravioleta en el reverso, se tomaron muestras para analizar los materiales del soporte. No obstante, lo más reseñable fue la radiografía completa que se pudo realizar al lienzo. Hay que destacar la colaboración del Instituto del Patrimonio Cultural de España en estos trabajos.

En 2009 se concibió un nuevo proyecto, que se firmó en 2010 bajo el patrocinio de la Fundación Telefónica: se trata de «Viaje al interior del Guernica», un trabajo que propone realizar un estudio pormenorizado de toda la superficie del cuadro. Se plantearon dos líneas de actuación: la primera se centra en el desarrollo de un automatismo robotizado de precisión que cumpla con todas las expectativas de calidad, que sea compatible con la exposición del cuadro y que, una vez acabado el estudio, se pueda trasladar fácilmente. La segunda línea de actuación se basa en la interpretación de las imágenes y en la aplicación de los avances necesarios para procesar toda la información con la máxima calidad posible.

A comienzos de 2012 y después de un año de trabajo, se pudo instalar el automatismo y se iniciaron las tomas fotográficas en alta resolución. Esta primera fase concluyó a finales de 2012; de la segunda fase, que ha comenzado a principios del 2013, se espera tener resultados antes de que finalice el 2014.

Con motivo de este trabajo se ha emprendido una labor de recuperación de información, para la que se han digitalizado todos los estudios realizados hasta la fecha en formato analógico. De este modo, se asegura la perdurabilidad de los datos, evitando así las modificaciones provocadas por envejecimiento de los materiales. Entre los aspectos más reseñables de todo este trabajo está la intención de crear una base de información continua que nos permita ir valorando la evolución material de la obra.

Abstract: The condition of Picasso's *Guernica* has always been a matter of great concern for the Conservation and Restoration Department at the Museo Reina Sofía. As soon as the work entered the museum's collection, a specific action and research plan was drawn up to gain a better understanding of the materials used, their present condition, and their interaction with environmental agents. A detailed study on the condition of the work was published in 1998 and a number of in-depth studies have been conducted at regular intervals since then. In 2006 we were able to work on the reverse side of the piece and took the opportunity to carry out numerous studies, including the use of infrared reflectography and ultraviolet light to examine this side of the work. We also took samples of the materials used in the support, However, perhaps most important of all on this occasion was the chance to take an X-ray of the entire canvas. We are grateful for the assistance received from the Spanish Cultural Heritage Institute on all these processes.

In 2009 we designed a new project entitled «Journey to the Inside of Guernica», which was formalised the following year when Fundación Telefónica pledged to sponsor the initiative. The cornerstone of this project consists in carrying out a detailed study of the entire surface of the work, to be conducted in two phases. The first phase entails the development of an extremely precise, state-of-the-art Cartesian robot and made cultures to examine the activity of fungi and bacteria without interfering with its public display and could be easily removed on completion of the study. The second phase will involve interpreting the images and implementing the necessary mechanisms for processing all the data collected to the highest possible standard.

At the beginning of 2012, after a full year of work, we were able to install the robot and start taking high-resolution photographs of the canvas. This phase concluded in late 2012; the second phase has started in early 2013 and is expected to have results by the end of 2014.

As part of this new project, we have retrieved all the analogue information collected to date in previous studies and converted it into digital format to prevent any loss or modification of the data as a result of the ageing of the materials. Another important aspect of this project is our plan to create a live database so that we can continually evaluate the material evolution of the work over time.

Introducción histórica

La obra *Guernica* de Picasso, icono de la colección del Museo Reina Sofía (MNCARS), es, por su tamaño y estado de conservación, una pieza de gran complejidad que requiere de especial atención y cuidado para su correcta conservación. Es necesario contar con un profundo conocimiento de los materiales que la componen, y saber con todo detalle el estado en el que estos se encuentran, para poder valorar con suficiente conocimiento los factores que van a incidir de forma significativa sobre el estado general de la obra. Así pues, unas de las prioridades del Departamento de Conservación-Restauración del Museo Reina Sofía ha sido siempre el cuidado de esta obra icónica, con la clara idea de hacer que perdure en el mejor estado posible, aplicando las medidas de conservación necesarias para disfrutar de su contemplación con el menor deterioro. En este sentido, desde que el *Guernica* forma parte de las colecciones del museo, se ha abierto una línea de investigación y conocimiento del cuadro, con la intención de poder evaluar desde un punto de vista científico su evolución material.



Figura 1. Portada de la publicación *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso*.

El *Guernica* en el MNCARS

El primer fruto del trabajo realizado por el Departamento de Conservación-Restauración que vio la luz fue el libro *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso* (Esteba *et al.*, 1998), publicado por el museo en 1998, bajo la dirección de José Guirao. Este estudio contenía todos los datos recopilados en el informe oficial que el Departamento de Conservación-Restauración realizó en 1997 bajo la dirección de Pilar Sedano, informe presentado ante la Dirección del Museo a requerimiento de esta, a raíz de la demanda de préstamo temporal del lienzo que presentó el Gobierno Vasco. El trabajo recogía análisis químicos de los materiales constitutivos, estudios técnicos y un detallado informe que incluía un mapa de alteraciones y un reportaje fotográfico. En esta extensa publicación se reflejaban y detallaban las alteraciones sufridas por el cuadro y su delicado estado de conservación.

Ese mismo año, entre el 15 y el 16 de enero de 1998, se celebró el simposio «*Guernica*. Problemas éticos y técnicos en la manipulación de la obra de arte». Dicho simposio ponía sobre la mesa los aspectos más relevantes de la conservación de obras de arte ante la perspectiva de préstamos o traslados, e incluía además información acerca de los estudios realizados sobre la obra. Cuatro años después, en 2002, se editó *El Guernica y los problemas éticos y técnicos de la manipulación de obras de arte* (VV. AA., 2002), publicación que recogía las actas del simposio y que aportaba información sobre el estado de conservación del *Guernica*.

En 2006, con motivo de la exposición *Picasso tradición y vanguardia*, se planteó la necesidad de descolgar la obra para adecuar la sala. Desde 1993, la obra solo se había movido una vez, en 1996, cuando se tomó la decisión de exponer la pintura sin el cristal de protección, ya que al llegar a España, en el montaje realizado en el Casón del Buen Retiro, la obra se había blindado con una urna por razones políticas. Esta protección se mantuvo en la primera instalación en el Reina por esos mismos motivos. En la reubicación de 1996, se decide colocar la obra en las galerías frente a la habitación, blindada con cristal, donde se había instalado al llegar desde el Casón del Buen Retiro. Es a partir de entonces, con la democracia española ya

consolidada, cuando el cuadro se puede contemplar sin interferencias de blindajes. Aunque en 1996 la obra queda libre para su exposición, este movimiento se proyectó como una intervención muy breve. No se quería cerrar al público la sala de su nueva ubicación, por lo que los trabajos se tuvieron que realizar el día en el que el museo cerraba al público. Es por esta razón que la acción se limitó al cambio de ubicación; únicamente se llevó a cabo una limpieza nocturna del reverso y algún estudio puntual, y se mantuvo el mismo sistema de montaje diseñado para el Casón. Así, la obra no se colgó paralela al muro, sino que presentaba una inclinación ya expuesta en el Casón, donde la obra se ubicaba sobre una base y dentro de una urna, con un cristal que mantenía una inclinación de abajo hacia arriba y hacia el frente.

Dada la intención expuesta en el año 2006, por Ana Martínez de Aguilar –la entonces directora del museo– de adecuar las salas del entorno a la obra *Guernica* –lo que conllevaría el acondicionamiento de las infraestructuras de las salas (una necesidad patente e imperiosa)– se plantearon varias alternativas. Se estudiaron todas las posibilidades como, por ejemplo, la de no mover la obra y mantenerla en una caja climática para poder ejecutar las labores de mantenimiento de la sala. No obstante, desde el Departamento de Conservación-Restauración este planteamiento presentaba varios aspectos dudosos y consideramos que la mejor solución era retirarla, algo que, además, ofrecería la oportunidad de hacer una revisión a fondo de la obra. Si procedíamos así podríamos actuar sobre aspectos pendientes que demandaban un tratamiento a fondo, como la modificación del sistema de anclaje al muro y la limpieza del reverso del cuadro. Por otro lado, eso nos permitiría realizar estudios sobre el soporte y el reverso de la obra. Descolgar el cuadro nos daría la opción de trabajar sobre el reverso durante varios días. Esta sería la primera vez que trabajaríamos en la parte del soporte del cuadro; contábamos con un periodo de tiempo de unos cuatro días, suficiente para hacer labores de mantenimiento que fueran más allá de la retirada de polvo en superficie. Además, se proyectaron nuevos estudios y mejoras en el montaje.

Para la planificación de estos cuatro días se analizaron todas las necesidades y mejoras posibles. Además de la limpieza de salidas de conductos de aire y los cambios en los carriles de iluminación, se planificó sustituir las sondas de medición de HR y temperatura alojadas en el muro en la zona que cubre la obra. Se añadieron dos nuevas sondas en los laterales a las dos ya existentes.

El montaje antiguo consistía en hacer reposar la obra sobre una pletina metálica en «L» a la que iba atornillado el bastidor. En la parte superior, otra pletina con unas prolongaciones metálicas, atornillada también al bastidor, fijaba el cuadro. Una vez fijada la obra, la pletina inferior se encastraba con una base, por lo que el cuadro quedaba visualmente apoyado en este saliente, con una inclinación de entre 10-15° gracias a las prolongaciones de la pletina superior, que separaban la obra unos 20 cm de la pared por la parte de arriba. Este sistema obligaba a hacer perforaciones en los bordes del cuadro para los tornillos y, por otro lado, el ángulo de inclinación incrementaba la tensión del cuadro sobre el bastidor, provocando un pandeo en la zona central. Además, complicaba en exceso la manipulación del cuadro, al ser un montaje muy impreciso que exigía a los operarios trabajar en posturas muy forzadas.

Después de haber estudiado todos los pormenores, se decidió retirar la obra de esta sala para trasladarla al espacio de enfrente, donde había estado durante tres años cuando tenía el cristal de protección. Este ámbito contaba con un sistema de climatización independiente que nos iba a permitir mantenerlo estanco de las otras salas. Se adecuaron las condiciones previamente, teniendo en cuenta que se iba a trabajar con el reverso de la obra. Los 15 m del trayecto eran bien conocidos, dado que ya se habían recorrido en 1993. El traslado se realizaría pues con un respaldo móvil especial que redujese al mínimo las vibraciones. Pero además –y aprovechando esta revisión– se planificó un enorme desafío: la realización de una placa radiográfica



Figura 2. Respaldo articulado en el momento del montaje de la placa de rayos X. Fotografía: José Loren.

de toda la obra. El respaldo tenía un papel muy importante en este cometido, ya que alojaría la placa de RX antes de colocar en él la obra. Por otro lado, se planificaron también con antelación los movimientos que se iban a realizar para hacer la placa radiográfica en una parte del trayecto.

Este proyecto suponía un gran reto para todas las partes implicadas: sería la primera vez que nos enfrentaríamos a una radiografía de 27 m² realizada de un solo disparo. Como complicación añadida, no se podrían hacer disparos de prueba, ya que la placa iba a estar alojada en el respaldo móvil que trasladaría la obra y era del todo inviable sustituirla o cambiarla, puesto que eso implicaría una manipulación que se descartó desde el primer momento. Esta aventura sólo fue posible gracias a la dirección de la Sección de Estudios Físicos del Instituto del Patrimonio Cultural de España, capitaneado por Araceli Gabaldón y su equipo constituido entonces por Tomás Antelo, Maca Vega y Miriam Bueso.

«La actuación diseñada desde este laboratorio contemplaba la toma radiográfica completa en un solo disparo, algo que, dadas las dimensiones (3,50 metros por 7,76 metros), requería una distancia entre el foco y la película de 13 metros».

«Una operación de este tipo entraña un gran compromiso, ya que un cálculo erróneo de la exposición o del posicionamiento del tubo emisor pueden arruinar el resultado o, cuando

menos, generar una imagen defectuosa. Por tanto, para determinar la exposición, se tuvo en cuenta la existencia de radiografías previas de varios fragmentos de la obra realizadas tras su instalación en el Casón del Buen Retiro, su primera ubicación tras llegar a España. El estudio de estas radiografías, así como los datos relativos a los materiales constitutivos, la preparación o los pigmentos, entre otros aspectos, que facilitaron los análisis ya efectuados (Cabrera, y Garrido, 1981) fueron de gran ayuda para determinar la exposición. Estas informaciones aportaron un margen realmente crítico, en vista del bajo contraste radiográfico que la composición y el empaste de los pigmentos auguraban. Al mismo tiempo, la preparación, que presentaba una considerable absorción radiográfica en relación con la capa pictórica, restaría aún más contraste, debido a su conocido efecto de apantallamiento general» (Gabaldón y Antelo, 2009).

En primer lugar, se montó la placa radiográfica en el respaldo articulado que iba a alojar el cuadro. La placa estaba compuesta por 26 tiras de 3.750 mm de rollo continuo, con 30 cm de ancho y unidas entre sí en sentido vertical, de tal forma que cubrían toda la superficie del cuadro.

Para lograr reducir al mínimo las vibraciones en el lienzo se planeó que todos los movimientos se hicieran con este respaldo móvil, al que se había dotado de articulación para poder modificar el plano de inclinación del cuadro una vez instalado. El sistema tenía que permitir descolgar el cuadro, trasladarlo, hacer la placa radiográfica, intervenir en el reverso y volver a colgar el cuadro, manteniéndose siempre unido al lienzo y de forma que lo preservase en todo momento de las vibraciones.



Figura 3. Instalación de la obra *Guernica* con el respaldo articulado. Fotografía: José Loren.

A tal efecto, el respaldo móvil contaba con una posición completamente vertical que podía inclinarse mediante un sistema hidráulico. Este desplazamiento nos permitiría colocar la placa una vez ensamblada en el suelo y posicionarla frente al cuadro, dándole la misma inclinación que tenía la obra colgada. También se estudió cómo debía distribuirse el equipo humano, para lo que se diseñaron diferentes plataformas integradas en el conjunto del sistema destinadas a cada momento del proceso.

Una vez situado el cuadro en la sala de enfrente, esta quedó sellada para que el equipo de restauración trabajara como estaba previsto: en el reverso de la obra. Se limpió el bastidor, se midió la tensión de todos los ángulos, se eliminó una cinta adhesiva en mal estado que unía la tela al bastidor y se limpió además el soporte de la obra. Se identificaron todas las alteraciones que presentaba el soporte por el reverso y se tomaron muestras de los materiales aplicados en anteriores restauraciones.

Una vez terminados los trabajos, se realizaron estudios con diferentes tipos de iluminación (luz ultravioleta, infrarroja y visible). Se utilizaron cámaras Canon D1 con sensor CMOS de 10,1 megapíxeles efectivos para la luz visible y ultravioleta, además de una cámara FinePix S3 Pro UVIR con un sensor SuperCCD. Esta cámara sustituye de fábrica los filtros anti UV e IR de la versión normal por un cristal que favorece estas longitudes de onda. La secuencia de las imágenes realizadas de forma manual se captó buscando la repetición de las condiciones en cada una de las tomas, sin variar el ángulo con respecto a la obra, con el objetivo de facilitar el montaje posterior sin necesitar correcciones de *software*, de manera que todo el reverso del cuadro quedase fotografiado. Las imágenes obtenidas, se montaron digitalmente. El resultado nos permitió hacer una reconstrucción del estado del soporte sin dejar partes sin registrar.

Tras procesar los nuevos resultados sobre el soporte y el reverso volvimos sobre la información que teníamos acerca del anverso. Dado que el estudio realizado en el año 1997 se hizo con tecnología analógica, decidimos escanear las casi 300 imágenes que en su día se tomaron del cuadro. Esta labor se llevó a cabo con el escáner de Nikon Coolscan 5000 con una resolución óptica de 4.000 ppp y una conversión de 16 bits.

Aunque las diapositivas se habían conservado en unas condiciones estables durante los 10 años transcurridos desde que se captaron, se podían apreciar ligeras modificaciones respecto al color original. Esto se añadía al hecho de que, al trasladar la información desde los estudios originales, se produjo una pérdida y distorsión de los datos, modificación que era difícil de parametrizar. De ahí que se plantease la necesidad de realizar un nuevo estudio, más minucioso, aplicando la nueva tecnología digital existente. Se puso de manifiesto asimismo la conveniencia de crear un procedimiento que utilizase los nuevos sistemas de automatización para efectuar un barrido sistemático y preciso de toda la superficie pictórica.

Gestión del proyecto

Con la perspectiva de poder hacer un estudio minucioso a través de la tecnología digital surge el embrión de este ambicioso proyecto. Queríamos hacer un barrido sistemático de la superficie pictórica de todo el cuadro, utilizando los equipos digitales con los que en ese momento realizábamos los estudios técnicos dentro del Departamento de Conservación-Restauración como, por ejemplo, los estudios en luz visible, luz ultravioleta, luz infrarroja y multispectral. Pero, además, pretendíamos aplicar nuevos estudios, como el escaneado en 3D de alta resolución, para obtener información precisa sobre la orografía de la obra. También se consideró muy interesante hacer medidas de reflectancia espectral, con el objetivo de recopilar información precisa sobre el color actual del cuadro, así como realizar termofotografías en diferentes estados de

iluminación, o profundizar, en la medida de lo posible, en el estudio hiperespectral de algunas zonas concretas.

El primer reto que se nos planteó fue desarrollar un sistema que nos permitiera realizar todos estos estudios de una forma compatible con la exposición del cuadro. El sistema tendría que funcionar *in situ*, delante del cuadro, en los periodos en que el museo se encontrase cerrado al público y fuese posible replegarlo, de manera que cuando el museo estuviese abierto no interfiriese en la contemplación del cuadro. Además se pretendía aprovechar al máximo el funcionamiento del sistema ya que no se disponía de mucho tiempo para estar delante de la obra, y nos dimos cuenta que la resolución a la que queríamos hacer los estudios requería de un periodo muy prolongado, por lo que había que conseguir que el sistema funcionase el máximo de horas posible al día.

Esto no fue una tarea fácil: suponía tener en cuenta dos aspectos fundamentales para un aprovechamiento máximo. Por un lado, el automatismo del sistema tenía que ser capaz de trabajar solo y con garantías de total seguridad, sin poner en riesgo la obra. Por otra parte, había que atender a las compatibilidades de horarios y servicios programados en las horas de cierre del museo, como la limpieza de salas, los controles de seguridad, las visitas fuera de horas o las revisiones de infraestructuras, por ejemplo. En este sentido, se estableció un calendario que permitía coordinar los trabajos ordinarios y unos protocolos de actuación ante situaciones espe-



Figura 4. Proceso del diseño del sistema. Fotografía: José Loren.

ciales y concretas, de tal forma que se pudieran abordar tales casos con suficiente antelación. Según el estudio en el que estuviésemos involucrados, se necesitarían unas condiciones más estrictas y diferentes a las de otros momentos. Por ejemplo, el periodo de estudio en el rango de UV iba a exigir un control máximo de la luz procedente de otras salas y, en el caso del escaneado en 3D, las vibraciones de cualquier sistema mecanizado circundante, e incluso el paso de personas cerca de la obra, serían de enorme importancia.

En el origen del proyecto se planteó la idea de que el automatismo trabajase de forma autónoma. Se idearon por tanto los sistemas de control necesarios para ello, algo que, en principio, parecía muy difícil. Aunque lo incluyésemos entre los requisitos del sistema, dejar elementos mecanizados en funcionamiento delante del cuadro sin nadie presente sólo podría permitirse si las garantías eran absolutas. Partiendo de la premisa de la seguridad, se inició el diseño del automatismo. La intención era que físicamente fuera imposible el contacto y que la estabilidad del aparato impidiera el desplome sobre el cuadro, por lo que se desestimaron sistemas que, pese a contar con los mecanismos de seguridad más avanzados, no permitían descartar la posibilidad de contacto, como era el caso de los brazos articulados. Por ello determinamos que el mecanismo debía moverse en paralelo al cuadro, manteniendo una distancia de seguridad de contacto infranqueable. El movimiento de la cabeza donde se albergarían los diferentes sensores debía desplazarse en paralelo, sin cambios de giro, y a una distancia de entre 200 y 1.000 mm. Con estas características podríamos hacer todos los estudios, a excepción del escáner de 3D, que probablemente requeriría algún cambio en las distancias y los ángulos de escaneado.

Una vez establecidos los diferentes estudios que íbamos a hacer –esto es, luz visible, luz ultravioleta, reflectografía infrarroja, reflectancia multispectral, visión hiperspectral en luz visible y escaneado en 3D en alta resolución– se plantearon todos los complementos que se tendrían que adosar al sistema (como las fuentes lumínicas o el láser de medida y posicionamiento), para ir adaptando las estructuras necesarias que alojarían estos complementos, y poder prever también los cableados y conectores necesarios.

Entre los requisitos iniciales se marcó la necesidad de que se pudiese trabajar con este sistema no solo en sala, sobre una obra de gran formato, sino también dentro del Departamento de Conservación-Restauración, en un formato reducido.

Como se ha comentado con anterioridad, otro factor importante a la hora de concebir el sistema era la compatibilidad con la exposición de la obra: se hacía necesario que, una vez recogido, en su posición de reposo, el sistema no impidiera la normal contemplación del cuadro, y que no proyectara sombras ni interfiriese en la iluminación de la sala.

El desarrollo del proyecto se basó en dos planes de actuación bien definidos. Por un lado, la elaboración del sistema que nos permitiría realizar todos los estudios en las condiciones de exposición del cuadro y, por otro, los desarrollos necesarios para trabajar y procesar las imágenes resultantes con la máxima resolución.

Lo que en un principio se planteó como un solo proyecto terminó revelándose como un trabajo que necesitaba dividirse en dos: una primera fase se centraría en la recopilación de información y la segunda estaría enfocada al procesamiento de las imágenes y a los desarrollos informáticos necesarios para interpretar esa información recopilada.

En 2009 se iniciaron las primeras conversaciones entre el Departamento de Patrocinio del Museo y la Fundación Telefónica. En 2010 se firmó el convenio entre los directores de ambas instituciones y se cerró un presupuesto de 200.000 € (más IVA) exclusivamente para la realización de la primera fase del proyecto. Esta fase consistiría en la captura de imágenes e in-



Figura 5. Vista general del automatismo. Fotografía: José Loren.

cluiría además el desarrollo del automatismo. La segunda fase correspondería al procesamiento, interpretación y divulgación (esta última, planteada sobre tres escenarios) y su negociación se pospuso hasta la finalización de la primera parte.

En abril de 2011, tras casi un año de propuestas y desarrollos conjuntos entre el equipo técnico encargado del Departamento de Conservación-Restauración y diferentes proveedores, se adjudicó la fabricación del automatismo a la empresa Robolán por un importe de 100.000 €. Esta empresa entregó el sistema en diciembre de ese mismo año. En aquel momento se instaló en una sala especial para realizar las pruebas de resistencia necesarias para confirmar la idoneidad de su funcionamiento. Después de un mes de pruebas, en enero de 2012, el automatismo se instaló delante de la obra *Guernica* y comenzaron los estudios sobre el cuadro.

Automatismo de ejes cartesianos

En vista de todos los aspectos descritos en el apartado «Gestión del proyecto», el resultado del diseño del automatismo fue un sistema de ejes cartesianos estructurado, compuesto por un raíl base paralelo al sentido del cuadro, a una distancia de 1 m. Por ese raíl se desplaza en sentido horizontal el eje «X», esto es, la torre vertical, que a su vez cuenta con un eje vertical, el eje «Y», encargado de mover el brazo que contiene el cabezal donde se alojan los diferentes sensores. Dicho brazo se desplaza además en profundidad, lo que sería el eje «Z». Los tres desplazamientos se realizan mediante un motor lineal de inducción (sistema derivado del motor de inducción normal, pero dispuesto longitudinalmente). Si imaginamos una representación gráfica, es como hacer un corte axial tomando como base un sector plano del estator y del rotor, con lo que quedaría un motor asincrónico con un rotor de radio infinito. De esta forma, el movimiento del campo magnético rotante se transforma en desplazamiento lineal de translación y, en vez de tener un par rotante, se transforma en un campo magnético de translación con una fuerza de empuje electromagnético. El desplazamiento va controlado en velocidad y longitud en tres ejes, lo que permite desplazar en el cabezal un sensor o cámara con un peso máximo de 25 kg, sin contar las fuentes de luz.

Descripción del automatismo:

- El eje «Z» o de aproximación a la obra cuenta con un sistema automático de control mediante un sensor láser de precisión OD de la marca SICK, que permite mantener la misma distancia con respecto a la superficie del cuadro con independencia de las ondulaciones que este pueda presentar.
- El eje «X» de desplazamiento horizontal está compuesto por dos tramos iguales, de 4.500 mm cada uno; pueden utilizarse indistintamente, uno o los dos, según el tamaño de la obra que se pretenda analizar.
- El eje «Y» de desplazamiento vertical del sistema se mueve también mediante un eje desmontable, con el fin de poder llegar a las cotas requeridas (desde 200 hasta 4.000 mm) y trabajar tanto en salas como en el taller de restauración, a una altura menor.
- El sistema es desmontable, lo que permite su traslado a salas del museo o donde sea necesario; para instalarlo se requiere tan solo un día.

Características de los ejes:

- Eje «X»:
Módulo lineal MLE 51000NS-9000, con motor lineal integrado $F = 500/1.000$ N, $1,00$ $i = 5/10$ A, 560 VDC, y sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recircula-

ción de bolas con 4 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 8.578 mm, L = 9.000 mm

- Carrera 8.300 mm (2 tramos de longitud 4.500 mm)

– Eje «Y»:

Módulo lineal MLE 51000NS-9000, con motor lineal integrado $F = 500/1.000$ N, $i = 5/10A$, 560 VDC, y sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recirculación de bolas con 4 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 8.578 mm, L = 9.000 mm

Código: MLE51000NS-0-0-1-000-0-ST-00-09000

- Carrera 3.700 mm (2 tramos de 2.745 mm y 1.400 mm)
- Repetitividad del eje: $\pm 0,01$ mm

– Eje «Z»:

Módulo lineal MLE 30210HS-0800, con motor lineal integrado $F = 105/210$ N, $i = 3,1/6A$, 560 VDC, con sistema de medición integrado 1 Vpp/ 40 μ m, guía de recirculación de bolas con 3 patines, 2 finales de carrera electromecánicos, soportes incluidos. Carrera útil: 536 mm, L = 800 mm

- Repetitividad del eje: $\pm 0,01$ mm



Figura 6. Vista general del sistema delante de la obra *Guernica*. Fotografía: José Loren.



Figura 7. Imagen del monitor mostrando la interface del *software* de gestión. Fotografía: José Loren.

El cabezal donde se alojan los sensores cuenta con un sistema de sujeción de las cámaras (mano del robot) que está preparado para albergar el sistema de escáner y los sistemas de alumbrado necesarios.

Además, el sistema cuenta con un cuadro eléctrico de gestión, con pantalla de control y pantalla táctil, que incluye los diferentes botones de encendido y apagado, donde quedan alojados el magneto térmico, los diferenciales, la fuente de alimentación y los controladores de los motores lineales. El PLC de control dispone de los elementos necesarios para interactuar con el *software* de captación de imágenes de que dispone el centro. Esta conexión se realizará por la vía que resulte más conveniente (Ethernet, RS232, USB, etc.).

Se ha incorporado asimismo un sistema de montaje y desmontaje del bastidor en el eje vertical con un cabrestante eléctrico para facilitar la maniobra de montaje de la torre, haciendo dicha maniobra más segura para los operarios que la realicen y para el entorno donde se lleve a cabo. Esto nos permite garantizar la máxima seguridad durante el proceso de montaje y desmontaje.

Software de gestión

Junto al diseño del automatismo, desde el inicio del proyecto se consideró necesario crear un *software* de gestión que permitiera interconectar todas las funciones del sistema con los con-

troladores de los diferentes sensores. Dado que se trataría de estudios prolongados, queríamos automatizar al máximo los diferentes sistemas sin tener que renunciar a los recursos que nos proporcionaban los fabricantes de los sensores y cámaras. Esto suponía contar con los distintos códigos fuentes, de tal manera que el nuevo *software* fuera capaz de trabajar automáticamente sin descartar ninguno de estos menús ni parámetros.

Se plantearon los distintos escenarios de trabajo para cada estudio y las necesidades de gestión del trabajo, teniendo en cuenta los posibles errores o fallos. Junto a los elementos descritos del automatismo y la mesa de control, el sistema cuenta con una mesa móvil que incorpora un PC, facilitando así el *hardware* necesario. Este PC nos permite trabajar en sala y distribuir la información a los diferentes sistemas que se quieran utilizar. Durante el proceso de estudio se habilitó la posibilidad de realizar los trabajos de forma remota mediante *wifi*, de tal forma que, pese a no estar en la sala, los participantes pudiéramos seguir en directo los trabajos y modificar cualquiera de las opciones del programa como, por ejemplo, detener el sistema en caso de ser necesario.

El programa está estructurado en la pantalla del ordenador en dos áreas principales: en la parte superior se puede ver el proceso del trabajo en desarrollo y en la inferior, las diferentes opciones y posibilidades de trabajo, como la elección de la cámara, el tipo de luz, el espacio de movimiento, el tiempo de espera o la distancia del cuadro.

En la zona dedicada al proceso de trabajo, en el lateral izquierdo, se muestran las imágenes en tiempo real, incluida secuencia de las sucesivas capturas que se están haciendo. La secuencia del trabajo se ve en un total de cinco pantallas, una superior, más grande, y cuatro inferiores, más pequeñas. La última toma es la que aparece en la imagen más grande; la secuencia de las cuatro imágenes anteriores se expone, de derecha a izquierda, en las cuatro pantallas inferiores. De esta forma, es posible seguir la evolución de las imágenes y se facilita la localización exacta, además de poder seguir el desarrollo del proyecto. Hay que tener en cuenta que el trabajo sobre el *Guernica* se está haciendo con imágenes que abarcan muy poco campo visual (alrededor de 4 x 6 cm) y los planos de color en el cuadro son muy grandes, por lo que las imágenes resultantes en tomas distintas pueden terminar siendo muy similares. En el lateral derecho se muestra el proyecto cargado: en un gráfico se representan, en rojo, todas las tomas de las que se compone el trabajo, antes de iniciarse. Según se van realizando las tomas, el color cambia a verde. Así, es posible saber con solo un golpe de vista por dónde va el proceso y cuánto queda de trabajo. Además, se muestra en formato numérico, en la parte inferior, la cantidad de imágenes captadas, la posición de la última toma y las imágenes que faltan por obtener.

En la sección inferior hay tres rectángulos que delimitan los menús para –de izquierda a derecha– (1) realizar las configuraciones generales, (2) seleccionar el sensor o cámara e interactuar con él, e (3) introducir los parámetros para el autómata y el láser.

Menú (1): en la parte superior cuenta con dos pestañas, «General» y «Configuración». Desde la pestaña «Configuración» se puede definir el tamaño de los píxeles y la ruta. En «General» se puede dar nombre al proyecto y definir los parámetros. Más abajo, hay otras dos pestañas para definir los parámetros de un proyecto general de trabajo y seleccionar imágenes concretas que queramos repetir. Sobre la captura completa de un trabajo podemos definir la ruta de destino, las pausas, el área de actuación, las dimensiones de las áreas de captura, la profundidad del eje «Z», o bien bloquear la medición del láser e iniciar o detener un trabajo. Con este menú se establece la configuración de las áreas de captura, que incluye los ejes «X» e «Y», el tamaño del encuadre, el porcentaje de superposición de las teselas, la distancia focal del láser, así como todas las opciones de dirección de captura; además cuenta con una ventana desde donde controlar la iluminación y el posicionamiento de los tres ejes de forma manual. También hay controles para

configurar la velocidad de los tiempos de pausa entre las tomas de forma diferenciada entre los ejes «X» e «Y».

Menú (2): en las dos primeras pestañas podemos elegir entre el uso de una cámara o la realización de una simulación. En la pestaña de la cámara encontramos tres nuevas pestañas en la parte inferior, correspondientes a las tres cámaras predefinidas, disponibles en el Museo, y que son las que suelen utilizarse como herramientas de trabajo. Según se trabaje con una u otra se tendrán nuevas opciones, como los encuadres, el enfoque o el tamaño de superposición. También se incorpora en este apartado la posibilidad de usar «Live View», para obtener vistas en tiempo real, el enfoque automático prescindiendo del láser del automatismo o la captura manual.

Menú (3): se divide asimismo en dos pestañas, la del «Autómata» y la del «Láser», que ofrecen los controladores para la conexión y desconexión de dichos sistemas. En la pestaña «Autómata» se controla el posicionamiento automático y la conexión o desconexión de las cámaras y las fuentes de luz; además permite resetear el equipo en caso de fallo e incluye una «seta» de apagado de emergencia ante cualquier incidencia.

Estudios técnicos

En un primer momento, los estudios que se plantearon realizar sobre la obra fueron estudios ampliamente conocidos por el equipo técnico del museo y utilizados habitualmente para analizar las obras de arte. Partiendo de la luz visible en alta resolución, nos propusimos continuar trabajando con la luz ultravioleta, también a alta resolución, para conocer y evaluar en profundidad el estado de la superficie del cuadro. En la reflectografía infrarroja que realizamos en el reverso se ven con claridad las primeras composiciones del cuadro. La evolución de la pintura en su proceso de realización se recoge muy bien en las series de fotografías que tomó Dora Maar mientras Picasso pintaba el cuadro. En estas series se aprecian claramente los cambios de composición. De cualquier forma, consideramos que sería muy interesante poder profundizar en el rango del infrarrojo para recoger con mucha más precisión estos cambios y capas de los que consta la obra. Para este cometido, decidimos realizar dos estudios en este rango de luz: uno en el infrarrojo visible, en torno a los 900 nm, y otro en el infrarrojo no visible, sobre los 1.700 nm.

Previamente, estuvimos valorando con diferentes empresas y equipos una novedad: veíamos de gran utilidad incorporar un estudio en 3D de la orografía de la superficie pictórica del cuadro. Nos planteamos delimitar y profundizar en el conocimiento de los craqueados y las diferentes alteraciones que presenta la obra mediante esta técnica. Pretendíamos además contrastar los diferentes trabajos que fuésemos haciendo, una comparación y estudio contrastado que serían posibles gracias a las herramientas de ayuda digitales y a la representación tridimensional, que nos permitirían trabajar con los diferentes estudios aplicándolos como capas sobre el 3D.

Gracias a la colaboración de instituciones como la del Departamento de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid y de varias empresas privadas se han podido añadir estudios de gran valía. Es el caso de un barrido de alta precisión con reflectancia multiespectral, o la realización de un estudio hiperspectral en luz visible en varias zonas concretas, seleccionadas por su especial interés.

A los trabajos ya comentados y realizados por el departamento, este estudio incorporaría el escaneado en 3D con un escáner de luz blanca de la empresa Breuckmann.

Se describe brevemente a continuación los equipos y condiciones de trabajo utilizados en los diferentes técnicas de examen de la obra:



Figura 8. Estudio en luz visible. Fotografía: José Loren.

Luz visible

Este estudio lo realiza íntegramente el equipo del departamento de Conservación-Restauración del museo. Humberto Durán y José Loren dirigen este primer trabajo, que marcará los parámetros que se intentarán seguir en los siguientes estudios.

- Cámara: Canon EOS 5D Mark II con sensor CMOS de formato completo
- Formato 3:2-36 mm × 24 mm
- Píxeles efectivos : 5.616 × 3.744 (21,1 MP) 48 bips
- Objetivo: Canon macro EF 100 mm 1:2,8 L IS USM
- Iluminación: Lámpara de tubo fluorescente de alta prestación KinoFlo 40W. Diseñada para responder a la sensibilidad espectral de imágenes digitales
- 2ft Kino 800 ma KF55 SFC F40/T12/HO Lumens 1610
- Temperatura de color: 5.500° K

- Luz recibida en superficie

- Lux: 742 lx
- Lumen: 6 μW/Lumen

- UV: 4,7 mW/m²
- Imagen: Apertura f 16,0 - Velocidad 1/4 s - ISO 320
- 20.241 imágenes en formato RAW. 31 mb y JPEG. 9 mb en disco
- Dirección de los trabajos: Humberto Durán y José Loren

Luz ultravioleta

En el caso de la luz ultravioleta propusimos un trabajo en condiciones críticas. El rendimiento del sistema exigía unas prestaciones máximas, pero no queríamos exponer innecesariamente el cuadro a radiaciones ultravioletas, por lo que elegimos una velocidad de obturación muy lenta con una apertura de diafragma amplia. Esto nos limitó la profundidad de campo a unos 3-5 mm. Por otro lado, alargamos considerablemente el tiempo de exposición para conseguir una buena toma a poca luz, lo que hacía las medidas sensible al más mínimo movimiento o vibración.

- Cámara: Canon EOS 5D Mark II con Sensor CMOS de formato completo
- Formato 3:2-36 mm × 24 mm
- Píxeles efectivos: 5.616 × 3.744 (21,1 MP) 48 bips
- Objetivo: Canon macro EF 100 mm 1:2.8 L IS USM
- Iluminación: Lámpara de tubo fluorescente, luz negra 18W. Color del cristal, azul-negro, UV de onda larga.
- Dimensiones: 590 mm × 26 mm
- Pérdida de rendimiento después 2.000 h: 15%
- Espectro: 300/400 nm
- Radiación UVA: 3,7 W

Ultravioleta en superficie

- Lux: 0,8 lx
- Lumen: 744868 μW/Lumen
- UV: 6963 mW/m²
- Imagen: Apertura f 5,6-Velocidad 1/2 s-ISO 640
- 20.241 imágenes en formato RAW. 31mb y JPEG. 9 mb en disco
- Dirección de los trabajos: Humberto Durán y José Loren

Reflectografías infrarrojas

Se planteó realizar la reflectografía infrarroja en dos rangos del espectro de luz, partiendo de un sensor con un índice de penetración bajo, pero con buena resolución como primer estudio. A continuación, pasaríamos al infrarrojo en rango no visible, con un incremento del índice de penetración alto, aunque con una definición de imagen mermada.

1. Reflectografía Infrarroja a 900 nm en rango visible/invisible

- Cámara: Fujifilm IS PRO con sensor de medio formato
- Formato: 23 mm × 15,5 mm
- Píxeles efectivos: 1.440 × 960 (12,9 MP) 24 bits

- Rango espectral: 380 nm-1.000 nm
 - Objetivo: Nikon AF Micro Nikkor 105 mm 1:2.8 D
 - Filtro B+W 093 IR
 - Iluminación: Antorcha de flash ELINCHROM con lámpara halógena, 300 W Osram 9.600 lm, a la mínima potencia.
 - Temperatura de color: 3.290° K
- Luz infrarroja en superficie de la obra
 - Lux: 486 lx
 - Lumen: 40 μ W/Lumen
 - UV: 18,9 mW/m²
 - Imagen: Apertura f 9,0-Velocidad 1/13 s-ISO 200
 - 20.241 imágenes en formato RAW. 24 mb y JPEG. 5,5 mb en disco.
 - Como resultado del *stitching* de las teselas, la resolución estimada por m² es de 20.000 millones de píxeles
 - Dirección de los trabajos: Humberto Durán

2. Reflectografía infrarroja a 1.700 nm, rango no visible

- Cámara: Xeva-1.7-640 con sensor Ingaes
 - 640 × 512 píxeles por calidad de cada imagen
 - Dirección de los trabajos: Humberto Durán
- Luz infrarroja en superficie de la obra
 - Lux: 486 lx
 - Lumen: 40 μ W/Lumen
 - UV: 18,9 mW/m²

Reflectancia multiespectral

- Tipo de fuente: anular que combina tecnología LED e incandescencia, que ilumina con 8500 lux (aprox.) el plano de medida, con un espectro de emisión de entre 380 y 780 nm.
- Cámara: espectrorradiómetro de la empresa Photoresearch, modelo PR655
- Objetivo: MS75 con montura C con un aumento de 2,5×. El campo de vista (FOV) del objetivo es de unos 6 mm a la distancia de trabajo.
- Detector: espectrorradiómetro «Array lineal de 128 elementos». Acoplada al ocular del espectrorradiómetro va una cámara CCD de la empresa The Imaging Source, modelo TIS DFK-41BU02, con un objetivo de 1» de diámetro y 25 mm de focal.
- Almacenamiento: 560 × 480 píxeles, con 230 KB cada foto.
- Realizado por: Escuela de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid.
- Dirección de los trabajos: Daniel Vázquez.

Visión multispectral con luz visible

Se definen áreas de captura de 26×24 cm y el sistema se comporta de forma lineal, de tal manera que cada línea que se captura genera una imagen de 1.312×800 píxeles. La captura del área completa implica la necesidad de un barrido, que se lleva a cabo mediante el automatismo. Para cada área se capturan 1.200 imágenes, correspondientes a las 1.200 líneas.

- Tipo de fuente: Halógena DCR III con fibra lineal y luz fría
- Tipo de cámara: Spectral cámara PFD
- Banda espectral: 400-1.000 nm
- Resolución espectral: 2,8 nm
- Resolución de cada imagen: 1,312 (espacial) \times 800 (espectral)
- Óptica: de alta calidad optimizada para producir imágenes de alta calidad. Distancia focal de 23 mm OLE 23
- Realizado por: INFAIMON
- Dirección de los trabajos: Carolina López

Escáner 3D

Se plantean tres escaneados, el de máxima resolución estará en torno a las $30\mu\text{m}$ de distancia entre los puntos y el tipo de fuente es de haz de luz blanca. En el escaneado de menor resolución se trabaja la información de color en RGB y una ampliación de la distancia de escaneado.

- Escáner: Breuckmann Smartsccan 3D-HE 2146
- Resolución: 5,0 mega píxel
- Resolución: (x,y): $42 \times 96 \mu\text{m}$
- Tamaño de píxel: $0,042 \times 0,096$ mm
- Iluminación: 250 w halógena
- Dirección de los trabajos: Fundación ITMA y la empresa Breuckmann bajo la dirección del doctor Breuckmann

El martes 28 de agosto de 2012 se dio por finalizada la fase de recogida de datos con el automatismo por lo que se procedió a desmontarlo de la sala Guernica. En total se ha estado trabajando casi 7 meses intentando aprovechar al máximo este recurso sin que esto haya supuesto la privación de esta obra al público que incluso ha tenido la oportunidad de vernos trabajar en momentos determinados o a museo cerrado creando una gran expectación. Es importante llamar la atención en este punto ya que las diferentes campañas de información que se han llevado a cabo durante el proyecto han permitido difundir y mostrar aspectos desconocidos al público en general, como es la labor del Departamento de Conservación-Restauración centrado en el cuidado de nuestro patrimonio.

El automatismo ha sido instalado en las dependencias del Departamento de Conservación-Restauración en su formato pequeño.

Bibliografía

- CABRERA, J. M., y GARRIDO, M. C. (1981): «Estudio técnico del Guernica», en *Boletín del Museo del Prado* 1, tomo 2, n.º 6. Madrid: Museo del Prado.
- ESTEBA, P.; SEDANO, P.; LOSADA, A.; CALOPA, P.; IRURETAGOYENA, A.; GARCÍA, J.; RUBIO, R.; SÁNCHEZ, J.; ROCHA, A., y MURO, C. (1998): *Estudio sobre el estado de conservación del Guernica de Picasso*. Madrid: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.
- GABALDÓN, A., y ANTELO, A. (2009): «Radiografía de gran formato», en *Patrimonio Cultural de España*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 203-213.
- VV. AA. (2002): *El Guernica y los problemas éticos y técnicos de la manipulación de obras de arte*. Simposio. Madrid: Fundación Marcelino Botín, Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.
- VV. AA. (2006): *Picasso. Tradición y vanguardia*. Catálogo de la exposición. Madrid: Museo Nacional del Prado y Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.