

# Propuesta metodológica para construir sistemas automatizados de inspección visual industriales, con base en productos comerciales

Luis Diego Murillo <sup>1</sup>

Rodrigo Bogarín <sup>2</sup>

*La inspección visual de productos ha sido una labor exclusiva del ser humano. Sin embargo, mantener los expertos necesarios en una línea de producción resulta muy costoso para las compañías industriales.*

## Palabras clave

Inspección visual automatizada (AVI), Visión de Máquina (MV), Integración de componentes comerciales.

## Resumen

Las compañías industriales que desean automatizar sus procesos de control de calidad, no deben arriesgar sus recursos en investigación y desarrollo para sus propios sistemas de visión industrial, debido a que esto implica invertir gran cantidad de tiempo y dinero para obtener los resultados deseados. En los últimos años, han surgido sistemas comerciales de inspección visual, los cuales se han convertido en una verdadera opción para quienes desean solucionar sus problemas concernientes al aseguramiento de atributos de los productos.

El presente artículo propone una metodología de 12 pasos, para construir un sistema de inspección visual automatizada (avi) a partir de la selección e integración de distintos componentes comerciales.

## Introducción

La inspección visual de productos ha sido una labor exclusiva del ser humano. Sin embargo, mantener los expertos necesarios en una línea de producción resulta muy costoso para las compañías industriales. Por otro lado, el personal encargado de la calidad brinda a las líneas de producción una flexibilidad enorme que permite realizar cambios de productos, incrementos o decrementos de producción casi instantáneos sin mayores complicaciones, simplemente aumentando o disminuyendo la cantidad de operarios, cambiando de experto o entrenado a los antiguos expertos. Los sistemas modernos

1 M.C. Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: (lmurillo@itcr.ac.cr).

2 M.Sc. Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: (rbogarin@itcr.ac.cr).

de inspección visual automatizada (AVI), han superado en gran medida esta limitación, y se han convertido en una opción real para las industrias.

Los sistemas automáticos de inspección visual utilizan tanto técnicas de procesamiento como de análisis de imágenes. El procesamiento de imágenes se refiere a la modificación de imágenes utilizando técnicas matemáticas con el fin de utilizarse posteriormente en análisis, clasificación, etc. El análisis de imágenes trata de interpretar o extraer características específicas de particular interés en la aplicación. Se puede decir que la entrada del proceso de análisis es una imagen y la salida son parámetros que se buscan como, por ejemplo, las dimensiones de un objeto.

Los sistemas de visión industriales son una combinación de hardware y software, que capturan una imagen para aplicarle una serie de técnicas para transformar y sustraer información importante con la finalidad de tomar una decisión binaria. Estos sistemas reciben el nombre de sistemas de inspección visual automatizada (AVI). Hoy en día estos sistemas se han convertido en una importante herramienta en diversos campos como por ejemplo: la medicina, astrofísica, geografía, biología, ingenierías, etc.

A pesar de esta diversidad de aplicaciones, los fundamentos del procesamiento y análisis de imágenes son prácticamente los mismos. Esto no quiere decir que se pueda construir un sistema de visión universal aplicable a cualquier campo.

### **Evolución de los sistemas AVI**

En los setenta aparecieron los primeros sistemas AVI, pero fue a partir de los ochenta que empezaron a tener un verdadero impacto en los países industrializados. No todas las compañías tenían la capacidad económica ni tecnológica de construir sus propios sistemas AVI personalizados. En ese entonces, los sistemas de visión en tiempo

real eran exóticos y prohibitivamente caros, en [Tere99] se menciona que esos sistemas oscilaban alrededor de \$900.000.

Con el advenimiento de la integración a ultra gran escala de los circuitos integrados (ULSI) [Davi97] y la aparición de sensores CCD (Charge Coupled Device) los sistemas de visión se volvieron más accesibles en los noventa cuyos precios se redujeron dramáticamente al 10% del valor original. Actualmente, la tendencia de disminuir el precio de los circuitos integrados, el surgimiento de nuevas tecnologías constructivas y la aparición de un gran número de suplidores comerciales de este tipo de sistemas, han permitido que los precios se reduzcan considerablemente y oscilen entre \$1.500 y \$60.000, los cuales son montos más accesibles para la industria.

Los fabricantes de sistemas de visión han identificado los principales requerimientos de la industria y han fabricado sistemas acordes a las necesidades existentes. De esta forma se encuentran los sistemas AVI y los sistemas de control robótico [GCGH00],[RoMi89]. Otro autor [Gro87] indica que las aplicaciones de los sistemas de visión se dividen en la industria en cuatro categorías: inspección, control y guía visual (para robots), identificación de partes y seguridad.

Para el sector industrial, los sistemas de visión comerciales representan un enorme ahorro en tiempo de investigación, desarrollo e implementación porque brindan hardware y software que solventan los requerimientos específicos de un determinado problema. Es decir, la mayoría de las veces, estos sistemas comerciales son suficientemente completos para resolver las necesidades y requerimientos de un área específica.

Debido a que la mayoría de los futuros proyectos en nuestras empresas, sino la totalidad de ellos, estarán dirigidas a automatizar la inspección de productos,

*Uno de los mayores beneficios de los sistemas automatizados de inspección es su capacidad de reducir costos y disminuir el desperdicio.*

el presente artículo tratará de presentar elementos claves para el diseño de este tipo de sistemas utilizando productos comerciales.

Existe en la literatura muchas referencias de aplicaciones de sistemas AVI en industrias alimenticias, metalmecánica, farmacéutica, semiconductores, automotriz, etc.; sin embargo, el autor desconoce si existe algún método para seleccionar sistemas AVI comerciales. En ingeniería industrial, cuando se desea comparar dos o más productos entre sí, se utilizan técnicas de cotejo como el QFD (Quality Function Deployment) para determinar cuál producto responde a las necesidades particulares del cliente o contexto. El presente artículo combina este método con la gestión de proyectos que propone el PMI (Project Management Institute) en su estándar llamado “*A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*”.

### ¿Cuándo usar un sistema AVI?

Actualmente, la competencia del mercado globalizado presiona a todas las industrias a producir más, a un costo menor, con una alta calidad y flexibilidad. La calidad de un producto ya no es por sí solo un elemento diferenciador en el mercado, los clientes suponen que todos los productos deben de ser de alta calidad. A nivel industrial es posible clasificar las inspecciones en 4 tipos [Dav97]: (a) inspecciones dimensionales o geométricas, (b) inspecciones estructurales, (c) inspecciones de superficie, (d) inspecciones de operación.

De acuerdo a [JaDo97], los sistemas AVI se componen de 4 partes: (a) adquisición de la imagen, (b) procesamiento, (c) extracción de características y (d) proceso de decisión. El proceso de inspección de productos es realizado por este tipo de sistemas a un bajo costo y se logra siempre y cuando los objetos por analizar presenten homogeneidad en la apariencia.

Es recomendable utilizar estos sistemas en compañías donde las líneas de producción requieren o concuerdan con alguna de las siguientes características:

- Se necesita revisar el 100% del producto.
- Se necesitan revisar grandes volúmenes de producción de cientos de miles de unidades diarias.
- Se necesitan realizar inspecciones con una alta precisión durante largos periodos de tiempo.

Estos sistemas son utilizados tanto en procesos productivos no discretos donde el flujo de producto es continuo como en la industria del papel, aluminio, pañales, etc. También en procesos discretos como por ejemplo: embotelladoras, fábricas de automóviles, etc.

Es importante mencionar, que los sistemas AVI aplican exactamente los mismos criterios de calidad a cada unidad revisada (alta fiabilidad), no sufren de estrés ni cansancio visual y no realizan malas interpretaciones de los criterios de calidad como sí lo hacen los operarios humanos.

Uno de los mayores beneficios de los sistemas automatizados de inspección es su capacidad de reducir costos y disminuir el desperdicio. Es recomendable utilizar este tipo de sistemas intensivamente para permitir procesar altos volúmenes de productos, que a su vez genera un acelerado retorno de inversión.

Si el proceso de control de calidad concuerda con cualquiera de las siguientes tareas, entonces es recomendable utilizar un sistema AVI para automatizar dicha inspección [RoMi89], [GCGH00], [Davi97]:

- Medición de dimensiones.
- Verificación de presencia o ausencia de componentes de un objeto y su conteo.
- Reconocimiento de caracteres o códigos de barras.

- Localización, orientación e identificación de objetos, símbolos, partes de máquinas, etc.
- Detección de errores de tamaño, forma y localización desconocida.

## Configuraciones de los sistemas AVI

Los sistemas de visión tienen por lo general una de las tres posibles configuraciones [MeGr03]:

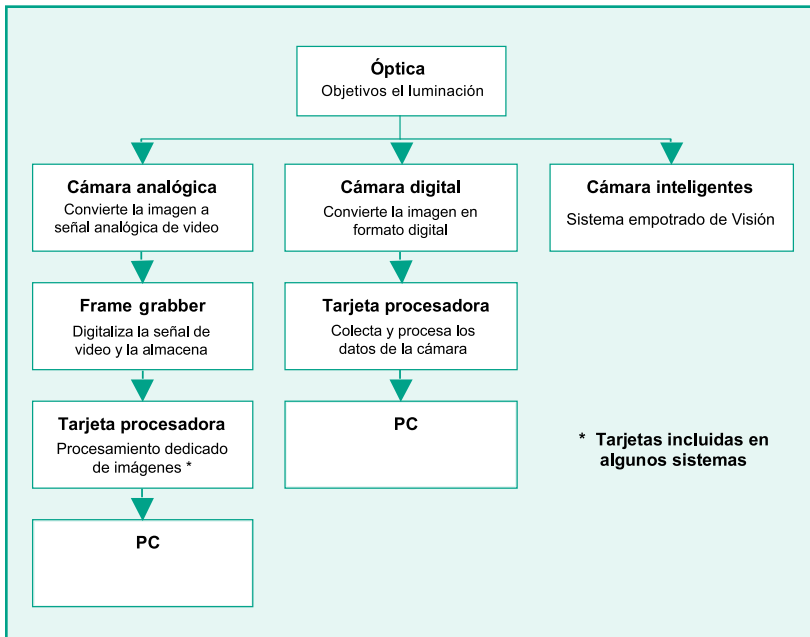


Figura 1. Arquitecturas de los sistemas AVI.

Las primeras máquinas de visión utilizaron cámaras de video analógicas, *frame grabbers*, y una PC. Por otro lado, las máquinas de visión más utilizadas actualmente son las que utilizan cámaras digitales y tarjetas de adquisición de señales. Por último, las cámaras inteligentes son sistemas de visión completos de bajo costo y aplicables a muchos problemas. Sin embargo, en soluciones donde el grado de dificultad es muy alto, estos sistemas tienen problemas en el procesamiento de la imagen debido a lo limitado del hardware.

Las cámaras inteligentes se están introduciendo al mercado con gran fuerza debido a una serie de ventajas respecto a los otros dos sistemas:

- Requieren menor hardware.
- Menor costo.
- Puesta en operación relativamente rápida tanto del hardware como del software.
- Ejecutan en tiempo real el análisis del producto.
- Alto desempeño similar a los sistemas tradicionales.

Es importante destacar que la mayoría de las veces, el éxito o fracaso de un sistema de visión se debe a una mala selección tanto de la iluminación como del objetivo de la cámara y no a la arquitectura seleccionada. Por ejemplo, un objetivo e iluminación mal escogidos, conllevan a una serie de distorsiones en la imagen como: iluminación no uniforme, pobre contraste, sombras y brillos excesivos, distorsiones geométricas, etc. [Davi97], [JaDo97] que afectan la calidad de la imagen capturada.

Las cámaras inteligentes son sistemas empujados (*embedded systems*) que poseen un software propietario para poderlas programar. En los sistemas de cámaras digitales y cámaras analógicas, existen varias posibilidades: fabricantes que manufacturan tanto el hardware como el software; y fabricantes que se especializan en componentes específicos del sistema. De esta forma encontramos fabricantes de software, de tarjetas de adquisición de imágenes, especialistas en iluminación y en óptica (objetivos), etc.

## Pasos para construir y seleccionar un sistema AVI

Se propone un proceso de doce pasos para seleccionar un sistema de visión industrial a partir de elementos comerciales, combinando la solución de problema mediante la gestión de proyectos y las

casas de calidad (QFD). En la figura 2 se muestra gráficamente la relación entre distintos pasos.

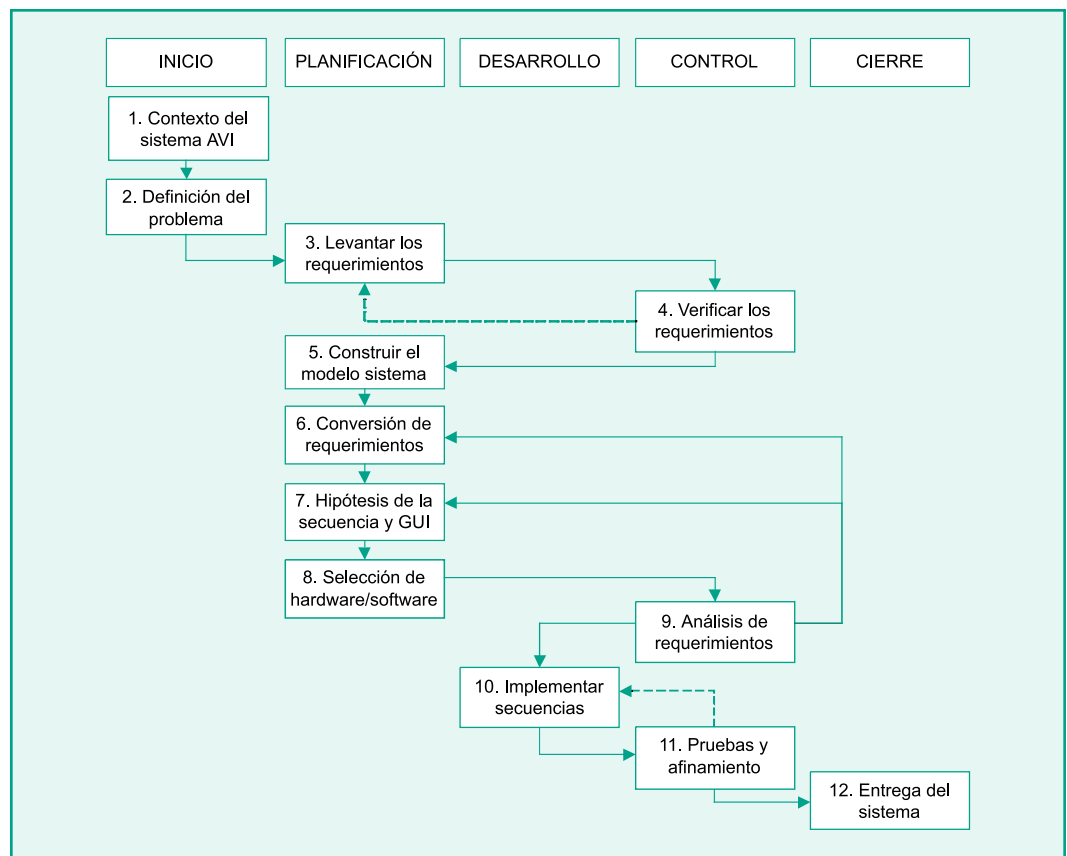
### Paso 1. Conocer el ambiente de instalación del sistema AVI

Familiarícese con la línea de producción y con la maquinaria. Recolecte toda la información posible, por ejemplo:

- Índice de disponibilidad
- Índice de desempeño
- Índice de calidad
- Gráficas de control

- Diagramas de errores (paretos)
- Velocidad de producto (Si el objeto se mueve)
- Especificaciones de calidad
- Espacio disponible
- Instalación electromecánica y de telecomunicaciones
- Recolecte muestras de productos defectuosos.

Esta información le servirá posteriormente en el análisis de requerimientos y a entender el proceso productivo.



**Figura 2.** Metodología para la construcción de un sistema automatizado de inspección visual AVI, con sus respectivas fases en el proyecto.

### Paso 2. Defina el problema existente y el alcance

Defina claramente el problema y los objetivos de la solución, con el fin de no resolver otro problema al final del proyecto.

### Paso 3. Levantamiento de requerimientos

Una vez que conoce el ambiente, entreviste a ingenieros, técnicos y operarios con el fin de determinar los requerimientos del sistema.

Elabore una guía que le permitan recolectar los requerimientos funcionales, los no funcionales y los de dominio [Somm02].

### Requerimientos funcionales

Estos requerimientos tratan de determinar qué tipo de servicios debe brindar el sistema AVI. Los servicios pueden ser entre módulos del mismo sistema, entre el sistema y los autómatas programables (PLC, RTUs), o entre el sistema y los usuarios.

Los servicios son, por tanto, la transferencia de información del sistema de visión a los usuarios o a otros sistemas. Por ejemplo, un servicio se puede especificar con base en que

*“El sistema debe ser capaz de determinar si la botella tiene tapa o no y reportar el resultado binario al PLC”.*

Es imprescindible que, cuando se definan los requerimientos funcionales, se establezcan los criterios bajo cuales se aceptará el sistema una vez terminado (criterios de aceptación).

Es recomendable utilizar alguna técnica de levantamiento de requerimientos tal como VORD o CRC, etc., en problemas que involucren cierto grado de dificultad.

### Requerimientos no funcionales

Los requerimientos no funcionales expresan limitaciones o restricciones a los servicios que brindará el sistema de visión. Por ejemplo:

*“El sistema debe de ser capaz de procesar 1500 tapas de botellas por minuto”.*

Conceptos tan importantes como la disponibilidad, la fiabilidad, la portabilidad, la eficiencia, la integridad del sistema, el cumplimiento de normas y estándares definidos por el usuario, etc., son parte de los requerimientos no funcionales.

Este tipo de requerimientos hay que tomarlos con especial cuidado, porque pueden determinar fácilmente el fracaso del proyecto.

### Requerimientos de dominio

Estos requerimientos son particulares a los sistemas de visión. Son una serie de parámetros básicos que permiten determinar posteriormente elementos del hardware como la resolución deseada en la imagen y el tipo de objetivo.

- Escena (FOV): Área que se desea capturar por la cámara.
- Distancia de trabajo (WD): Margen de distancia que se dispone entre la cámara y el objeto.
- Resolución: Característica más pequeña que se desea capturar en la imagen.
- Profundidad de la escena (DOF): Profundidad del objeto a ser capturado. Si la cámara solo captura imágenes en dos dimensiones este parámetro no se utiliza.

### Paso 4. Verificación de requerimientos

Revise la información obtenida en el paso 1., y compárela con los requerimientos no funcionales del paso 3. Los datos de los requerimientos deben ser lógicos y acordes a los datos de la línea de producción o máquina. Por lo general, los índices de fiabilidad, disponibilidad, etc., del sistema de visión deben ser mejores que los índices del equipo donde se instalará el sistema.

Revise los requerimientos con los principales responsables del proyecto o del sistema, para corroborar si están de acuerdo con la interpretación de las necesidades y si no se ha omitido algún punto importante.

### Paso 5. Construir un modelo a partir de la interpretación de requerimientos

Este paso lo que pretende es plasmar en forma gráfica los requerimientos

*Es imprescindible que, cuando se definan los requerimientos funcionales, se establezcan los criterios bajo cuales se aceptará el sistema una vez terminado (criterios de aceptación).*



funcionales. Esto permitirá comprender mejor los requerimientos de los usuarios del sistema.

El modelo se puede construir con diagramas de caso de UML, o con cualquiera otra notación que permita entender las necesidades del cliente.

### Paso 6. Conversión de los requerimientos de dominio y no funcionales

La conversión pretende especificar los requerimientos de dominio y no funcionales, de tal forma que permitan seleccionar, posteriormente, el equipo o los componentes de este. La conversión de requerimientos, se podría decir, que es una segunda especificación de requerimientos, no en términos de las necesidades del cliente, sino en términos técnicos que faciliten la selección. Este paso debe realizarse por personal técnico capacitado en el área.

La conversión de requerimientos arroja parámetros técnicos que permitirán comparar y seleccionar cuál será el tipo de hardware idóneo (tipo de sensor, objetivos, iluminación).

#### Reespecificación: extracción de la imagen

La extracción de la imagen esta relacionada con conceptos de óptica, iluminación y arreglos de sensores fotosensibles.

#### Resolución de la cámara

Para seleccionar la resolución de la cámara se utiliza el teorema de Nyquist donde la frecuencia de muestreo debe ser, al menos, dos veces la máxima frecuencia espacial; más información en [Week96], [Davi97]. Fabricantes como National Instruments aplican el teorema y calcula la resolución como:

$$\text{ResoluciónSensor}=(FOV/\text{Resolución})*2 \quad (1)$$

Otros fabricantes utilizan factores multiplicativos más altos, como [DVT02]

y [MeGr03] multiplican por tres la frecuencia espacial máxima. Inclusive, hay diseñadores de sistemas que recomiendan un factor de diez [HTS03] según los requerimientos de los equipos.

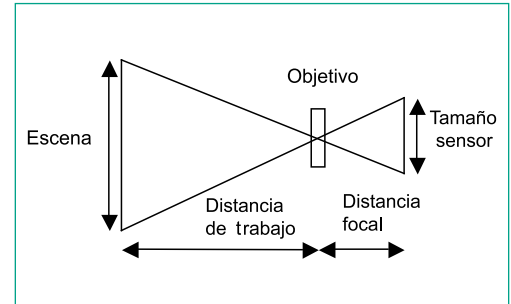


Figura 3. Relación de la escena, la distancia de trabajo, el tamaño del sensor y la distancia focal.

#### Aumento del objetivo

El aumento se define como la relación del ancho del FOV entre el ancho del sensor.

$$\text{Aumento} = \text{Tamaño sensor}_{diagonal} / FOV_{diagonal} \quad (2)$$

#### Distancia focal del lente

Se define como la relación de las diagonales de la distancia de trabajo, el tamaño del sensor y el FOV.

$$DF = WD * \text{Tamaño sensor} / FOV \quad (3)$$

Es importante determinar el f/# (medida de captura de intensidad de luz) debido a que esto repercute en la selección de los objetivos correctos. Más información del cálculo de estos parámetros en [DSW99], [MeGr03], [HTS03], [DVT02] o en libros de óptica. El tipo de montaje del objetivo, ya sea tipo C o CS, dependerá del tipo de cámara seleccionada.

#### La iluminación

Las técnicas de iluminación pretenden iluminar la escena con la finalidad de mejorar el contraste entre los objetos. Las técnicas de iluminación se basan en dos conceptos: (a) el contenido espectral de

la luz, (b) la orientación y geometría de la lámpara.

El contenido espectral está relacionado con la longitud de onda que emiten las distintas fuentes de luz tales como fluorescentes, LEDs, alógenos, láceres. El círculo cromático ayuda a seleccionar longitud de onda de los colores complementarios para incrementar el contraste del objeto.

La manipulación del haz luz y la geometría de la lámpara crean las llamadas técnicas de iluminación. Entre las más utilizadas están las técnicas de luz directa, campo oscuro, luz difusa, luz trasera, luz co-axial, y sus combinaciones, [Davi97].

La luz directa consiste en apuntar el haz de luz al objeto. Se utiliza cuando se desean altos contrastes; sin embargo, en superficies irregulares o brillantes causan regiones sombreadas o con brillos excesivos. La luz de campo oscuro es un haz de luz que se apunta en cierto ángulo para detectar defectos o relieves en la superficie; en caso de que la superficie sea lisa, el sistema de visión no captará nada. La luz trasera consiste en proyectar la luz desde la parte de atrás de la escena. Esta técnica de iluminación le permite a las máquinas de visión capturar las siluetas de los objetos, lo cual facilita el análisis de imágenes cuando se desea obtener dimensiones y orientaciones. Por otra parte, la iluminación difusa provee luz no direccional, utilizada en superficies brillantes e irregulares. Finalmente, la iluminación coaxial es una variación de la luz difusa, que es útil para iluminar regiones específicas que son afectadas por sombras de objetos vecinos.

Cada técnica denota un propósito especial. Para un estudio a profundidad: [DSW99], [RoMi89], [Groo87], o con un fabricante especializado en iluminación para máquinas de visión como son: Melles Griot, Stoker & Yale, Nerlite, Graftek, Advance Illumination, etc.

## Paso 7. Hipótesis de la secuencia de análisis y GUI

Este paso busca asegurar que el seleccionador del sistema AVI, conozca elementos claves para discernir entre las capacidades de procesamiento y análisis de los paquetes de software comerciales, una vez que inicie el proceso de selección.

Es importante conocer las técnicas utilizadas en el procesamiento y análisis de imágenes industriales. Cada técnica nos brinda información específica obtenida bajo ciertas parametrizaciones que ayudan a optimizar los algoritmos a necesidades muy particulares. He allí la necesidad de construir una secuencia de técnicas que permitan plantear hipotéticamente la secuencia ideal de análisis para resolver el problema.

En [GoWo02], se propone un paradigma que traslapa las áreas de procesamiento y el análisis de imágenes. En el contexto de procesamiento de imágenes, se establecen tres procesos computacionales: uno de bajo nivel, encargado de realizar operaciones básicas tales como mejoramiento de contraste, reducción del ruido, mejoramiento y detección de contornos, un segundo nivel llamado “intermedio”, que realiza tareas como segmentación, descripción de objetos y clasificación; por último, el procesamiento de alto nivel consiste en emular las funciones cognitivas del cerebro humano asociadas al análisis de una imagen. Los sistemas comerciales, en general, utilizan técnicas de procesamiento de bajo y mediano nivel.

Es necesario profundizar en las técnicas más utilizadas en el procesamiento de imágenes. Textos como [Davi97], [Week96], [DSW99] y [GoWo02] exploran a profundidad las técnicas más utilizadas en los sistemas AVI. Entre ellas se encuentran:

Procesamiento en el dominio del espacio.

- Histograma.

*La luz directa consiste en apuntar el haz de luz al objeto. Se utiliza cuando se desean altos contrastes; sin embargo, en superficies irregulares o brillantes causan regiones sombreadas o con brillos excesivos.*



- Aritmética de imágenes (adición, sustracción, etc.)
- Filtros espaciales (máscaras)

Procesamiento en el dominio de la frecuencia

- Transformada de Fourier
- Filtros de frecuencia espaciales
- Filtros homomórficos

Morfología de imágenes

- Morfología binaria y avanzada
- Dilatación y erosión de imágenes

Segmentación y representación

- Umbrales (Thresholding)
- Detección de líneas, límites y puntos
- Segmentación basadas en regiones
- Detección de patrones

Procesamiento de color

- Comparación de colores
- Localización del color
- Patrones de color
- Segmentación por color
- Afinar y suavizar bordes

Reconocimiento de objetos

- Redes neuronales
- “Template matching”
- Clasificadores estadísticos

La construcción de la hipótesis para resolver el problema es uno de los subpasos de mayor dificultad, porque se requiere un conocimiento profundo de los resultados de cada técnica. Esto con el fin de determinar si es aplicable, y si lo es, dónde se recomienda colocar la técnica en la secuencia de inspección.

## Diseño del GUI (Graphic User Interface)

Las interfaces gráficas de usuario para las máquinas de visión están, en su gran

mayoría, destinadas a brindar información de las inspecciones en el proceso productivo. Su propósito no es configurar secuencias ni parámetros.

Generalmente, las GUI muestran imágenes y datos con fines informativos. Por ejemplo, muestran en pantalla la imagen del último producto revisado como también, la última imagen del producto que no cumplió con las especificaciones, etc. Es habitual mostrar las estadísticas de los productos revisados, aprobados y rechazados, con sus respectivos porcentajes. Algunas interfaces gráficas muestran los tiempos de captura, el tiempo de procesamiento de la imagen, o índices adicionales del proceso productivo.

Muchos de los paquetes de software disponibles para la construcción de secuencias de inspección, poseen herramientas que permiten construir la interfase gráfica y mostrar los parámetros deseados a partir de una secuencia definida previamente. Otros paquetes computacionales ofrecen la posibilidad de convertir la secuencia completa a lenguajes de alto nivel como C++, o Visual Basic, lo que permite desarrollar GUI casi sin restricciones operacionales.

Los requerimientos tradicionales de los sistemas de inspección visual para las interfaces gráficas, están orientados a la información; sin embargo, recientemente, han surgido programas capaces de traducir secuencias de inspección a lenguajes de alto nivel lo que permite desarrollar interfaces más interactivas.

## Paso 8. Comparación de tecnologías

Una vez que se tienen claros los tres tipos de requerimientos obtenidos en el paso 3 (funcionales, no funcionales y de dominio) y se ha establecido un algoritmo para el análisis y procesamiento, se procede a seleccionar el hardware y software para el sistema de automatizado de inspección visual.

*Los requerimientos tradicionales de los sistemas de inspección visual para las interfaces gráficas, están orientados a la información; sin embargo, recientemente, han surgido programas capaces de traducir secuencias de inspección a lenguajes de alto nivel lo que permite desarrollar interfaces más interactivas.*

La forma de selección será comparando las tecnologías comerciales con los requerimientos deseados por medio de una matriz inspirada en el QFD (Quality Function Deployment) [Lewi00].

Primero, se determina cuál es la prioridad de cada requerimiento, por medio de una

matriz de prioridades similar a la del cuadro 1.

Una vez que se priorizan los requerimientos, se utiliza una tabla para comparar fabricantes comerciales de sistema de visión industriales como en el cuadro 2. A cada requerimiento que

### Cuadro 1

Matriz de prioridades

	Req A	Req B	Req C	Req D	Rango	Prioridad
Req A		0	1	0	1	3
Req B	1		1	1	3	1
Req C	0	0		0	0	4
Req D	1	0	1		2	2

cumple satisfactoriamente se le asignan dos puntos, si cumple parcialmente un punto y si no cumple no se le asigna nada. Al final se suman los puntos de cada fabricante.

El cuadro 2 no contempla el peso de cada punto según la prioridad del requerimiento. Una forma de corregir los puntajes anteriores es plantear algún tipo de modelo, ya sea lineal o no lineal. Por

ejemplo, un modelo lineal se obtendría multiplicando cada valor de celda por un factor obtenido de la siguiente forma:

$$Re(i) = \frac{(Rango(i)+1)}{Total\_de\_requerimientos} \quad (4)$$

Por ejemplo, para el requerimiento D el factor será el siguiente:

$$Req(D) = (2+1)/4 = 0.75$$

### Cuadro 2

Comparación de fabricantes sin factor correctivo de prioridad

0= no cumple 1= +/-cumple 2= cumple	Fabricante 1	Fabricante 2	Fabricante 3	Fabricante 4
1. Req B	1	0	2	2
2. Req D	0	1	2	2
3. Req A	1	2	0	1
4. Req C	2	2	0	0
<b>Totales</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

De esta forma se calcularán los factores para los restantes requerimientos. En este cuadro 3, se muestran los puntajes con el factor correctivo y la sumatoria de dichos puntajes por fabricante.

### Cuadro 3

Comparación de fabricantes según prioridad de requerimientos

0= no cumple 1= +/-cumple 2= cumple	Fabricante 1	Fabricante 2	Fabricante 3	Fabricante 4
1. Req B	2	0	2	2
2. Req D	0	0.75	1.50	1.50
3. Req A	0.50	1	0	0.50
4. Req C	0.50	0.50	0	0
<b>Totales</b>	<b>3</b>	<b>2.25</b>	<b>3.50</b>	<b>4</b>

El fabricante con mayor puntaje debería ser el seleccionado porque cumple las necesidades según su prioridad.

Es importante recordar que el modelo se puede cambiar a patrones logarítmicos o exponenciales, según sea conveniente.

Este tipo de “comparación” arroja cuál tecnología cumple mejor los requerimientos técnicos. Sin embargo, debe tomarse como una guía a combinar con factores tan importantes como costos, retorno de inversión, garantías, etc., o experiencias en ciertas marcas específicas.

#### Selección de hardware

Los requerimientos no funcionales y los de dominio son los que deben considerarse en la selección de cualquier hardware.

Una vez que decidimos utilizar una arquitectura específica, como sistemas de cámaras inteligentes o “frame grabbers” con cámara digital, etc., se realiza la comparación según el método inspirado

en el QFD descrito anteriormente entre distintos fabricantes.

Es recomendable comparar las técnicas de iluminación y la selección de los lentes mediante el método anterior.

La forma de asignar los puntos en el cuadro 2, es corroborando que las especificaciones técnicas cumplen con los requerimientos técnicos planteados en el paso 6.

#### Selección de software

La selección del software debe incluir, como mínimo, los requerimientos funcionales y los no funcionales. Esto permite escoger una herramienta adecuada para programar la secuencia de inspección.

Para seleccionar el paquete de software correcto, no basta con leer un boletín de un fabricante determinado. Extraer la información de esta forma es difícil y no asegura que se pueda implementar la solución al final. Lo más conveniente es escribir al fabricante para que envíe una versión de prueba. De esta manera, resulta fácil corroborar si están todas las herramientas que se necesitan y si son lo suficientemente poderosas.

La forma de asignar los puntajes para seleccionar el software en el cuadro 2, es corroborando que los distintos paquetes tengan implementados las técnicas o grupos de ellas, que resolverían el problema hipotéticamente (paso 7).

#### Paso 9. Análisis de requerimientos

Es importante recordar que los fabricantes de máquinas comerciales de visión construyen un software especializado que implementa muchas de las técnicas de procesamiento y análisis de imágenes citadas en el paso 7. Estos paquetes dirigidos al sector industrial, utilizan la reutilización de requerimientos, lo que permite construir poderosas herramientas que ayudan a satisfacer los requerimientos comunes de una inspección de calidad.

Sin embargo, una vez seleccionado el software comercial, es importante revisar nuevamente los requerimientos funcionales. Si el problema por resolver posee un grado de dificultad bajo, probablemente el sistema AVI cumplirá todos los requerimientos planteados originalmente. Las dificultades surgen cuando el problema es complejo: en este tipo de casos, no existe ese software comercial a la medida. Por tanto, es necesario ajustar los requerimientos de acuerdo a las capacidades que brinda la herramienta seleccionada.

### Paso 10. Implementación de la secuencia de análisis

Implementar el procesamiento y análisis de la imagen una vez seleccionado el software, no debería ser complicado, porque ya se tiene hipotéticamente las técnicas por utilizar y se han ajustado los requerimientos en el paso anterior. Por otro lado, mediante la selección de software, se aseguró que este cumpliera con la mayoría de herramientas, técnicas y algoritmos con el fin de cumplir con las necesidades originalmente planteadas.

Basándonos en [NaIn02], [DVT02] se propone, en la figura 3, un diagrama de flujo para la construcción de una secuencia de análisis. Determinar la secuencia correcta requiere conocimiento teórico y práctico, no existe una secuencia ideal para cada problema específico, debido a distintas combinaciones de técnicas o herramientas que pueden arrojar resultados similares. Lo que la literatura técnica recomienda [DVT02] es buscar, en la medida de lo posible, soluciones rápidas y sencillas.

En cuanto a la instalación mecánica, es necesario conocer previamente los tipos de soportes para la cámara, la colocación de la iluminación, montaje de lentes, guías para el producto, etc. A nivel eléctrico es indispensable estar claro en el tipo de sensores que accionará el disparo de la cámara, la comunicación a emplear, la alimentación eléctrica, etc.

### Paso 11. Pruebas y afinamiento

Una vez instalado tanto el hardware como el software, es necesario realizar múltiples pruebas con productos de la misma clase, con el fin de ir afinando cada uno de los parámetros de las técnicas seleccionadas y obtener los resultados deseados.

Se pueden construir distintas secuencias de análisis, con el mismo software, pero la mejor secuencia será la que posee el menor tiempo de procesamiento [JaDo97] y la mejor fiabilidad (menor número de falso positivos o menor tasa de escape).

Finalmente, la calibración del sistema de visión es responsabilidad de todas las áreas involucradas. La calibración optoelectrónica se realiza mediante 5 plantillas distintas según sean los requerimientos del sistema. Existen plantillas para validar el contraste y color, la distorsión geometría del objetivo, la profundidad de campo, la resolución del sistema, y las plantillas que miden las curvas MTF (Modulation Transfer Function), que verifican la capacidad del objetivo de trabajar a una resolución y contraste determinado.

### Paso 12. Entrega del sistema AVI

Es importante que cuando se entregue un sistema de inspección visual al “cliente” se le brinden varios documentos tales como:

- Manual del usuario
- Manual de ingeniería
- Bitácora del proyecto

El manual de usuario describe el sistema en general, así como los detalles de sus partes. Este manual debe contemplar las precauciones que se deben tomar en cuando el equipo esta en operación, así como los cuidados de mantenimiento cuando esta fuera de servicio. Este documento explica la interacción de la GUI con el usuario. Además, debe especificar claramente los procedimientos tales como: paradas de

*Se pueden construir distintas secuencias de análisis, con el mismo software, pero la mejor secuencia será la que posee el menor tiempo de procesamiento [JaDo97] y la mejor fiabilidad (menor número de falso positivos o menor tasa de escape).*

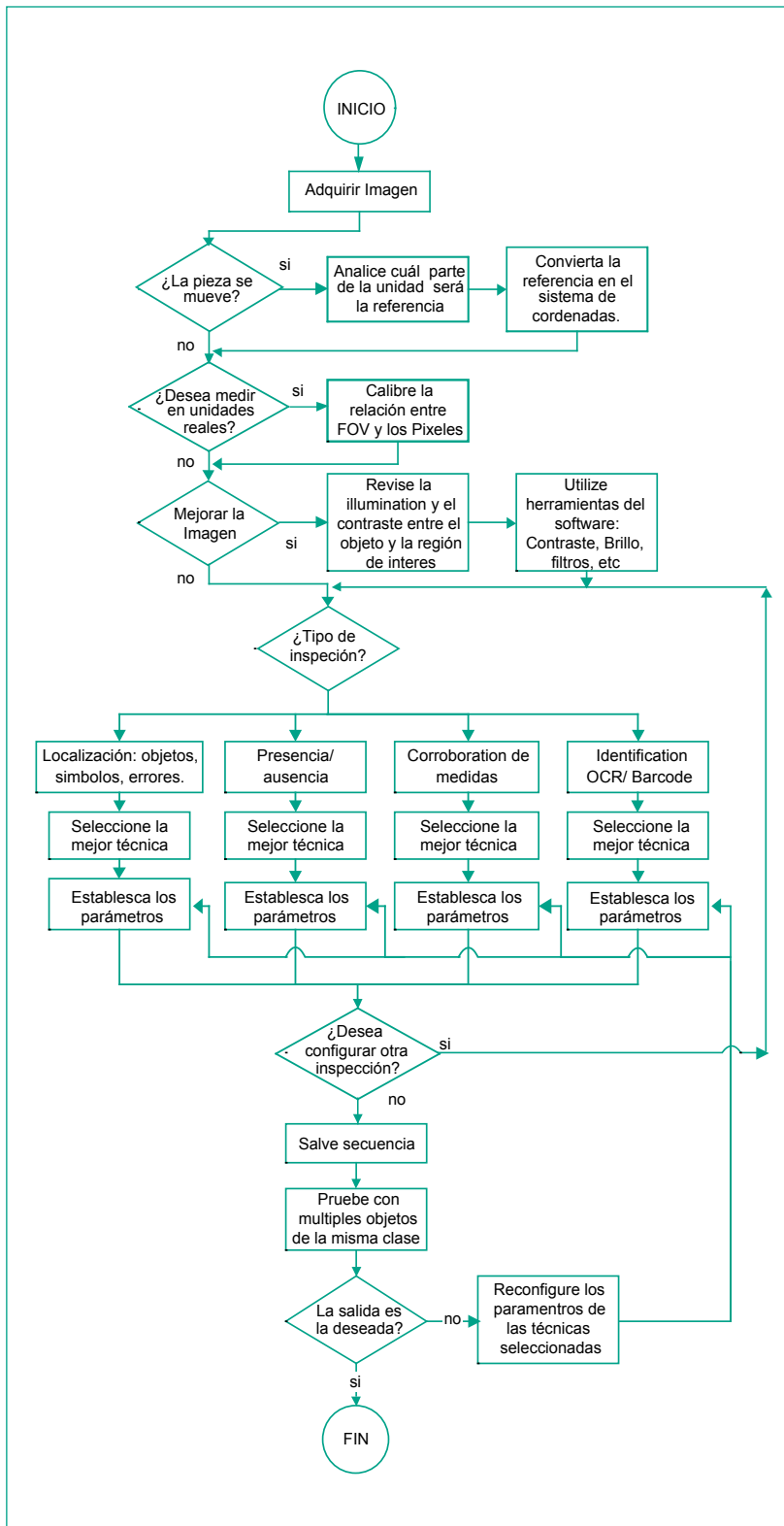


Figura 4. Metodología para la construcción de la secuencia de análisis de un sistema AVI.

emergencia, paradas programadas, puesta en inicio del sistema, etc.

El manual de ingeniería muestra las configuraciones eléctricas, mecánicas y la secuencia de técnicas seleccionadas para la inspección del producto.

La bitácora muestra al “cliente” el proceso de diseño, implementación y pruebas del sistema. En este documento aparecen los requerimientos iniciales, los criterios de aceptación, la selección de hardware y software, diseño de la secuencia programada, costos, retorno de la inversión, etc.

## Recomendaciones finales

La presente metodología pretende establecer lineamientos generales para la construcción sistemas de inspección visual automatizada con el propósito de guiar a ingenieros y a la industria a aprovechar estas poderosas tecnologías que hasta hace pocos años por razones económicas eran prácticamente inalcanzables.

Esta metodología es una guía flexible, lo cual implica que puede sufrir variaciones dependiendo del alcance del sistema que se desea construir.

## Referencia bibliográfica

[Davi97] Davies, E.R. *Machine Vision Theory Algorithms Practicalities*. 2°ed. Academic Press: Cambridge. 1997.

[DSW99] C. Demant, B. Streicher-Abel, P. Waszkewitz. *Industrial Image Processing: Visual Quality Control in Manufacturing*. Springer-Verlag: Berlin. 1999.

[DVT02] DVT Corporation. “DVT SmartImage Sensors: Installation & User Guide”. January 2002.

URL: <http://www.dvtsensors.com>

[DeNe03] Design News Magazine “Machine Vision comes to the masses”.

URL: <http://www.designnews.com>

[GCGH00] Guda, Prasanthi; Cao, Jin; Gailey, Jeannine; Hall, Ernest. “Machine vision

fundamentals". Center for robotic research. University of Cincinnati. OH. 2000.

[Groo87] Groover, Mikell. *Automation, Production Systems, And Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice-Hall: New Jersey. 1987.

[GoWo02] Gonzalez, Rafael C; Woods, Richard E. *Digital Image Processing*. 2 ed. Prentice-Hall: New Jersey. 2002

[HTS03] High Tech Services. "Machine Vision Tutorial". 2003.

URL:

<http://www.htservices.com/ToolsMachineVision/MachineVisionTutorial1.htm>

[JaDo97] Jain, Anil; Dorai Chitra. "Practicing Vision: Integration, Evaluation and Applications". Department of Computer Science. Michigan State University. MI. 1997.

[Lew00] Lewis, James. *The project manager desk reference*. 2 ed. McGraw Hill, New York: 2000.

[MeGr03] Melles Griot Inc. "Machine Vision Guide". 2003.

URL:

<http://www.mellesgriot.com/products/machinevision/>

[NaIn02] National Instrument Corp. "IMAQ: NI Vision Builder for Automated Inspection Tutorial". National Instrument Corporation. 2002.

URL:

[http://digital.ni.com/demo.nsf/websearch/21A7B90A7502DA5B86256C93005ACD7F?OpenDocument&node=11700\\_US](http://digital.ni.com/demo.nsf/websearch/21A7B90A7502DA5B86256C93005ACD7F?OpenDocument&node=11700_US)

[RoMi89] Robinson, Stanley; Miller, Richard. *Automated Inspection and Quality Assurance*. Marcel Denkker Inc: New York. 1989.

[Somm02] Sommerville, Ian. *Ingeniería de Software*. 6 ed. Pearson Educación, Mexico: 2002.

[Tere99] Teresko, John. "New eyes in Manufacturing". Industry Week. Cleveland. Tomo 248, N°8, pag 47-50. 1999

[Week96] Arthur, Weeks. *Fundamentals of Electronic Image Processing*. IEEE Press: New York. 1996