

# Proyecto Integrador

BMJIvan

August 2021

## 1. Definiciones

|                     |                    |  |
|---------------------|--------------------|--|
| Mecatronics journal | 1991<br>M, E       | Balance óptimo de estructuras mecánicas y control  |
| IEEE/ASME           | 1996<br>M, E, C    | Integración sinérgica, diseño y manufactura de producto y procesos   |
| Bishop              | 2002<br>M, E, I    | Proceso en evolución, integración, sinérgica   |
| Amerogen            | 2003<br>M, E       | Diseño como un todo  |
| Iserman             | 2005<br>M, E, I, C | Integrar sistemas, diseño simultaneo, balance óptimo entre estructuras, actuadores, sensores, información y control  |
| Bolton              | 2008<br>M, E, C    | Completa integración   |
| De Silva            | 2008<br>M, E, I, C | Sinergia y diseño integrado, sistemas electromecánicos, grado de inteligencia, más preciso, exacto, seguro, flexible, funcional y mecánicamente menos complejo |
| Sheltty y Kolk      | 2011<br>M, E, I    | Diseño óptimo, productos electromecánicos, concurrencia y sinergia   |
| Merzouki            | 2013<br>M, E, C    | Mejorar sistemas mecánicos con control inteligente. Reemplazar componentes mecánicos con electrónica   |
| Cetinkowt           | 2015<br>M, E, I    | Integración sinérgica, nivel de sistemas. Diseño simultaneo para obtener un diseño óptimo  |

Tabla 1: Definiciones

1. Ingeniería concurrente (CE): Es un enfoque sistematizado para el diseño concurrente de productos y procesos, considerando desde el inicio todos los elementos que componen el ciclo de vida del producto.

Principales objetivos Incrementar la calidad del producto, la reducción general del gasto y la reducción del tiempo de desarrollo. Principales características

- Mejor definición del problema de diseño
  - Implementación de herramientas de manufactura y ensamble en la etapa de diseño
  - Mejora de la estimación del costo
  - Reducción de problemas entre los procesos de diseño y manufactura
2. Ingeniería de sistemas: Consiste en el desarrollo de sistemas que sean capaces de satisfacer requerimientos dentro de un conjunto de restricciones bien definidas.

Sistema: Es un conjunto o colección de diferentes elementos que en conjunto producen resultados que no se podrían obtener de forma independiente.

Modelo TTDSE (Traditional Top-Down System Engineering) Se compone de dos etapas principales

- S1: Análisis de necesidades, definición del sistema, definición de subsistemas, definición de componentes y definición de configuración de componentes.
- S2: Verificación desde la configuración de componentes al sistema final, validación y aprobando los resultados obtenidos. (modelo V)

Modelo espiral: Consiste de cuatro procesos

- Planificación: investigación
- Análisis y evaluación de riesgos: diseño y prototipo
- Desarrollo y pruebas
- Aprobación: mantenimiento, retroalimentación

Existen tres tipos de arquitecturas para sistemas

- A1: Arquitectura funcional-lógica  
Define que es lo que el sistema debe hacer, las acciones o funciones del sistema. Incluye modelos de información, procesos y el comportamiento inicial. (Modos de operación)
- A2: Arquitectura física Define los componentes, ensambles y elementos físicos que se requieren para el cumplimiento de las funciones, también representa las conexiones físicas entre componentes, sistemas, subsistemas y elementos.

- A3: Arquitectura de asignación Es el mapeo o relación de funciones y recursos necesarios. Se define el modelo final de comportamiento del sistema.

## 2. Diseño del sistema

### 2.1. Conceptos

- Necesidad: Es el resultado de una transformación de uno a más conceptos en un expectativa para el cumplimiento de una función con cierto o dentro de cierto rendimiento. Indicadores de calidad (KPI).
- Requerimiento: Es el resultado de una transformación de una o más necesidades en una obligación para cumplir cierta función dentro de las cotas establecidas.

### 2.2. Clasificación general de requerimientos

1. Requerimientos funcionales: Algo que el sistema debe hacer o proveer.
2. Requerimientos no funcionales: Alguna propiedad o atributo que el sistema debe tener pero que no se modifica el comportamiento o cumplimiento de las funciones que desempeña (deben cumplirse, pero no afecta la funcionalidad).
3. Restricción: Son las fronteras en las que el sistema debe operar. Comúnmente se enlistan dentro de los requerimientos funcionales y no-funcionales.

Un requerimiento debe definir qué es lo que debe hacer, no como hacerlo.  
¿Por qué se necesitan?

- Para definir el alcance del proyecto.
- Para asegurar el cumplimiento de las expectativas.
- Para poder reportar un progreso.
- Para medir el avance en el proceso del diseño.

Principales características

1. Necesario
2. Singular
3. Correcto
4. inequívoco
5. Realizable
6. Completo: Tenga un rango
7. Ajustable: Que se pueda medir

### **2.3. Términos**

- Necesidad: Expectativa no tangible
- Requerimiento: Algo acotado
- Especificación: Valor final medible
- Diseñar: Cumplir requerimientos
- Necesidad no funcional: Son aquellas que no afectan la función principal

### **3. Dominios en el desarrollo de sistemas mecatrónicos**

#### **3.1. Dominio lógico o funcional: funciones, relación, comportamiento**

Es el dominio donde se lleva a cabo la descomposición de funciones, la función principal que el sistema debe realizar es dividida en funciones que busquen definir y describir el comportamiento del sistema. Así mismo, deben cumplir los objetivos de diseño, los requerimientos y las necesidades.

El dominio puede dividirse en  $m$  espacios, de acuerdo a los niveles jerárquicos de funciones. Una función puede definirse de manera general como la transformación de una entrada en una salida. Esta transformación debe mantener el índice de desempeño deseado. Las entradas y salidas de la transformación deben ser del tipo

1. Materia
2. Energía
3. Información

#### **3.2. Clasificación de funciones**

Las funciones se puede clasificar en los siguientes tipos

1. Función principal: Es una parte fundamental del sistema, es lo que cumple el comportamiento del sistema. Es predominante independiente. A partir de esta función, se puede definir las funciones propias del sistema.
2. Funciones secundarias: Son las funciones requeridas para que el sistema cumpla con la función principal.
3. Funciones básicas: Son funciones que un sistemas mecatrónico debe desempeñar, sin importar los objetivos de diseño, necesidades y requerimientos.
4. Funciones irrealizables: Son funciones que debido a fenómenos físicos o tecnología actual no pueden realizarse.

La descomposición de funciones se debe realizar de una forma jerárquica y sistematizada. Se recomienda que cada nivel (espacio) contenga las funciones que permitan describir el comportamiento del sistema. El proceso de descomposición es iterativo.

#### **3.3. Relación entre funciones**

La interrelación entre funciones está definida por la conexión y la comunicación de las entradas y salidas, describiendo en conjunto el comportamiento del sistema.

Se puede definir una función de manera general como:

Donde  $\{$  es la función que transforma las entradas de  $A$  en las salidas de  $B$ .

Cuando una función está compuesta de dos funciones ( $f_1, f_2$ ), la relación entre ellas se puede definir como:

1. Si la trayectoria de  $f_1$  está contenida en  $f_2$  se considera que las funciones son secuenciales. Se puede definir la relación como la composición de funciones ( $f_1 \circ f_2$ ). Las salidas de  $f_1$  se convierten en las entradas de  $f_2$ .
2. Si la trayectoria de cada función es independiente, entonces las funciones son paralelas y su transformación puede ser simultánea. El operador ".AND" se emplea para describir esta operación.
3. Si la trayectoria de cada función es independiente, son paralelas, pero no pueden realizar la transformación simultánea. Se emplea el operador "XOR".



## **4. Arquitectura funcional**

### **4.1. consideraciones para generar la arquitectura funcional**

1. Las funciones deben ser claras.
2. Entender la conexión y comunicación entre funciones.

### **4.2. Esta compuesta por los siguientes tres modelos**

1. Jerarquía de funciones (FBS: Function, Behaviour, Structure)
2. Relación entre funciones (IDEF-0: Integration Definition for Function Modeling)
3. Comportamiento entre funciones (EFFBD: Enhanced Function Flow Block Diagram)

Considerando los atributos de sistemas mecatrónicos, y las funciones generales del sistema propuesto. Las funciones genéricas del sistema mecatrónico son:

- F10: Medición de parámetros del sistema y entorno.
- F20: Detección de errores del sistema.
- F30: Interacción con el usuario.
- F40: Administración de decisiones, proceso de aprendizaje, manejo del conocimiento.
- F50: Acondicionamiento de entradas y salidas.
- F60: Almacenamiento de información.
- F70: Comunicación interna y externa.
- F80: Recuperación de la funcionalidad.
- F90: Desempeñar funciones propias del sistema.
- F100: Soporte y protección.
- F110: Administración energética (alimentación, conversión, distribución, almacenamiento)

### 4.3. Principales errores al generar la arquitectura funcional

- Mejorar dominios, incluir funciones que describen el comportamiento, sistemas o componentes físicos en la misma arquitectura. Por ejemplo: HMI (Human Machine Interface), cuando la función que desempeña es la interacción con el usuario.
- Inconsistencias en la salida de las funciones, deben representar la transformación.
- Elegir nombres confusos e incorrectos para las funciones, entradas o salidas.
- Que la función represente o desarrolle más de una función.
- La arquitectura (modos de operación) no representa el comportamiento completo del sistema.
- Las salidas del sistema y las funciones no representan las expectativas y necesidades del sistema.

### 4.4. Modelo EFFBD

Permite en la arquitectura funcional determinar el comportamiento que tiene un sistema a través del flujo de funciones. Este flujo está definido como el trayecto que siguen las entradas y salidas a lo largo de transformaciones.

#### 4.4.1. Generalidades

Las funciones se representan con bloques, estos tienen un indicador (el mismo que se obtiene de la estructura funcional).

Existen dos tipos de entradas y salidas, las entradas "pasivas" y las entradas "activas".

Las activas se refieren a que mantienen su flujo activo mientras se realiza la transformación. Las pasivas ya no transmiten flujo hasta que termine la transformación.

## 5. Comportamiento entre funciones

Para describir el comportamiento se tiene cuatro tipos de operadores lógicos.

1. AND
2. OR (paralelo), XOR (no se puede en paralelo)
3. LOOP
4. ITERACION

Estos operadores se representan con un círculo y su símbolo se emplean deben aparecer al inicio y al fin de su uso. En el caso de los operadores "LP", se deben incluir la condición a la que están sujetas.

Al inicio y al término del modelo se deben incluir funciones o acciones de referencias: se expresan como:

Existen otro tipo de funciones que son tentativas, es decir, no siempre existen. Estas se representan con bloques punteados.

Si existieran elementos actuadores del comportamiento, estos se modelan con rectángulos con aristas redondeadas.

Para evaluación del diseño se emplea el coeficiente de diseño mecatrónico (MQD). Con los siguientes atributos.

1. Inteligencia
2. Robusto
3. Flexible
4. Adaptable
5. Eficiencia del ensamble

## 6. Dominio físico

El dominio físico es la transformación de las funciones que el sistema debe desempeñar en componentes físicos. Estos pueden ser partes, ensambles, módulos, dispositivos, sistemas.

La representación del dominio físico es mediante un diagrama a bloques, denominado arquitectura funcional, con base en las funciones generadas de un sistema mecatrónico, se propone la siguiente arquitectura.

Con base en teoría de sistemas, un sistema mecatrónico se puede considerar como un "sistema de sistemas"(SoS), y a su vez el sistema que tiene mayor impacto en el sistema mecatrónico se denomina como "sistema de interés"(SoI).

## 7. Diseño conceptual

Con base en los sistemas que conforman la arquitectura física se requiere comenzar a buscar posibles soluciones. Estas soluciones deben cumplir las funciones, los requerimientos y las necesidades.

La integración de las soluciones por cada uno de los módulos se denomina diseño conceptual.

### 1. Análisis morfológico, caja morfológica

- De cada característica se requiere al menos una posible solución.
- Posibles soluciones, no importa si parecen "absurdas".
- Mayor cantidad de posibles soluciones.

No

- Componentes
- Materiales
- Procesos de manufactura

Si

- Mecanismos
- Controladores
- Formas
- Métodos
- Ubicación componentes

### 2. Generar combinaciones

- Deben ser congruentes
- De 3 a 5 combinaciones
- Deben incluir todas las características
- Deben buscar el mejor desempeño de las funciones

Cada combinación se denomina "Diseño conceptual"

### 3. Seleccionar el mejor diseño conceptual

- Generar los criterios de selección
- Determinar una herramienta de selección multicriterio
- Resolver el problema de selección

### 4. Analizar resultados del método de selección

### 5. Comprobar

## 8. Método de selección multicriterio

Los métodos de selección multicriterio se emplean en el diseño de sistemas mecatrónicos en la etapa de conceptualización y detalle. Estos métodos permiten al diseñador la toma de decisiones a lo largo del proceso, sin embargo, estas decisiones dependerán de la formulación de los criterios que permiten la decisión.

Dentro de la etapa de selección se encuentran: redes neuronales, AHP, lógica difusa, PERT, tablas ponderadas, entre otros.

### 8.1. Metodo AHP: Analytic Hierarchy Process

Fue propuesto por Thomas Seaty para la toma de decisiones. A continuación, se describirá el método general.

1. Se define una escala de 9 niveles para comparación directa donde cada nivel representa el cumplimiento o satisfacción con respecto a la comparación.

En caso de existir dudas en la escala, se emplean los valores intermedios 2, 4, 6 y 8. Se construye la matriz de comparación directa de los criterios de selección y se realiza la evaluación.

La diagonal se compone de unos que son igualmente importantes esos criterios. Debido a la relación simétrica de comparación, los valores asignados representan el inverso al comparar de forma inversa los criterios.

2. Una vez que se tiene la matriz  $M_{cr}$  se normaliza dividiendo cada columna por la suma de sus valores en ella, de tal forma que la suma de cada columna sea de 1.
3. Se obtiene el vector prioridad de los criterios sumando los vectores columna y dividiendo entre el número de ellos.
4. Evaluación de los características o combinaciones a seleccionar por cada criterio. se sigue el mismo procedimiento para la matriz de criterios, pero esta vez comparando cada característica, es decir, las diferentes posibilidades para cada criterio. Se obtendrá un vector por cada criterio. Y al unirlos se obtendrá una matriz.
5. Obtenemos el ranking global a partir de los vectores de prioridad, se multiplica la matriz de características por el vector de prioridad para evaluar cada combinación.

\*Ponderados: consiste en usar solo valores 1 y 0

## **9. Selección de diseño conceptual y componentes**

### **9.1. Criterios de selección para el diseño conceptual**

Un criterio de selección debe permitir elegir y comparar entre las opciones de diseño conceptual generados. Esta selección debe ser clara, no debe dejar a dudas para el diseñador.

Los criterios deben proponerse con base en las funciones y comportamientos que el sistema debe realizar, es decir, se debe buscar definir criterios que permitan "medir" el rendimiento de las funciones.

Deben estar fundamentadas en las necesidades y requerimientos definidos anteriormente.

Se recomienda definir al menos tres criterios por cada característica que conforma el diseño conceptual.

### **9.2. Selección de componentes**

Un componente se define como un elemento que desempeña una función o varias funciones de un sistema. Estos componentes son los que el diseñador no va a diseñar, sino seleccionar. Los componentes son también denominados partes.

Para la selección de componentes se emplearán dos herramientas.

1. Árbol de decisión: permite realizar una ruta y clasificación de los componentes de forma general.
2. Método de selección multicriterio: Permitiendo definir el componente "único" que se empleará a través de los criterios de selección.

Para la selección de los componentes se necesitan los requerimientos y funciones que va a desempeñar.

### **9.3. Proceso de selección de componentes**

1. Identificar el tipo de componente que se requiere con base en las funciones que debe desempeñar, por ejemplo, medición de temperatura, generación de movimiento lineal.
2. Con base en los requerimientos, se requiere una investigación profunda para determinar cuáles pueden ser los fabricantes y proveedores. Estos siempre serán los que puedan aportar mayor información.
3. Una vez identificados los proveedores (fabricantes), investigar y analizar los catálogos de sus productos. Es aconsejable que se revisen al menos tres fabricantes (si es que existen).

Es recomendable que se contacte con el fabricante para explicar las funcionalidades y requerimientos del componente, esto facilita la selección. Puede que recomienden un modelo o una familia.

4. Aplicar el árbol de decisión a través de la información analizada de los catálogos, funcionalidades y requerimientos. Se pueden hacer preguntas que determinen y acaten el universo de componentes posible.



## 10. Confiabilidad e integración del sistema

Es la probabilidad de que el sistema desempeñe sus funciones dentro de los índices de desempeño requeridos.

Para determinar la confiabilidad de componentes que se encuentren en serie se aplica

$$R(T) = R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_i \quad i = 1, \cdots, n$$

Donde  $n$  es la cantidad de componentes en serie. Gráficamente se expresan como

Por ejemplo, un sistema de engranes montados a un eje, determine confiabilidad del sistema.

Para determinar la confiabilidad de los componentes que están en paralelo se aplica

$$R_T = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \cdots (1 - R_i) \quad i = 1, \cdots, n$$

Donde  $n$  es la confiabilidad de componentes en paralelo, gráficamente se expresa como

### 10.1. Integración del sistema

La integración en el proceso de diseño mecatrónico es fundamental ya que tiene como propósito asegurar el comportamiento del sistema dentro de un rendimiento deseado, es decir, se busca que cada una de las partes del sistema operen de forma armónica.

El proceso de integración también debe ser jerárquico, va integrando los componentes hasta volverse módulos, y posteriormente integra los módulos para convertirse en sistemas, y finalmente en el sistema mecatrónico.

El proceso de integración se divide en

1. Integración de hardware: es la unión entre cada uno de los componentes físicos, son conexiones físicas, unión mecánica, contacto.
2. Integración de software: es la unión de componentes a través de información o energía, por ejemplo, algoritmo, control, protocolo, comunicación.

En el proceso de integración es necesario diseñar nuevos componentes y/o modificar existentes para asegurar la integración armónica.

## **11. Validación y verificación**

El proceso de validación y verificación es transversal o paralelo ya que se desarrolla a lo largo del proceso de diseño. Usualmente se desarrolla con ayuda de los procesos de modelado y simulación.

### **11.1. Validación**

Validación es el proceso para determinar si se ha diseñado el sistema en forma correcta, y cumple con índices de desempeño, y las necesidades-requerimientos.

Algunas de las validaciones existentes son

- Validación operacional
- Validación concepto
- Validación requerimiento
- Validación función

### **11.2. Verificación**

La verificación es la coincidencia de los componentes, ensambles, módulos y sistemas en los requerimientos para asegurar que se han logrado correctamente.

Dentro de las técnicas y herramientas que existen para verificar el sistema, se encuentran las siguientes

- Análisis del sistema
- Estructura del sistema
- Análisis del valor (ingeniería del valor)
- Análisis de requerimientos (QFD)

### **11.3. Validación y verificación del sistema**

Existen 4 métodos para la evaluación completa de un sistema

- Pruebas instrumentales con equipo calibrado
- Análisis y simulaciones, computacionales y analíticas
- Demostraciones o pruebas funcionales ante un jurado
- Examinación de la documentación

El desarrollo de prototipos a lo largo del proceso de diseño, permite que los interesados del proyecto validen y verifiquen de forma constante.

El proceso termina con la aceptación del sistema.

Un prototipo es un modelo físico del sistema que no incluye todos los aspectos, pero permite analizar algunas partes o funcionalidades específicas.

La validación de los procesos de manufactura y ensamble son requeridos, el análisis de la secuencia del ensamble, las tolerancias de manufactura, minimizar costos de manufactura, ensamble, herramientas, tiempos, entre otras cosas.

#### **11.4. Matriz de trazabilidad**

Para determinar el cumplimiento de las necesidades, requerimientos, funciones y sistemas, se emplean a lo largo del proceso de diseño, las matrices de trazabilidad.

1. Necesidades-requerimientos
2. Requerimientos-funciones
3. funciones-sistemas/modelos

Todas las necesidades deben tener al menos un requerimiento asociado.

Una función sin requerimientos: hace más de lo que debería hacer.

Si no existen funciones asociadas a todos los requerimientos, quizá falta definir funciones.

Índice: Valor tangible para evaluar