

# Despliegue de Función Calidad (QFD) apoyado mediante técnicas difusas : Caso prótesis mioeléctrica de mano\*

## A Quality Function Deployment (QFD) approach to designing a prosthetic myoelectric hand

Erika Sofía Olaya Escobar,<sup>1</sup> Carlos Julio Cortes Rodríguez,<sup>2</sup> Óscar Germán Duarte Velasco<sup>3</sup>

### RESUMEN

En este artículo se presenta un modelo de *Despliegue Función Calidad* (QFD) apoyado en sistemas de computación con palabras. Específicamente se emplea en la fase de construcción de la Casa de Calidad (HOQ). La metodología se ilustra en la planeación del diseño de una Prótesis Mioeléctrica de Mano.

**PALABRAS CLAVE:** *Despliegue de la Función Calidad, QFD, casa de la calidad, calidad, diseño producto, voz del cliente, requerimientos del usuario, características de calidad, ingeniería concurrente, técnicas difusas, aritmética difusa, sistemas de computación con palabras, red difusa, prótesis de mano, biomecánica.*

### ABSTRACT

This paper presents a Quality Function Deployment (QFD) model based on computing with words. It is specifically used in the House of Quality (HOQ) construction phase. It illustrates the methodology employed in designing a prosthetic myoelectric hand.

**KEY WORDS:** *Quality Function Deployment (QFD), House of Quality (HOQ), quality, product design, user's voice, customer demands, quality characteristics, fuzzy set, fuzzy arithmetic, word-based computation system, fuzzy net, prosthetic myoelectric hand.*

Recibido: noviembre 24 de 2004

Aceptado: mayo 20 de 2005

### Introducción

El QFD se fundamenta en la búsqueda de las necesidades del usuario, teniendo en cuenta tanto las expresadas como las no expresadas, las cuales son trasladadas dentro de acciones de diseños y comunicadas a través de toda la organización. Se constituye en una herramienta de apoyo importante para la toma de decisiones en la etapa temprana de diseño, con el fin de desarrollar productos que involucren las *características de calidad* que logren maximizar la satisfacción del cliente.

Sin embargo, el método convencional de QFD presenta limitaciones y problemas, dado que las decisiones tomadas son normalmente fundamentadas en información vaga e imprecisa, la cual se adquiere de manera subjetiva y de fuentes de información muy variables.

Con el fin de solventar las limitaciones y falencias de la metodología de QFD, se han adelantado estudios que pretenden minimizar su vaguedad mediante la aplicación de técnicas difusas. Investigadores tales como *Masud y Dean* (1993), *Khoo y Ho* (1996), *Temponi* (1997) *Zhou* (1997), *Trappey* (1996) y *Park y Kim* (1998) han sugerido diferentes aproximaciones para priorizar las *características de calidad*, mediante la implementación de números difusos en algunos de los vectores o matrices de la *Casa de la Calidad* (Vanegas y Labid, 2001, págs. 99-120), (Vanegas y Labid, 2001, págs. 152-161), (Vanegas y Labid, 2000, págs. 541-548), (Vanegas y Labid, 2001, págs. 255-256).

Los trabajos adelantados en la mejora del QFD mediante técnicas difusas se han limitado a trabajar con ésta herramienta sólo en algunos vectores y matrices, lo cual reduce su eficiencia al permitir que la subjetividad, im-

\* Este es el segundo artículo de una serie de tres, los cuales son el resumen de los resultados de la tesis de maestría "Despliegue de Función Calidad (QFD) Apoyado Mediante Lógica Difusa para Requerimientos de Diseño de Prótesis Mioeléctrica de Mano", la cual obtuvo Mención MERITORIA.

1 Ingeniera industrial, M.Sc. en Ingeniería- Materiales y Procesos, Universidad Nacional de Colombia. Investigadora en el Grupo de Investigación en Biomecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, e-mail: esolayae@unal.edu.co.

2 Ingeniero mecánico, M.Sc. Materiales y Procesos de Manufactura, M.Sc. en Ciencias Económicas - Industria y Tecnología, profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, e-mail: cjcortesr@unal.edu.co.

3 Ingeniero eléctrico, M.Sc. en Automatización Industrial, Ph.D en Informática, profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia. e-mail: ogduartev@unal.edu.co.

precisión y vaguedad de los datos trabajados de forma convencional, se repliquen a lo largo de la construcción de la HOQ, ocasionando que los resultados arrojados estén asociados a un alto grado de incertidumbre, el cual va aumentando a medida que avanza su construcción.

En este artículo se presenta una mejora de la metodología, al proponer un *Modelo de QFD apoyado mediante aritmética difusa*. El modelo permite integrar sistemáticamente el desarrollo de la *casa de la calidad* e involucrar la incertidumbre inherente a la metodología en todas las etapas de su construcción; adicionalmente proporciona la mayor cantidad de información (cualitativa y/o cuantitativa), para la selección de las *características de calidad prioritarias* a ser involucradas y optimizadas durante la etapa temprana de diseño (Olaya, 2004).

Una breve introducción a la metodología QFD se encuentra en (Olaya et al., 2005, págs. 30-38), mientras que los fundamentos de Sistemas de Computación con Palabras se pueden consultar en Duarte, 2000.

### Modelo de QFD apoyado por SCP mediante Aritmética Difusa

En este artículo se presenta una propuesta enfocada hacia la mejora de la metodología QFD apoyada mediante técnicas difusas. La propuesta se fundamenta en la necesidad de superar las limitaciones inherentes al trabajar con el criterio de un grupo de personas (expertos y/o usuarios), quienes normalmente expresan sus opiniones mediante palabras o califican con valores cualitativos o cuantitativos siempre asociados a un grado de subjetividad. Por lo tanto, el trabajar con información de este tipo desde el inicio del QFD permite que la subjetividad, imprecisión y vaguedad de los datos se replique a lo largo del desarrollo de la metodología, ocasionando que los resultados arrojados estén asociados a un alto grado de incertidumbre, el cual va aumentando a medida que avanza su desarrollo.

Esto implica que la toma de decisiones sobre la selección de las *características de calidad prioritarias* para el usuario esté sujeta a un alto grado de incertidumbre acumulado que en la metodología convencional no se tiene en cuenta. Esto ocasiona que la selección de las características no sea la más adecuada, con la consecuencia inminente de destino de recursos y esfuerzos hacia la optimización de diseño de producto que no involucran las características prioritarias, que logran satisfacer realmente los *requerimientos del usuario*.

La *aritmética difusa*, y específicamente los *sistemas de computación con palabras*, son herramientas útiles para abordar este tipo de problemas, en los que la imprecisión y vaguedad están presentes, brindando un marco adecuado para trabajar simultáneamente variables numéricas y lingüísticas. Así que la *aritmética difusa* puede ayudar a subsanar las dificultades que se presentan

actualmente en el QFD relacionadas con la combinación de información cuantitativa y cualitativa, y con la presencia de incertidumbre.

Esta propuesta se desarrolla para la primera fase del **QFD** es decir, para la *Casa de la Calidad*, puesto que:

- Es la fase en la que se trabaja con mayor cantidad de información imprecisa.

- La incertidumbre es acumulable.

- La HOQ es la base fundamental para el desarrollo de las fases siguientes.

Por tanto, es necesario plantear un modelo de *Sistemas de Computación con Palabras* en esta etapa de diseño y desarrollo de producto.

Para la construcción de la casa se presenta una optimización de su desarrollo, la cual consta de ocho etapas que contemplan desde la recopilación de la información hasta la identificación de las *características de calidad prioritarias*. Estas etapas son:

Etapas 1: Determinar la voz del usuario.

Etapas 2: Organizar, consolidar y traducir información.

Etapas 3: Características de calidad.

Etapas 4: Organizar y consolidar información.

Etapas 5: Construir la matriz de correlación.

Etapas 6: Construir la matriz de sensibilidad.

Etapas 7: Construir la matriz de evaluación.

Etapas 8: Construir la matriz de puntuación.

El detalle de cada una de las anteriores etapas se profundiza en Olaya, 2004 y Olaya et al., 2005, págs. 30-38.

En el Anexo 1 se presenta la estructura de la HOQ, en donde se muestra la nomenclatura de cada matriz o vector y permite relacionarlos con los nodos de las redes que se presentarán posteriormente.

El modelo de QFD apoyado mediante aritmética difusa se dividió en dos partes:

- La primera se denominó *entradas al sistema*, y está constituida por las primeras cuatro etapas de desarrollo de la HOQ mencionadas en el párrafo anterior, y genera como resultado la estructura de los vectores de *requerimientos del usuario* y *características de calidad*, los cuales constituyen la base de la información a ser analizada.

- La segunda se denominó *sistemas de computación con palabras*, y la conforman desde la etapa quinta hasta la octava del desarrollo de la HOQ; en esta parte se evalúa,

opera y desarrolla toda la información inherente a la construcción de la HOQ evaluada bajo los conceptos de *Sistemas de Computación con Palabras* interrelacionando mediante redes difusas.

### Entradas al sistema

Esta parte tiene como finalidad estructurar la recopilación de información para identificar los *requerimientos del usuario*, determinar oportunidades competitivas, traducir las *características de calidad* y determinar requerimientos-características para estudios posteriores.

Las mejoras planteadas para las primeras cuatro etapas se enfocan hacia la implementación de diferentes herramientas para la recopilación, traducción, consolidación y organización de la información, generando como aporte principal en esta parte del proyecto la integración de herramientas de calidad y diseño para el desarrollo de la HOQ, con el fin de estructurar una metodología que permita conseguir la cantidad de información fiable y necesaria.

La construcción de la HOQ, y específicamente la parte de *entradas al sistema*, está dada por una serie de pasos, apoyados por herramientas de calidad, estadísticas, matemáticas, entre otras. La información en cada etapa es recopilada del criterio de los usuarios y/o expertos. La estructura propuesta permite:

- Reducir los volúmenes de información sin atender contra la fiabilidad de la misma.
- Al reducir la cantidad de información su manejo se agiliza.
- Optimizar tiempo, recursos, y reducir costos.

Como se puede observar en la Figura 1, el desarrollo de las primeras etapas (Etapa 1: voz del usuario y Etapa 2: organizar, consolidar y traducir información), tienen por finalidad determinar el *vector de requerimientos del usuario*; y las etapas posteriores (Etapa 3: características de calidad y Etapa 4: organizar y consolidar), generan como resultado la identificación del vector de *características de calidad*.

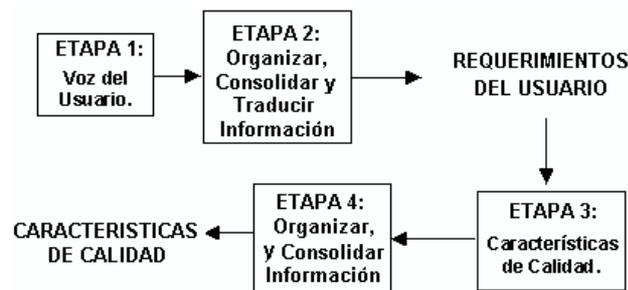


Figura 1. Primeras cuatro etapas del modelo propuesto

Es importante aclarar que cada caso de aplicación del QFD es diferente y depende de las particularidades del producto. De manera que esta metodología plantea el esquema global de desarrollo y debe ser adaptado para cada caso particular.

### Sistemas de computación con palabras

La segunda parte, planteada para el desarrollo de la HOQ en este artículo, está conformada por las siguientes cuatro etapas de su construcción, las cuales toman la información de los vectores de *requerimientos de usuarios* y *características de calidad*, para procesarla, analizarla y generar como resultado la priorización de la información de cada uno de estos vectores. Estas etapas se muestran en la Figura 2.

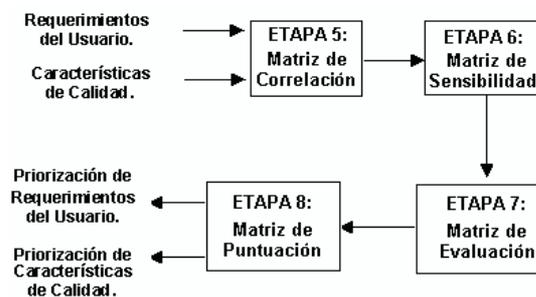


Figura 2. De la quinta a la octava etapas del modelo propuesto

El aporte en esta parte del proyecto se fundamenta en generar una herramienta metodológica que permita la construcción de la HOQ, involucrando *números difusos* para representar la incertidumbre inherente a la información e incorporar *aritmética difusa* para operar dichos números. Como se ha planteado anteriormente, el argumento para incorporar *números difusos* a la metodología del QFD, se fundamenta en que:

- *Requerimientos del usuarios*, son subjetivos y dependen del criterio de los individuos.
- La traducción a *características de calidad* se determina mediante el criterio de expertos como subjetiva.
- Las relaciones de las *matrices* están definidas en forma vaga por expertos.
- El *grado de importancia* de los *requerimientos del usuario* y la *evaluación competitiva externa* son recopilados y dependen del nivel de satisfacción que perciben los usuarios respecto a cada uno de sus requerimientos con el producto propio y con los de la competencia.
- La *evaluación competitiva interna* depende del criterio, experiencia e imparcialidad de un grupo de expertos, los cuales califican el producto propio y el de la competencia.

Las razones anteriores evidencian que a lo largo del desarrollo de la HOQ se percibe un alto nivel de incertidumbre, vaguedad y subjetividad respecto a la información que ingresa al sistema. Sin embargo, el uso de *número difusos* en forma parcial ni tiene sentido, ni es mayor el aporte que brinda, si en la implementación total de la HOQ se sigue trabajando con las mismas técnicas desarrolladas para *números enteros*. Por consiguiente, es conveniente incorporar *técnicas difusas* para la construcción

total de la HOQ. El resultado de esta incorporación es una nueva "metodología de construcción de la HOQ apoyada mediante aritmética difusa".

Por otra parte, la escasa información numérica disponible y el hecho de manejar la mayor parte de la información bajo criterios lingüísticos, permite plantear el uso de *Sistemas de Computación con Palabras (SCP)*, basados en *aritmética difusa*, para operar los *números difusos* involucrados en la HOQ.

Esta nueva propuesta metodológica se fundamenta en la aplicación de los conceptos de *computación con palabras* basado en *aritmética difusa*, puesto que la gran cantidad de variables de entradas y salida que se manejan en los diferentes vectores y matrices de la HOQ no hacen viable la construcción de un *Sistema de Computación con Palabras basado en reglas*, por el alto costo computacional que se genera.

Por las razones mencionadas a lo largo de este artículo, y por el hecho de que los vectores de cálculo que conforman la HOQ pueden ser tratados como SCP independientes, se planteó el diseño de una *red difusa* (cada nodo en la red representa un vector o matriz) que simula la construcción de la estructura de la HOQ convencional y permite involucrar la incertidumbre en el sistema asociando varios SCP.

Como se puede observar en las Figuras 3 y 4, la *red difusa* está formada por nodos interconectados. Algunos representan variables de entrada (p.ej.  $v_i$ ,  $g_i$ ), y otros representan variables calculadas a partir de las anteriores (p.ej.  $w_i$ ). En cada nodo de la red es posible manipular información lingüística o numérica.

De las diferentes técnicas difusas existentes, los SCP basados en aritmética difusa son los que aportan mayores ventajas al integrarlas a la construcción de la HOQ, puesto que dichos sistemas están diseñados para trabajar específicamente con datos de entrada de tipo lingüístico y por medio de funciones de razonamiento aproximado se logra operar información tanto cualitativa como cuantitativa.

El manejar toda la información con *números difusos* y operarlos mediante *aritmética difusa* exige que se reformulen algunas de las operaciones implementadas en la HOQ convencional para números reales; las principales razones para realizar estos cambios se fundamentan en que:

- El manejo de la división difusa es complejo e ineficiente.
- Mediante un producto es difícil mantener la independencia de las entradas y darle ponderación a un vector que lo requiera.

Estos cambios no afectan la esencia de la metodología puesto que se buscan funciones que mantienen el sentido de monotonía de la función original.

La *red difusa* presentada en la Figura 3 representa la primera estrategia (de requerimientos del usuario), la cual está conformada por la información necesaria para identificar la relevancia de un *requerimiento del usuario*, mediante los *nodos* que la conforman, como se explica a continuación:

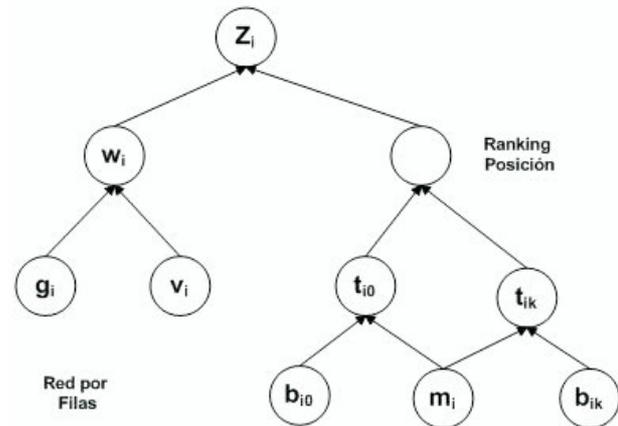


Figura 3. Red del sistema de computación con palabras para los requerimientos del usuario.

- Los SCP para los vectores de *ratio de mejora* ( $t_{i0}$ ,  $t_{ik}$ ), tienen por finalidad identificar qué tan cerca está cada uno de los competidores con respecto a la meta planteada; por lo tanto, estos sistemas tienen como entradas los vectores de *evaluación competitiva externa* ( $b_{i0}$ ,  $b_{ik}$ ) y el vector de *plan de calidad* ( $m_i$ ).
- A su vez, estos SCP *ratio de mejora* ( $t_{i0}$ ,  $t_{ik}$ ), son entradas del vector *ranking*, el cual tiene por objetivo determinar en qué posición se encuentra el producto propio respecto al de la competencia, en cuanto a cada *requerimiento del usuario*.
- El SCP para el vector de *peso absoluto* ( $w_i$ ) tiene por finalidad determinar la importancia de los *requerimiento del usuario*, teniendo en cuenta la situación de la compañía; tiene como entradas el *grado de importancia* ( $g_i$ ), *punto de ventas* ( $v_i$ ) y el *ratio de mejora del producto propio* ( $t_{i0}$ ).
- El SCP de *RC prioritario* ( $z_i$ ) tiene como entradas los SCP de: *ranking i* y *peso absoluto* ( $w_i$ ), su objetivo es determinar los *requerimientos del usuario* que se consideran prioritarios a ser mejorados y por ende a los cuales se les debe asignar mayores recurso y esfuerzos para su optimización.

Por otra parte, la *red difusa* presentada en la Figura 4, constituye la segunda Estrategia (de características de calidad). Esta tiene por objetivo determinar las *características de calidad prioritarias* y está constituida con información de vectores que evalúan dichas características, los cuales son representados como *nodos*.

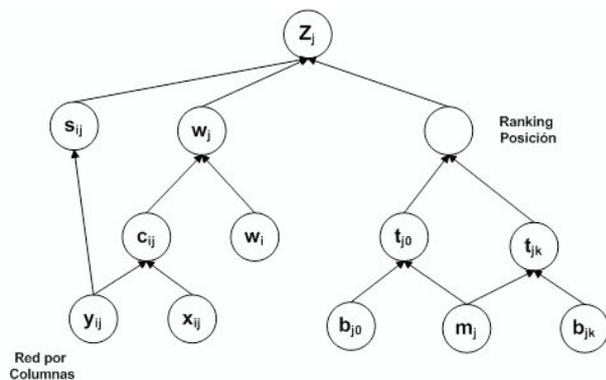


Figura 4. Red del Sistema de Computación con Palabras para las características de calidad.

- Los SCP para los vectores de *ratio de mejora* ( $t_{jo}$ ,  $t_{jk}$ ), tienen por finalidad identificar qué tan cerca está uno de los competidores con respecto a la meta de diseño especificada para cada *característica de calidad*; estos sistemas tienen como entradas los vectores de *evaluación competitiva interna* ( $b_{jo}$ ,  $b_{jk}$ ) y el vector de *plan de calidad* ( $m_j$ ).
- A su vez, estos SCP *ratio de mejora* ( $t_{jo}$ ,  $t_{jk}$ ), son entradas del vector *ranking*, el cual tiene por objetivo de terminar en qué posición se encuentra el producto propio respecto al de la competencia, en cuanto a cada *característica de calidad*.
- El SCP para el vector de *peso absoluto* ( $w_j$ ) tiene por finalidad identificar la importancia de cada *característica de calidad*, teniendo en cuenta la relación entre la *matriz de correlación* y la importancia de cada *requerimiento del usuario*, las entradas que lo constituyen son el *peso absoluto* ( $w_j$ ) y la *matriz de correlación* ( $c_{ij}$ ).
- El SCP de *CQ prioritario* ( $z_j$ ) tiene como entradas los sistemas de computación con palabras de: *ranking j* y *peso absoluto* ( $w_j$ ); su objetivo es determinar las *Características de calidad* que se consideran prioritarias a ser mejoradas y por ende a las cuales se les debe asignar mayores recursos y esfuerzos para su optimización.

Cada estrategia sólo genera el cálculo de un *requerimiento del usuario* o una *característica de calidad* según el caso; por lo tanto se implementa un determinado número de casos (el número de casos de cada estrategia corresponde al número de requerimientos del usuario o características de calidad), para la construcción de cada uno de estos y estas.

### Herramienta computacional

Como se puede observar, el modelo propuesto para la construcción de la HOQ involucra una gran cantidad de variables de entrada y salida para varios SCP, lo cual hace que su desarrollo manual sea complejo y demorado. Esto constituye un inconveniente, puesto que se busca

optimizar la construcción de la HOQ mediante un modelo fácil de aplicar y que brinde la mayor cantidad de información fiable; por esta razón fue indispensable adoptar una herramienta computacional que trabaje con dicho tipo de información. Así que en este proyecto se implementa la herramienta computacional Fuzzynet<sup>4</sup>, la cual está diseñada para trabajar con información difusa mediante los conceptos de *aritmética difusa* y SCP; por otra parte, el sistema permite incorporar y desarrollar varios SCP interrelacionados por *redes difusas* las cuales se han denominado *estrategias* que a su vez están constituidas por casos.

### Aplicación del modelo a prótesis mioeléctrica de mano

Con el fin de ilustrar la construcción de la HOQ mediante el modelo propuesto, se presenta un ejemplo para prótesis mioeléctrica de mano. El Anexo 1 presenta la estructura total de la HOQ para el ejemplo de prótesis mioeléctrica de mano.

Debido a la necesidad de precisar las *Características de Calidad Prioritarias* de los productos del área de rehabilitación, el Grupo de Biomecánica (GIBM-UNCB) decidió implementar la herramienta de QFD, apoyado con técnicas difusas en su etapa inicial del desarrollo de producto.

Dicha herramienta fue seleccionada porque brinda específicamente las siguientes ventajas:

- Mayor calidad de la prótesis.
- Cambios en la etapa temprana de diseño.
- Menores costos.
- Reducción en el tiempo de desarrollo y fabricación.
- Ventaja sustancial dentro del mercado.
- Contar con una base de datos que permite almacenar los conocimientos y avances de los proyectos.

El ejemplo presentado fue desarrollado por los autores para implementar la propuesta. Por lo tanto, la información presentada en este artículo es real y pertenece al proyecto: "Despliegue de función de calidad (QFD) apoyado mediante lógica difusa para requerimientos de diseño de prótesis mioeléctrica de mano", realizado para el GIBM-UNCB.

### Entradas al sistema

Como se presentó en la sección anterior del presente artículo, la metodología inicia con las etapas que conforman la parte de *Entradas al sistema* (ver Figura 1).

A continuación se hace una breve descripción de la forma como se recopiló y manejó la información en cada una de estas etapas. Sin embargo, el detalle de desarrollo de las mismas se presenta en Olaya, 2004.

<sup>4</sup> Diseñada en la Universidad Nacional de Colombia - Bogotá en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el área de Sistemas de Computación Flexible

Etapa 1. Voz del usuario: la determinación de la voz del usuario es la primera etapa en la implementación de la metodología y una de las más importantes porque en ella se fundamenta la filosofía del QFD, por lo tanto debe ser estructurada, apoyada y estandarizada para su aplicación, razón por la cual en el proyecto se proponen los siguientes pasos para su desarrollo:

- Tipo de usuario.
- Segmentación de la población objetivo.
- Tipo de requerimientos.
- Identificación de los medios para recoger la información.
- Diseño de herramientas para recoger la información.
- Aplicación de las herramientas.

Por lo tanto, el proyecto de aplicación a la prótesis mioeléctrica de mano se desarrollo bajo dichos lineamientos.

La adaptación y rehabilitación con una prótesis específica se influyen en gran medida por una serie de pasos que constituyen el proceso, desde la evaluación de las causas y parámetros de amputación (o la amputación según el caso), hasta la manipulación y entrenamiento en el manejo de la prótesis. Durante cada etapa de este proceso, diferentes usuarios pueden influenciar en el paciente para la adquisición de un determinado tipo de prótesis, por lo tanto es importante identificar las expectativas de cada uno de ellos respecto a un determinado aparato protésico de miembro superior y específicamente de mano. Por tratarse de diferentes tipos de usuario, la segmentación de la población objetivo será independiente para cada uno, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipo de usuario y segmentación de la población

Usuario		Segmentación
Pacientes		Sexo: Masculino Edad: 16 – 60 años Amputación Miembro Superior Usa Prótesis Limitadas condiciones económicas.
Área Médica	Ortopedistas	Personal de Hospitales, Clínicas y Centros Ortopédicos, que manejan amputaciones y/o rehabilitación de Miembro superior
	Fisiatras	
	Fisioterapeutas	
	Psicóloga	
Técnicos Protésistas		Personal encargado de la adaptación y/o elaboración de prótesis.
Familiares		Personas encargadas del cuidado del paciente.

Teniendo en cuenta los diferentes usuarios y su respectiva segmentación, se determina el tamaño de muestra mediante las herramientas planteadas en Olaya, 2004.

Una vez identificados los usuarios directos e indirectos, segmentados según el tipo de usuario, y determinados los requerimientos fundamentales para este tipo de producto (ver Tabla 1), se procedió a identificar, diseñar y aplicar los medios para obtener los requerimientos fundamentales para una prótesis de mano. En la Tabla 2 se presentan las herramientas que se implementaron para este proyecto.

Tabla 2. Herramientas para Recolección de Información.

Requerimiento	Herramienta	Usuario
Básico	Inf. Secundaria. Inf. de la Competencia.	
Funcional	Cuestionarios	Pacientes, Ortopedistas, Fisioterapeutas, Técnicos protésistas
	Ir al Gemba	Pacientes, Ortopedistas, Fisioterapeutas
	Quejas y Reclamos	Pacientes, Familiares, Otros
	Grupos de Discusión	GIBM-UNCB.
	Encuesta	Pacientes, Ortopedistas, Fisioterapeutas, Técnicos Protésistas GIBM-UNCB.

Como se presentó en la tabla anterior, según el tipo de usuario se diseñó una herramienta específica para recopilar la información; el diseño de estas herramientas se fundamentó en conseguir el volumen de información necesario para determinar el mayor número de *requerimientos del usuario*. El detalle del listado de usuarios a quienes se les aplicó dichas herramientas se presenta en Olaya, 2004.

Etapa 2. Organizar, consolidar y traducir la información: después de recopilar la información se procede a organizarla, con el fin de identificar las necesidades concretas del usuario de prótesis de miembro superior. El primer paso para organizar la información es sacar en limpio todas las respuestas textuales de los usuarios, con el fin de visualizar mejor la información con la que se cuenta, es decir, si son claras y coherentes las respuestas. Con las respuestas organizadas en forma de listado, se procede a aplicar la herramienta de *conversión de expresiones del usuario en datos reformulados* (Akao, 1999), y por último se aplica el *diagrama de afinidad* (González, 2000), mediante el cual se logran integrar los requerimientos y se obtiene el vector de *requerimientos del usuario*.

Etapas 3. Características de calidad: las *características de calidad* se determinan mediante la traducción de los *requerimientos del usuario* y la aplicación de la herramienta de *análisis de funciones básicas* (Stone, 2000).

Para esta aplicación la traducción se logró mediante la colaboración de los miembros del GIBM-UNCB, revisión bibliográfica, análisis de la competencia y desarrollos tecnológicos logrados en este campo. Por otra parte, se implementó la herramienta de *modelo de funciones básicas* (Stone, 2000), con el fin de determinar los requerimientos y características básicas plantadas en el modelo de Kano, los cuales representan la funcionalidad de la prótesis.

Etapas 4. Organizar y consolidar la Información: una vez identificados y traducidos los elementos de calidad, se procede a elaborar una lista con la cual se pretende identificar con mayor claridad la información con que se cuenta para la determinación de las *características de calidad*. Durante este proceso se debe filtrar y depurar la información para evitar redundancia; una vez generado el listado la información se despliega mediante el *diagrama de árbol* (González, 2000), y se identifican el vector de *características de calidad* y su respectiva métrica.

#### Sistema de computación con Palabras

Las siguientes etapas constituyen la parte de *Sistema de Computación con Palabras*, en la cual se pretende determinar los *requerimientos del usuario* y *características de calidad prioritaria*, mediante la integración y operacionalización de vectores y matrices que presentan información difusa.

Etapas 5. Matriz de correlación: mediante esta matriz se relacionan los *requerimientos del usuario* con cada una de las *características de calidad*, con el fin de establecer el grado de influencia de estas en la satisfacción de cada requerimiento; la estructura fundamental de la *matriz de correlación*, está constituida por dichos vectores.

Para esta aplicación se limitó la matriz, reduciendo los vectores de *requerimientos del usuario* a 32 y *características de calidad* 23, puesto que los objetivos y alcances del proyecto lo requerían. La selección de los requerimientos y características se fundamentó en:

- La posibilidad de acceder fácilmente a información de los diferentes tipos de usuarios.
- Información de la competencia.
- La experiencia GIBM-UNCB.
- La limitación de los objetivos planteados en la segunda etapa del proyecto.

Etapas 6. Matriz de sensibilidad: con esta interrelación se determina el tipo de relación que hay en las característi-

cas y el grado de dependencia entre ellas. Mediante el *análisis dinámico de variables* (González, 2000), se logró determinar la dependencia entre las *características de calidad* determinadas para la prótesis. Al presentar una variación, las que generan influencia son: *longitud del pulgar, peso rotador, peso flexo-extensor, longitud de los dedos, velocidad de apertura y cierre, resistencia mecánica del material y pinza fina*; con las anteriores características se debe tener especial cuidado y conocer primero el tipo de influencia que están causando, para tomar cualquier decisión. Una vez identificadas las relaciones de dependencia se evalúa el tipo, es decir, cuáles son positivas y cuáles negativas. Esto con el fin de observar si al mejorar una de estas características mejoran las que de ella dependen; así se estaría logrando un gran avance puesto que con el mínimo esfuerzo se obtiene una mejora, y si sucede lo contrario, se complica la aplicación del modelo, puesto que se desconoce cuánto se gana o pierde al mejorar una característica que ocasiona desmejora en otras.

Etapas 7. Matriz de evaluación: mediante esta matriz se evalúan los requerimientos prioritarios, identificando para cada uno y mediante la opinión del usuario y/o expertos: la importancia sobre su satisfacción, la influencia sobre la adquisición del producto y el grado en que cada producto evaluado logra satisfacerlo.

Con el fin de recopilar la información para el desarrollo de la *matriz de evaluación*, se desarrolló una segunda fase de toma de información, mediante la aplicación de herramientas que permiten evaluar específicamente los *requerimientos del usuario* seleccionados. Esta toma de información se planeó específicamente para determinar la información correspondiente a los siguientes vectores: *grado de importancia, plan de calidad, punto de venta, evaluación competitiva externa*.

Etapas 8. Matriz de puntuación: esta tiene por objeto evaluar los valores meta para cada *característica de calidad* y el comportamiento de cada competidor respecto del cumplimiento de esta meta, con el fin de apotar información para la identificación de las *características de calidad* prioritarias a ser tenidas en cuenta durante la fase inicial de diseño de producto. La recopilación de información para el desarrollo de la *matriz de puntuación* se adelantó mediante la segunda fase de la toma de información y se aplicaron las herramientas al personal que ha trabajado en el desarrollo de prótesis de miembro superior en el GIBM-UNCB. Mediante esta información se logran determinar los datos de los vectores *metas de diseño y evaluación competitiva interna*.

Una vez obtenida la información, se procede a ingresarla a la herramienta computacional *Fuzzynet*, mediante la cual se opera toda la información de los diferentes vectores y matrices, para lograr establecer los *requerimientos del usuario* y las *características de calidad* prioritarios.

## Análisis de resultados

Es importante tener en cuenta que este modelo está dividido en dos estrategias; por lo tanto, el análisis de los resultados se debe realizar tanto para los *requerimientos del usuario* prioritarios como para las *características de calidad* y luego sí establecer cuáles son las características a las que se deben enfocar los mayores esfuerzos y recursos para su optimización.

### Requerimientos del usuario prioritarios

Siendo el criterio de los usuarios el punto de partida para un análisis de las características prioritarias de un producto, es necesario determinar los requerimientos prioritarios y luego evaluar si las características logran satisfacerlos. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultado obtenidos en esta aplicación.

Tabla 3. Requerimientos del Usuario Prioritarios.

Grado de Importancia (gi)	Peso Absoluto (wi)	Requerimientos Prioritarios (zi)
Realizar Apertura y Cierre	Fácil de quitar y poner	Fácil de quitar y poner
Buena Fuerza de Presión	Realizar Apertura y Cierre	Realizar Apertura y Cierre
No se Desajuste	Apariencia Natural	Durable
Fácil de quitar y poner	Durable	Manejar Auto
Precisión en Movimientos	Apta para Diferentes Trabajos	Apariencia Natural

Como se presenta en la Tabla 3, el *Grado de Importancia* presenta muy buena información sobre lo que los pacientes desean; sin embargo, es importante tener en cuenta si esos requerimientos que el paciente considera importantes pueden influir en la mayor aceptación del producto y por lo tanto la venta del mismo, así que se debe evaluar la capacidad de nuestro aparato protésico para cumplir con ese requerimiento; es decir, que tan cerca está de la meta. Para ello se tiene en cuenta el valor del *peso absoluto*. Así los requerimientos de *buena fuerza de presión*, *no se desajuste* y *Precisión en movimientos*, ya no están entre los cinco más importantes, esto debido a que el producto propio está muy cercano a la meta de dichos requerimientos, de manera que nuestro esfuerzo sobre esos requerimiento se debe limitar a mantenerlo.

Por otra parte, con la información del *peso absoluto* y la posición de nuestra prótesis respecto de los demás competidores se establecen los *requerimientos del usuario prioritarios*, puesto que, así un requerimiento tenga un peso

absoluto alto, si nuestro producto está mejor ubicado que los demás competidores respecto a la satisfacción que logra, no constituye un requerimiento urgente a mejorar; por lo tanto no es prioritario.

### Características de calidad prioritarias

Con el fin de determinar las *características de calidad* que tienen mayor influencia en la satisfacción de los *requerimientos de usuario*, se analiza el vector de *peso absoluto de las características*. En la Tabla 4 se presenta el resumen de los resultado obtenidos para esta aplicación.

Tabla 4. Características de Calidad Prioritarias.

Característica de Calidad Prioritarias	Razones para ser Prioritarias
Fuerza de Presión	- Mejora varios
Longitud de los Dedos	Requerimientos del Usuario, importantes y recomendados.
Apertura Máxima	- Dependencia positiva
Anchura Palmar	con otras
Dimensiones del Pulgar	Características de Calidad.
	- Afecta negativamente costos de manufactura.

Mediante este vector se determina la correlación de cada característica con los diferentes requerimientos, es decir, si al variar una característica se logran mejorar varios requerimientos, significa que con el mínimo de recursos físicos y económicos se puede optimizar el diseño de la prótesis de mano; sin embargo, puede ocurrir que al variar una característica se desmejoren algunos requerimiento. Por lo tanto, es indispensable evaluar la influencia de cada característica sobre los diferentes requerimientos.

Una vez identificadas las características de mayor peso absoluto, se procede a determinar la independencia de las características y la posición de la prótesis del GIBM-UNCB respecto de los demás competidores para satisfacer cada una de las características de calidad, con el fin de establecer las que son realmente prioritarias para nuestro producto y así poder enfocar los esfuerzos y asignar recursos a su optimización (ver Tabla 4).

### Modelo convencional

Las *características de calidad* determinadas por los estudiantes que han desarrollado diseños para miembro superior mediante la aplicación del QFD convencional, son: las características que tienen que ver con pesos, fuerza de presión, capacidad de carga y manufactura económica, como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Características con el modelo convencional

Característica de Calidad Prioritarias	Razones para ser Prioritarias
Peso Pinza	- Poca Correlación con Requerimientos del Usuario.
Peso Rotado	
Peso Flexo-Extensor	- Alta dependencia Negativa con otras Características de Calidad.
Capacidad de Carga	
Costos de Manufactura.	- Muy Cerca de la Meta Propuesta o mejor que la competencia.

Implementando el modelo propuesto, sólo una de estas características ocupó un lugar entre las prioritarias, por lo tanto es importante analizar dicha información (ver Tabla 6).

Tabla 6. Comparación entre los resultados del modelo convencional y el propuesto de QFD.

Modelo Convencional del QFD	Modelo Propuesto del QFD
Peso Pinza	Fuerza de Prensión
Peso Rotado	Longitud de los Dedos
Peso Flexo-Extensor	Apertura Máxima
Capacidad de Carga	Anchura Palmar
Costos de Manufactura.	Dimensiones del Pulgar

- **Peso Pinza:** ocupó el decimoséptimo lugar en el ordenamiento características prioritarias, correlacionado con pocos *requerimientos del usuario*, presenta alta dependencia negativa con otras características de calidad. Además es una de las características sobre las que más se ha trabajado y está muy cerca de cumplir la metas, por lo tanto no es prioritaria, sólo basta con mantener el peso alcanzado.
- **Peso Rotador:** ocupó el decimocuarto lugar en el ordenamiento características prioritarias. Está correlacionado con pocos *requerimientos del usuario*, los cuales presentan una priorización de recomendado; presenta alta dependencia negativa con otras características de calidad. Se ha trabajado sobre dicha característica pero aún no se logra satisfacer, la prótesis del GIBM-UNCB presenta una valoración para el *ratio* de mejora respecto a la meta de cercano.
- **Peso flexo-extensor:** ocupó el puesto veintidós en el ordenamiento características prioritarias, aunque se ha trabajado sobre ella, y presenta la mejor opción entre los demás competidores; no es una característica que cumpla con los parámetros para cumplir con la satisfacción de los pacientes por lo tanto se debe tener en cuenta para su optimización.

- **Capacidad de carga:** ocupó decimotercer lugar en el ordenamiento características prioritarias, Correlacionada con pocos *requerimientos del usuario*, y la mayoría de ellas presentan una priorización de indiferente y recomendado. Por otra parte, presenta alta dependencia negativa con otras *características de calidad*. Se ha trabajado sobre dicha característica pero aún no se logra satisfacer la prótesis del GIBM-UNCB.
- **Costos de manufactura:** ocupó el lugar número veintitrés en el ordenamiento características prioritarias. Esta altamente correlacionando con los requerimiento del usuario, pero en su totalidad son relaciones negativas, presenta total dependencia negativa con la mayoría de *características de calidad*. Esto ocasiona que sea difícil de controlar puesto que cualquier cambio en otra puede afectarla.

## Conclusiones

### Respecto del modelo propuesto

- Mediante el diseño de *entradas al sistema* se reducen los grandes volúmenes de información sin atender contra la fiabilidad de la mismas; al reducir la cantidad de información su manejo se agiliza, se optimizan tiempo, recursos y se reducen costos; por otra parte, la aplicación de las herramientas empleadas e interpretación de resultados hace que la metodología sea más fácil y genere mayor acogida y aceptación.
- Teniendo en cuenta la ineficiencia de un único SCP, y que cada vector y matriz de la HOQ puede ser considerado como SCP independiente, es mucho más enriquecedor para la metodología el diseño de varios SCP interrelacionados mediante una red difusa que estructure la construcción total de la HOQ y permita involucrar la incertidumbre asociada a la información con que se trabaja, generando una herramienta más robusta, sin atender con la estructura convencional de la casa.
- Es evidente que trabajar con varios SCP interrelacionados por una red difusa involucra gran cantidad de variables de entrada, cálculos y variables de salida, lo cual hace que su desarrollo en forma manual sea complejo, demorado e ineficiente. Por lo tanto, con el fin de subsanar esas dificultades se implementó la herramienta computacional Fuzzynet.
- Mediante el modelo propuesto QFD apoyado mediante SCP interrelacionados por una red difusa se logra superar las fallas del QFD convencional en cuanto al manejo de la información tanto cualitativa como cuantitativa, involucrar incertidumbre asociada a la información, minimizar los volúmenes de información, agilizar su desarrollo, manejar solo la información necesaria, optimizar recursos, reducir costos y lograr mantener las ventajas asociadas al QFD convencional.

### Respecto de la aplicación del modelo propuesto

- El objetivo de desarrollar un aparato protésico de miembro superior es proporcionar la posibilidad de rehabilitación al paciente, esto es, suplir de la mejor manera la función perdida; por lo tanto, el trabajo para el desarrollo de una prótesis debe involucrar un equipo interdisciplinario y tener en cuenta todos los aspectos relacionados con la amputación desde el momento en que ocurre, al igual que los conceptos de todas las personas involucradas en el proceso de amputación, rehabilitación, construcción de la prótesis y adaptación del paciente.

- Mediante la aplicación de las herramientas sugeridas en este proyecto para la primera parte de entradas al sistema, con un grupo de usuarios relativamente bajo, se logró capturar información suficiente para establecer los *requerimientos del usuario* para una prótesis de miembro superior, por lo tanto es evidente que no se necesita un tamaño de muestra muy grande para obtener información clara, precisa y confiable.

- La implementación del modelo propuesto para el diseño de la prótesis mioeléctrica de mano genera información valiosa para el estudio de diseño y desarrollo de otro tipo de elementos protésicos para miembro superior.

### Respecto de los resultados arrojados por Fuzzynet

- Una de las grandes ventajas del modelo propuesto es que se puede adaptar para el desarrollo de diversas aplicaciones, permitiendo depurar y acondicionar las variables lingüísticas, el nivel de optimismo y el tipo de información que ingresa al sistema, según la experiencia y conocimiento del diseñador experto y los datos arrojados como resultado.

- Las *características de calidad* prioritarias arrojadas como resultado de la aplicación del modelo propuesto y bajo la herramienta computacional Fuzzynet son: *fuerza de presión, longitud de los dedos, apertura máxima, anchura palmar*; valoradas como muy importante y *dimensiones del pulgar* valorada con muy recomendado. La importancia de estas características está dada principalmente por estar correlacionada positivamente con un número alto de *requerimientos del usuario*, presentar un peso absoluto de requerimientos alto, bajo nivel de dependencia, y que la prótesis del GIBM-UNCB no logra satisfacerlas adecuadamente.

- De las características evaluadas como prioritarias, la *longitud de los dedos, anchura palmar y dimensiones del pulgar* presentan correlación con los mismos requerimientos, es decir, son redundantes, puesto que al mejorar cualquiera de ellas mejoran los mismos requerimientos, esto implica que se realice una optimización innecesaria por lo tanto es criterio del diseñador la selección de la que desea optimizar.

- Al optimizar las cuatro características prioritarias identificadas por el software, y depuradas las redundantes, se logran satisfacer dos de los *requerimientos del usuario* valorados como muy importantes, los cuales son: *realizar apertura y cierre y manejar auto*; diez requerimientos recomendados como: *aparición más natural, dimensiones acordes al paciente, permita actividades de fuerza, libertad de movimientos, autonomía en actividades cotidianas, tiempos prolongados de operación, apta para diferentes trabajos, realizar pinza fina, buena fuerza de presión, variación en rapidez de movimientos y baterías intercambiables*, y cuatro indiferentes: *autobloqueante, girar perillas y puertas, tomar objetos pequeños, tomar objetos grandes*.

- De las características determinadas con el QFD convencional para prótesis de miembro superior, las de mayor prioridad son: peso pinza, peso flexo-extensor, peso rotador, fuerza de presión, capacidad de carga y manufactura económica, de las cuales sólo la fuerza de presión fue determinada como prioritaria, mediante la implementación del modelo propuesto; esto debido principalmente a que presentan correlación con pocos requerimientos del usuario o dichos requerimientos tienen priorización de baja, presentan dependencia negativa con otras características de calidad, o es una característica sobre la cual se ha trabajado en el GIBM-UNCB y está muy cerca de cumplir con la meta.

- Mediante la evaluación de los *ratios* de mejora de la competencia se pueden estudiar las fortalezas de cada una de estas prótesis para cumplir con las *características de calidad* y así tener una base para optimizar nuestro producto.

### Bibliografía

Akao, Y., "Despliegue de la Función Calidad: integración de las necesidades del usuario en el diseño del producto", Japón, 1990.

Duarte, O., "Técnicas difusas en la evaluación de impacto ambiental", tesis presentada en la Universidad de Granada, España, para optar al grado de Ph.D en Informática", 2000.

González E., M.E., "QFD La Función Despliegue de la Calidad, McGraw-Hill, España, 2000.

Olaya E, Erika., "Despliegue de Función Calidad (QFD) apoyado mediante lógica difusa para requerimientos de diseño de prótesis mioeléctrica de mano", tesis presentada a la Universidad Nacional de Colombia para optar al grado de Magíster en Ingeniería-Materiales y Procesos, 2004.

Olaya E, Erika; Cortés R., Carlos y Duarte V., Oscar, "Despliegue de Función Calidad (QFD): beneficios y limitaciones detectados en su aplicación al diseño de prótesis mioeléctrica de mano", en *Ingeniería e Investigación*, N° 57, pp. 30- 38, abril del 2005.

Stone, Robert B.; Wood, Kristin L., "Development of a Functional Basis for Design", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 122, December 2000.

