

# Aplicación de la metodología de diseño axiomático en el desarrollo de productos de liberación modificada\*

## Applying axiomatic design methodology in developing modified liberation products

Bibiana Vallejo<sup>1</sup>, Carlos Cortés<sup>2</sup>, Armando Espinosa<sup>3</sup>, Helber Barbosa<sup>4</sup>

### RESUMEN

En esta investigación fueron desarrollados algunos elementos conceptuales de la metodología de diseño axiomático para un caso específico de estudio, como es el desarrollo de un comprimido de liberación modificada (CLM-UN), para uso en el sector agrícola como agente regulador de pH en suelo. El estudio se orientó hacia la definición de requerimientos funcionales, parámetros de diseño y variables de proceso, para la manufactura del comprimido. Como resultados se presenta la evaluación de los axiomas de independencia e información. Se encontró que la aplicación de la metodología de diseño axiomático constituye una alternativa para enfrentar la actividad de diseño integral de producto y proceso, como un ejercicio racional y sistémico, que facilita la generación de productos con los atributos de calidad que espera el futuro usuario de éstos.

**PALABRAS CLAVES:** diseño, requerimientos funcionales, parámetros de diseño, variables de proceso, axiomas.

### ABSTRACT

Some conceptual elements regarding the axiomatic design method were applied to a specific case-study regarding developing modified liberation compressed product (CLM-UN), for use in the agricultural sector as pH regulating agent in soil. The study was orientated towards defining functional requirements, design parameters and process variables for manufacturing the product. Independence and information were evaluated, supporting axiomatic design as an alternative for integral product and process design (as a rational and systemic exercise), facilitating producing products having the quality which future users expect from them.

**KEY WORDS:** design, functional requirement, design parameter, process variable, axiom.

Recibido: Septiembre 29 de 2004

Aceptado: Noviembre 24 de 2004

## I. Introducción

Cuando se desarrolla un producto se pretende contribuir a la sociedad en la satisfacción de sus necesidades. El desarrollo involucra actividades como la identificación del problema a partir de un conjunto difuso de expresiones lingüísticas de los potenciales usuarios del producto, seguido de una etapa con elevado componente creativo, en donde el diseñador genera las alternativas posibles de solución, y esto a su vez es seguido por la etapa analítica, o de evaluación, donde a partir de la confrontación entre alternativas posibles y especificaciones definidas se llega a una conclusión sobre cuál puede ser la mejor alternativa (1,2).

En el desarrollo integral de un producto, la etapa inicial comprende la definición clara del tipo de producto a diseñar; en este sentido, en un proceso de diseño se generan alternativas, a partir de la identificación de los atributos de diseño claves y los niveles de estos atributos, y de allí se generan, mediante permutación de atributos sobre sus niveles, las posibles alternativas de diseño (3).

El proceso se inicia reconociendo las necesidades de la sociedad, que son formalizadas, generando un conjunto de FR (requerimientos funcionales). La selección de FR, que define el problema de diseño, es entregada al diseñador. Una vez la necesidad se formaliza, las ideas son generadas para crear un producto (o sistema). Este

1 Q.F. Especialista, MSc, Profesora Asistente de la Universidad Nacional de Colombia. bmvalljod@unal.edu.co

2 Ing Mecánico, MSc., Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. cjcortesi@unal.edu.co

3 Ing Químico, MSc., Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia. aespinosah@unal.edu.co

4 Q.F. Profesor Asociado, MSc, Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia

\* Maestría en ingeniería - materiales y procesos de manufactura, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia - sede bogotá.

producto es analizado y comparado con las condiciones originales de FR, a través de una retroalimentación de lazo cerrado. Cuando el producto no satisface completamente los FR especificados, entonces se da lugar a la generación de una nueva idea o al cambio de los requerimientos funcionales para reflejar la necesidad original de forma más exacta. Este proceso iterativo continúa hasta alcanzar un resultado aceptable (4).

Este procedimiento convencional de diseño ocasiona demoras en el proceso y lleva a considerar el desarrollo de productos independiente de su proceso de manufactura, se incrementa la necesidad de ensayos y finalmente los resultados pueden no ser del todo satisfactorios para las expectativas del usuario.

## II. Diseño axiomático

El diseño axiomático es una metodología cuyos orígenes se remontan a los años ochenta, tiene como fundamento ayudar al diseñador a estructurar y entender los problemas del diseño, facilitando la síntesis y análisis de los requerimientos de diseño adecuados, las soluciones y procesos. (1,2).

La teoría de diseño axiomático ha sido estudiada para el diseño de productos, (5,6,7,8,9), procesos, (10, 11, 12), desarrollo de software, (13, 14, 15) y en empresas servicios, (16,17); sin embargo, su estudio y aplicación hasta ahora comienza a ser estudiada en el desarrollo de productos con actividad sobre seres vivos (18).

El diseño axiomático se fundamenta en los siguientes conceptos:

1. Existencia de cuatro dominios en el mundo del diseño: dominio del usuario, dominio funcional, dominio físico y dominio del proceso; cada uno de éstos, con su vector característico: atributos del usuario, requerimientos funcionales, parámetros de diseño y variables de proceso, respectivamente. El proceso de diseño en conjunto incluye el procesamiento continuo de información entre y dentro de los cuatro dominios identificados (Figura 1).

2. Las alternativas de solución son creadas por la descripción en detalle de los requerimientos especificados en un dominio para establecer los parámetros característicos en el dominio siguiente. La relación entre los dominios del usuario y funcional es definida como el concepto de diseño; la relación entre los dominios funcional y físico es el diseño de producto; la relación entre los dominios físico y de proceso corresponden al diseño del proceso (1).

3. La existencia de restricciones (C) o valores límites, especificaciones o fronteras que una solución de propuesta de diseño debe satisfacer. Son definidas por el diseñador y se diferencian de los FR, en que las C no tienen que ser independientes de otras C o FR.

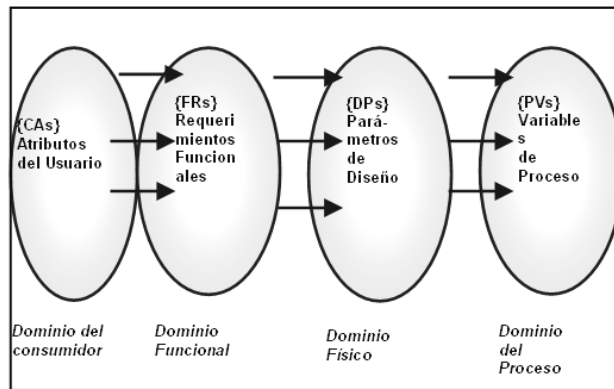


Fig. 1. Dominios del diseño axiomático

4. El proceso de mapeo o relación entre dominios, puede ser expresado matemáticamente en términos de los vectores característicos que definen el objetivo del diseño y la solución de diseño (1,4).

5. La salida de cada dominio desarrolla los conceptos de lo abstracto a información detallada en una forma jerárquica priorizada. La descomposición jerárquica en un dominio puede no ser llevada a cabo independientemente de otros dominios, así la descomposición sigue una relación en zigzag entre dominios adyacentes.

6. La existencia de dos axiomas de diseño proveen una base racional para evaluar las alternativas de solución propuesta y la subsecuente elección de la mejor alternativa. Los dos axiomas se han descrito en los siguientes términos (4,19).

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{Bmatrix}$$

Vector Requerimientos funcionales	Matriz de diseño del producto	Vector parámetros de Diseño
---	-------------------------------------	-----------------------------------

Ecuación 1

**Axioma 1**, axioma de independencia, busca mantener la independencia de los requerimientos funcionales. Esto significa que es posible satisfacer un requerimiento funcional (FR), mediante el cambio de un parámetro de diseño (DP) y no habrá ningún otro cambio en los FR, por cambios en el DP.

**Axioma 2**, axioma de información, pretende minimizar el contenido de información del diseño. Es la medida del conocimiento requerido para satisfacer un FR dado o la capacidad tecnológica para lograrlo.

Cuantitativamente se puede definir la información como:

$$I = \log_2 (\text{rango} / \text{tolerancia}),$$

notando que:

$$\text{tolerancia} / \text{rango} = \text{probabilidad de éxito}$$

La aplicación del axioma de independencia se puede describir en términos de una matriz de diseño. La matriz de diseño (DM) muestra la relación entre los FR y DP a un nivel dado de la jerarquía del diseño. La matriz de diseño {A} resulta de una ecuación de diseño tal como la ecuación 1, de donde se establece que el proceso de mapeado puede ser expresado matemáticamente (19).

De la misma forma, los DP establecidos en el dominio físico son un vector, así como las PV del dominio del proceso para establecer la ecuación del proceso, tal como se presenta en la ecuación 2.

La aplicación del concepto de ingeniería concurrente requiere que los procesos de mapeado y descomposición entre dominios se realicen simultáneamente, verificando el cumplimiento de los dos axiomas de diseño (1,4,19).

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_n \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{Bmatrix}$$

Vector Requerimientos Funcionales	Matriz de diseño del producto	Vector Parámetros de Diseño
---	-------------------------------------	-----------------------------------

Ecuación 1

Cada línea de la ecuación del vector puede escribirse de acuerdo con la ecuación 3:

$$\begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} PV_1 \\ \vdots \\ PV_n \end{Bmatrix}$$

Vector Parámetros de Diseño	Matriz de diseño del proceso	Vector Variables de Proceso
-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

Ecuación 2

$$FR_i = \sum_j A_{ij} DP_j$$

Ecuación 3

La matriz de diseño [A], tiene la forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix}$$

Ecuación 4

Cada elemento  $A_{ij}$  en la ecuación 4 de la matriz asocia un componente del vector FR a un componente del vector DP. En términos generales el elemento  $A_{ij}$  se puede expresar según la ecuación 5, como:

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$$

Ecuación 5

Cuando se evalúa el cumplimiento del axioma de independencia, la matriz resultante debe ser diagonal o triangular, ésta puede representarse con el valor X cuando existe un fuerte efecto de un DP sobre un FR, y un valor O indica que no hay efecto relativo a la tolerancia asociada con el FR.

Con relación al axioma de información, su definición se basa en un concepto de probabilidad que busca cuantificar la cantidad de conocimiento necesaria para alcanzar un FR o un DP, según el dominio que se esté evaluando. En la medida en que se requiere un mayor nivel de conocimiento, se ingresa a niveles más complejos de información, por lo cual, entre menor contenido de información involucre un diseño, mejor será esta propuesta (1,4,19).

El contenido de información es definido en términos de probabilidad "p", donde este concepto se asocia con el logro o alcance de los FR definidos; de acuerdo con la ecuación 6, el contenido de información es cero cuando la probabilidad es igual a uno; considerando que el contenido de información tiene la unidad "bit", se toma el logaritmo en base dos para su determinación (4).

$$I = \text{Log}_2 (1/p)$$

Ecuación 6

Esta expresión puede especificar que el contenido de información es simplemente el logaritmo del rango definido para una variable, dividido por su tolerancia, de esta forma el contenido de información puede escribirse como aparece en la ecuación 7.

$$I = \text{Log}_2 (\text{rango} / \text{tolerancia})$$

Ecuación 7

La información del sistema diseñado finalmente se expresa en términos de las probabilidades  $P_i$  de cada  $FR_i$ , ecuación 8.

$$I_{\text{sistema}} = \text{Log}_2 * P_{\text{sistema}}$$

$$\text{Log}_2 * P_{\text{sistema}} = \log_2 P_1 + \log_2 P_2 + \dots + \log_2 P_n$$

Ecuación 8

### III. Metodología

En este trabajo fueron establecidas varias fases para llevar a cabo la aplicación de la metodología. En primer lugar se establecieron las propiedades de los materiales a emplear para el desarrollo del comprimido.

Con la información obtenida se procedió a definir cada uno de los dominios y sus correspondientes vectores característicos, y a partir de los resultados obtenidos se plantearon las ecuaciones correspondientes y fueron evaluados los axiomas de independencia e información.

Los ensayos de caracterización fueron de tipo farmacotécnico para definir las propiedades de los materiales en la formación de un comprimido de liberación modificada de uso agroindustrial.

En la definición de atributos del usuario se utilizaron metodologías como QFD y espacio de solución, y éstos fueron transformados en requerimientos funcionales, los cuales determinaron el punto de partida para aplicar la metodología de diseño axiomático.

En la determinación de la funcionalidad del producto se empleó una técnica analítica volumétrica que permitió hacer el seguimiento de la velocidad de liberación de una sustancia con actividad (principio activo) sobre el suelo y establecer el comportamiento de liberación del producto desarrollado.

#### IV. Resultados

##### A. Definición de los atributos del usuario (CA)

En la definición preliminar de la arquitectura del producto se partió de la información recopilada sobre las ventajas que representa la utilización de hidrogeles en un sistema constituido por el suelo o tierra y la planta, para utilizarlos en sistemas de liberación modificada (20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27,28).

En la siguiente etapa fueron definidos los "CÓMO", que corresponden a aquellas características de calidad, a través de las cuales el listado de "QUÉ" puede ser realizado. Las dificultades para su definición se basaron en las expresiones cualitativas, que son imprecisas y ambiguas, debido en parte a su origen lingüístico.

Los atributos se clasificaron de acuerdo a tres categorías: suelo, planta y riego, y para cada uno de ellos se señalaron las características que esperaba un potencial usuario del producto y se asignó una importancia relativa entre 1 y 10, basada en la relevancia del atributo; siendo 10 muy importante y 1 sin importancia.

Con el fin de disminuir las fallas que se cometen al tratar de definir los "CÓMO", para los "QUÉ" anteriores, especialmente al encontrarse en un nivel de detalle que no da lugar a una determinación confiable mediante la metodología QFD, se recurrió al empleo de una alternativa metodológica que permitiera suplir en alguna medida estas dificultades, tal es el caso del análisis funcional y espacio de solución, opción que se utilizó para diferenciar los requerimientos funcionales de las restricciones y categorizar la importancia de los requerimientos, así como las relaciones funcionales entre las partes que constituyen el comprimido de liberación modificada objeto del estudio.

##### B. Análisis de funciones y definición del producto

La definición de la arquitectura del producto fue una de las tareas más críticas en el diseño propuesto.

A partir de la metodología de análisis funcional, se establecieron las funciones de diseño y las relaciones existentes entre los posibles componentes de éste. Se confrontó la verdadera relación entre los posibles componentes y su necesidad de ser incluidos en un diseño, así como la interrelación entre éstos para dar una mayor funcionalidad al producto.

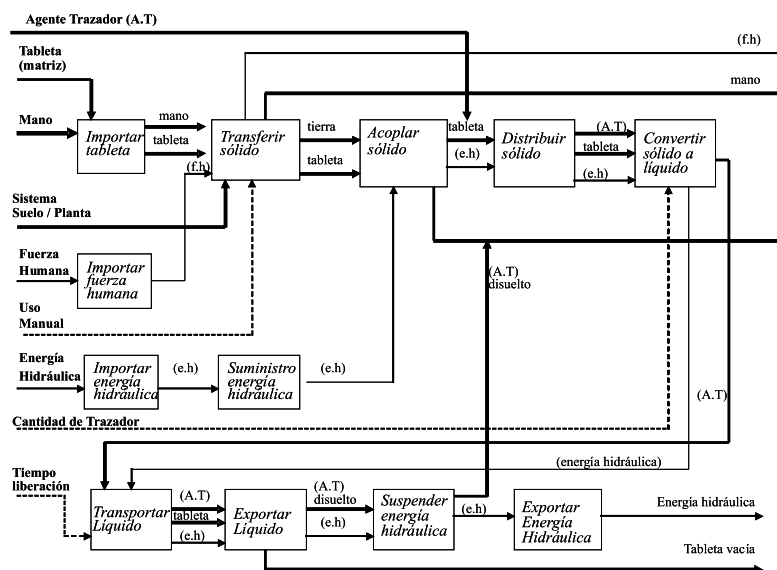


Fig. 2. Modelo funcional para el producto CLM-UN

En el modelo funcional se definió como flujo de materiales al comprimido o tableta, el sistema tierra-planta, el agente trazador (principio activo) y la mano humana como elemento necesario para la colocación del producto, por que su aplicación planteó que fuera de tipo manual. La Figura 2 presenta el modelo funcional para el producto.

Los flujos de energía están constituidos por la energía hidráulica-difusional y la acción humana. Finalmente, los flujos de información se representan mediante la cantidad de trazador (principio activo), el tiempo de liberación y la manipulación del producto.

En el desarrollo de este modelo funcional se estableció cómo la tableta o comprimido de liberación modificada que contiene un principio activo se ubicará manualmente en un sistema conformado por suelo (tierra) - planta, y con ayuda de la humedad del medio (energía hidráulica) se llevará a cabo el proceso de difusión, durante el cual será cedido el principio activo al medio externo, dejando un residuo de materiales en el medio, una vez finalice la cesión. El proceso de transferencia al suelo tendrá lugar en la medida en que se disponga de principio activo en la

tableta, así como de la suficiente energía hidráulica para que tenga lugar el fenómeno de difusión.

## V. Definición de Requerimientos Funcionales

En la definición de los atributos del usuario deben conocerse las necesidades y deseos del futuro usuario del producto; para este caso era importante que el diseño del comprimido propuesto pudiera liberar una sustancia en un sitio específico y permitiera un tiempo prolongado de contacto entre la planta y el producto, exponiendo el principio activo a la absorción en el sistema el mayor tiempo posible.

Esto reforzó la calificación obtenida en el método QFD, donde los atributos de mayor importancia se orientaron hacia la capacidad de retención de agua y el menor consumo de sustancias fertilizantes.

La siguiente actividad consistió en la identificación de los "DEBE" para el diseño del comprimido de liberación modificada, **CLM-UN**, en este sentido se comenzó por desafiar y definir los requerimientos de producto, construyendo una visión para la solución. Para cada perspectiva se identificaron los "debe" relacionados con los factores de éxito, que fueron determinados como aquellas características que se esperarían reuniera completamente el producto.

Así, el producto libera una cantidad determinada de una sustancia activa, en un lugar específico y durante un período de tiempo establecido. El producto es compatible con el medio ambiente y es seguro para su manipulación.

El FR fundamental es controlar la liberación de una sustancia activa en el sistema suelo-planta, de este requerimiento principal se derivaron los requerimientos que resumen la funcionalidad del producto que se pretendía desarrollar:

FR<sub>1</sub>: el principio activo se libera desde el comprimido al sistema suelo-planta.

FR<sub>2</sub>: la liberación del principio activo desde el comprimido es lenta durante un periodo como mínimo de cinco días.

## VI. Definición de Parámetros de Diseño

La siguiente actividad consistió en la desagregación y traducción de estos requerimientos en expresiones de ingeniería, asignando métrica y valor según fuera el caso, para ser asociados con sus correspondientes parámetros de diseño en el dominio de lo físico y simultáneamente asociarlos con el dominio del proceso, identificando las variables correspondientes.

Asociado a los dos requerimientos funcionales identificados previamente, se encontraron los siguientes parámetros de diseño:

DP<sub>1</sub>: relación entre principio activo y excipientes, composición del producto

DP<sub>2</sub>: mecanismo de liberación por difusión controlada

A partir de la definición de los FR y DP y la relación existente entre ellos, se planteó la propuesta de ecuación de diseño, ecuación 9:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Liberación principio} \\ \text{activo} \\ \\ \text{Tiempo mín. de} \\ \text{libera. 5 días} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} A & A \\ 11 & 12 \\ A & A \\ 21 & 22 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \text{Composición producto} \\ \text{Difusión controlada} \end{array} \right\}$$

Ecuación 9

Los elementos  $A_{ij}$  representan el grado de acoplamiento entre los FR<sub>i</sub> y los DP<sub>j</sub>, los elementos diagonales no son todos cero, porque cada DP fue seleccionado para satisfacer directamente el FR.

En el caso de este comprimido la liberación del principio activo y el tiempo que ésta pueda tomar, está asociado directamente con la composición del producto. Puede considerarse a la proporción entre materiales como el parámetro de diseño más crítico en este tipo de productos.

## VII. Definición de variables de proceso

En la metodología de diseño axiomático, la actividad que continúa es el mapeado entre el dominio físico y el dominio del proceso.

Las variables de proceso PV<sub>i</sub> para los DP anteriores fueron:

PV<sub>1</sub>: índice de mezcla igual o próximo a uno

PV<sub>2</sub>: friabilidad de los comprimidos menor o igual a 1%

En cuanto al proceso, éste fue establecido como una compresión directa de los materiales, mediante la aplicación de una fuerza directa, favoreciendo la deformación plástica de éstos.

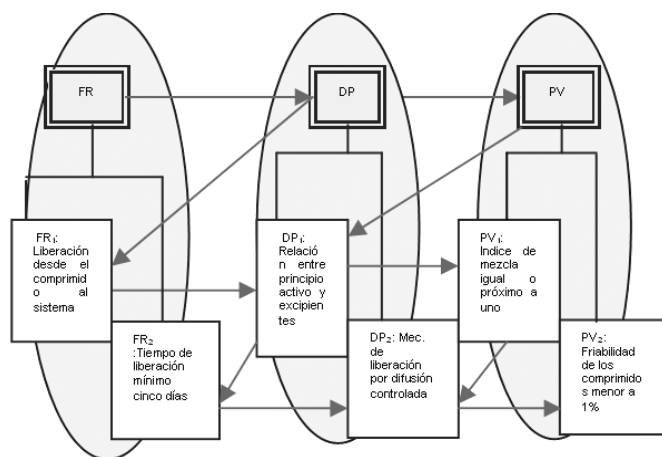


Fig. 3. Descomposición entre dominios al primer nivel

El mapeado entre dominios a este primer nivel se representa en la Figura 3.

### VIII. Evaluación formal del axioma de independencia

La evaluación fue llevada a cabo para el primer nivel de descomposición en la matriz presentada en la ecuación 9, puede considerarse que la liberación al sistema suelo planta se representa como  $V$ , el tiempo de liberación  $t$ , la composición del producto  $X$  y el mecanismo de difusión controlada como  $D$ .

Los elementos de la matriz de diseño se pueden escribir de la forma:

$$A_{11} = \left( \frac{\partial V}{\partial X} \right); \quad A_{12} = \left( \frac{\partial V}{\partial D} \right); \quad A_{21} = \left( \frac{\partial t}{\partial X} \right); \quad A_{22} = \left( \frac{\partial t}{\partial D} \right)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial D} \\ \frac{\partial t}{\partial X} & \frac{\partial t}{\partial D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix}$$

Donde el término  $\frac{\partial t}{\partial X}$  define el efecto de la composición sobre el tiempo de liberación.

La ecuación de Higuchi (29), describe la tasa de liberación del principio activo disperso en un sistema matricial, ecuación 10.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = C_0 \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{C_s}{2}$$

Ecuación 10

Donde:

$M$ : cambio en la cantidad de principio activo liberado por unidad de área

$h$ : cambio en el espesor de la matriz cuando se agota el principio activo

$C_0$ : cantidad total de principio activo por unidad de volumen en la matriz

$C_s$ : concentración de saturación del principio activo dentro de la matriz

De la teoría de difusión se establece la ecuación 11 (30).

$$\partial M = \frac{D m C_s}{h} \partial t$$

Ecuación 11

Donde:

$Dm$ : coeficiente de difusión en la matriz

Cuando se integran las ecuaciones 10 y 11, y resolviendo para  $h$ , se encuentra la ecuación 12:

$$M = [C_s Dm (2 C_0 - C_s) t]^{1/2}$$

Ecuación 12

Cuando la cantidad de principio activo está en exceso la concentración de saturación es  $C_0 \gg C_s$ , entonces la ecuación tiene la forma:

$$M = (2 C_s Dm C_0 t)^{1/2}$$

Ecuación 13

La ecuación 13 indica que la cantidad de principio activo liberado es una función de la raíz cuadrada del tiempo, y de la misma forma esta ecuación se representa para un comprimido de tipo poroso como la que fue utilizada en este estudio; la diferencia radicó en que para el caso el principio activo pasa fuera de la matriz a través de canales llenos de fluido, los poros que se encuentran presentes en el comprimido y las tortuosidades que se forman en el proceso, la ecuación tiene la forma:

$$M = \left[ Ds Ca \frac{p}{T} (2 C_0 - pCa) t \right]^{1/2}$$

Ecuación 14

Donde:

$p$ : porosidad de la matriz

$T$ : tortuosidad

$Ca$ : solubilidad del principio activo en el medio de liberación.

Mediante las expresiones anteriores se explicó la dependencia entre la composición de un comprimido y su comportamiento de liberación, en función del tiempo que puede tardar la entrega del principio activo al sistema. A esto se debe el acoplamiento en  $A_{21}$ .

### IX. Evaluación del axioma de información

Para evaluar el cumplimiento de este axioma se utilizó una variable de proceso, el peso promedio de los comprimidos elaborados, la cual está asociada al parámetro de diseño ángulo de reposo. En la evaluación del contenido de información se encontró que para un lote el contenido de información es cero, lo cual significa que la tecnología disponible permitía la obtención de comprimidos con peso promedio adecuado.

La forma en la cual se estableció el rango del diseñador fue a partir del valor objetivo definido como caso, 600 mg, y el rango establecido desde el comienzo fue entre 570 y 630 mg.

A continuación se definió el rango del sistema, que para este proceso específico correspondió al valor de la media obtenida, más o menos tres desviaciones estándar, predeterminando la normalidad del sistema. La asignación de tres desviaciones estándar más o menos, se asocia al concepto de capacidad del proceso, que corresponde a las variaciones inherentes al proceso de manufactura.

Así, el rango del sistema resultó de tomar el valor de la media de un lote experimental, que fue 592.80 mg, la desviación estándar calculada fue igual a 0.212, y al establecer las tres desviaciones estándar se encontró un rango para el sistema entre 592.16 mg y 593.44 mg.

Finalmente, se estableció sobre el gráfico el rango de intersección entre el rango del sistema y el rango del diseño; de esta forma se definió el rango común, que para la determinación fue el mismo rango del sistema.

$$I = \log_2 \left( \frac{\text{Rango del Sistema}}{\text{Rango Común}} \right)$$

$$I = \log_2 \left( \frac{593.44 - 592.16}{593.44 - 592.16} \right)$$

$$I = \log_2(1)$$

$$I = 0$$

Ecuación 15

En la Figura 4 se evidencia cómo el rango común del sistema, área rayada, se localizó dentro del rango del sistema, siendo el rango común un área pequeña en comparación con el área del rango del diseño, este resultado podría suponer especificaciones de diseño muy amplias, para la variable evaluada; sin embargo, debe anotarse que hay una diferencia entre el valor objetivo propuesto en el diseño y el valor medio encontrado en el sistema, valor conocido como *bias*.

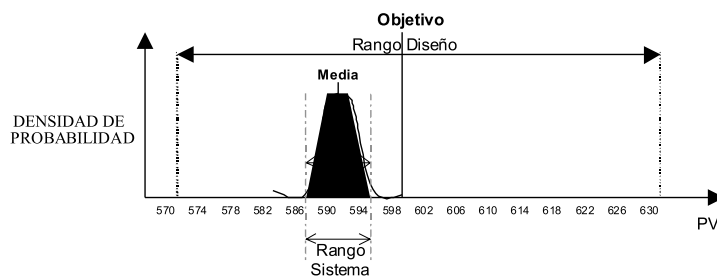


Fig. 4 Evaluación axioma de información lote 1

## X. Conclusiones

A partir de la aplicación de la metodología de diseño axiomático fue posible establecer una propuesta para el desarrollo conceptual del producto **CLM-UN**, Comprimido de liberación modificada, del tipo matriz hidrofílica, que permite la liberación de un principio activo en un sistema suelo-planta.

Fueron identificados los cuatro dominios del diseño (consumidor, funcional, físico y proceso), y sobre cada uno de ellos se pudo realizar la desagregación y mapeado, para establecer en el producto tanto las características de diseño, como su composición y posterior manufactura.

Se llevó a cabo la evaluación de los dos axiomas fundamentales del diseño, encontrando independencia entre requerimientos funcionales y parámetros de diseño, así como la independencia entre parámetros de diseño y variables de proceso.

El axioma de información permitió la identificación de la composición más adecuada para el diseño del producto, a partir de la evaluación en términos de probabilidad de éxito de los resultados encontrados.

El producto **CLM-UN** cumplió en su desarrollo con el axioma de independencia, donde para cada una de las ecuaciones planteadas se presentó desacoplamiento tanto entre FR y DP, como entre DP y PV. Siendo este resultado muy satisfactorio en términos de desempeño del diseño propuesto.

## Bibliografía

- [1] Suh, N., *The Principles of Design*, Editorial Oxford University Press, New York, 1990.
- [2] Suh, N., *Axiomatic Design. Advances and Applications*, Editorial Oxford University Press, New York, 2001.
- [3] Li, H. and S. Azarm., "Product Design Selection Under Uncertainty and with Competitive Advantage", *Journal of Mechanical Design*, 122, Dec, 411, 2000.
- [4] Du, X. and W. Chen., "Towards a Better Understanding of Modeling Feasibility Robustness in Engineering Design", *Journal of Mechanical Design*, December, Vol. 122, pp. 385-393, 2000.
- [5] Lin, F., W. Sun and Y. Yan., "Axiomatic Design theory based design rules for mechatronics products". 5th International Conference on Manufacturing Technology. 2001.
- [6] Capetti, N., Axiomatic evaluation of a support plate fuzzy design for electrical accumulator in a motor vehicle, *Associazione Nazionale Disegno di Macchine- DIEM*, International Conference. Riminini Italy, September. 2001.
- [7] Gawlik, T., *A Methodology for facilitating axiomatic design using network partitioning*. Degree PHD. University of Central Florida, Dissertation Abstracts, 1996.
- [8] Stanec, V., *An axiomatic based methodology for determining design producibility (product development)*, Degree PHD. University of Alabama, Dissertation Abstracts, 1994.
- [9] Zak, G and M. Sela., Layered - manufacturing of fiber reinforced composites, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121, 448, 1999.
- [10] Nordlund, M., D. Tate and N.P Suh., "Growth of Axiomatic Design through Industrial Practice", *3rd CIRP Workshop on Design and Implementation of Intelligent Manufacturing Systems*, Tokyo, June. p 77-84, 1996.
- [11] Park, C. and N. Suh., "Filamentary extrusion of microcellular polymers using a rapid decompressive element", *Polymer Engineering and Science*, 1, 34, 1996.

- [12] Gunasekera, J. and A. Ali, "A Three step approach to designing a metal forming process", *JOM*, June, pp. (22-25), 1995.
- [13] Hintersteiner, J.D and A. Nain, Integrating software into systems: an axiomatic design approach, *Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Design and Automation, Vancouver, August*, pp. 1-7, 1999.
- [14] Yien, T., *Manufacturing system design methodology (CIMOSA), axiomatic design, object oriented modelling*, Degree PHD. Hong Kong University of Science and Technology. Dissertation Abstracts, 1999.
- [15] Hintersteiner, J. and D. Tate., Command and control in axiomatic design theory: its role and placement in the system architecture., *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Design and Automation, Maui, HI. August*, pp. 1-5, 1998.
- [16] Cochran, D., *The design and control of manufacturing systems (axiomatic design, pull system)*, Degree PHD, Auburn University, Dissertation Abstracts, 1995.
- [17] Favela, J., *Organizational memory management for large - scale systems development*, Degree PHD, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation Abstracts, 1994.
- [18] Agouridas, V., J. Baxter, A. McKay and A. Pennington, "On defining product requirements: A case study in the UK health care sector". ASME 2001, Design Engineering Technical conference and Computers and Information in Engineering conference, Pittsburgh, PA, September, 2001.
- [19] Suh, N., "Designing in of Quality Through Axiomatic Design", *IEEE Transactions on Reliability*, 44, 256, 1995.
- [20] ERAZO, F., "Superabsorbent hydrogels and their benefits in forestry applications", *Paper presented at the Intermountain Forest Nursery Association, August Oklahoma City*, 1987.
- [21] ACS Symposium Series, *Superabsorbent Polymers, Science and Technology*, Editor Fredric L. Buchholz, Nicholas A. Peppas, American Chemical Society, Washington D.C. Cap. I (2-24), Cap. II (25-36), Cap. III (40-48), Cap. IV (50-62), Cap. VIII (99-111), 1994.
- [22] De Liñan Y Vicente, C., *Farmacología vegetal*, Ediciones Agrotécnicas S.L, Madrid, 1997.
- [23] Pilatti, R. y M. Buyatti., El agua de riego bicarbonatada y su efecto sobre el cultivo de pimiento, *Revista FAVE.*, I, 28, 1997.
- [24] Kaye-Shoemake, J.L and W.E. Watwood., "Polyacrilamide as a substrate microbial amidase", *Soil Bio and Biochem*, 30, 1647, 1998a.
- [25] Kaye-Shoemake, J.L and W.E. Watwood., "Polyacrilamide as an organic source for soil microorganisms with potential impact on inorganic soil nitrogen in agricultural soil", *Soil Bio and Biochem*, 30, 1045, 1998b.
- [26] Martínez, C.E., A.W. Kleinschmidt and M.A. Tabatabai., "Sulfate adsorption by variable charge soils: Effect of low molecular weights organic acids", *Biology and Fertility of Soils.*, 26, 157, 1998.
- [27] Amado, L.G. y J.C. Orozco, *Síntesis de un hidrogel a partir de acrilamida y ácido acrílico por copolimerización inversa para la liberación controlada de un fertilizante tesis de grado, carrera de ingeniería química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*, 2002.
- [28] Rudzinski W., T. Chipuk., A. Dave., S. Kumbar and T. Aminabhavi, "pH- Sensitive Acrylic-Based Copolymeric Hydrogels for the Controlled Release of a Pesticide and a Micronutrient", *Journal of Applied Polymer Science.*, 87, 394, 2003.
- [29] Aulton, M, *Pharmaceutics The Science of Dosage Form Design*, 2nd Edition, M.E. Aulton, Leicester U.K, 2002.
- [30] Florence, A.T and D. Attwood., *Physicochemical Principles of Pharmacy*. 3rd edition, Creative Print & Design, Great Britain, pp. 308-370, 1998.