

# MODELADO TÉRMICO DE UNA UNIÓN SOLDADA MEDIANTE ELEMENTO FINITO

Contreras Juárez Perla Lilian<sup>1</sup>, Dr. Briones Flores Roberto<sup>2</sup>,  
M.C. Rodríguez Zamarrón Juan Gabriel<sup>3</sup>, M.C. Hernández Trujillo Saúl Leonardo<sup>4</sup> e Ing. Cárdenas Núñez Miguel  
Ángel<sup>5</sup>

**Resumen**— Se presenta el modelado térmico de una unión soldada mediante el proceso de Arco de Metal Protegido con Gas (GMAW) de 2 placas de aceros inoxidables AL-6XN y 316L mediante el método de Elemento Finito, considerando los parámetros de soldadura obtenidos experimentalmente, para poder determinar el historial térmico en alguna coordenada de interés en la junta soldada. Se revisaron de diferentes investigaciones de uniones soldadas para conocer las consideraciones y condiciones bajo las cuales se realiza la simulación por computadora; entre las que destacan el flujo de calor, tasa de enfriamiento, calor específico, temperatura de fusión, densidad de los materiales, potencia de la fuente, convección del aire y aporte térmico.

Partiendo de una unión soldada real obtenida por Flores, R.B y colaboradores e implementando diferentes programas de cómputo, se realizó el modelo geométrico en 3 dimensiones. El análisis y modelado térmico fue realizado mediante el método de elementos finitos utilizando el módulo Thermal Transient del programa ANSYS<sup>TM</sup> Academic. Finalmente, se demuestra que con el procedimiento propuesto se puede estimar el ciclo térmico para diferentes coordenadas de las placas a soldar, lo cual servirá como apoyo para estudiar la distribución de temperaturas y poder optimizar los parámetros de soldadura, determinar el ancho de la zona afectada por el Calor (ZAC) y las regiones que pudieran presentar precipitación de fases intermetálicas.

**Palabras clave**—Modelado térmico, Elemento Finito, Soldadura, AL-6XN, 316L.

## Introducción

El proceso de soldadura se utiliza para la unión permanente de piezas o elementos de máquinas es la soldadura, principalmente en aplicaciones industriales desde la automotriz hasta la aeroespacial. La mayor parte de la soldadura se lleva a cabo utilizando procesos que generan una fuente de calor y produciendo una piletta líquida de soldadura en la sección transversal de la junta. Los efectos del aporte térmico generan una diferencia de temperatura sobre el material base, lo que ocasiona esfuerzos residuales, cambios geométricos y esfuerzos residuales y en la microestructura, los cuales influyen en las propiedades mecánicas finales de la junta soldada. Por lo tanto, es de gran importancia llevar a cabo un historial térmico del proceso de soldadura para su análisis.

Las soldaduras por fusión pueden hacerse en una variedad de formas. Dependiendo del tipo de material que será soldado, el aporte térmico, el procedimiento para soldar y el diseño que se le dará la junta, determinará sus propiedades mecánicas. En esta investigación se enfocará en el proceso de soldadura GMAW, el cual es un proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible, que con el paso de corriente actúa como fuente térmica durante el proceso de soldadura.

Aunque pudiera no parecerlo, la soldadura es un proceso muy complejo de controlar cuyo análisis constituye un reto para la ingeniería, ya que es compleja la medición de los valores de la mayoría de sus parámetros; y el poder obtener una estimación de estos requiere de mucho tiempo y de la implementación de instrumentos especiales muy costosos.

<sup>1</sup> Perla Lilian Contreras Juárez, tesista Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. [perla-lilian@hotmail.com](mailto:perla-lilian@hotmail.com)

<sup>2</sup> Dr. Roberto Briones Flores, Profesor Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. [robertobriones@tecuruapan.edu.mx](mailto:robertobriones@tecuruapan.edu.mx)  
(corresponsal)

<sup>3</sup> M.C. Juan Gabriel Rodríguez Zamarrón, Profesor Instituto Tecnológico Superior de Uruapan.  
[juanrodriguez@tecuruapan.edu.mx](mailto:juanrodriguez@tecuruapan.edu.mx)

<sup>4</sup> M.C. Saúl Leonardo Hernández Trujillo, Profesor Universidad Cultural Indígena de Michoacán. [saullht@yahoo.com.mx](mailto:saullht@yahoo.com.mx)

<sup>5</sup> Ing. Miguel Ángel Cárdenas Núñez, Profesor Instituto Tecnológico Nacional de México, Sede Uruapan.  
[miguelnunez@tecuruapan.edu.mx](mailto:miguelnunez@tecuruapan.edu.mx)

Por otro lado, los procesos complejos en la ingeniería, como lo es el de soldadura, pueden ser simulados mediante programas de modelación computacional. La simulación representa una ventaja al poder experimentar, manipular variables, predecir el comportamiento de los materiales al ser sometidos a diferentes aportes térmicos. De esta manera, si se ingresan los datos adecuados y se hace un correcto análisis, es posible modelar el ciclo térmico de una unión soldada, siendo el objetivo principal de esta investigación.

Posteriormente, en el 2008 Romero y colaboradores realizaron un análisis numérico por transferencia de calor de la unión de materiales acero inoxidable 304 como base y material de aporte de memoria de forma NiTiNOL del proceso de soldadura con tungsteno y gas (TIG por sus siglas en inglés *tungsten inert gas*). En esta investigación se tomaron las temperaturas de fusión de cada uno de los materiales a unir y a partir del proceso de soldadura real se midió con un calorímetro la temperatura inicial y final. Después se determinaron los parámetros y variables del proceso con la finalidad de realizar un modelo matemático mismo que dio la pauta para el desarrollo de un análisis numérico a partir de la geometría de la unión a soldar. En esa investigación Romero y colaboradores analizaron la parte frontal en 2 dimensiones del elemento por la limitación de datos del proceso.

En la investigación “Effect of heat input and accumulated fatigue damage on mechanical properties of dissimilar AL-6XN/316L welding joints (Briones y colaboradores.), se estudia una unión disímil de placas de acero inoxidable AL-6XN y 316L, las cuales fueron soldadas con ER-NiCrMo3, evaluando el efecto de la entrada de dos aportes térmicos diferentes y el daño por fatiga acumulado en la microestructura y el comportamiento mecánico. En estos resultados, se encontraron zonas amplias de los metales base sin mezclar en el cordón. El acero 316L fue el metal que falló al someter la unión soldada a la prueba mecánica de tensión. Cuando se utilizó un aporte térmico más alto, el daño por fatiga produjo una fractura en el metal de soldadura.

Se tomó como material de estudio el perfil de la soldadura (ver figura 1) y los datos de los materiales base y de aporte.

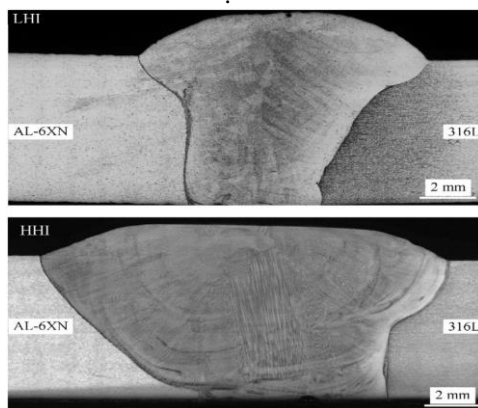


Figura 1. Micrografías de la soldadura disímil AL6XN y 316L

### Descripción del Método

La elaboración de esta investigación se enfoca en el modelado térmico de una unión soldada mediante el método de elementos finitos utilizando el módulo Thermal Transient del programa ANSYS™ Academic. Para lograr esto, se realizó una revisión de los resultados obtenidos por diferentes autores para conocer las consideraciones y condiciones bajo las cuales se realiza la simulación de diversas uniones soldadas, entre las que destacan el flujo de calor, punto de fusión y densidad de los materiales, potencia de la fuente, convección del aire, aporte térmico, tasa de enfriamiento y calor específico.

#### Modelado geométrico

Para obtener el perfil transversal de la unión soldada, se utilizaron los programas de diseño asistido por computadora CAD (por sus siglas en inglés *computer aided design*), AutoCAD™, y SolidWorks™.

Partiendo de una unión soldada real obtenida por Flores, R.B y colaboradores, se trazó el contorno del perfil de soldadura y se dividió en 3 secciones (2 placas y el cordón de soldadura). Luego de ser vectorizada, la imagen fue importada en AutoCAD™ para ser extruida a una altura de 250 mm, convirtiéndola en un modelo compuesto de 3 sólidos.

Una vez generado el sólido, el modelo fue importado al programa ANSYS™ para realizar las pruebas y el análisis térmico.

Es importante mencionar que el uso de estos programas de diseño fue necesario, debido a que ANSYS™ no cuenta con la opción para dibujar sobre fotografías, y el objetivo es que la simulación sea lo más cercana al modelo real.

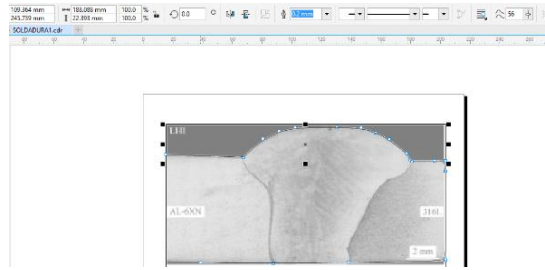


Figura 2. Trazado del perfil de la unión soldada.

### Modelado térmico transitorio

Para el modelado térmico se utilizó un modelo transitorio, definiendo los materiales y propiedades de cada uno de los sólidos que componen la junta a soldar.

En la parte experimental, se utilizaron 2 placas de aceros inoxidable diferentes; AL-6XN y 316L, soldadas con el proceso GMAW.

Para lograr una fuente térmica móvil fue necesario dividir la región central del modelo en 25 secciones de 10 x 10 mm, las cuales representan los pasos donde se aplicó el aporte térmico al modelo, esto debido a que las condiciones de temperatura para el material de cada placa (AL-6XN y 316L) son diferentes para cada instante, considerándose un comportamiento lineal con respecto al tiempo. Utilizando estas divisiones fue posible tabular los valores de temperatura para cada una de las secciones.

Se dibujó una placa más grande debajo de la junta a soldar, la cual representa el respaldo en que fue soldada la junta. (Ver figura 3)



Figura 3. Fotografías de las juntas soldadas

El siguiente paso fue ingresar las propiedades térmicas de cada material y las condiciones ambientales. Estas propiedades se obtuvieron de bases de datos para cada uno de los materiales empleados, por otro lado, la potencia y el flujo de calor fueron calculados mediante fórmulas:

$$P = VI$$

Donde:

P= Potencia de la fuente	4,165.41 W
V= voltaje	19.625 V
I= intensidad	212.25 A

$$\Delta Q = \frac{VI}{v}$$

Donde:

$\Delta Q$ = Aporte térmico	$\rightarrow$ 1096.159539 J/mm
v = Velocidad de avance de la gota de soldadura	$\rightarrow$ 3.8 mm/s

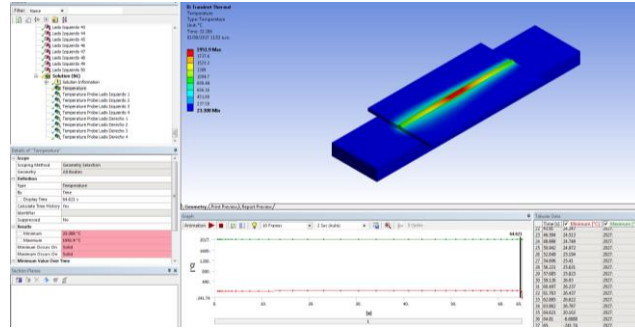


Figura 4. Perfil de soldadura con los datos térmicos.

### Resultados

Para desarrollar la simulación del comportamiento del flujo de calor que se provoca al soldar dos placas de acero inoxidable AL-6XN y 316L por medio del proceso GMAW, se utilizó el módulo transiente térmico en el programa ANSYS™ Academic.

Se realizaron varias pruebas tomando diferentes consideraciones, como el uso de la placa de respaldo, tamaño de malla, coeficientes de convección, entre otras, para encontrar la distribución de temperatura que más se adecuara al perfil de la unión soldada, debido a que, en la línea de fusión, las temperaturas máximas corresponden a la temperatura de fusión de los materiales base.

Uno de los puntos clave de la simulación fue analizar historial térmico en diferentes coordenadas de la unión soldada. En este análisis se marcaron 16 coordenadas sobre el modelo tridimensional, los cuales están ubicados a 10 y 20 mm respecto al cordón de soldadura y una separación de 50 mm entre ellos (ver Figura 5).

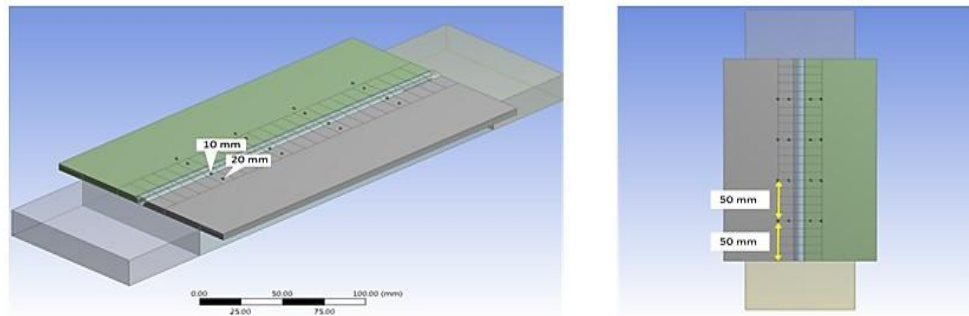


Figura 5. Ubicación de las coordenadas seleccionadas sobre el modelo tridimensional.

Para el modelo se utilizó un mallado con elementos sólidos tetraédricos, así mismo un refinamiento de malla en la región cercana al cordón de soldadura, obteniendo en el modelo un total de 441,480 elementos y 784,488 nodos, (ver Figura 6).

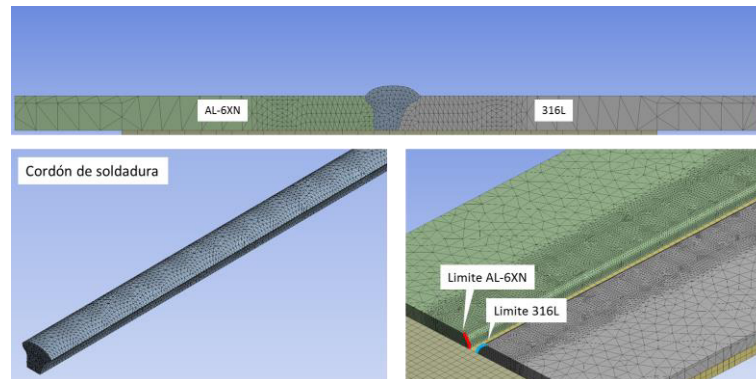


Figura 6. Refinamiento de mallado

Mediante el estudio térmico transitorio se simuló el desplazamiento del electrodo durante el proceso de soldadura. Esto se logró aplicando el calor de aporte calculado previamente a cada una de las secciones de 10x10 mm trazadas en el modelo con una variación de posición que depende de la velocidad de avance utilizada durante el proceso de soldadura experimental (ver figura 7).

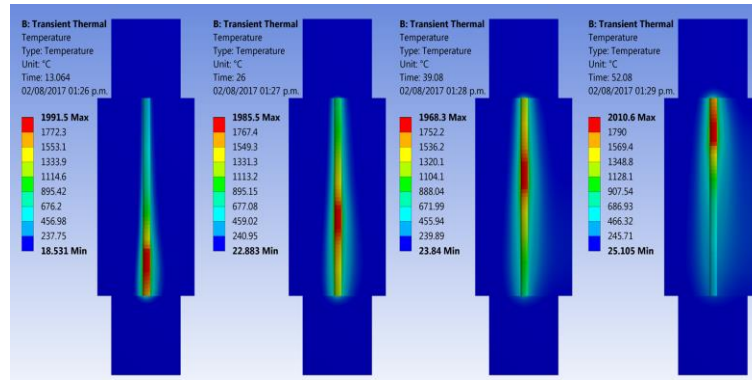


Figura 7. Imágenes obtenidas de la simulación.

En las figuras 8-10 se muestra el historial térmico, a 50, 100 y 200 mm. desde la posición inicial del electrodo. Las gráficas del lado izquierdo muestran los resultados de la placa de AL-6XN y las de la parte derecha las de la placa de 316L.

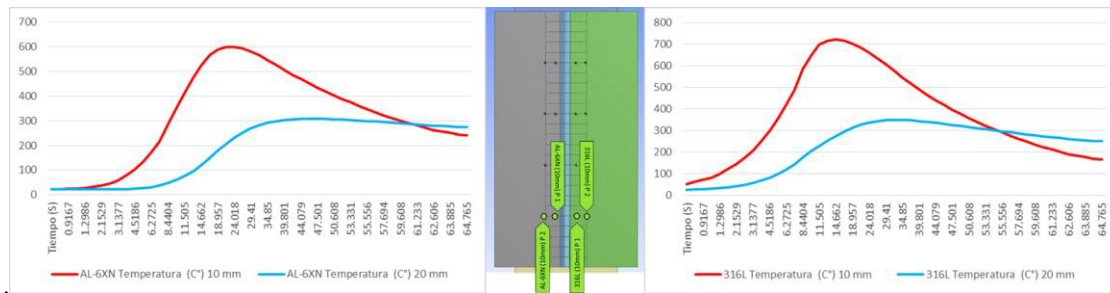


Figura 8. Historial térmico, 50 mm de la posición central del cordón de soldadura

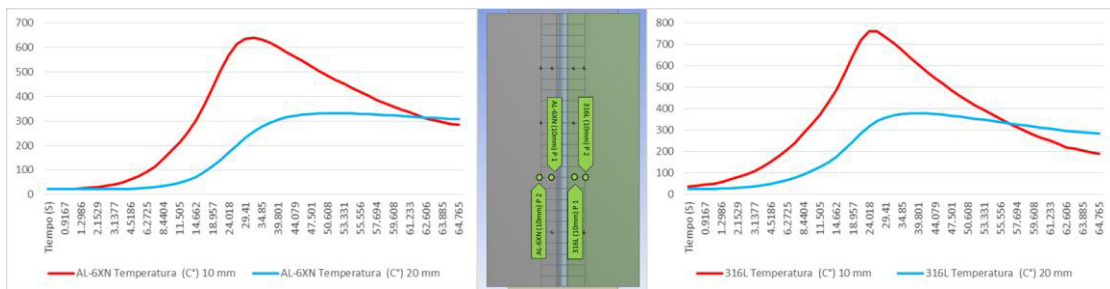


Figura 9. Historial térmico, 100 mm de la posición central del cordón de soldadura.

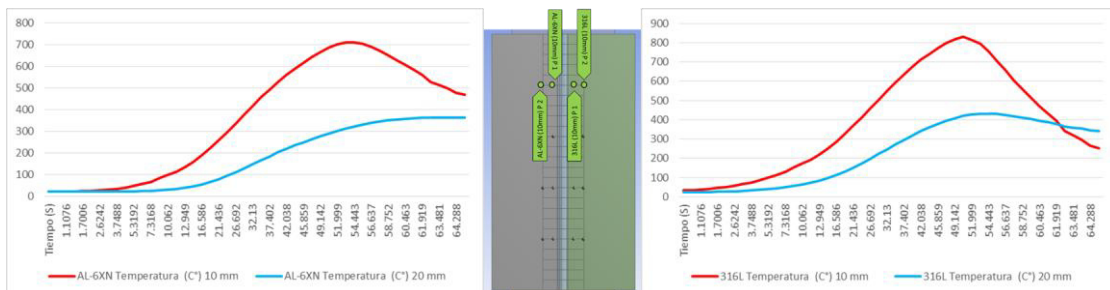


Figura 10. Historial térmico, 200 mm de la posición central del cordón de soldadura.

Las figuras anteriores (ver figura 8-10) muestran el historial térmico en diferentes posiciones del modelo durante el proceso de soldadura. Como puede apreciarse, existe una variación importante en los valores máximos de temperatura, los cuales dependen de la distancia al cordón o a la fuente de calor, siendo mayor en los puntos más cercanos a dicha fuente.

Se puede observar que en la placa de 316L las temperaturas son ligeramente más altas y se mantienen en un tiempo más prolongado que en la placa de AL-X6N, esto es debido a la diferencia en las propiedades térmicas de cada uno de los materiales base.

Para configurar el estudio transiente que simula el movimiento del electrodo fue necesario conocer cuáles serían las cargas térmicas que se aplicaron al modelo y las condiciones de convección existentes (ver cuadro 1). Las primeras están dadas por la potencia y eficiencia del arco, mientras que las segundas son la forma en que se transfiere calor sobre el modelo respecto al ambiente.

Cuadro 1. Propiedades térmicas utilizadas

Coefficiente de convección	2.5e-005 W/mm <sup>2</sup> °C
Eficiencia del arco	67%
Flujo de calor	64.423 W/mm <sup>2</sup>
Temperatura Hastelloy	2,027 °C
Temperatura AL-6XN	1,360 °C
Temperatura 316L	1,387.5 °C
Diámetro gota	5.5 cm
Temperatura ambiente	25°C

## Comentarios Finales

### Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del procedimiento propuesto permiten determinar el historial térmico de uniones soldadas, lo cual permite evaluar las condiciones óptimas para un determinado proceso de soldadura, estimar el ancho de la zona afectada térmicamente o determinar si existen las condiciones para la formación de fases intermetálicas.

Con el procedimiento propuesto utilizando un modelo térmico transiente, es posible determinar el historial térmico para diferentes coordenadas de las placas a soldar y con ello queda abierta la posibilidad de que en trabajos futuros se puedan emplear estos datos para determinar la microestructura y el ancho de la zona afectada por el calor.

Este estudio muestra la utilidad de la simulación por el método de Elementos Finitos para el análisis térmico del proceso de soldadura.

### Referencias

Romero Jesús "Análisis de transferencia de calor de la Unión soldada de un material 304 con material de memoria de forma NiTiNOL en el proceso de soldadura TIG por medio de Elemento Finito", Instituto Tecnológico Nacional Unidad Zacatenco, 2008.

Briones R. et al." Effect of heat input and accumulated fatigue damage on mechanical properties of dissimilar AL-6XN/316L welded joints."2016.

Pacheco Jorge & al., (2015). "Modelado de ciclos térmicos durante la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido en juntas disímiles de aceros inoxidable usando una aproximación teórico-experimental". *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 30, N° 3, pp. 111-118, 2015

Huei-Hang Lee. (sin fecha). "Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14 Theory, Applications, Case Studies" Tainan City, Taiwan: Schroff Development Corporation

### Notas Biográficas

La **C. Perla Lilian Contreras Juárez** es egresada de la carrera de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Ha participado en diversos eventos y concursos de Ciencia y Tecnología entre los que destacan el concurso Vive con Ciencia 2015 en el cual obtuvo el primer lugar Estatal en el reto de Educación y ha participado en el Congreso Internacional de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2016 y 2017.

El **Dr. Roberto Briones Flores**, es Subdirector de Posgrado e Investigación en el Instituto Tecnológico Superior de Uruapan, Terminó sus estudios de Maestría y Doctorado en el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH. Docente de la Academia de Ingeniería Mecatrónica, líder de la línea de Investigación "Mecánica Computacional y Diseño". Obtuvo el perfil deseable otorgado por PRODEP desde Julio del 2016.

El **M.C. Juan Gabriel Rodríguez Zamarrón**, realizó sus estudios de Licenciatura en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, realizó sus estudios de maestría en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Docente de la Academia de Ingeniería Mecatrónica.

El **M.C. Saúl Leonardo Hernández Trujillo**, Terminó sus estudios de Maestría en el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH y actualmente se encuentra por terminar en la misma Institución sus estudios de Doctorado.

El **Ing. Miguel Núñez Cárdenas**, es egresado de Instituto Tecnológico de Morelia y actualmente es candidato a grado de maestría de Diseño y Manufactura de la Universidad de Guanajuato. Docente de la Academia de Ingeniería Mecatrónica, miembro activo de la línea de Investigación “Mecánica Computacional y Diseño”.