

Formalización algebraica del método de arriba hacia abajo de diseño tecnológico

Juan Manuel García-Chamizo y Mario Nieto-Hidalgo

¹Department of Computer Technology, University of Alicante,
P.O. Box 99, E-03080 Alicante, Spain

{juanma,mnieto}@dtic.ua.es

Resumen. La literatura sobre ingeniería del software contiene numerosas propuestas para sistematizar las operaciones de diseño y ayudar en la toma de decisiones relacionadas con las soluciones a los problemas. Este artículo propone un marco conceptual para justificar la técnica de arriba hacia abajo que se sigue en el diseño tecnológico. El punto de partida es el enunciado de un problema en su versión de conjetura inicial, esto es, una hipótesis, y consta de una fase inicial que es esencialmente del ámbito del problema, y una segunda fase que es esencialmente del dominio de la solución. La fase del dominio del problema aborda una técnica para expresar el enunciado del problema con formato de una definición correcta y exacta, contextualizada en un dominio de referencia que es un modelo del problema y basada en una estructura sintáctica preestablecida. Esta fase produce una especificación formal del problema con formato de una expresión lógica o matemática que refiere el problema a un modelo y que denota, desde un enfoque externo al problema, los objetivos que se persigue que la solución satisfaga. La fase del dominio de la solución obtiene una especificación estructural de una solución al problema, que consiste en un árbol descriptor de la jerarquía de los módulos que componen la estructura y un grafo de las relaciones entre módulos, es decir, de la organización de los módulos. El fundamento del proceso de tomar decisiones de arriba hacia abajo consiste en clasificar las acciones que conforman el método de diseño y en establecer una ordenación entre las clases de acciones encontradas. Se propone un caso de estudio sencillo para poner de relieve el alcance de esta propuesta.

Palabras clave. Decisiones de diseño, Factores de diseño, Árbol estructural, Grafo de organización, Factores esenciales de la solución, Factores circunstanciales de la realización, Diseño orientado a modelo.

CONTENIDO

1.	Introducción.....	3
1.1.	La actividad de diseñar	3
1.2.	Conceptos sobre los problemas	7
2.	Organización de los factores de diseño	10
1.1.	Evidencia empírica para clasificar los factores de diseño	10
1.2.	La relación de alcance de las decisiones de diseño	12
1.3.	Ordenación de las clases de factores de diseño	13
3.	Plataforma para una especificación formal de problemas	14
1.1.	Decisiones de diseño sobre los modelos	15
1.2.	Decisiones sobre los objetivos	16
4.	Decisiones de diseño sobre los factores esenciales	17
1.1.	Clasificación de los factores esenciales	17
1.2.	Ordenación de las clases de factores esenciales	20
5.	Especificación de problemas y de soluciones	21
1.1.	Especificación formal de los problemas	21
1.2.	Especificación estructural de las soluciones	23
1.3.	Organización de una estructura	27
6.	Decisiones de diseño sobre los factores circunstanciales	28
7.	Conclusiones.....	29
	Referencias	30

1. Introducción

La motivación de este trabajo es proponer un marco conceptual para poder realizar sistemáticamente las operaciones diseño y, en general, para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con las soluciones a los problemas. Este marco conceptual puede proporcionar criterios para desarrollar procedimientos sistemáticos de decisión. La consecuencia es que aumenta la parte de justificación objetiva de las soluciones a los problemas a cambio de que disminuye la parte arbitraria que proviene de la inspiración del ingeniero y, con ello, ganan terreno el rigor del procedimiento y la fiabilidad del resultado.

Nótese que la aportación a la solución de un problema mediante la inspiración es la que entronca con la experiencia, la preferencia, la casualidad, la moda, la costumbre, la escuela o la corriente, la influencia externa, y otras causas de índole subjetiva o fantástica. Esa inspiración podrá, a su vez, ser de naturaleza endógena, que es lo que llamamos intuición, y producirá resultados artísticos (avalados por la convicción); e incluso podrá ser de naturaleza exógena, que es lo que llamamos revelación (resultados avalados por la creencia).

Debido a que los avales de la inspiración, la convicción y la confianza, son débiles, su papel en el diseño de las cosas, los ingenios y los procesos se acepta como recurso extremo, en ausencia de deducibilidad teórica y de empiria inductiva que garanticen la objetividad. Por eso, la finalidad general de la metodología de diseño es maximizar la base objetiva de las decisiones de diseño y, en consecuencia, disminuir la subjetividad.

En un horizonte más lejano, la finalidad es desarrollar entornos computacionales que proporcionen ayuda a los ingenieros en la actividad de tomar decisiones para crear los objetos, los equipos, los sistemas o los métodos, es decir para proponer soluciones a los problemas que acometen.

1.1. La actividad de diseñar

Estudios relativamente recientes tratan de proporcionar criterios para determinar, entre el planteamiento top-down y el planteamiento bottom-up, cuál de ellos se adecua mejor a la resolución de un determinado problema dentro del marco de los sistemas multiagente [Crespi, 2008].

Unos años antes, en el ámbito del diseño de sistemas electrónicos con señales mezcladas, Kundert desecha el planteamiento bottom-up debido a que carece de potencia expresiva suficiente para producir las soluciones de diseño de circuitos con la complejidad y el ritmo que demandan el mercado y la capacidad de fabricación. Indica que es necesario un método formal de tipo top-down que pueda soportar un proceso de diseño metódico y sistemático. Propone una secuencia de toma de decisiones y verificación mediante simulación que, efectivamente, es sistemática, pero totalmente empírica, sin fundamento formal alguno [Kundert, 2001], [Kundert, 2003].

Hace ya 25 años, Mäntylä se mostraba partidario del diseño top-down de sistemas mecánicos mediante entornos CAD [Mäntylä, 1990].

El modelado multi-granular resuelve aspectos de propagación de características entre las diversas fases de modelado: el análisis de requerimientos, el diseño conceptual, el diseño detallado y el prototipado [Huang, 2008], [Zhang, 2013].

Por su parte, el paradigma del diseño orientado a modelos resuelve aspectos de la composición e integración a gran escala [Balasubramanian, 2006].

Automatizar la obtención de especificaciones formales partiendo de los requisitos de un problema ha sido motivo de abundante esfuerzo investigador desde hace cincuenta años [Wijngaarden, 1965], [Edunpuganty, 1989], [Bryant, 2000], [Bryant, 2002], [Bjørner, 1978], [Dürr, 1995], [Bryant, 2003].

Brunetti y Golob proponen un enfoque de diseño basado en las características del problema para capturar la semántica de las primeras fases de diseño con la finalidad de utilizar dicha información en las fases finales de desarrollo del prototipo. Encuentran empíricamente la doble estructura de árbol y grafo que más tarde propone Qi, y con esta concepción desarrollan el entorno SINFONIA de ayuda al diseño [Brunetti, 2000]. Qi propone una doble estructura basada en un árbol y un grafo para modelar el ensamblaje y una notación para representar la estructura compuesta. El nivel de relación del modelo de ensamblaje está representado mediante un árbol, y la conexión entre los módulos del modelo de ensamblaje de árbol, está representado mediante un grafo [Qi, 2009]. Otto muestra los principios y mecanismos subyacentes de la arquitectura de los sistemas y de las estructuras de datos para obtener soluciones mediante la transformación de los conceptos y de las características en especificaciones formales consistentes pero encuentra que es necesario desarrollar una base teórica que proporcione soporte al análisis conceptual de las características de los problemas [Otto, 2001].

La literatura recoge también numerosas propuestas de análisis de requerimientos de sistemas software en lenguaje natural. Así mismo, abundan los entornos de transformación automática de cierto tipo de especificación formal a código fuente y su validación a partir de dicha especificación [Spivey, 1992], [Duke, 1995], [Jackson, 2002].

Hay propuestas de análisis de requerimientos en lenguaje natural [Gomez, 1999],[Deeptimahanti, 2009], [Jlieva, 2005], [Meziane, 2008], [Brunel, 1998], [Coleman, 1994].

La conclusión sobre el estado del conocimiento es que aumenta el interés por los entornos de ayuda a la toma de decisiones de diseño para obtener una especificación formal de un problema a partir de los objetivos que se plantea satisfacer dicho problema. Ello se explica, entre otros motivos, por la también creciente envergadura de los sistemas que dan solución a los problemas cada vez más complicados que se abordan.

La mayor disponibilidad de entornos de ayuda computerizada al diseño se ha visto favorecida por los avances en los enfoques metodológicos que han ido incorporándose al diseño ingenieril en los cuales, cada vez son más relevantes las variables arquitecturales de escalabilidad, sistematización y reutilizabilidad.

Es deseable avanzar en los aspectos conceptuales de las relaciones entre los problemas y los modelos con la finalidad de establecer un marco que sirva de soporte al desarrollo de los entornos de ayuda a la especificación y resolución.

En la medida que la finalidad de este trabajo es sumamente abierta, el punto de partida habrá de ser tan general como alcancemos a concebir, es decir, que no haya restricciones o que si las hay, sean las indispensables. En ese sentido, conviene observar que la actividad que realiza el maître para servir una ensalada, la que realiza el estudiante para averiguar la superficie de un triángulo, o la que realiza el ingeniero para diseñar un sistema, o para desarrollar un teclado, comparten la misma esencia: contestar a la cuestión intuitiva “qué es lo que hay que hacer para hacer algo”. Simplificadamente, contestar a la cuestión del “para hacer”.

Esa cuestión totalmente general puede descomponerse en un sinnúmero de cuestiones más concretas, de manera que cualquier compendio de la respuesta a todas ellas constituirá una respuesta al “para hacer”. Algunas de esas cuestiones son las siguientes: “qué (es lo que hay que hacer)”, “quién (tiene que hacerlo)”, “con qué (hay que hacerlo)”, “para quién (hacerlo)”, “cuánto (ha de costar)”, “cómo (hay que hacerlo)”, “cuándo (se hace)”, “para qué (hay que hacerlo)”, “dónde (se hace), etc.

La tabla 1 muestra casos de preguntas que hay que contestar para tomar las decisiones que proporcionan solución a algunos problemas.

Cada respuesta representa una acción, un evento o un valor de una variable. En lo sucesivo, nos referiremos a estos factores de la creación de un ingenio o de la resolución de un problema como a los “factores de diseño”. Las decisiones de diseño consisten, precisamente, en establecer los factores de diseño.

El enunciado de un problema, es decir, la hipótesis, ha de ser del ámbito de los enunciados a esclarecer, que es el ámbito de los problemas.

Tabla. 1. Cuestionarios para encontrar las actividades que hay que hacer para crear los ingenios o resolver algunos de los problemas propuestos como ejemplos.

Qué es lo que hay que hacer para hacer algo	
Ingenio	Actividad
diseñar un sistema	qué, cómo, cuándo, quién, dónde, con qué,...
servir ensalada	a quién, cuándo, dónde, cómo, cuánto,...
calcular triángulo	quién, cuál, con qué,...
producir un teclado	con qué, cuánto,...

Sin perjuicio de otras posibilidades, la coherencia del procedimiento de diseño puede garantizarse causalmente y, por lo tanto, su inicio ha de establecerse en la conjetura inicial, esto es, la hipótesis de partida.

La figura 1 muestra el esquema general del proceso causal de diseño: el punto de partida es una conjetura que pertenece al ámbito del problema, una secuencia de acciones da lugar, sucesivamente, a una definición correcta y exacta del problema, a

una instancia provisional de una solución, y a una instancia válida de esa solución, también llamada prototipo.

Cada fase del método está fundamentada causalmente en la precedente. La hipótesis, para no condicionar por adelantado podas en el árbol de posibles soluciones, debería expresar el problema desde un punto de vista externo a la solución, sin hacer consideraciones sobre la estructura y la composición de la solución. Es decir, la hipótesis debe consistir en un enunciado del problema visto desde el universo, pero no puede descartarse que también incluya condiciones sobre los ingredientes o sobre la estructura de la solución.

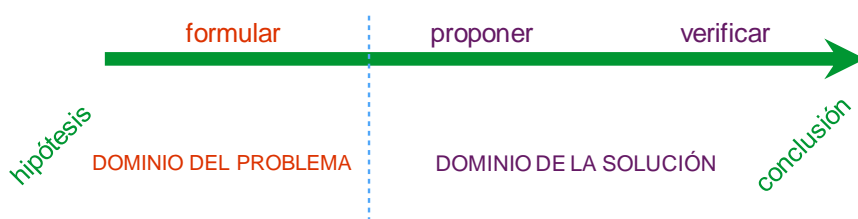


Fig. 1. Esquema general del proceso causal de diseño: se inicia en una propuesta del dominio del problema y culmina en una instancia válida del dominio de la solución.

El proceder que recoge la figura 1 está considerado por la comunidad internacional como intuitivo, es decir, forma parte del sistema postular de la praxis ingenieril y, por lo tanto, está asumido que no requiere mayor justificación. Tal estado de cosas conlleva la aceptación del procedimiento de crear ingenios como una actividad cuya esencia surge de la inspiración del ingeniero: sus conocimientos, experiencia, habilidades, etc. Esto es, se asume, a la creación en ingeniería, una génesis inspirada endógena y, por ende, basada en la intuición del ingeniero que proviene de sus propias convicciones. El procedimiento está, pues, impregnado de arbitrariedad subjetiva, luego es una expresión artística: el arte de diseñar. Por ello, resulta francamente dificultoso encontrar trabajos en la literatura científica que avalen formalmente su idoneidad salvo, quizás, contribuciones epistemológicas o provenientes del ámbito de la historia y la filosofía de la ciencia [Hannay, 2007], [Gregg, 2001], [Sjoberg, 2007] [Easterbrook, 2008], [Stol, 2013], [Wieringa, 2011]. En primera aproximación, la aceptación de la calidad de las soluciones que obtiene el ingeniero depende en gran medida del arbitrio de cada persona.

La fórmula usual para investir de calidad objetiva a la creación subjetiva que realiza el ingeniero la proporciona, en última instancia, un mecanismo de inducción parcial que consiste en probar experimentalmente que la solución satisface los objetivos que se propusieron a modo de condiciones para caracterizar el problema. La tabla 2 recoge un conocido refrán que proporciona la receta para aliñar una ensalada, cuyo fundamento es la evidencia empírica de que esos ingredientes (con qué), en esas proporciones (cuánto), y esa secuencia de elaboración (cómo) dan lugar a ensaladas que se consideran buenas.

Tabla. 2. Elaboración tradicional de la ensalada mediante un criterio empírico basado en la experiencia.

Procedimiento arbitrario para hacer una ensalada	
“La ensalada, salada, poco vinagre, y bien aceitada”	
con qué	con sal, vinagre y aceite
cuánto	mucha sal, poco vinagre y mucho aceite
cómo	primero la sal, después el vinagre y, finalmente, el aceite

Lo que proponemos en el resto de este documento es un procedimiento para tomar las decisiones que atañen a los factores de diseño. Este procedimiento está basado en las relaciones binarias entre dichos factores de diseño. Resumidamente, de lo que se trata es de caracterizar los factores de diseño que comparten determinadas propiedades, asumiendo que todos los factores que sean de la misma clase serán susceptibles de admitir un tratamiento análogo. Seguidamente, ordenar las clases de factores porque ello proporcionará criterios sobre la secuencias de acciones a seguir para obtener respuesta a la cuestión del “para hacer”.

1.2. Conceptos sobre los problemas

El concepto de problema ha recibido un trato extremadamente remiso en la literatura científica. Los pocos autores que lo han abordado, lo hacen desde un enfoque eminentemente epistemológico y filosófico, lo cual sirve para conocer a los problemas pero aporta poco sobre cómo están constituidos y sobre cómo resolverlos [Landry, 1995], [Agre, 1982]. Tanto Agre como Landry coinciden con todos los autores en considerar a los problemas como el mecanismo de crear conocimiento, y manejan el concepto de problema en sentido dinámico, relacionado con la actividad de resolverlo en sí misma. Es lo que en este trabajo venimos llamando tomar decisiones de diseño.

Agre propone una definición genérica del concepto de problema que está basada en las nociones de conciencia, dificultad y convicción de poder ser resuelto. Finalmente, señala la ausencia de trabajo científico sobre la relación que pueda existir entre la resolución de problemas y el aprendizaje, y reconoce que parece existir una compleja conexión conceptual entre aprendizaje, problema y solución.

Landry señala que han sido enunciadas numerosas definiciones de problema pero que no han sido contrastadas empíricamente.

Preston, en relación con los sistemas de gestión de la información, apunta que los problemas tienen una estructura inherente compuesta por variables finitas y reglas que gobiernan las relaciones entre las variables. Así mismo, sugiere que el asunto clave es identificar el conjunto de actividades ordenadas que componen el proceso de resolución de problemas [Preston, 1991].

Como estamos interesados en una concepción procedural que pueda soportar las transformaciones que requiere el proceso de resolución, proponemos que la creación de conocimiento es el proceso de obtener la respuesta a partir de la pregunta o,

equivalentemente, el de toma decisiones para obtener la solución partiendo del problema.

En el ámbito estrictamente empírico, definimos la creación de conocimiento en los términos que siguen. Un efecto observacional de una entidad, hecho o fenómeno del universo depende de la naturaleza del propio fenómeno que se observa. La percepción humana del efecto observacional ocurre mediante los órganos de los sentidos, y tal vez de los instrumentos, y consiste en una transformación que filtra el efecto observable. Finalmente, el conocimiento que se crea es la modulación que la mente produce sobre la percepción, esto es, la interpretación de lo observado.

Es decir, el conocimiento que se crea al obtener la respuesta a un efecto observacional consiste en el doble filtrado de percibir e interpretar. Los enfoques objetivista, subjetivista y constructivista corresponderían a una clasificación de los problemas que estuviera basada en las combinaciones posibles de las transformaciones de percepción y de interpretación para producir conocimiento. Así, el objetivismo sería el caso en que la interpretación fuera la identidad, en el subjetivismo sería la percepción la identidad, y en el constructivismo, tanto la percepción como la interpretación serían cualesquiera funciones. Más aún, si la percepción y la interpretación fueran la función identidad, podríamos decir que la respuesta alcanzada es la verdad, lo cual significa que la interpretación coincide con el efecto observacional. Por otro lado, la percepción nula daría lugar a conocimiento inspirado, artístico o revelado, dependiendo de que la fuente de inspiración fuera intuitiva o exógena.

En línea con la propuesta de Preston, con carácter general, consideramos que el término problema tiene el significado estático de declaración que ha de ser esclarecida. Para que el alcance sea lo más general posible, proponemos las siguientes definiciones:

Problema. Un problema es un enunciado a esclarecer. Los componentes de la sentencia son términos que se refieren a los elementos involucrados en el problema, y los llamamos variables del problema. El significado de la sentencia es una condición entre las variables. Las variables no tienen por qué ser cuantificables y las condiciones sobre ellas no tienen por qué ser funcionales.

El ámbito del enunciado del problema es, por lo tanto, el dominio de los efectos observables, exento de la subjetividad que puedan incorporar la percepción y la interpretación. Instrumentalmente, los problemas son efectos observables. Que la sentencia haya de ser esclarecida, incorpora inevitablemente subjetivismo pero lo deja inscrito en el ámbito del proceso de esclarecimiento, esto es, de resolución del problema.

Decisión de diseño. Es la acción que deriva un enunciado a partir de otro. La derivación de enunciados establece coherencia causal entre un problema y una solución del mismo. Las decisiones de diseño operan tanto sobre las variables como sobre la condición del problema, y están relacionadas con los filtros de observación e interpretación. Una secuencia de acciones de diseño transforma el problema en un enunciado solución.

Las decisiones de diseño consisten, precisamente, en establecer los factores de diseño. Las respuestas al “para hacer”, esto es, los factores de diseño han de ser derivables con la condición del problema que resuelven.

Solución. Una solución a un problema es un enunciado derivado del problema, que lo esclarece. Es decir una solución a un problema es conocimiento que se crea a partir de un efecto observable, mediante la percepción y la interpretación. La naturaleza de una solución es la misma que la de un problema, ya que la condición de ser solución radica en el valor semántico que se le asigna externamente.

Modelo de un conjunto de problemas. Es un problema cuyo enunciado forma parte del enunciado de cada problema del conjunto. Sus variables son las variables comunes a todos los problemas y su condición incluye a la unión de las condiciones. Por lo tanto, un modelo es una abstracción de cada problema del conjunto, y, en consecuencia un subproblema común a todos los problemas de dicho conjunto.

Bajo ese enfoque, la primera etapa de diseño que proponemos es descomponer el problema en los dos subproblemas siguientes:

- Subproblema modelo. Es la parte del problema relativa a las variables y las condiciones sobre las mismas que este problema comparte con otros de una familia. La resolución del subproblema modelo se refiere a tomar las decisiones de diseño correspondientes al nivel de los modelos. Por ejemplo, plato (alimento, comida) es un modelo del ingenio ensalada. Decidido un modelo, es posible definir un problema en términos del mismo: una ensalada es un plato saludable.
- Subproblema específico. Es la parte del problema relativa a las variables y las condiciones sobre las mismas que distinguen a este problema del modelo. La resolución del subproblema específico es el compendio de las decisiones de diseño que corresponden a los aspectos del problema que no resuelve el modelo, es decir, resolver el subproblema específico consiste en actividades de concreción sobre el modelo. Por ejemplo: una ensalada es un plato a base de verduras frescas, crudas, y baratas. La concreción de ser saludable la ensalada consiste en este caso en que las verduras sean frescas, crudas y baratas.

La definición del modelo del problema restringe la solución al ámbito del propio modelo y, por ello, provoca una poda en el árbol de las soluciones que admite el problema. Expresar el problema en referencia a uno de sus modelos proporciona una definición incompleta del problema y, como tal, su valor es declarativo para el problema.

La caracterización del problema específico, por su parte, ha de expresar la condición que complementa al modelo frente al problema y, por lo tanto, en el caso general, involucra a los elementos de todo el problema. En el caso más general, podremos extraer la condición del subproblema específico mediante transformaciones de la hipótesis que aseguren su corrección y exactitud.

2. Organización de los factores de diseño

Partiendo de la consideración de que un problema es un enunciado que establece una condición entre las variables, que ha de ser esclarecido, han sido propuestas sendas definiciones para los conceptos de “solución”, “decisión de diseño”, y “modelo”. Dichas definiciones proporcionan una base para clasificar los factores de diseño y para ordenar las clases de factores que intervienen en el diseño de soluciones

1.1. Evidencia empírica para clasificar los factores de diseño

Los factores de diseño están contenidos en las respuestas a las preguntas subyacentes a la cuestión genérica del “para hacer”: los ingredientes del aliño, sus cantidades y el orden de operación. Un análisis fenomenológico de los factores de diseño proporciona evidencia empírica de que pueden ser clasificados.

Tomando como ejemplos los problemas “cómo hacer un teclado” y “cómo hacer una ensalada”, las respuestas a las preguntas del “para hacer” se muestran en las tablas 3 y 4, respectivamente. La columna “Alcance de la respuesta” de dichas tablas denota la identidad de la respuesta correspondiente. Los símbolos de la columna “Clase” identifican las categorías de respuestas.

En el ejemplo de diseñar un teclado, las respuestas pueden ser las siguientes: referirse a un superconjunto del ingenio teclado visto como problema (dispositivo), en cuyo caso será una respuesta referente a un modelo del teclado (M); referirse a aspectos o partes del ingenio teclado visto como solución (entrada, tecla, pulsación), que es lo que denominaremos factores esenciales del ingenio que se diseña visto como solución (E); o referirse a asuntos que no forman parte del ingenio teclado diseñado sino que conforman el contexto de la actividad de diseñar (planificación, facultativo, precio, etc.), a los cuales les llamamos factores circunstanciales de la actividad de realizar el teclado (C).

Tabla. 3. Las respuestas que se obtienen al cuestionario para hacer un teclado pueden referirse a un modelo del ingenio teclado (M), a factores esenciales del teclado (E), o a factores circunstanciales de la actividad de diseñar el teclado (C).

Clases de respuestas para hacer un teclado			
Cuestión	Respuesta	Alcance de la respuesta	Clase
Qué es	Un dispositivo	Abstrae al problema	M
Para qué es	Para entrada de caracteres y órdenes	La solución incluye a la respuesta	E
Con qué se hace	Con teclas, circuitos, chasis, etc.	La solución incluye a la respuesta	
Cómo	Convirtiendo pulsación en señal eléctrica	La solución incluye a la respuesta	
Cuándo	La semana que viene	La respuesta es externa a la solución	C

Quién	Un ingeniero electrónico	La respuesta es externa a la solución	
Cuánto	Menos de 50 €	La respuesta es externa a la solución	
Dónde, de quién, para quién, etc.	...	La respuesta es externa a la solución	

En el ejemplo de diseñar una ensalada, análogamente, las respuestas pueden referirse al superconjunto comida, modelo de la instancia ensalada (M); referirse a propiedades, partes o ingredientes, esto es, factores esenciales (E); o referirse al contexto de elaboración de la ensalada (C).

Tabla. 4. Clases de respuestas al cuestionario para hacer una ensalada. Modelo (M: comida), factores esenciales (E: sabrosa, nutritiva, lechuga, pepino, aceite, lecho de verduras, aliño, etc.), y factores circunstanciales (C: planificación, facultativo, precio, etc.).

Clases de respuestas para hacer una ensalada			
Cuestión	Respuesta	Alcance de la respuesta	Clase
Qué es	Una comida	Abstrae al problema	M
Para qué es	Sabrosa, nutritiva, saludable y agradable	La solución incluye a la respuesta	E
Con qué se hace	Lechuga, pepino, rúcula, aceite,...	La solución incluye a la respuesta	
Cómo	Un lecho de verduras aliñadas	La solución incluye a la respuesta	
Cuándo	En el momento de servirla	La respuesta es externa a la solución	C
Quién	Un cocinero	La respuesta es externa a la solución	
Cuánto	Menos de 10 €	La respuesta es externa a la solución	
Dónde, de quién, para quién, etc.	...	La respuesta es externa a la solución	

1.2. La relación de alcance de las decisiones de diseño

La existencia de la partición que aparece en las dos tablas {M, E, C}, teniendo en cuenta el teorema fundamental de las relaciones de equivalencia, permite afirmar que existe una relación de equivalencia en el conjunto de los factores de diseño.

Definimos el alcance de un factor de diseño sobre un problema en el ámbito de un modelo como el conjunto de los problemas en los que la decisión de diseño produce deriva. El alcance puede ser: el modelo y el problema, solamente el problema, o ninguno de ellos.

Definición. La sentencia “alcance de la respuesta” establece una relación de equivalencia en el conjunto de los factores de diseño (F, ~).

El alcance de la respuesta a una cuestión del “para hacer” determina si esa respuesta es una condición del modelo y el problema (M), solamente del problema (E), o no afecta al problema sino al proceso de obtención de la solución (C), significando esto último la fabricación del ingenio o la realización de un prototipo. Luego, el alcance de la respuesta viene a indicar el ámbito de la decisión de diseño que lleva aparejada la respuesta a cada cuestión del “para hacer”: el modelo, las peculiaridades de problema, o circunstancias de la resolución (contexto de la realización).

Hay tres clases de factores (F):

$$F = \{M, E, C\}$$

- Los factores de diseño que se obtienen respondiendo a la cuestión “qué es el problema” tienen alcance en el problema y en el modelo y, por lo tanto, recogen lo abstracto del problema y dan lugar a las generalizaciones del mismo.
- Los factores de diseño que se obtienen respondiendo a las cuestiones {para qué, con qué, cómo} derivan de lo específico del problema. Las decisiones de diseño sobre estas cuestiones esclarecen aspectos locales. Esta clase de los factores comprende el subconjunto de los factores de diseño que son parte constituyente de la solución y por ese motivo los denominamos factores esenciales: ingredientes, propiedades, estructura o módulos.
- Los factores circunstanciales se obtienen respondiendo a las restantes cuestiones del “para hacer” {cuándo, quién, cuánto, dónde, a quién, de quién, ...}. El contexto resuelve aspectos que intervienen en el proceso de obtención del resultado: coste, equipo de diseño, planificación, lugar, etc.

La figura 2 consiste en una representación del alcance que tienen las decisiones de diseño en relación con la intensidad que esclarecen del problema o la cantidad del ingenio que contribuyen a crear. El significado de cada una de las cuestiones del “para hacer” contribuye a hacer intuitiva la correspondencia de los factores de diseño y de las decisiones a que dan lugar. La interpretación del significado de las tres clases de factores de diseño respecto del ingenio que se crea también se hace evidente.

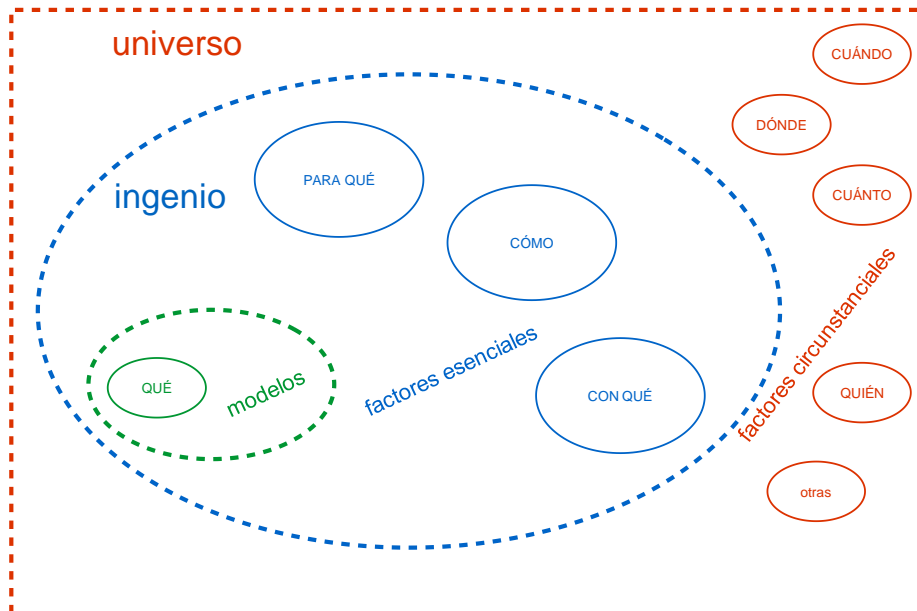


Fig. 2. Clases de factores de diseño e interpretación de su relación el ingenio.

Puede darse el caso de que factores que son genuinamente ajenos al modelo interese considerarlos como propios del modelo. Por ejemplo, el factor “que tenga máxima frescura” la ensalada es una respuesta genuina a la cuestión “cuándo” pero también puede obtenerse como respuesta a la cuestión “qué es” si se da el caso de que el restaurante considera que la frescura de la ensalada es un aspecto primordial. Desde el punto de vista del formalismo, ese mismo factor de diseño puede obtenerse como respuesta a la cuestión “qué es” y a la cuestión “cuándo”, lo cual descompondría el rigor de la clasificación.

Por convenio, para mantener el rigor de la clasificación, imponemos la condición de prevalencia de lo establecido en la hipótesis sobre la naturaleza genuina o habitual de los factores de diseño.

Esto es una forma de imposición de causalidad dentro del método de diseño que estamos justificando: si forma parte de la hipótesis, corresponde que genere consecuencias y carece de sentido que constituya un hallazgo.

1.3. Ordenación de las clases de factores de diseño

Nos proponemos ordenar las tres clases de factores de diseño para obtener un criterio sobre cuáles son las decisiones de diseño que hay que tomar en primer lugar y cuáles las que corresponde tomar seguidamente.

Definimos la potencia de un factor de diseño sobre un problema en el ámbito de un modelo como el cardinal de su alcance.

El dominio de la potencia es, por lo tanto, los valores {0,1,2}.

Como dicho conjunto está ordenado, podemos establecer la siguiente:

Definición. La sentencia “potencia de un factor de diseño” ordena las clases de factores de diseño: (F,>).

$$C < E < M$$

La conclusión es que existe una precedencia que establece cuál es la secuencia correcta de niveles para tomar las decisiones que atañen a los factores de diseño.

factores circunstanciales < factores esenciales < modelo

La hipótesis constituye el hito de inicio de la actividad de diseñar y, en su esencia, expresa abstractamente a la solución, corresponde al ámbito del modelo. Luego, la secuencia formalmente correcta que hay que seguir en la toma de decisiones de diseño para mantener la coherencia respecto de la potencia de los factores sobre los que se toman las decisiones es la siguiente: decidir en primer lugar el modelo que va a caracterizar a la solución, tomar seguidamente las decisiones sobre los factores esenciales de la solución y, finalmente, las decisiones sobre el contexto en que tiene lugar la creación de dicha solución.

La derivación de las decisiones de diseño da lugar a clases que admiten ser ordenadas por su potencia, lo cual constituye un marco del diseño orientado a modelo.

El procedimiento causal para tomar las decisiones de diseño que hemos desarrollado hasta este punto afecta a los aspectos globales de la resolución de problemas: modelos, constituyentes y entorno. La casuística a que nos enfrentamos tiene los siguientes rasgos definitorios:

- Las decisiones de diseño relacionadas con los modelos corresponden esencialmente al ámbito del problema pero están encaminadas a delimitar el marco general dentro del cual habrá de obtenerse la solución. Su finalidad instrumental es hacer una selección. Por lo tanto, aunque los elementos para el razonamiento sean del ámbito del problema, los resultados son del ámbito de la solución.
- Las decisiones de diseño relacionadas con los factores esenciales son las que tienen que dilucidar sobre los ingredientes tecnológicos constituyentes de la solución, sobre la interfaz de utilización de la misma, y los demás aspectos constitutivos de la propia solución, esto es estructurales y organizacionales. La finalidad instrumental de las decisiones de este nivel del diseño es sustancial, de composición y constitución de la solución.
- Las decisiones de diseño relacionadas con el contexto son procedimentales, de ambientación del escenario, inmersa en el cual ocurre la solución.

3. Plataforma para una especificación formal de problemas

Como forma sistemática para resolver cualquier problema, esta propuesta tiene la esencia de descomponer el problema de partida en otros que sean más sencillos y proceder iterativamente hasta instancias de problemas que interese resolver mediante técnicas específicas o cuya solución sea conocida.

El diseño orientado a modelo que hemos justificado para obtener una solución a un problema trata de obtener esa solución mediante una estrategia “divide et vincas” que

descompone canónicamente al problema inicial en dos subproblemas: un modelo del problema, y otro subproblema que comprende la concreción que media entre el modelo y el problema inicial. Luego, la selección del modelo es una decisión de diseño dado que condiciona la solución que finalmente obtengamos para el problema. Como estamos tratando de operar los problemas para obtener otros problemas o partes de ellos, además de las concepciones postulares al uso, es necesario establecer concepciones operacionales de las entidades que intervienen.

1.1. Decisiones de diseño sobre los modelos

Puede haber muchos modelos de un problema dado, tantos como resultan de combinar los factores de diseño de este último y de proponer condiciones que contengan a la del problema.

En términos topológicos, podemos referirnos al espacio de representación de todos los factores de diseño y concebir cada problema como la región de ese espacio que satisface la condición del problema.

La pretensión de resolver con estrategia orientada a modelo, con la finalidad de que la solución obtenida para el modelo pueda ser utilizada para resolver otros problemas que tengan ese mismo modelo, proporciona criterio para proponer una técnica de selección del modelo que va a servir de marco a la solución de un problema dado.

En el caso general, la hipótesis de partida representa al problema que nos planteamos resolver en términos, quizás, de un modelo y de un compendio de objetivos que ha de alcanzar el problema, e incluso de requerimientos que debe satisfacer la solución. Todo ello, mediante una expresión del lenguaje de la disciplina del problema, pudiendo la tal expresión ser inexacta, imprecisa, ambigua, e incluso errónea.

Debido a esa posibilidad de incorrección, evitamos llamar enunciado del problema a la hipótesis o conjetura inicial y reservamos el término problema para el enunciado formalmente correcto y exacto que resulta de la transformación (léxica, sintáctica e incluso semántica) de la hipótesis para obtener una definición que consiste en:

- Una sentencia generalizadora que expresa el modelo; p.e.: “una ensalada es una mezcla de verduras”.
- Una sentencia de concreción, que expresa la condición como una conjunción de otras condiciones más ligeras, extraídas de la hipótesis, en coherencia con el modelo; p.e.: “una ensalada es fresca, sabrosa, nutritiva y barata”.

Llamaremos “objetivos del problema” a las condiciones parciales correctas y exactas extraídas de la hipótesis, expresadas en coherencia con el modelo.

El cometido de decidir el modelo del problema es, pues, doble: por un lado, establecer la parte correspondiente de la solución, y por el otro, precisar el marco de la hipótesis.

La técnica que proponemos consiste en contestar a la cuestión “qué” es el problema, para decidir cuál es el modelo de problema a proponer. Ej.: la pregunta “qué es la ensalada”, obtendrá como respuesta modelos de ensalada: “entrante frío”, “alimento saludable”, “mezcla de verduras”, etc.

Consta de los siguientes pasos:

- Enunciar una colección de otros problemas tipo para los cuales, el modelo, lo sea. Serán considerados casos favorables o ejemplos positivos.

- Enunciar, tal vez, una colección de otros problemas tipo para los cuales, el modelo, no lo sea. Serán considerados ejemplos negativos o contraejemplos.
- Enunciar una condición derivada de la unión de las condiciones de los ejemplos, de tal manera que no contenga las condiciones de los contraejemplos.

Siguiendo con el ejemplo de la ensalada, para proponer un modelo para la misma, pueden servir como casos favorables los siguientes: ensalada murciana, pipirrana, ensalada César, ensalada Waldorf, tabulé, ensalada rusa y escalivada. Como contraejemplos, los siguientes: gazpacho, vichyssoise, cocido, paella, hervido y verduras a la plancha.

Un modelo de ensalada es el de la siguiente definición:

“Ensalada es una mezcla diferenciada a base de verduras y tal vez otros ingredientes, predominantemente fría”.

Cuando de lo que se trata es de resolver reutilizando modelos ya conocidos, lo pertinente es considerar dichos modelos directamente. Así, en el caso de querer crear una ensalada científicamente, podemos proponer:

- Mezcla de verduras. Es una concepción de la ensalada bajo del enfoque del chef.
- Alimento ligero. Este enfoque de la ensalada corresponde al punto de vista del experto en dietética.
- Entrante frío. Se trata del planteamiento que tiene el maître de lo que es una ensalada.

En caso de estar interesados más en hacer la ensalada que en servirla o en su valor nutritivo, una primera definición de ensalada sería la siguiente:

“Ensalada es una mezcla diferenciada a base de verduras y tal vez otros ingredientes, predominantemente fría”.

En cambio, el experto en dietética podría proponer el siguiente modelo:

“Ensalada es una mezcla hipocalórica y facilitadora del tránsito intestinal a base de verduras y tal vez otros ingredientes”.

Nótese que estas definiciones proporcionan solamente la información del problema respecto del modelo que hemos decidido para el mismo. Su valor se limita al ámbito de lo declarativo pero carece de utilidad operacional para transformarla en otra expresión que contenga la información para producir la ensalada.

1.2. Decisiones sobre los objetivos

Establecido precisamente el marco de la hipótesis mediante un modelo del problema, para completar la transformación de la misma en una expresión correcta, exacta y precisa, bajo el planteamiento de que la propia hipótesis evite las preconcepciones sobre la solución, corresponde que esa nueva expresión de la hipótesis esté enmarcada en el ámbito del problema. Luego la transformación de la hipótesis ha de consistir en:

- Corregir y refinar las expresiones, objetivos o requerimientos, contenidos en la conjetura inicial.
- Transformar los requerimientos sobre la solución que puedan estar contenidos en la conjetura inicial en objetivos del ámbito del problema, esto es, expresiones construidas con términos procedentes de un punto de vista externo a la interfaz que

media entre el ingenio solución y el resto del universo. Esta transformación desliga al enunciado del problema de potenciales restricciones del árbol de soluciones que hubieran sido incorporadas arbitrariamente e incluso sin intención. Contrariamente, como puede ocurrir que exista decisión de que determinado requerimiento sobre la solución constituya un objetivo del problema (p.e., que un circuito sea CMOS), todo lo que corresponde hacer es conservar tal consideración en su versión como objetivo del problema. De esta forma, la nueva expresión de la hipótesis adquiere la consistencia formal de ser un enunciado del problema desde el enfoque externo al mismo problema y, por lo tanto, libre de precondiciones.

- Proponer objetivos adicionales. Dado que el modelo del problema recoge los objetivos establecidos en la conjetura inicial, la obtención del conjunto de todos los objetivos del problema lleva consigo decidir sobre la incorporación de otros objetivos adicionales que sean consistentes con los iniciales. Aquí es donde se incorporan las conclusiones del estudio del estado del conocimiento sobre el problema. El análisis del conocimiento que existe sobre el problema permite determinar los avances que corresponde que satisfaga la solución, adicionalmente a los contenidos en la hipótesis. La especificación formal, finalmente, contendrá el compendio de los objetivos extraídos de la hipótesis y de los extraídos del análisis del estado del conocimiento. Realizar el análisis del estado del conocimiento después de definir el modelo justifica que el ámbito del análisis quede acotado por el modelo. A su vez, los objetivos que se obtienen del análisis del conocimiento pueden corresponder al propio modelo o a la parte específica del problema, lo cual produce un refinamiento del modelo. Bajo ese punto de vista, en la práctica, ambas actividades, definición del modelo y análisis del estado del conocimiento, se realizan concurrentemente como un bucle formado por la secuencia: definición de modelo seguida de análisis del estado del conocimiento.

4. Decisiones de diseño sobre los factores esenciales

1.1. Clasificación de los factores esenciales

Los factores esenciales E son las respuestas a las preguntas {para qué, con qué, cómo}. Análogamente a como hemos procedido para la clasificación de los factores de diseño en general, un análisis fenomenológico de los factores esenciales sugiere la posibilidad de clasificarlos. Tomando como ejemplos los problemas de hacer un teclado y de hacer una ensalada, las respuestas a las preguntas para encontrar soluciones se muestran en las tablas 5 y 6, respectivamente.

Las anotaciones del campo “RoI” se refieren ahora al papel que desempeñan los factores que dan respuesta a las cuestiones. En ambos casos surge una partición que, teniendo en cuenta el teorema fundamental de las relaciones de equivalencia, permite afirmar que existe una relación de equivalencia en el conjunto de los factores esenciales de diseño tanto del teclado como de la ensalada. Más aún, la partición consiste en las siguientes tres clases:

- Los factores de la clase A, que representan la utilidad, son los factores esenciales que la solución manifiesta explícitamente al universo, los que se perciben desde un punto de vista externo a la solución. Son los factores de la arquitectura (prestaciones) de la solución, podemos denominarlos factores explícitos. Su característica operacional es que pueden deducirse de la hipótesis, y se obtienen respondiendo a la cuestión “para qué”. Un ejemplo de factores explícitos para el caso de la ensalada es “plato saludable de sabor intenso y fuerte contraste”.
- Los factores de la clase T, son los ingredientes tecnológicos, es decir, que representan a la constitución de la solución. Podemos denominarlos factores intrínsecos. Su característica operacional es que son elementales por definición, y se obtienen respondiendo a la cuestión “con qué”. Ejemplos de factores intrínsecos para el caso de la ensalada son: lechuga, tomate, cebolla y aceite de oliva.
- Los factores de la clase S son los constructivos de la solución, es decir, los factores estructurales y de la organización de la solución. Podemos denominarlos factores implícitos, y se obtienen respondiendo a la cuestión “cómo”. Representan la visión interna de la solución. Un ejemplo de factores implícitos para el caso de la ensalada es “mezcla aliñada de tomate y cebolla sobre lecho de espinacas”.

Tabla. 5. Clasificación empírica de las respuestas a las cuestiones sobre los factores esenciales para hacer un teclado.

Cuestiones esenciales para hacer un teclado			
Cuestión	Respuestas	Rol	Clase
Para qué es	Para entrada de caracteres y órdenes	La utilidad del teclado	A
Con qué se hace	Con teclas, circuitos, chasis, etc.	Los constituyentes	T
Cómo	Convirtiendo presión en señales eléctricas	Su funcionamiento	S

Tabla. 6. Clasificación empírica de las respuestas a las cuestiones sobre los factores esenciales para hacer una ensalada.

Cuestiones esenciales para hacer una ensalada			
Cuestión	Respuestas	Rol	Clase
Para qué es	Sabor, textura, salubridad, nutrición,...	La utilidad de la ensalada	A
Con qué se hace	lechuga, pepino, aceite de oliva,...	Los ingredientes	T
Cómo	Un lecho de verduras y aceite pulverizado	Su construcción	S

Por lo tanto, el rol de un factor esencial consiste en la repercusión que tienen las decisiones de diseño que lo incorporan a la solución, en la propia actividad de obtener la solución: la deriva de los factores explícitos (arquitectura) a partir de la hipótesis es deductiva, la de los factores implícitos (estructura) es inductiva, y la de los factores intrínsecos (tecnología) es indirecta, a través de la estructura.

Definimos el rol de un factor de diseño en un problema como la naturaleza de la deriva que lo produce. El rol puede ser: deducción, inducción o indirección.

Definición. La sentencia “rol de un factor esencial” establece una relación de equivalencia en el conjunto de los factores esenciales (E, \sim).

El conjunto de clases de equivalencia tiene tres elementos:

$$E = \{A, T, S\}$$

La figura 3 muestra la clasificación de los factores esenciales mediante las cuestiones del “para hacer”.

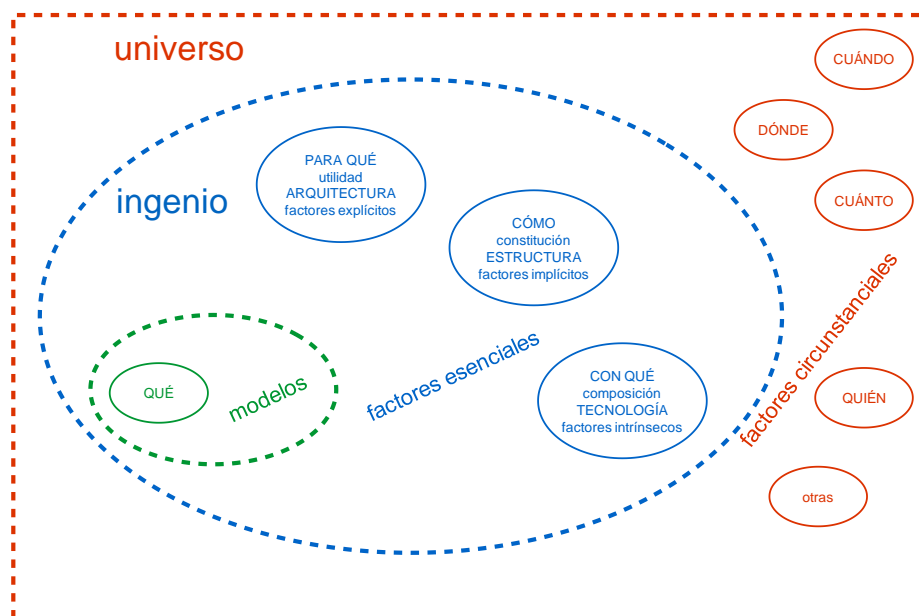


Fig. 3. Clases de factores esenciales y su significado en las fases de toma de decisiones de diseño.

Análogamente a lo que ocurre con los factores de diseño en general, para los factores esenciales puede darse el caso de que factores genuinamente tecnológicos o estructurales (ej.: tecnología CMOS) vengan impuestos en la hipótesis. Es decir, la imposición de causalidad al método de diseño que estamos formalizando puede dar lugar a que factores intrínsecos o implícitos formen parte de los objetivos que debe satisfacer el problema. En tal caso, ese mismo factor (tecnología CMOS) puede

obtenerse como respuesta a la cuestión “para qué”, lo cual descompondría la clasificación. Para que tal inconveniente no surja, imponemos la condición de prevalencia de lo específico de un problema (establecido en la hipótesis) sobre lo genuino para que un factor esencial sea explícito, implícito o intrínseco pero tenga solamente un rol.

1.2. Ordenación de las clases de factores esenciales

Nos proponemos ordenar las tres clases de factores esenciales con la finalidad de utilizar dicha ordenación como criterio para determinar cuáles son las decisiones de diseño sobre los factores esenciales que hay que tomar antes y cuáles son las que corresponde tomar después.

Un factor esencial dado “es parte de” otro factor esencial, si el primero es un factor esencial del segundo (vistos como cosas, sistemas o hechos). Cada factor esencial es factor esencial de sí mismo. Los factores intrínsecos son parte de los factores implícitos, y éstos lo son de los explícitos.

La sentencia “ser un factor de diseño parte de otro” ordena los factores esenciales: (E,>)

$$T < S < A$$

Los factores de diseño y, por lo tanto el método de diseño está ordenado:

factores circunstanciales < tecnología < estructura < arquitectura < modelo

Como, por otro lado, la hipótesis expresa al problema con enfoque desde el exterior, corresponde al ámbito del modelo y a la arquitectura, y es la que constituye el hito de inicio de la actividad de diseñar, la secuencia correcta que hay que seguir para tomar decisiones de diseño es la que establece en primer lugar el modelo de problema que va a caracterizar a la solución, seguidamente, tomar las decisiones sobre la arquitectura del problema, después sobre la estructura y organización de la solución, seguidamente sobre la tecnología y, finalmente, las decisiones sobre el contexto en que tiene lugar la creación de dicha solución.

Luego, la secuencia coherente de diseño es:

modelo → arquitectura → estructura → tecnología → factores circunstanciales

En términos de las cuestiones del “para hacer”, la secuencia coherente de preguntas es:

qué → para qué → cómo → con qué → las demás

La figura 4 muestra la secuencia causalmente coherente del método de diseño de arriba hacia abajo.

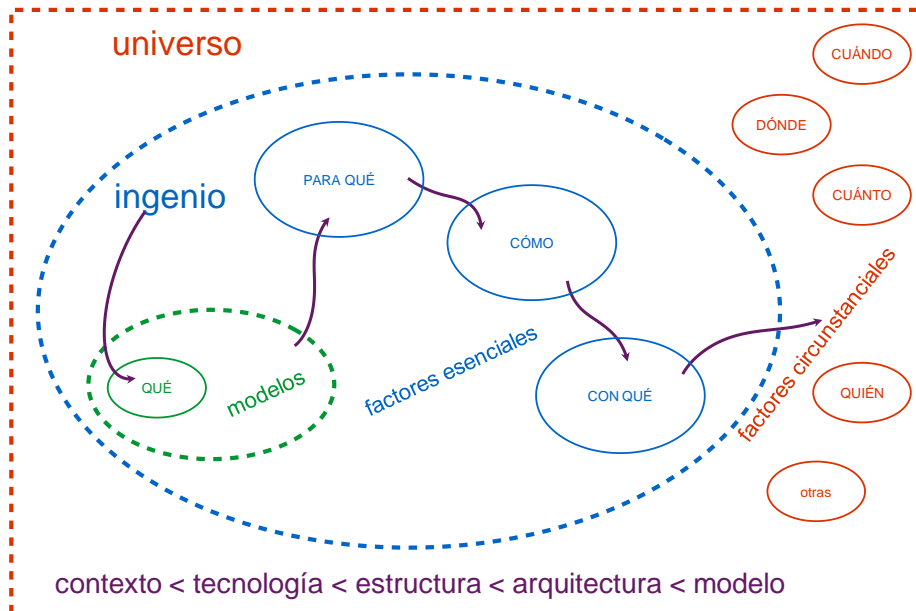


Fig. 4. Secuencia de diseño de arriba hacia abajo.

5. Especificación de problemas y de soluciones

5.1. Especificación formal de los problemas

La segunda etapa de la fase de especificación formal es la de la arquitectura, es decir, la funcionalidad o las prestaciones que debe satisfacer una solución. Se obtiene contestando a la cuestión “para qué”, lo cual proporciona los objetivos del problema desde un punto de vista externo, además de potenciales desafíos que el entorno plantea a la solución y los inconvenientes que puede tener la solución al problema, que puedan derivarse de lo enunciado en la hipótesis. La tabla 7 contiene los objetivos para el ejemplo de la ensalada.

Tabla. 7. Objetivos que debe satisfacer el problema de la ensalada.

Objetivos de la ensalada (incluyendo desafíos e inconvenientes)	
núm	Objetivo
o1	Valor nutritivo
o2	Aroma agradable
o3	Sabores diversos
o4	Apariencia atractiva
o5	Precio bajo
o6	Frescura

Nótese que los dos últimos objetivos son genuinamente factores circunstanciales pero el hecho de ser objetivos los convierte en factores esenciales explícitos. La definición ahora es la siguiente: “Ensalada es una mezcla fresca de verduras con valor nutritivo, con aroma agradable, sabores diversos, apariencia atractiva y precio bajo.”

El modelo del problema junto con los objetivos, extraídos de la hipótesis y del estado del arte, que el problema debe satisfacer responden, respectivamente, a las cuestiones “qué es el problema” y “para qué sirve su solución”, esto es, la caracterización del problema visto desde el punto de vista de su universo y, por lo tanto, bajo un enfoque externo. La relevancia de este aspecto radica en que la aproximación externa, objetivista, independiza de potenciales condicionantes que podrían provenir de preconcepciones sobre la solución. La definición del problema es claramente formal ya que denota exclusivamente la naturaleza del problema y su utilidad, con independencia de la naturaleza y las características de la solución que finalmente se provea.

La especificación formal admite una estructura sintáctica sencilla que consiste en un predicado transitivo para asignar la identidad del modelo y otro predicado formal para asignar los objetivos como una conjunción.

<problema> <verbo ser> <artículo> <modelo> <preposición> <objetivo> (<conjunción> <objetivo>)* “.”

Algunos ejemplos de especificación formal se muestran en la tabla 8:

Tabla. 8. Ejemplos de especificación formal.

Especificación formal de problemas	
problema	especificación formal
tomate	es una fruta con tegumento delgado y endotelio carnoso y ácido y con semillas planas
marchar	es desplazarse linealmente sobre una superficie desde una posición inicial hasta otra posición final
ensalada	es una mezcla fresca de verduras con valor nutritivo y con aroma agradable y con sabores diversos y con apariencia atractiva y con precio bajo

A modo de resumen, el proceso para obtener una expresión formal del problema parte de la hipótesis y consiste en los siguientes pasos:

- Corregir los errores e inconsistencias de la conjetura inicial.
- Expresar los requerimientos (enfoque interno) que la hipótesis contiene como objetivos (enfoque externo).
- Decidir un modelo de referencia para el problema.
- Completar los objetivos mediante el estudio del estado del conocimiento.

- Expresar formalmente el problema como la composición de un predicado sobre el modelo y otro sobre los objetivos.

La especificación formal del problema proporciona información declarativa y utilitaria sobre el mismo, es decir, da a “conocer” el problema.

Para proporcionar una solución, se requiere que la información sobre el problema sea constitutiva y operacional, es decir, “conocer cómo”, para poder identificar los elementos de que consta, y “conocer cómo hacer”, para poder operar transformaciones sobre los elementos.

1.2. Especificación estructural de las soluciones

Para obtener una solución, se requiere hacer una interpretación del problema desde el punto de vista interno ya que hay que entender de la naturaleza de sus elementos y de las relaciones entre ellos. Esos elementos, y esas relaciones constituyen la estructura, la organización y los ingredientes de las soluciones, y cada enfoque del problema desde el punto de vista interno puede producir distintas soluciones del problema.

En este apartado indicamos un método para obtener la especificación estructural y la organización de una solución dentro del marco de la teoría de grafos, como un par que consiste en un árbol que define una estructura jerarquizada de los módulos de la solución, y en un grafo dirigido que organiza las relaciones entre los módulos.

El recorrido partiendo de la hipótesis que puede contener requerimientos (visión interna informal), para obtener una especificación formal de objetivos (visión externa formal), y nuevamente una especificación estructural y organizacional que consiste en requerimientos (visión interna formal), constituye un proceso de ida y vuelta para obtener lo que teníamos al principio pero objetivado, completado, expresado con exactitud y corrección, y dentro del marco formal de la teoría de grafos.

Sean los objetivos las condiciones que se imponen al problema (enfoque externo), sean los requerimientos las prestaciones que ha de tener una solución (enfoque interno), sean los desafíos las condiciones que el contexto puede imponer al problema (enfoque externo), y sean los inconvenientes las limitaciones que puede tener una solución (enfoque interno).

El punto de partida para obtener la especificación estructural es la especificación formal y, por lo tanto, de lo que se trata es de proponer un conjunto de requerimientos de una solución, con la condición de que los requerimientos proporcionen una cobertura que satisfaga el conjunto de los objetivos. Como al proponer requerimientos pueden surgir desafíos o inconvenientes, la obtención de la cobertura final debe también superar los desafíos, y contrarrestar los inconvenientes. Resumidamente, los requerimientos han de: satisfacer los objetivos, superar los desafíos y contrarrestar los inconvenientes.

Cualquier conjunción de los requerimientos de una solución puede interpretarse como otro requerimiento que constituye la condición de un subproblema del problema inicial, y una solución de ese subproblema es un módulo de la estructura de una solución del problema inicial. En consecuencia, una cobertura mediante requerimientos del conjunto de los objetivos del problema, los desafíos y los inconvenientes, proporciona un árbol de dos niveles: el nivel 0 contiene un nodo raíz

que representa a una solución del problema y el nivel 1 contiene un nodo por cada requerimiento de la cobertura, representando cada nodo a un módulo de la solución. Para el ejemplo de la ensalada, la fase de especificación estructural consiste en contestar a la cuestión “cómo” es la ensalada, obteniendo los requerimientos de la solución. Seguimos la estrategia de enunciar requerimientos para obtener una cobertura de los objetivos y eventualmente los desafíos e inconvenientes que pudieran haber surgido en la especificación funcional, o surgir ahora asociados a los requerimientos. Las tablas 9 y 10 muestran un conjunto de requerimientos para el ejemplo de la ensalada y la secuencia a seguir para obtenerlo.

Tabla. 9. Requerimientos de una solución al problema de la ensalada para cubrir los objetivos de la tabla 7.

Requerimientos de la ensalada para cubrir los objetivos							
		objetivos					
		o1	o2	o3	o4	o5	o6
		valor nutritivo	sabores diversos	aroma agradable	apariencia atractiva	precio bajo	frescura
requerimientos							
r1	base de verduras frescas de buena calidad	✓	✓		✓		✓
r2	núcleo a base de quesos ligeros	✓	✓		✓		
r3	aderezo a base de aceite de oliva	✓	✓	✓			
r4	elaborar justo antes de servir						✓
r5	incluir pasta en la ensalada					✓	
r6	servir raciones reducidas					✓	

Tabla. 10. Aparición de desafíos e inconvenientes al definir los requerimientos, y requerimientos adicionales para superar esos desafíos y contrarrestar esos inconvenientes.

Aparición de desafíos e inconvenientes, y requerimientos adicionales									
		objetivos, desafíos e inconvenientes							
		o1	o2	o3	o4	o5	o6	d1	i1
		va- lor nu- tri- tivo	sa- bo- res di- ver- sos	aro- ma a gra- da- ble	apa- rien- cia atra- cti- va	pre- cio ba- jo	fres- cu- ra	ace- ite ca- ro	so- bre car- ga co- ci- na
requerimientos									
r 1	base de verduras fres- cas de buena calidad	✓	✓		✓		✓		
r 2	núcleo a base de quesos ligeros	✓	✓		✓				
r 3	aderezo a base de aceite de oliva	✓	✓	✓					
r 4	elaborar justo antes de servir						✓		
r 5	incluir pasta en la ensa- lada					✓		✓	
r 6	servir raciones reduci- das					✓		✓	
r 7	planificación de con- tingencias								✓

Debido al requerimiento r3, aderezo a base de aceite de oliva, surge el desafío d1, aceite caro. Para superar este nuevo desafío, habría que incorporar requerimientos adicionales. En este ejemplo no es necesario ya que los requerimientos r5, incluir pasta en la ensalada, y r6, servir raciones reducidas, permiten superar el desafío del encarecimiento debido a la incorporación de aceite de oliva.

El requerimiento r4, elaborar justo antes de servir, lleva aparejado el inconveniente i1, sobrecarga cocina, ya que desencadena contingencias temporales para montar la ensalada, y ello obliga a una planificación correctiva de la actividad en la cocina, es decir, a incorporar el requerimiento r7, planificación de contingencias, para contrarrestar el inconveniente de instantaneidad.

La figura 5 muestra una selección de los módulos de la ensalada que cubre los objetivos, supera los desafíos y contrarresta los inconvenientes. El conjunto de requerimientos {r1, r2, r3, r5, r7} proporciona una solución al ingenio ensalada.

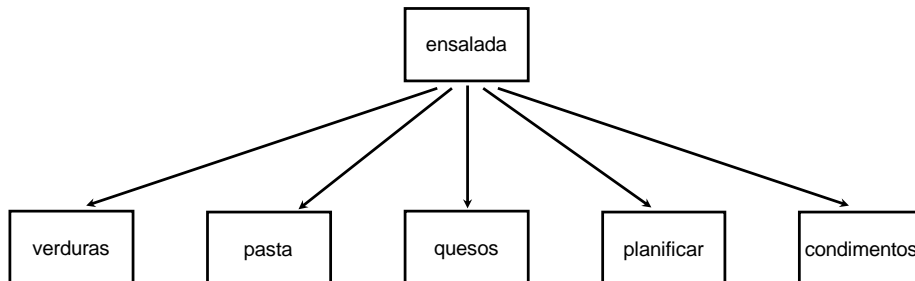


Fig. 5. Niveles 0 y 1 del árbol estructural de la ensalada.

Recursivamente, proceder para cada nodo del nivel inferior como si el subproblema que representa fuera un nuevo problema, es decir, considerando que los requerimientos de ese nodo representan a la hipótesis del subproblema que resuelve. La condición de terminación es obtener nodos que sean solución trivial o conocida. Las hojas del árbol estructural son los módulos elementales que resuelven los subproblemas atómicos, es decir, los componentes tecnológicos de la solución. Proporcionan la respuesta a la cuestión “con qué” está hecha la solución.

La figura 6 muestra un árbol estructural completo para el ejemplo de la ensalada, asumiendo que las materias primas son las que aparecen como nodos hoja, es decir, que las verduras, la pasta, los condimentos y los quesos se adquieren en el mercado, y que el programa de planificación también existe.

Si fuera el caso de un restaurante que tiene su propio huerto, cada nodo de las verduras sería, a su vez, la raíz de un subárbol que represente al proceso agrícola de producción de la verdura correspondiente.

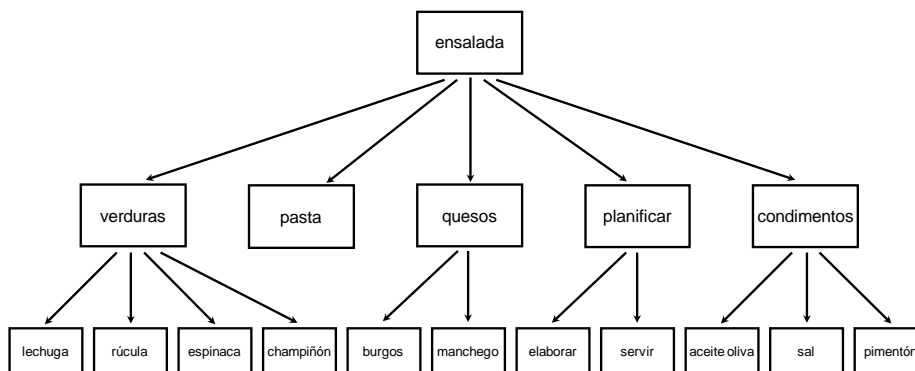


Fig. 6. Árbol estructural de una solución organoléptica al problema de la ensalada.

1.3. Organización de una estructura

La organización de la estructura de una solución es un grafo dirigido que expresa las relaciones entre los módulos de esa solución. Los nodos representan a los módulos de la estructura y cada arista representa una relación entre los nodos que conecta. El grafo de mayor detalle de la organización es el que contiene los nodos hoja del árbol estructural pero también es un grafo de la organización cualquiera otro cuyos nodos pertenezcan al árbol estructural y cumpla la condición de que sean alcanzables todos los nodos hoja, directamente, o indirectamente a través de los nodos ascendientes.

El algoritmo que proponemos para construir los grafos de la estructura es el siguiente:

- Construir un grafo cuyos nodos sean los nodos del nivel 1 del árbol estructural.
- Definir las aristas de relación entre los nodos del grafo.
- Para cada nodo del árbol estructural que se expande en el subárbol de sus hijos:
 - Reemplazar, en el grafo de organización, al nodo por sus hijos.
 - Propagar, a los hijos que corresponda, cada arista del nodo reemplazado.
 - Definir las aristas de relación entre los hijos del nodo reemplazado.

En el ejemplo de la ensalada con estructura organoléptica, una posible solución puede ser la siguiente:

- Organización con los nodos del nivel 1 del árbol estructural (figura 7). Los nodos “verduras” y “pasta” constituyen el módulo “lecho de verduras con pasta”. Cada uno de los otros nodos queda como un módulo. El módulo “planificar” es el destino de los demás.
- Organización con los nodos del nivel 2 del árbol estructural (figura 8). El módulo “planificar” se descompone en los módulos “elaborar” y “servir”. El módulo “condimentos” se descompone en los módulos “sal” y “aliño”, consistiendo este último en una maceración de aceite de oliva y pimentón. La sal se sirve por separado. Cada arista de organización que conectaba a dos nodos del nivel 1 se ha desglosado en las aristas que relacionan nodos del nivel 2 de los subárboles correspondientes. Además, para cada subárbol con raíz en el nivel 1, se relacionan los nodos dentro del propio subárbol.

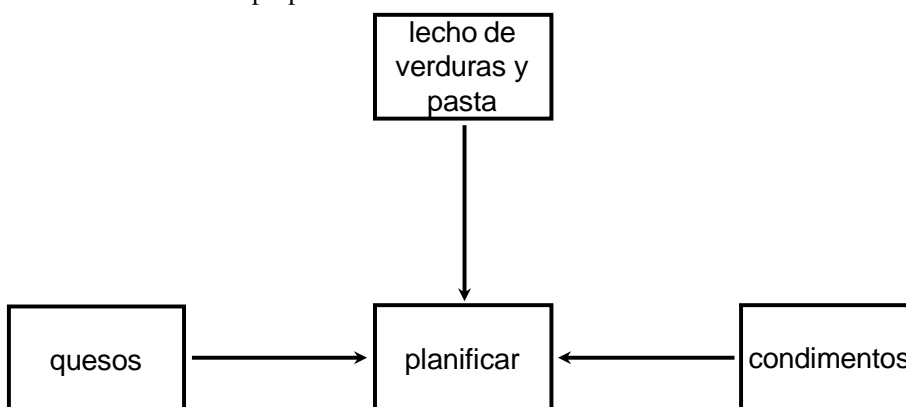


Fig. 7. Grafo de la organización entre los nodos del nivel 1 de la estructura.

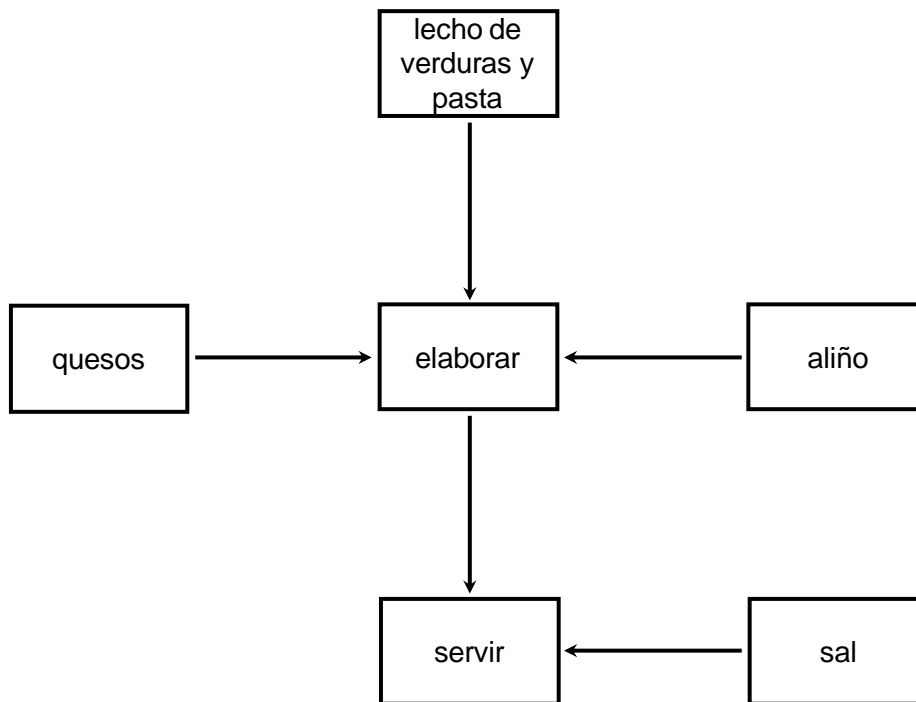


Fig. 8. Grafo de organización de la ensalada.

6. Decisiones de diseño sobre los factores circunstanciales

Los factores circunstanciales caracterizan el contexto en que tiene lugar la actividad en sí de realización de la solución que se diseña. Dicho contexto consiste en la respuesta a todas las demás preguntas del “para hacer” que sean distintas del modelo y de los factores esenciales, es decir, en la respuesta a las cuestiones “cuando”, “quién”, “cuánto”, “dónde”, etc.

La conclusión del análisis del estado del conocimiento sobre el contexto de la realización de la solución a un problema es que hay tantos procedimientos como autores, es decir, cada ingeniero utiliza criterios propios para tomar las decisiones contextuales de diseño, y lo hace siguiendo una secuencia particular, según preferencias propias e incluso distinta para cada problema que resuelve [Banville, 1989].

Tal ausencia de sistematización avala que, con carácter general, carece de sentido conceptual que haya precedencia de ningún tipo entre los factores circunstanciales. En la práctica, esto, que es una obviedad, da lugar a diversas secuencias procedimentales de toma de decisiones sobre el contexto. Por ejemplo, es frecuente que las respuestas a la cuestión “cuánto” estén entre las primeras que se abordan, provocando notable

impacto en la calidad de la solución. También podemos encontrar soluciones obtenidas con criterio de conceder precedencia a las respuestas de la cuestión “quién es el autor” pero con categoría de cuestión de contexto. Esas soluciones suelen tener la impronta estilística del autor. Precedencia de las respuestas a la cuestión “quién es el autor” que vaya más allá, sitúa a estas respuestas en la categoría de los factores esenciales explícitos (para qué) y puede producir soluciones en que los aspectos estilísticos estén por encima de otros factores arquitecturales como la propia usabilidad o la robustez de la solución (casas inhóspitas, puentes impracticables, catedrales interminables, smartphones que se doblan,...).

Conceptualmente, está claro que la justificación de las secuencias de acciones, para tomar las decisiones sobre la parte contextual de una solución, es independiente del problema.

La consecuencia formal es que, en el caso general, no existen relaciones de orden que sean causales, es decir, inspiradas en el problema. La consecuencia metodológica es que la definición del contexto de resolución de un problema es una actividad intrínsecamente paralela. Por lo tanto, el tratamiento que corresponde es el de la concurrencia de un conjunto de objetivos contextuales que debe alcanzar la solución.

Definimos el contexto de resolución de un problema como otro problema que puede resolverse recursivamente de arriba hacia abajo basándose en la formalización algebraica propuesta en este documento para la parte arquitectural (la de los factores esenciales) de los problemas.

A lo más que podemos llegar en el caso general es a proponer un modelo para el contexto de un problema.

Definición. El contexto general de un problema es otro problema cuyo dominio es el conjunto de factores de diseño contenidos en las respuestas de las preguntas circunstanciales del primero, excluidas las que constan explícitamente en su hipótesis, y cuya condición es nula.

7. Conclusiones

Este artículo propone la clasificación de las decisiones que toman los ingenieros para diseñar soluciones a los problemas de ingeniería a que se enfrentan. Hemos obtenido cinco clases de decisiones: las orientadas al problema son las decisiones sobre el modelo; las orientadas a la solución son las decisiones sobre la arquitectura, la estructura, y la tecnología; y las decisiones sobre la realización del prototipo son las del contexto. Respectivamente, son decisiones para conocer, para conocer cómo, y para cómo hacer, y las hemos vinculado empíricamente a la actividad intuitiva de contestar, respectivamente, a las cuestiones “qué”, “para qué”, “cómo”, “con qué”, y “las demás”, que son implícitas a la pregunta universal “qué es lo que hay que hacer para hacer una cosa”. A las respuestas a esas cuestiones, es decir, los elementos de las clases de decisiones, las hemos llamado factores de diseño.

Hemos ordenado las clases de factores de diseño según la secuencia: modelo > arquitectura > estructura > tecnología > contexto. Con esto, disponemos de un base formal para establecer un método para que el ingeniero tome las decisiones de diseño. El hecho de que la hipótesis representa una versión del problema cercana a dominio del modelo y de la arquitectura, hace que el diseño, para que sea causalmente correcto, tenga que empezar por tomar decisiones sobre el modelo que proporciona el marco a la solución, y continuar tomando decisiones secuencialmente según el orden que hemos encontrado.

Dentro de cada clase de factores de diseño, los criterios de precedencia para determinar cuáles son las decisiones de diseño que hay que tomar antes y cuáles han de subordinarse, dependen de los objetivos de optimización y, por lo tanto, de cada problema o de cada solución. Por ejemplo, las decisiones de diseño sobre la estructura (selección de unos u otros requerimientos, árbol de módulos más horizontal o con más niveles, etc.) no están sujetas a un método general independiente del problema, sino que están dirigidas por los objetivos de optimización, que son dependientes de cada caso. Lo mismo ocurre en cuanto a las decisiones de diseño sobre el contexto, de manera que no es posible pronunciarse con carácter general sobre la precedencia de los aspectos modales del diseño, es decir, no hay criterio general para establecer precedencia entre las decisiones sobre tiempos, precios, autoría, y los demás aspectos del contexto de diseño.

Referencias

1. [Crespi, 2008] Crespi, V., Galstyan, A. & Lerman, K., Top-down vs bottom-up methodologies in multi-agent system design, *Autonomous Robots*, Vol 24 Issue 3, pp. 303-313, 2008. DOI 10.1007/s10514-007-9080-5
2. [Kundert, 2001] Kundert, K, A Formal Top-Down Design Process for Mixed-Signal Circuits, Url: <http://designers-guide.org/Design/top-down.pdf>, 2001.
3. [Kundert, 2003] Kundert, K. Principles of Top-Down Mixed- Signal Design, Url: <http://www.designers-guide.org/Design/tdd-principles.pdf>.
4. [Balasubramanian, 2006] Balasubramanian, K., Gokhale, A., Karsai, G., Sztipanovitis, J., & Neema, S., Developing Applications Using Model-Driven Design Environments, *Computer*, Vol. 39 no 2, pp. 33-40, 2006. DOI 10.1109/MC.2006.54
5. [Mäntylä, 1990] Mäntylä, M., A modeling system for top-down design assembled products, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 34 Issue 5, pp 636-659, 1990. DOI 10.1147/rd.345.0636
6. [Edunpuganty, 1989] Edunpuganty, B. & Bryant B.R., "Two-level Grammar as a Functional Programming Language", *Oxford Journals - Mathematics & Physical Sciences - Computer Journal*, Vol. 32, Issue 1, pp. 36-44, 1989.
7. [Wijngaarden, 1965] Wijngaarden, van A., "Orthogonal design and description of a formal language", *Stichting Mathematisch Centrum*, pp. 1-25, 1965.
8. [Qi, 2009] Qi, F., "A assembly modeling method based on assembly feature Graph-Tree model", *Industrial Engineering and Engineering Management*, 2009. IE&EM '09. 16th International Conference on. DOI 10.1109/ICIEEM.2009.5344360
9. [Huang, 2008] Huang, J. & Zhang, H., "Multi-Granularity Modeling of virtual prototyping in collaborative product design" *Computer Supported Cooperative Work in Design*,

- CSCWD 2008. 12th International Conference on, pp. 710 - 715, 2008. DOI 10.1109/CSCWD.2008.4537065
10. [Zhang, 2013] Zhang, C.; Mao, H.; Peng, G. & Zhang, H. "A novel BOM based multi-resolution model for federated simulation", Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), 2013 IEEE 17th International Conference on, On page(s): 178 - 183, 2013. DOI 10.1109/CSCWD.2013.6580959
 11. [Brunetti, 2000] Brunetti, G. & Golob, B. "A feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information", Computer-Aided Design, Vol 32, Issue 14, pp. 877-8827, December 2000. DOI 10.1016/S0010-4485(00)00076-2
 12. [Otto, 2001] Otto, H.E. "From concepts to consistent object specifications: Translation of a domain-oriented feature framework into practice" Journal of Computer Science and Technology, Vol 16, Issue 3, pp 208-230, May 2001. DOI 10.1007/BF02943200
 13. [Spivey, 1992] J.M. Spivey, "The Z notation: a reference manual", Prentice Hall International (UK) Ltd. Hertfordshire, UK, 1992, ISBN:0-13-978529-9.
 14. [Duke, 1995] R. Duke, G. Rose & G. Smith, "Object-Z: A specification language advocated for the description of standards", Computer Standards & Interfaces, Vol. 17, pp. 511-533, 1995.
 15. [Jackson, 2002] D. Jackson, "Alloy: a lightweight object modelling notation", ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, Vol. 11, Issue 2, pp. 256-290, 2002.
 16. [Gomez, 1999] Gómez, F., Segami, C. & Delaune, C. "A system for the semiautomatic generation of E-R models from natural language specifications", Data & Knowledge Engineering, Vol. 29, pp. 57-81, 1999.
 17. [Deeptimahanti, 2009] Deeptimahanti, D.K. & Ali Babar, M., "An Automated Tool for Generating UML Models from Natural Language Requirements", IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, pp. 680-682, 2009.
 18. [Ilieva, 2005] Ilieva, M. G. & Ormandjieva, O., "Automatic Transition of Natural Language Software Requirements Specification into Formal Presentation", Lecture Notes in Computer Science Natural Language Processing and Information Systems, Vol. 3513, pp. 392-397, 2005.
 19. [Meziane, 2008] Meziane, F., Athanasakis, N. & Ananiadou S., "Generating Natural Language specifications from UML class diagrams", Requirements Engineering, Vol. 13, pp. 1-18, 2008
 20. [Brunel, 1998] J. M. Brunel & R. B. France, "Transforming UML models to formal specifications", Proceedings of the OOPSLA, 1998.
 21. [Coleman, 1994] Coleman, D., Arnold, P., Bodoff, S., Dollin, C., Gilchrist, H., Hayes, F. & Jeremaes, P., "Object-Oriented Development: The Fusion Method", Prentice Hall, 1994.
 22. [Hannay, 2007] Hannay, J.E.; Sjoberg, Dag I.K. & Dyba, Tore, "A Systematic Review of Theory Use in Software Engineering Experiments", IEEE Transactions on Software Engineering, Vol 33, Issue: 2, pp 87 - 107, 2007. DOI 10.1109/TSE.2007.12.
 23. [Gregg, 2001] Gregg, D.G., Kulkarni, U.R. & Vinzé, A.S., "Understanding the Philosophical Underpinnings of Software Engineering Research in Information Systems" Information Systems Frontiers, Vol 3, Issue 2, pp 169-183, 2001. DOI 10.1023/A:1011491322406
 24. [Sjoberg, 2007] Sjoberg, Dag I.K. ; Simula Res. Lab., Lysaker ; Dyba, Tore ; Jorgensen, M., "The Future of Empirical Methods in Software Engineering Research", Future of Software Engineering, 2007. FOSE '07, pp. 358 - 378. DOI 10.1109/FOSE.2007.30

25. [Easterbrook, 2008] Easterbrook, S.; Singer, J.; Storey, M.A. & Damian, D.; "Selecting Empirical Methods for Software Engineering Research"; Guide to Advanced Empirical Software Engineering, pp 285-311. 2008. DOI 10.1007/978-1-84800-044-5_11
26. [Stol, 2013] Stol, K.-J. ; Lero-The Irish Software Eng. Res. Centre, Univ. of Limerick, Limerick, Ireland ; Fitzgerald, B., "Uncovering theories in software engineering", Software Engineering (GTSE), 2013 2nd SEMAT Workshop on a General Theory of, pp.5-14, 2013. DOI 10.1109/GTSE.2013.6613863
27. [Wieringa, 2011] Wieringa, R. ; Dept. of Comput. Sci., Univ. of Twente, Enschede, Netherlands ; Daneva, M.; Condori-Fernandez, N., "The Structure of Design Theories, and an Analysis of their Use in Software Engineering Experiments", Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM), 2011 International Symposium on, pp. 295 - 304, 2011. DOI 10.1109/ESEM.2011.38
28. [Landry, 1995] Landry, M., A note on the concept of 'Problem', Organization Studies Vol.16/2, pp. 315-343, 1995.
29. [Agre, 1982] Agre, G.P., The Concept of Problem, Educational Studies: A Journal of the American Educational Studies Association, Vol. 13:2, pp. 121-142, 1982. DOI: 10.1207/s15326993es1302_1
30. [Preston, 1991] Preston, A. M., 'The "problem" in and of management information systems'. Accounting, Management and Information Technologies. Vol 1, Iss 1. pp 43- 69. 1991. doi:10.1016/0959-8022(91)90012-4
31. [Banville, 1989] Banville, C.; Landry, M. Can the Field of MIS be Disciplined? Communications of the ACM. Vol 32. 1, pp. 48-60,1989.