



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

**Equipo de clasificación de semillas basado
en visión artificial. Implantación sobre
hardware libre**

Autor:

Francisco Javier Sevillano Bustos

Tutor:

**Eusebio De la Fuente López
Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Automática**

Valladolid, diciembre de 2015

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

RESUMEN

Implantación de un sistema de visión artificial que permita la clasificación de granos de trigo en función de su morfología y tonalidad.

Se desarrollará tanto el algoritmo de control que permita realizar las inspecciones de los granos, como el código correspondiente a la interfaz de usuario que facilitará el manejo de la aplicación. Así mismo se realizará el programa del controlador Arduino que controle los distintos accionamientos mecánicos y los comunique con la parte de visión.

Para el desarrollo se han empleado los IDE CodeBlocks y el propio de Arduino y las librerías de código abierto OpenCV y GTK+.

PALABRAS CLAVE

Visión artificial; Grano de trigo; OpenCV; GTK+; Arduino.

SUMMARY AND KEYWORDS

SUMMARY

Implementation of an artificial vision system for classifying wheat grains based on their morphology and tonality.

It will be developed both, the control algorithm which allows for inspections of grains and the corresponding code to the user interface that will facilitate the handling of the application. Likewise the Arduino program controller that controls the various mechanical drives and communicate with the viewing part will be performed.

For the development it has been employed the CodeBlocks and Arduino IDE's and the open source libraries OpenCV and GTK +.

KEYWORDS

Artificial vision; Wheat grain; OpenCV; GTK+; Arduino.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES	III
SUMMARY AND KEYWORDS	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	11
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
1.1. Preámbulo.....	15
1.2. Justificación	15
1.3. Objetivos.....	16
1.4. Estructura de la memoria.....	17
Capítulo 2. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SEMILLAS	21
2.1. ¿Qué es una máquina de análisis y clasificación de semillas?.....	21
2.2. Estado del arte.....	22
2.2.1. Análisis por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)	23
2.2.2. Colorímetros.....	24
2.2.3. Máquinas cuenta semillas	26
2.2.4. Máquinas separadoras de semillas.....	27
Capítulo 3. LA VISIÓN ARTIFICIAL	29
3.1. Introducción a la visión artificial.....	29
3.2. Aplicaciones de la visión artificial.....	31
3.2.1. Campo de la seguridad vial	31
3.2.2. Campo de la robótica.....	32
3.2.3. Otros campos de aplicación.....	34
3.3. Tipos de iluminación.....	35
3.3.1. Iluminación difusa tipo domo.....	36
3.3.2. Iluminación a contraluz o <i>backlight</i>	37
3.3.3. Iluminación directa frontal.....	37
3.4. Espacios de color	38
3.4.1. Espacio RGB	39

Índice general

3.4.2.	Espacio HSV	40
3.4.3.	Espacio CIE.....	41
3.4.4.	Relaciones entre los distintos espacios de color	42
Capítulo 4.	SISTEMA MECÁNICO	45
4.1.	Funcionamiento general.....	45
4.2.	Sistema de almacenamiento y dosificación.....	46
4.3.	Sistema de transporte.....	49
4.4.	Sistema de clasificación	50
Capítulo 5.	SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL	53
5.1.	Elementos físicos del sistema de visión artificial.....	53
5.1.1.	Cámara	53
5.1.2.	Óptica	56
5.1.3.	Iluminación	57
5.2.	Algoritmo de visión artificial	58
5.2.1.	Captura de la imagen.....	59
5.2.2.	Conversión a escala de grises.....	60
5.2.3.	Binarización de la imagen	61
5.2.4.	Detección de contornos. Método de Canny	63
5.2.5.	Cálculo del rectángulo de menor área	65
5.3.	Análisis de las semillas.....	66
5.3.1.	Análisis de morfología	66
5.3.2.	Análisis de tonalidad	67
Capítulo 6.	SISTEMA DE CONTROL	69
6.1.	El controlador	69
6.2.	Entradas y salidas del sistema	71
Capítulo 7.	INTERFAZ DE USUARIO	73
7.1.1.	El menú principal del programa	73
7.1.2.	Ventana de nuevo análisis.....	74
7.1.3.	Ventana de análisis en ejecución	75
7.1.4.	Ventana de fin del análisis.....	76
7.1.5.	Ventana de consultar análisis	77
7.1.6.	Ventana de salir del programa	77

7.1.7. Informe de resultados.....	78
Capítulo 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	81
8.1. Condiciones de los análisis	81
8.2. Resultados sobre granos enteros	82
8.2.1. Iluminación directa frontal.....	82
8.2.2. Iluminación directa inclinada	84
8.2.3. Iluminación a contra luz	85
8.3. Resultados sobre granos partidos	87
8.3.1. Iluminación directa frontal.....	87
8.3.2. Iluminación directa inclinada	88
8.3.3. Iluminación a contra luz	90
Capítulo 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	93
9.1. Conclusiones	93
9.2. Líneas futuras	94
9.2.1. Mejoras a nivel mecánico	95
9.2.2. Mejoras a nivel de software.....	96
BIBLIOGRAFÍA	99

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Diagrama de bloques del algoritmo de visión artificial.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. Selección manual de semillas.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3. Ejemplo de análisis con visión artificial de granos de trigo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. Espectro de reflectancia NIR (Infrarrojo cercano) de la harina de trigo</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. Espectrofotómetro industrial.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 6. Colorímetro Konika Minolta (CR-10).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7. Curva de distribución espectral CIE D65.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8. Contador de semillas (Data count S25).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9. Máquina de clasificación óptica.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10. Granos de arroz antes y después de pasar por la máquina</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11. Granos de arroz cayendo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12. Anatomía del ojo humano.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13. Sistema de control de velocidad media por tramos.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14. Robot de soldadura.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Robot asistente.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16. Control de calidad de naranjas por visión artificial</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Escaneado 3D de una escultura.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18. Iluminación difusa tipo domo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19. Iluminación a contra luz o backlight.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20. Iluminación directa frontal.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21. Cubo del modelo RGB.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22. Cono del modelo HSV.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23. Esfera del modelo CIE Lab.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24. Esquema general de la máquina.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 25. Dosificador gravimétrico BSP100.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 26. Dosificador vibratorio cilíndrico para grano de trigo.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 27. Diagrama de bloques del funcionamiento de la máquina.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Detalle canal interior dosificador vibratorio.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 29. Cinta transportadora con lengüetas.....</i>	<i>49</i>

<i>Figura 30. Electroválvula (Festo) y esquema de funcionamiento.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31. Boquilla para soplador (Modelo MJ6 Silvent)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 32. Tipografía con diferentes resoluciones.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 33. Funcionamiento de un sensor CCD.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34. Cámara seleccionada para la aplicación (DFK 23U445).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35. Curva espectral del sensor CCD de la cámara seleccionada.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36. Óptica seleccionada para la aplicación (HF16HA-1B).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37. Comparación de granos bien y mal germinados.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 38. Comparación de granos con distintas tonalidades</i>	<i>59</i>
<i>Figura 39. Comparación de granos partidos y sin partir.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40. Imagen RGB granos de trigo.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 41. Imagen en escala de grises granos de trigo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 42. Histograma imagen escala de grises.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 43. Imágenes de granos enteros binarizadas con distintos umbrales.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 44. Imágenes de granos partidos binarizadas con distintos umbrales.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45. Imágenes Canny de granos partidos con distintos parámetros.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 46. Imágenes Canny de granos partidos con distintos parámetros.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 47. Imagen rectángulo menor área.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 48. Logotipos comerciales Arduino y Rasperry Pi.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 49. Placa Arduino Mega 2560.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 50. Ciclo de control de un proceso.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 51. Menú principal del programa.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 52. Ventana de análisis nuevo.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 53. Ventana de análisis en ejecución.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 54. Ventana de fin de análisis.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 55. Ventana de consultar análisis</i>	<i>77</i>
<i>Figura 56. Ventana de salir del programa</i>	<i>78</i>
<i>Figura 57. Ejemplo del informe de resultados.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 58. Imagen color - iluminación directa frontal.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 59. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa frontal</i>	<i>83</i>
<i>Figura 60. Imagen binaria - iluminación directa frontal</i>	<i>83</i>
<i>Figura 61. Imagen color - iluminación directa inclinada.....</i>	<i>84</i>

<i>Figura 62. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa inclinada</i>	<i>84</i>
<i>Figura 63. Imagen binaria - iluminación directa inclinada</i>	<i>85</i>
<i>Figura 64. Imagen color - iluminación a contraluz.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 65. Imagen contorno + rectángulo - iluminación a contraluz.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 66. Imagen binaria - iluminación a contraluz.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 67. Imagen color - iluminación directa frontal.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 68. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa frontal</i>	<i>88</i>
<i>Figura 69. Imagen binaria - iluminación directa frontal</i>	<i>88</i>
<i>Figura 70. Imagen color - iluminación directa inclinada</i>	<i>89</i>
<i>Figura 71. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa inclinada</i>	<i>89</i>
<i>Figura 72. Imagen binaria - iluminación directa inclinada</i>	<i>89</i>
<i>Figura 73. Imagen color - iluminación a contraluz.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 74. Imagen contorno + rectángulo - iluminación a contraluz.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 75. Imagen binaria - iluminación a contraluz.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 76. Sistema compacto de visión artificial</i>	<i>95</i>
<i>Figura 77. PLC Siemens y módulos de expansión</i>	<i>96</i>

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Este primer capítulo del trabajo va a servir para introducir de una forma breve en qué va a consistir y por qué se quiere llevar a cabo su realización. Para que al final del trabajo se haya alcanzado su fin último, se van a fijar una serie de objetivos a cumplir a lo largo de su desarrollo. Además, se va a incluir un resumen de cada uno de los capítulos de la memoria para hacerse una idea de los contenidos que la forman.

1.1. Preámbulo

El desarrollo de este trabajo se ha realizado a partir de la estancia en la empresa vallisoletana Automatinfo SL durante el período de prácticas establecido por la UVa para los grados del plan Bolonia. El tiempo total en dicha empresa fue de seis meses.

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de un proyecto más amplio como es el de desarrollar un sistema de análisis, clasificación y contaje de granos de trigo que podrá ser usado en los laboratorios de las empresas del sector.

Este trabajo se centrará en el diseño y desarrollo de un software de usuario que permita facilitar las labores de los técnicos del laboratorio que vayan a realizar dichos ensayos.

El fundamento de este software se encuentra en la visión artificial y en la comunicación, mediante un puerto serie, con un controlador Arduino. La visión artificial será la que nos permita obtener las características físicas de los granos, como la morfología o el color, mientras que el controlador Arduino será el encargado de gestionar el funcionamiento de los sensores y actuadores del sistema en función de los datos recabados por las cámaras.

1.2. Justificación

Cada vez con más frecuencia lo que la sociedad demanda es una alta calidad de los productos que consume, desde los más novedosos aparatos tecnológicos hasta los productos más típicos de los supermercados.

Sin embargo, la calidad de un producto no es una preocupación exclusiva de los consumidores. Las empresas que los producen también están interesadas en esa alta calidad ya que de ello dependerán factores como su balance económico, su posición en los mercados o la percepción que los consumidores tienen de ella.

Por otra parte, la calidad de un producto no solo va a depender de la tecnología y maquinaria empleada en su fabricación, sino que también lo va a hacer de las materias primas que se usen.

Acorde a esta última idea y teniendo en cuenta que en el sector harinero la calidad del grano va a influir directamente en la de la harina es por lo que se pretende desarrollar esta máquina.

Además, y como se verá en el capítulo dos del trabajo, supondría una mejora respecto a los métodos de clasificación y análisis empleados en la actualidad. Se van a poder obtener en un solo análisis los mismos resultados que se obtendrían con varios si se emplearan los métodos tradicionales.

Esto supone una gran ventaja para las empresas ya que podrían emplear parte del tiempo que dedicaban en los análisis en mejorar otras partes del proceso.

1.3. Objetivos

Como se ha comentado en el preámbulo, este trabajo forma parte de un proyecto más amplio y es por ello por lo que en esta sección vamos a definir los objetivos principales que se quieren cumplir con su realización.

El primer objetivo que se quiere alcanzar es el de realizar un estudio sobre los distintos elementos que conformarán el sistema de visión artificial. Estos serán el tipo de lente, el tipo de cámara y el tipo de iluminación. Es crucial este primer paso ya que de él van a depender los siguientes objetivos, por ejemplo, un algoritmo de visión artificial puede verse muy afectado si la iluminación o las lentes seleccionadas no son las correctas.

El segundo objetivo sería el de desarrollar una aplicación de visión artificial que permita obtener una serie de características de las semillas. Estas se explicarán con más detalle en los posteriores capítulos pero podemos avanzar que serán las medidas principales (ancho y largo), los parámetros característicos del modelo de color CIE Lab (L, a y b) y determinar la presencia de fracturas en las semillas mediante la detección de partes blancas.

En la Figura 1. se muestra un diagrama de flujo del algoritmo de visión en el que se puede observar de una forma más clara lo que se ha explicado anteriormente.

La aplicación estará escrita en C/C++ y para facilitar su desarrollo se hará uso de la librería de código abierto OpenCV.

El tercer objetivo será el de implementar el código necesario para comunicar, vía puerto serie, el PC con un controlador Arduino. Los distintos mecanismos de comunicación entre procesos que se van a emplear forman parte de la API de Windows.

Como cuarto y último objetivo se ha marcado el desarrollar una interfaz de usuario para facilitar las labores a la hora de realizar los análisis. Se ha elegido la librería GTK+, que también es de libre difusión, para su programación.

La consecución de todos los objetivos mencionados aseguraría una correcta clasificación de las semillas a falta del desarrollo mecánico y eléctrico del resto de la máquina que debido a su amplitud no forma parte del contenido de este trabajo.

1.4. Estructura de la memoria

Para facilitar la comprensión del trabajo y tener una visión general de los contenidos del mismo, esta sección del capítulo estará dedicada a hacer una breve explicación de cada uno de los capítulos que lo conforman.

- **Capítulo 1: Introducción y justificación**

Breve introducción y explicación del trabajo, así mismo se justificará su realización y se establecerán los objetivos a cumplir.

- **Capítulo 2: Sistemas de clasificación de semillas**

Explicación de las máquinas de clasificación de semillas y sistemas empleados actualmente en la industria.

- **Capítulo 3: La visión artificial**

Introducción a los conceptos básicos de la visión artificial así como a los distintos sistemas de iluminación que hay en el mercado. Además, se hará una breve explicación a los distintos modelos de color y se citarán algunas de las aplicaciones que tiene hoy en día la visión artificial.

- **Capítulo 4: Sistema mecánico**

Explicación del diseño mecánico de la máquina, qué elementos la conforman y cuál es el ciclo de funcionamiento.

- **Capítulo 5: Sistema de visión artificial**

La primera parte de este capítulo se centrará en explicar qué elementos físicos forman parte del sistema. En segundo lugar se pasará a explicar el algoritmo de visión desarrollado, en cuántas etapas se ha dividido y cómo se extraen las características deseadas de las semillas.

- **Capítulo 6: Sistema de control**

Este capítulo estará destinado a explicar la parte de control de la máquina, qué controlador se ha seleccionado y por qué y cuáles son las entradas y salidas del sistema.

- **Capítulo 7: Interfaz de usuario**

En este capítulo se va a explicar la interfaz de usuario del *software* que controla los análisis.

- **Capítulo 8: Resultados experimentales**

El objetivo principal del capítulo es comprobar la bondad del algoritmo de visión implementado. Para tal fin se mostrarán varias imágenes con los distintos resultados experimentales obtenidos.

- **Capítulo 9: Conclusiones y líneas futuras**

Revisión de los objetivos marcados y valoración personal del trabajo. Además, se citarán posibles mejoras para el sistema desarrollado en el presente trabajo.

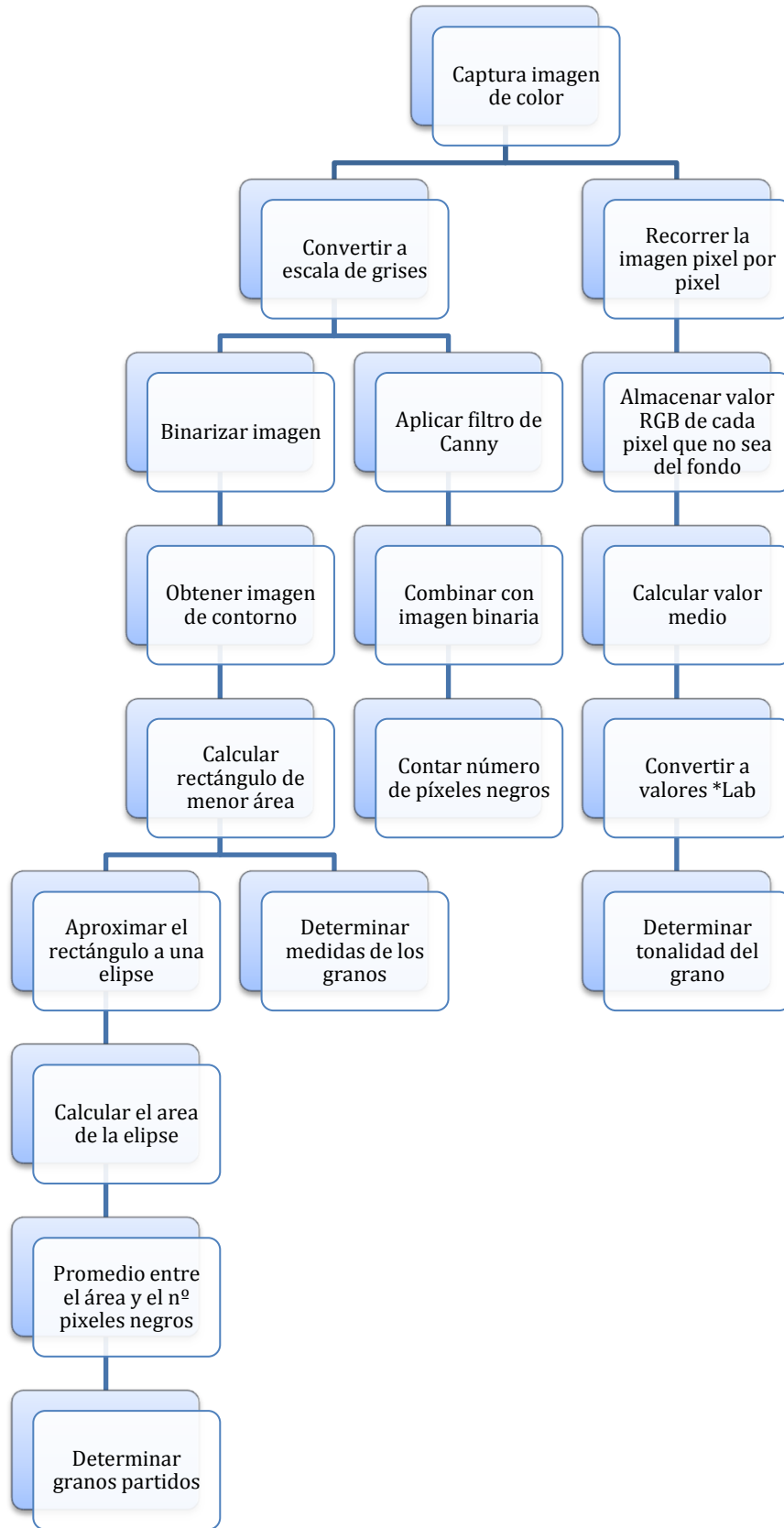


Figura 1. Diagrama de bloques del algoritmo de visión artificial

Capítulo 2. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SEMILLAS

El objetivo que se persigue al incluir este capítulo en la memoria es el de explicar qué se entiende por una máquina de análisis y clasificación de semillas para que los contenidos de los capítulos posteriores del trabajo se comprendan mejor. Además, se pretende mostrar qué herramientas y maquinaria hay actualmente en el mercado, estado del arte, lo que nos va a permitir justificar la realización de este trabajo. Por último se comentarán algunas aplicaciones prácticas de estos sistemas.

2.1. ¿Qué es una máquina de análisis y clasificación de semillas?

Por una máquina de análisis y clasificación de semillas se entiende un sistema electromecánico que permite, de una forma automática y en base a unas características predefinidas, hacer una clasificación de las semillas.

El análisis y la posterior clasificación de las semillas se solía hacer gracias a la labor del ser humano, pero debido al gran avance que han tenido tanto los distintos sistemas de medición láser como los sistemas de visión artificial, se han ido desarrollando estas máquinas que suponen una mayor rapidez a la hora de completar el proceso así como unas altas tasas de efectividad respecto a las que ofrecía el operario humano.



Figura 2. Selección manual de semillas

Las características que se suelen analizar para clasificar las semillas, van desde propiedades meramente físicas como el peso, el color, el tamaño o la humedad, hasta propiedades químicas como la cantidad de proteínas del núcleo o la proporción de enlaces de carbono. Con esta cantidad de parámetros, la variedad de clasificaciones que se puede hacer es muy amplia.

En este trabajo las propiedades elegidas para realizar la clasificación, son el color y el tamaño. Gracias a estas características se pueden hacer diversos tipos de clasificaciones, desde separar aquellas semillas que tengan algún tipo de manchas hasta hacer diversos grupos en función de su colorimetría (parámetros L, a, b) pasando por desechar aquellas semillas que estén partidas.

Será en el capítulo 4 en el cual se describirá de una forma más detallada cómo se obtienen esas características y cómo se hace realmente la clasificación desde el punto de vista de la visión artificial.

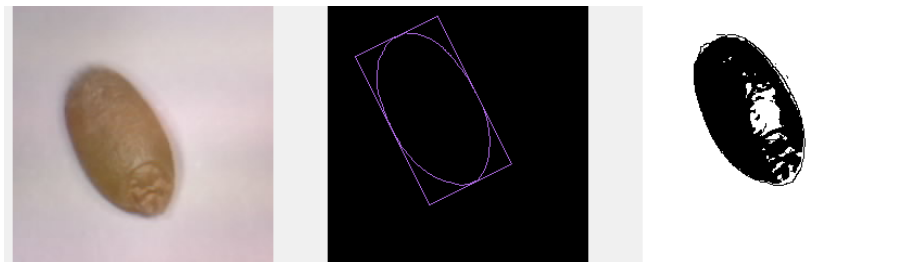


Figura 3. Ejemplo de análisis con visión artificial de granos de trigo

2.2. Estado del arte

Aunque el presente trabajo se centra en el uso de la visión artificial como medio principal para obtener las características de las semillas y que el producto con el que se va a trabajar son granos de trigo, en esta sección del capítulo se van a mostrar algunos de los métodos que hoy en día se utilizan en la industria.

Algunos de los ejemplos que se van a exponer a continuación son métodos que están enfocados principalmente a los granos de trigo mientras que otros se podrían emplear con cualquier tipo de semillas pues su principio de funcionamiento así lo permite.

2.2.1. Análisis por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

El primer método de análisis y clasificación que vamos a explicar es el de la espectroscopia de infrarrojo cercano o espectroscopia NIR. Esta técnica se podría considerar como una de las más importantes del sector ya que gracias a ella se pueden obtener una gran cantidad de propiedades de las semillas.

Si hablamos del sector del trigo, el uso de esta técnica va a permitir obtener propiedades como la humedad, la cantidad de proteínas y contenido en aceite del grano, detección de carbohidratos complejos y más recientemente la predicción de las propiedades funcionales de los granos.

No solo se pueden obtener una gran cantidad de propiedades de la muestra sino que esta técnica presenta otras grandes ventajas frente a otro tipo de análisis como los análisis químicos. Algunas de ellas son: el tiempo de análisis es menor, no hace falta una preparación previa de la muestra antes de realizar el análisis o no es necesario el uso de técnicas adicionales para obtener los resultados.

Vistas las grandes ventajas que presenta el uso de esta técnica, vamos a pasar a describir en qué consiste y qué aparatos se emplean en la actualidad.

La técnica de la espectroscopia NIR está basada en la medida de la intensidad de la reflectancia, o de la transmisión, de la radiación de una muestra en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético (800-2500 nm). Estos parámetros van a depender de la absorbancia de la muestra que a su vez, dependen principalmente de los enlaces de hidrógeno que esta presente.

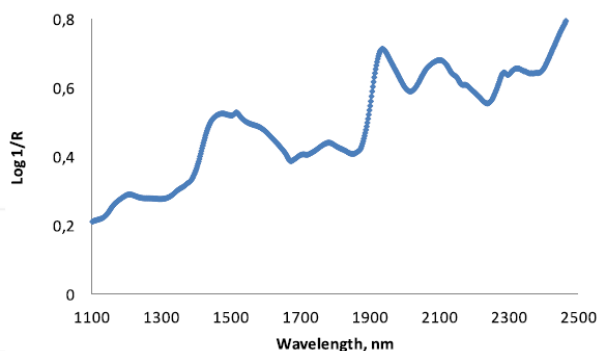


Figura 4. Espectro de reflectancia NIR (Infrarrojo cercano) de la harina de trigo

Como se puede observar en la figura 4., el espectro NIR que se obtiene es muy irregular debido a los sobretonos, a la combinación de varias vibraciones fundamentales y a las absorciones electrónicas. Es por este motivo por el que se precisa de modelos de calibración para poder determinar la composición de la muestra analizada.

A continuación, vamos a describir la instrumentación típica de este tipo de espectrofotómetros.

En primer lugar se tiene una fuente luminosa que normalmente es una lámpara de tungsteno, esta luz atraviesa una serie de filtros y rendijas que permiten obtener la longitud de onda deseada. Una vez se tiene la luz con una longitud de onda concreta esta atravesará la muestra, que está colocada en un porta-muestras, y por último se colocarán los detectores de reflectancia y transmitancia adecuados.

Para procesar toda la información obtenida se dispondrá de tarjetas amplificadoras, convertidores analógico-digitales así como de un computador y un *software* específico.



Figura 5. Espectrofotómetro industrial

2.2.2. Colorímetros

El segundo método que se propone, se basa en el color de las semillas para realizar la clasificación de las mismas.

La ciencia que se encarga de estudiar, analizar y medir los colores se llama colorimetría. Uno de los objetivos que persigue es el de estandarizar los colores y gracias a ello se pueden realizar distintas clasificaciones así como reproducir los colores.

Los instrumentos que se emplean para realizar las mediciones colorimétricas son los colorímetros. Las mediciones de estos instrumentos están basadas en la ley de absorción de la luz o más conocida como ley de Lambert-Beer. Esta ley relaciona las propiedades de un material con la absorbancia del mismo.

Una de las características de estos aparatos es que miden los colores en base a tres variables llamadas variables triestímulo. Las variables que más se suelen emplear son las establecidas por la Comisión Internacional de la Iluminación o CIE (por las siglas francesas de Commission Internationale de l'Éclairage) que son L, a y b. El significado de estas tres variables se explicará en el capítulo 3 en la sección correspondiente a los modelos de color.



Figura 6. Colorímetro Konika Minolta (CR-10)

Otra de las características importantes de estos aparatos de medida es la elección del tipo de iluminante ya que de ello dependerán los resultados obtenidos al final del análisis. Como esta elección podría tener múltiples interpretaciones, la CIE propone un estándar para que todas las mediciones se realicen bajo las mismas condiciones. Este estándar es el CIE Standard Illuminant D65 o simplemente D65 y trata de describir las condiciones medias de iluminación de un medio día en Europa occidental.

La fuente luminosa elegida para el ensayo, tendría que tener una curva de distribución espectral similar a la mostrada en la figura 7.

Una vez realizada esta introducción teórica, vamos a poder sacar algunas conclusiones prácticas de la utilización de este método.

Si se quieren obtener unos resultados fiables y precisos de la información colorimétrica de cada una de las semillas de la muestra, se tendrá que hacer un análisis de cada una de ellas por separado. Esto aumentaría considerablemente el tiempo del proceso de clasificación aunque por el contrario, permitiría que la clasificación realizada fuera muy detallada.

Si por el contrario, de lo que se trata es obtener un valor aproximado de la muestra, se analizarían varias semillas al mismo tiempo y así se reduciría considerablemente el tiempo de análisis.

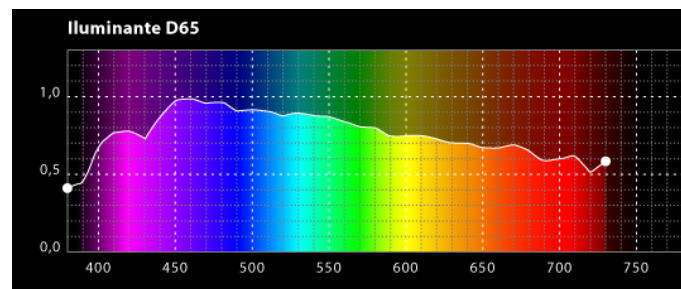


Figura 7. Curva de distribución espectral CIE D65

2.2.3. Máquinas cuenta semillas

Otro de los métodos de análisis y clasificación de semillas que se emplean actualmente en la industria son las máquinas contadoras de semillas. Estas máquinas, por la labor que realizan, no se pueden considerar propiamente como un método de análisis o clasificación, pero debido a su amplio uso se ha considerado conveniente su inclusión en el trabajo.



Figura 8. Contador de semillas (Data count S25)

Dos pueden ser los principales usos que tengan estas máquinas. El primero de ellos sería el de controlar el llenado de envases o paquetes con un determinado número de semillas, y el segundo sería el de hacer contajes de mil semillas.

La explicación que tiene el que se quieran contar exactamente mil semillas es que una de las estadísticas más importantes que se manejan en el sector se toma sobre una muestra de esta cuantía. Esta estadística es el peso, en gramos, de mil semillas.

Si hablamos del sector harinero, el peso de mil granos de trigo va a ser un buen indicador del rendimiento de la harina. Además, gracias a este indicador, se va a poder determinar si la muestra es pura o cuenta con una mezcla de varios tipos de grano.

2.2.4. Máquinas separadoras de semillas

Este último método de clasificación, también se va a basar en el color de las semillas para realizar las discriminaciones. A diferencia del segundo método explicado, este no hace un análisis exhaustivo sino que simplemente detecta una anomalía respecto a un patrón de color dado.



Figura 9. Máquina de clasificación óptica

Como se puede ver en la figura 10., el principal uso de esta máquina es el de garantizar una muestra final de la máxima calidad ya que se desechan todas aquellas semillas defectuosas aunque presenta un inconveniente. Cuando hay semillas partidas en la muestra, la máquina no es capaz de detectarlas y habría que incluir algún otro tipo de sistema a lo largo del proceso para asegurarnos que tenemos una muestra final de calidad.

La forma de trabajar de estas máquinas está basada en cámaras CCD de alta velocidad y un sistema de expulsión de aire comprimido.



Figura 10. Granos de arroz antes y después de pasar por la máquina

Una vez las semillas se encuentran en la tolva, estas caen de forma continua por unos conductos (figura 11.) y pasan por delante de una serie de cámaras. Este sistema cuenta con una iluminación dedicada de tipo led para asegurarnos que las condiciones del entorno no varían con el tiempo. Después de las cámaras tendríamos el sistema de expulsión que sería accionado en caso de que la imagen tomada con la cámara detectara alguna anomalía en la semilla.



Figura 11. Granos de arroz cayendo

Capítulo 3. LA VISIÓN ARTIFICIAL

Este tercer capítulo va a estar dedicado a realizar una explicación sobre qué es la visión artificial y su relación con la visión humana, también se van a explicar algunos conceptos sobre los distintos sistemas de iluminación ya que están considerados como uno de los pilares más importantes de cualquier sistema de visión artificial. Además, y como en el desarrollo del trabajo a tenido mucha relevancia, se va a hacer una introducción a los distintos modelos de color y para terminar se van a citar algunas de las aplicaciones que a día de hoy tiene la visión artificial.

3.1. Introducción a la visión artificial

La visión artificial, o también denominada visión por computador, es considerada una rama de la inteligencia artificial y su principal propósito es que las máquinas sean capaces de interpretar el entorno que las rodea tal y como lo hacemos nosotros mediante el sentido de la vista.

Los seres humanos hacemos uso del resto de los sentidos, como el tacto, para terminar de comprender la situación en la que nos encontramos. Para hacer posible que las máquinas interpreten mejor su entorno, es necesario el uso de otros sensores como los de proximidad o alcance o más recientemente el uso de los sensores láser.

Una vez completado el proceso de percepción, las personas utilizamos las extremidades para interactuar con el medio que nos rodea, es por eso que sería de utilidad incluir una serie de actuadores para que las máquinas puedan responder a los estímulos recibidos.

El campo de la visión artificial se encuentra en pleno crecimiento y presenta un gran interés a nivel científico-técnico por el gran número de aplicaciones que tiene y por la importancia de las funciones que desempeña.

Para continuar con esta introducción, vamos a comparar cómo funciona la visión humana con cómo lo hace la visión por computador.

De una forma resumida se podría decir que la visión humana funciona de la siguiente manera. A través del ojo se recibe la radiación exterior y esta debe ser

transformada en señales que posteriormente el cerebro procesará. El ojo es el elemento transductor mientras que el cerebro es el que procesa dicha información.

Si hiciéramos un símil con la visión artificial el ojo lo podríamos asociar con la cámara y el cerebro con el computador.

Como toda cámara el ojo humano cuenta con un elemento óptico y un elemento sensor. La óptica está constituida por la córnea, el iris o pupila y el cristalino. Su misión principal es la de conducir la radiación electromagnética, del espectro visible, hacia la retina la cual identificaremos como el elemento sensor. Como se puede observar en la figura 12., la retina se encuentra en la parte posterior del glóbulo ocular y es donde se ubican las células fotosensibles: los conos y los bastones.

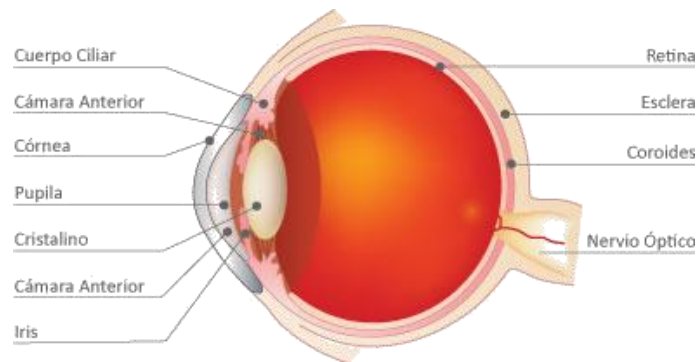


Figura 12. Anatomía del ojo humano

De las células fotosensibles antes citadas la percepción del color está a cargo de los conos, mientras que gracias a los bastones se percibe la intensidad lumínica. Se estima que el ojo humano es capaz de detectar 100 millones de píxeles en el espectro de la luz.

Una vez que la señal luminosa ha sido transformada en pulsos eléctricos por los conos y bastones, éstos son transportados al cerebro por los nervios ópticos.

Como hemos comentado antes vamos a asociar al cerebro con el computador del sistema de visión artificial. Este es capaz de procesar la información capturada por el ojo de una forma muy rápida y contrastarla con los recuerdos, memoria y otros elementos para proporcionar información del entorno en tiempo real. Se podría concluir que el cerebro presenta una sofisticación en la percepción que ni ahora ni en mucho tiempo habrá posibilidad de implementar artificialmente.

Para concluir esta sección vamos a citar que ventajas presenta la visión humana frente a la visión artificial y viceversa:

- Sistema humano:
 - Mejor reconocimiento de objetos.
 - Mejor adaptación a situaciones imprevistas.
 - Utilización de conocimiento previo.
 - Mejor en tareas de alto nivel de proceso.

- Sistema artificial:
 - Mejor midiendo magnitudes físicas.
 - Mejor para la realización de tareas rutinarias.
 - Mejor en tareas de bajo nivel de proceso.

3.2. Aplicaciones de la visión artificial

El campo de la visión artificial se encuentra en pleno crecimiento gracias a los avances de la electrónica e informática. El que se tengan sensores cada vez de mayor resolución y que el tiempo de procesamiento de las imágenes cada vez sea menor provoca que el número de aplicaciones aumente de una forma muy rápida.

Pero como se ha visto en la introducción de este capítulo, la visión artificial presenta muchas carencias respecto a la visión humana y a día de hoy hay ciertas aplicaciones que aún precisan de un mayor desarrollo de la tecnología.

Aún con estas carencias, vamos a ver en este apartado que los campos de utilización y las aplicaciones son muy amplias.

3.2.1. Campo de la seguridad vial

Debido al aumento del volumen de vehículos en circulación en todo el mundo, vemos que cada vez hay más campañas de sensibilización para conseguir mejorar el comportamiento de los conductores al volante. Aunque estas campañas van teniendo sus efectos hay que tomar otra serie de medidas para tener seguridad en las vías.



Figura 13. Sistema de control de velocidad media por tramos

Estas medidas de las que estamos hablando son las siguientes:

- Radares de velocidad instantánea fijos y móviles
- Sistemas de control de velocidad media por tramos
- Localización de vehículos
- Sistemas de gestión de tráfico

Como se puede observar, en todas ellas el uso de la visión artificial se podría decir que es indispensable. Gracias al uso de las cámaras el número de vehículos que se pueden analizar es mucho mayor que si lo hiciera un operario humano y también supone unas mayores tasas de efectividad.

Otra aplicación relacionada con la gestión de vehículos, aunque no con la seguridad vial como tal, son los sistemas de acceso en aparcamientos.

Con la ayuda de estos sistemas es mucho más fácil controlar los accesos ya que tenemos diferentes datos de los vehículos como la matrícula, el modelo, etc.

3.2.2. Campo de la robótica

Otro de los campos en los que la visión artificial está aumentando su presencia es el de la robótica. Como ya se comentara, el proporcionar a las máquinas de un sistema que las permita reconocer su entorno es uno de los objetivos de la visión artificial y que mejor máquina que un robot para hacerlo.

Las aplicaciones a las que pueden estar destinados los robots son muy variadas, desde un robot que simplemente recoge piezas de un sitio y las lleva a otro, hasta un robot auxiliar de quirófano. En cada una de esas aplicaciones la visión artificial jugará un papel u otro.

A continuación vamos a citar algunos ejemplos de aplicaciones robóticas y el uso de la visión artificial.

Robot para soldadura

En la industria estos robots tienen un amplio uso. Gracias a la visión artificial se es capaz de posicionar correctamente al robot para que efectúe las distintas soldaduras o para que sea capaz de seguir una trayectoria y el aporte de material lo haga correctamente.

Una aplicación complementaria sería el del análisis de los distintos puntos de soldadura.



Figura 14. Robot de soldadura

Robot asistente

La robótica social es una rama de la robótica que se encuentra en pleno crecimiento. Se trata de desarrollar robots que sean capaces de interactuar con humanos para ofrecerles distintos servicios.



Figura 15. Robot asistente

Para que el robot pueda percibir el estado de ánimo del humano y así ofrecerle distintas respuestas o servicios se recurre a la visión artificial y al reconocimiento facial.

3.2.3. Otros campos de aplicación

En esta sección vamos a comentar de una forma breve algunos de los otros campos en los que la visión artificial tiene utilidad y qué principales aplicaciones existen.

Campo de la medicina

En el campo de la medicina se lleva utilizando mucho tiempo la inspección de imágenes como las radiografías, las resonancias magnéticas o los análisis de microscopía.

Todas esas labores están realizadas por personal médico pero con la ayuda de la visión artificial se pueden obtener unos mejores resultados y en menor tiempo.

Otro de los grandes avances que ha supuesto el uso de la visión artificial en la medicina es el control de la evolución de los cánceres.

Campo de la alimentación

Otro de los campos en los que la visión artificial tiene un amplio uso es el de la alimentación.

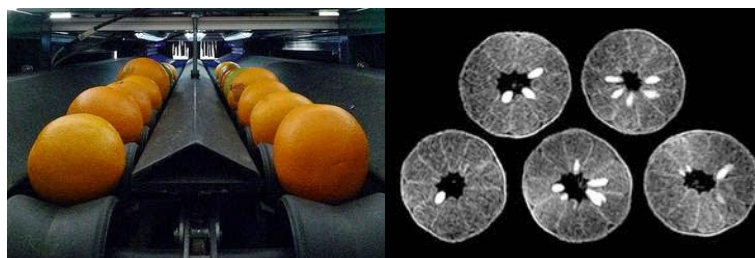


Figura 16. Control de calidad de naranjas por visión artificial

Principalmente los sistemas de visión se emplean para el control de calidad del producto tanto antes de su manipulación como después. Si estamos hablando de materias primas, por ejemplo hay sistemas que detectan cuando un producto está podrido, roto o difiere de su color normal y lo rechazan antes de entrar en planta.

Si estamos hablando de productos finales puede haber sistemas destinados al control de calidad del etiquetado o simplemente para contar el número total de productos.

Se podría decir que el número de aplicaciones es tan grande como empresas y productos existan

Campo de la arquitectura

El último campo del que vamos a hablar es el de la arquitectura. En este campo se lleva empleando mucho tiempo el uso de imágenes como los planos topográficos o los planos de edificaciones.

Más actualmente se puede hablar de una nueva rama de la visión artificial como es la visión 3D.

Puede haber sistemas que permitan la reconstrucción de edificios o esculturas mediante técnicas de escaneado láser. Estas técnicas se basan en la triangulación de un haz de luz láser con una o varias cámaras.



Figura 17. Escaneado 3D de una escultura

3.3. Tipos de iluminación

Uno de los elementos que conforman los sistemas de visión artificial es la fuente de iluminación. Su importancia es muy grande ya que de ello dependerá el que tengamos una buena imagen y no tengamos que mejorarla vía *software*. De esta forma el tiempo de procesado de la imagen es mucho menor y conseguiremos una mayor frecuencia de análisis.

Antes de pasar a describir los tres tipos de iluminación que se han considerado más propicios para el desarrollo de la aplicación, cabe decir que el color más apropiado para nuestra fuente de iluminación sería el blanco ya que como se va a trabajar con imágenes en color no conviene alterar la escena con luces de otros colores.

3.3.1. Iluminación difusa tipo domo

El primer tipo de iluminación que se ha considerado adecuado para esta aplicación ha sido la iluminación difusa del tipo domo. Como se puede observar en la figura 18., la fuente de luz se encuentra entre la lente de la cámara y el objeto que se quiere iluminar.

Con este tipo de iluminación se consigue, gracias a la cúpula semiesférica, que los haces de luz incidan sobre cada uno de los puntos de la superficie del objeto desde todas las direcciones. De esta forma se consigue reducir las posibles sombras y brillos.

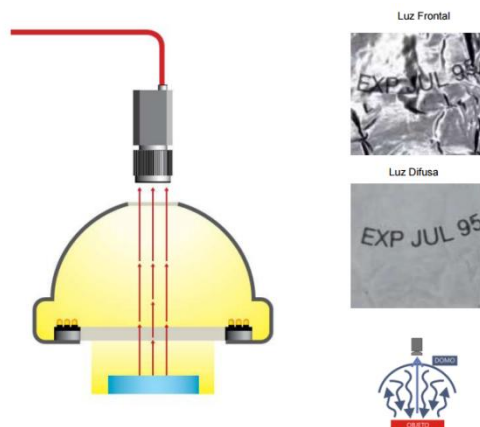


Figura 18. Iluminación difusa tipo domo

Si nos centramos en nuestra aplicación, esta iluminación nos va a permitir distinguir aquellos granos que se encuentren rotos, ya que se va a poder observar con facilidad qué partes del grano son blancas. También nos permitirá determinar la tonalidad que tienen los granos.

Por otro lado nos podría servir para analizar la morfología y obtener las medidas principales aunque para determinar estas características de los granos es más conveniente el siguiente tipo de iluminación.

3.3.2. Iluminación a contraluz o *backlight*

El segundo tipo de iluminación elegido es el de contraluz o *backlight*. Como se puede observar en la figura 19., el objeto que se quiere iluminar se encuentra entre la lente de la cámara y la fuente de luz.

Con este tipo de iluminación se obtienen imágenes con un gran contraste pensadas para extraer las siluetas de los objetos. Con el fin de conseguir unos resultados óptimos hay que asegurarse que la luz sea uniforme en toda la superficie del objeto.

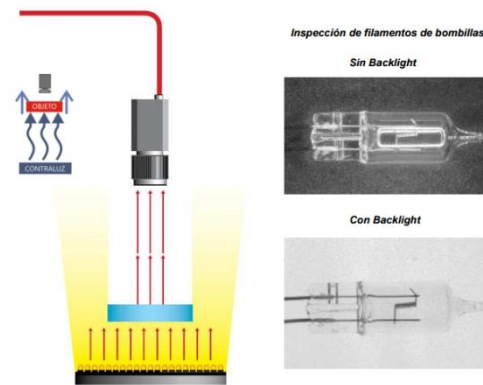


Figura 19. Iluminación a contra luz o *backlight*

En nuestra aplicación esta iluminación nos permitiría obtener las medidas características del grano a partir de su silueta.

Tal y como está concebido el diseño mecánico incluir este tipo de iluminación sería un problema, es por eso que como gracias a la iluminación difusa se obtienen unos resultados satisfactorios esta quede en un segundo plano pensada como una posible mejora de la máquina.

3.3.3. Iluminación directa frontal

El tercer y último tipo de iluminación que se ha considerado es el de una iluminación directa frontal con un anillo de leds. Al igual que en la de tipo domo el objeto a iluminar se encuentra detrás de la lente y la fuente luminosa.

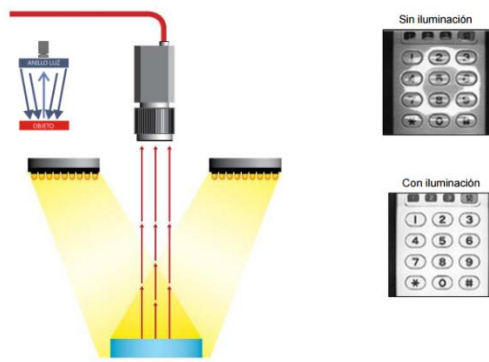


Figura 20. Iluminación directa frontal

Las ventajas que presenta esta iluminación son que las sombras y las influencias del polvo y las imperfecciones del objeto se ven muy reducidas. Por otro lado, las imágenes tomadas permiten diferenciar de una forma muy clara los cambios de color que haya.

De cara a emplearla en nuestra aplicación, con esta iluminación seríamos capaces de detectar aquellos granos que estuvieran partidos así como determinar la tonalidad.

3.4. Espacios de color

Esta sección del capítulo va a estar dedicada a explicar en qué consisten los modelos o espacios de color y cuáles son los más representativos.

El motivo de incluir esta explicación es porque como a lo largo del trabajo se ha hablado y se va a hablar del color y de su medición, así se entenderá de una forma más clara de qué se está hablando.

Lo primero de todo es definir el concepto de color. Según la RAE el color es la sensación producida por los rayos luminosos que impresionan los órganos visuales y que depende de la longitud de onda. Explicado de otra forma, es la sensación de nuestro cerebro cuando la luz reflejada por un objeto es captada por nuestros ojos.

Ahora que sabemos qué es el color vamos a definir que son los espacios o modelos de color. Son modelos matemáticos abstractos que describen la forma en la que los colores pueden representarse como tuplas de números, normalmente de 3 ó 4 valores o componentes de color.

De una forma estricta, espacio y modelo de color no son lo mismo aunque tienden a usarse por igual. El espacio de color, es un modelo de color más una función de mapeo.

Conocidos los conceptos de color y modelo o espacio de color, vamos a explicar tres de los modelos más representativos que existen. Uno porque es el que más se emplea en los aparatos electrónicos, otro porque es el más similar a la visión humana y el último porque es el estándar de medida.

3.4.1. Espacio RGB

El primer modelo de color del que vamos a hablar es el modelo RGB. Este modelo es el más empleado para representar los colores en los aparatos electrónicos como monitores, cámaras o sistemas de vídeo.

Los colores primarios de este modelo son el rojo (R), el verde (G) y el azul (B) y el resto de colores se forman por la síntesis aditiva de ellos.

La representación de los colores es mediante tres cifras cuyos valores se encuentran entre el 0 y el 255 y hacen referencia a la cantidad que hay de cada color primario. En algunas ocasiones en lugar de trabajar con valores entre 0 y 255, estos se normalizan y toman valores entre 0 y 1.

Según lo anteriormente citado, se puede definir un cubo que contenga todos los colores (figura 21.).

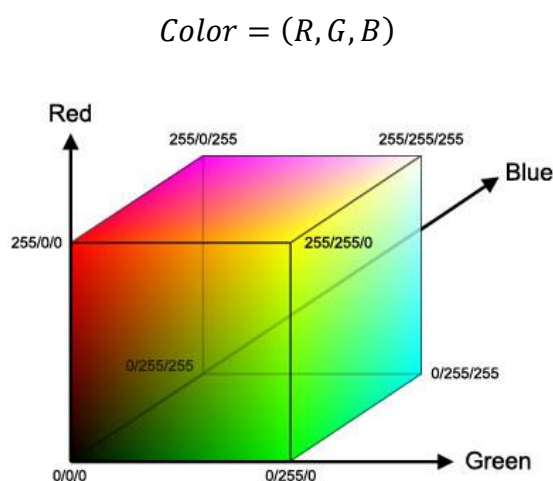


Figura 21. Cubo del modelo RGB

3.4.2. Espacio HSV

El segundo modelo de color del que vamos a hablar es el modelo HSV o HSB. Este modelo se basa en cómo los humanos percibimos el color y define los colores según tres de sus propiedades: matiz (*hue*, H), saturación (*saturation*, S) y valor (*value*, V).

A continuación vamos a explicar el significado de cada uno de los parámetros:

- El matiz está representando por un ángulo entre 0° y 359°. Esta propiedad del color hace referencia al estado puro del color y está directamente asociada con la longitud de onda dominante.
- La saturación queda definida como la distancia al eje y varía entre 0 y 100. Esta propiedad está asociada con la viveza o palidez del color, de tal forma que cuanto más próximo se encuentre a 100, más vivo será el color. También se puede asociar esta propiedad a cuánta cantidad de gris tiene un color, un color poco saturado tendrá más cantidad de gris que uno saturado.
- El valor o luminosidad se define como la altura del cono y toma valores que también oscilan entre 0 y 100. Esta propiedad se refiere a lo claro u oscuro que puede parecer un color, cuanto más próximo a 100 sea el valor más claro será el color.

Así como el modelo RGB se podía definir en forma de cubo, el modelo HSV se podrá modelar como un cono (figura 22.).

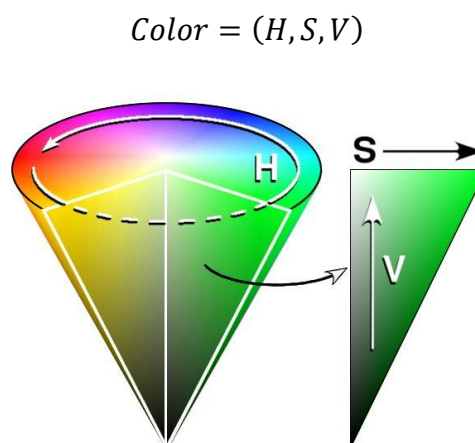


Figura 22. Cono del modelo HSV

3.4.3. Espacio CIE

El último espacio de color del que vamos a hablar es el que propone la Comisión Internacional de la Iluminación o CIE.

Originalmente esta comisión propuso un sistema de color basado en los tres colores luz primarios y lo denominó CIE XYZ. Años más tarde este modelo se fue perfeccionando y surgió el modelo CIE LAB.

La principal diferencia de este modelo respecto a todos los demás es que con él se puede representar todo el espectro visible. Otra de las ventajas del modelo es que es independiente del dispositivo que estemos usando porque describe la apariencia del color en lugar de la cantidad de colorante que ese dispositivo necesita para reproducir dicho color.

Es por esta última ventaja por la que la mayoría de los sistemas de gestión y medición del color emplean este modelo.

Como se puede observar en la figura 23. este espacio de color se puede representar en forma de esfera. En el eje vertical está representada la luminosidad (L) la cual puede variar entre 0 y 100. En los otros dos ejes de coordenadas están representadas las variables A y B, pudiendo variar entre -120 y +120.

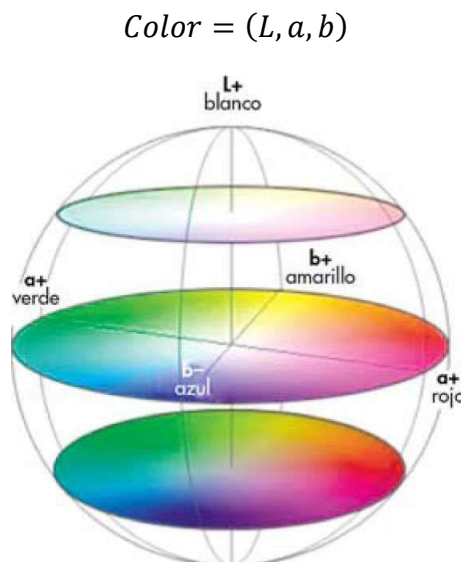


Figura 23. Esfera del modelo CIE Lab

3.4.4. Relaciones entre los distintos espacios de color

Para terminar la explicación de los modelos de color vamos a ver qué relaciones existen para cambiar de un modelo a otro:

Conversión RGB a HSV

$$R' = \frac{R}{255}; G' = \frac{G}{255}; B' = \frac{B}{255}$$

$$C_{max} = \max(R', G', B')$$

$$C_{min} = \min(R', G', B')$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min}$$

$$V = C_{max}$$

$$S = \begin{cases} 0, & C_{max} = 0 \\ \frac{\Delta}{C_{max}}, & C_{max} \neq 0 \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} 0^\circ, \Delta = 0 \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{G' - B'}{\Delta} \text{ mod } 6 \right), C_{max} = R' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{B' - R'}{\Delta} + 2 \right), C_{max} = G' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{R' - G'}{\Delta} + 4 \right), C_{max} = B' \end{cases}$$

Conversión RGB a XYZ

$$R' = \frac{R}{255}; G' = \frac{G}{255}; B' = \frac{B}{255}$$

$$\begin{cases} \text{Si } R' > 0.04045 \rightarrow R' = \left(\frac{R' + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\ \text{Si } R' < 0.04045 \rightarrow R' = \frac{R'}{12.92} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } G' > 0.04045 \rightarrow G' = \left(\frac{G' + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\ \text{Si } G' < 0.04045 \rightarrow G' = \frac{G'}{12.92} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } B' > 0.04045 \rightarrow B' = \left(\frac{B' + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\ \text{Si } R < 0.04045 \rightarrow B' = \frac{B'}{12.92} \end{array} \right.$$

$$R' = R \cdot 100 ; G' = G \cdot 100 ; B' = B \cdot 100$$

$$X = R' \cdot 0.4124 + G' \cdot 0.3576 + B' \cdot 0.1805$$

$$Y = R' \cdot 0.2126 + G' \cdot 0.7152 + B' \cdot 0.0722$$

$$Z = R' \cdot 0.0193 + G' \cdot 0.1192 + B' \cdot 0.9505$$

Conversión XYZ a Lab

$$X' = \frac{X}{95.047} ; Y' = \frac{Y}{100} ; Z' = \frac{Z}{108.883}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } X' > 0.008856 \rightarrow X' = (X')^{1/3} \\ \text{Si } X' < 0.008856 \rightarrow X' = \frac{16}{116} + 7.787 \cdot X' \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } Y' > 0.008856 \rightarrow Y' = (Y')^{1/3} \\ \text{Si } Y' < 0.008856 \rightarrow Y' = \frac{16}{116} + 7.787 \cdot Y' \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } Z' > 0.008856 \rightarrow Z' = (Z')^{1/3} \\ \text{Si } Z' < 0.008856 \rightarrow Z' = \frac{16}{116} + 7.787 \cdot Z' \end{array} \right.$$

$$L = (116 \cdot Y') - 16$$

$$a = 500 \cdot (X' - Y')$$

$$b = 200 \cdot (Y' - Z')$$

Capítulo 4. SISTEMA MECÁNICO

Este cuarto capítulo del trabajo se va centrar en realizar una explicación del sistema mecánico de la máquina. En primer lugar se expondrá el funcionamiento básico de la máquina y a continuación se detallarán cada uno de los elementos principales que lo forman.

4.1. Funcionamiento general

El objetivo final a cumplir, una vez que la máquina se encuentre acabada, es que se pueda realizar una clasificación de semillas en función de su morfología y tonalidad.

En la figura 24. se muestra un esquema con el primer diseño mecánico que se ha considerado más sencillo en base a las especificaciones marcadas. En el capítulo correspondiente a las líneas futuras se citan las posibles variaciones y mejoras que podría tener.

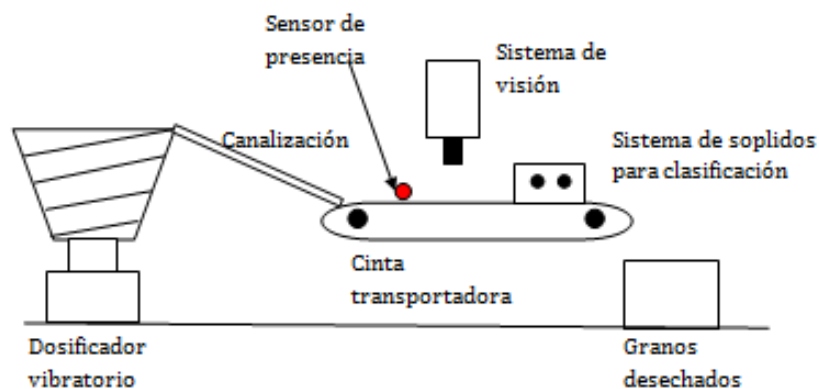


Figura 24. Esquema general de la máquina

El proceso comienza con un cribado previo de la muestra a analizar. Esto nos asegura que las semillas que se van a verter al dosificador están limpias de piedras y restos de la cosecha.

Como se observa en el esquema de la figura 24., una vez que las semillas salen del dosificador estas van a parar a una cinta transportadora que hará que las semillas vayan avanzando y pasen por delante de la cámara para poder realizar el análisis. Una vez terminado este, las semillas seguirán avanzando hasta llegar a una zona con sopladores de aire comprimido los cuales harán posible la clasificación de las semillas.

Los grupos en los que se va a poder clasificar las semillas serán: semillas partidas, semillas con un problema en la germinación y semillas normales.

Cuando el número de semillas de los dos últimos grupos alcance la cifra de 1000, el proceso de dosificación se detendrá y estas se trasladarán a una báscula de pesaje. Una vez pesadas se volvería a iniciar la dosificación hasta alcanzar de nuevo la cifra de 1000 semillas.

Aunque los granos hayan tenido una mala germinación no se les puede excluir de la muestra que va a ser pesada porque ese defecto en el tamaño se debe a un problema que ha tenido la planta y ese aspecto les interesa conocerlo a las empresas productoras.

El motivo de excluir a los granos partidos del pesaje es que esa fractura se suele producir durante la cosecha y por tanto no se puede considerar como un problema de la planta.

En la figura 27. se muestra un diagrama de bloques que resume lo explicado hasta el momento

4.2. Sistema de almacenamiento y dosificación

Este sistema se considera como la etapa inicial del proceso y la que mayor dificultad a presentado.

Las especificaciones de funcionamiento de la máquina indicaban que el análisis mediante visión artificial tenía que realizarse de una única semilla, lo cual implicaba que a la hora de su dosificación estas tendrían que hacerlo en fila de a uno.

La opción más sencilla para dosificar semillas son los dosificadores gravimétricos (figura 25.). Estos se ubican al final de una tolva de almacenaje y por el propio peso de las semillas estas van cayendo. El inconveniente de este sistema es que para conseguir una fila de a uno en la que las semillas fueran una tras otra, habría que diseñar una serie de canalizaciones que consiguieran tal objetivo.



Figura 25. Dosificador gravimétrico BSP100

La siguiente opción para la dosificación de las semillas son los dosificadores vibratorios. El fundamento de su funcionamiento es que mediante la acción vibratoria de un motor, ubicado en el centro de su base, las semillas vayan ascendiendo por unas acanaladuras realizadas en la cara interior de la campana de almacenamiento.



Figura 26. Dosificador vibratorio cilíndrico para grano de trigo

El diseño del canal interior se realiza acorde al producto que se quiere dosificar de tal forma que solo quepa uno. De esta forma aunque al principio de la acanaladura puedan caber varias semillas al final del recorrido nos hemos asegurado que estas se encuentren una tras otra.

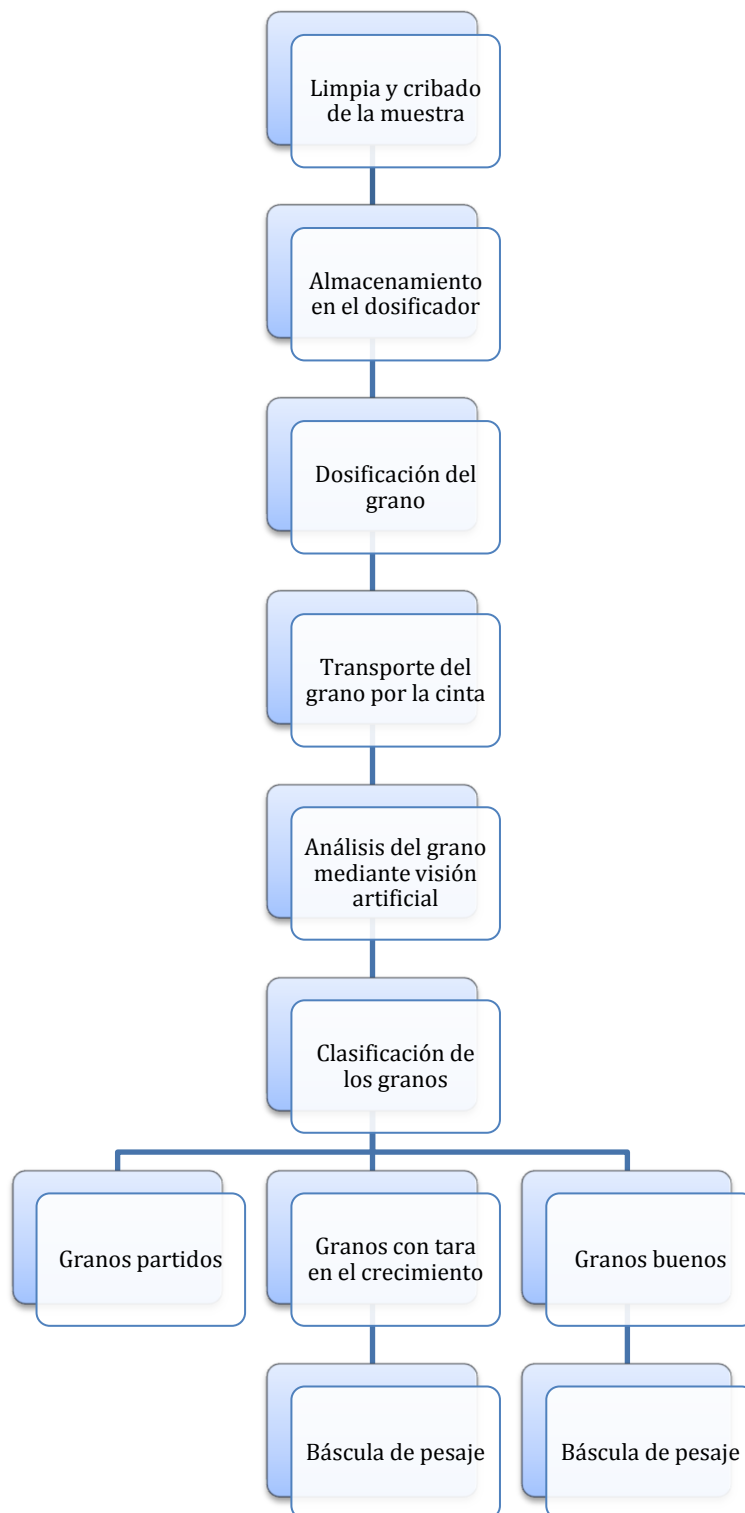


Figura 27. Diagrama de bloques del funcionamiento de la máquina

Las imágenes de las figuras 27 y 28 se corresponden con un modelo de dosificador vibratorio que se ha encargado realizar a una empresa especializada.



Figura 28. Detalle canal interior dosificador vibratorio

4.3. Sistema de transporte

La segunda etapa del proceso es la del transporte de los granos para que pasen por delante de la cámara y se realice el análisis.

Como se explicara en el apartado del funcionamiento de la máquina, los granos son conducidos desde la salida del dosificador hacia una cinta transportadora. Esta cinta transportadora tendrá en su superficie una serie de lengüetas de tal forma que entre una y otra solo haya una semilla.



Figura 29. Cinta transportadora con lengüetas

Cabría pensar que esta etapa no es necesaria y que el análisis por visión artificial se podría hacer con los granos cayendo por gravedad cuando salen del dosificador y así tener un procesado más rápido. Sin embargo, como la máquina no se va a encontrar dentro del proceso productivo y lo que se quiere obtener son unos

resultados lo más exactos posibles por eso se ha decidido emplear este sistema de transporte.

La cinta transportadora estará accionada mediante un motor paso a paso y además se dispondrá de un *encoder* para facilitar aún más el control de su posición. El fin de querer saber en qué posición se encuentra es que será de ayuda para activar el sistema de clasificación.

4.4. Sistema de clasificación

La última etapa en la que podemos dividir el sistema mecánico es el sistema de clasificación de las semillas.

Si tenemos en cuenta que el tipo de material con el que se está trabajando es pequeño y frágil hay que asegurarse que este no sufra daños. El método que se ha considerado más adecuado es el de soplos de aire comprimido.

La inclusión de accionamientos neumáticos en la máquina requiere que se diseñe una red de aire comprimido en el espacio de trabajo de la misma. Debido a la envergadura que tendría el diseñar dicha instalación, vamos a suponer que en la ubicación en la que va a estar la máquina se dispone de una toma de aire.

El resto de elementos que van a formar este sistema de clasificación son un regulador de presión, unas electroválvulas, unas boquillas y unos latiguillos flexibles.

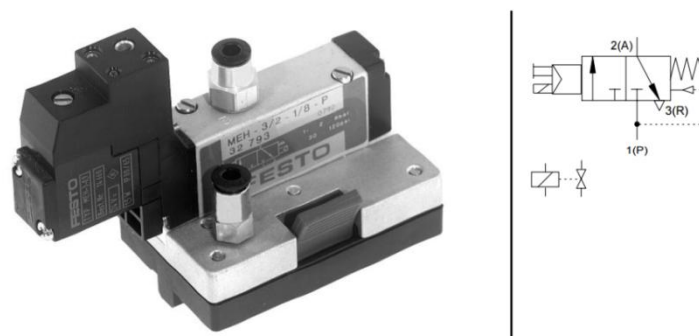


Figura 30. Electroválvula (Festo) y esquema de funcionamiento

La inclusión de un regulador de presión es necesaria ya que la presión con la que funcionan los distintos accionamientos neumáticos suele ser inferior que la que se tiene a la salida de la toma.

Por otro lado los latiguillos nos servirán para conducir el aire comprimido entre los distintos elementos del sistema, entre la toma y el regulador, entre el regulador y las electroválvulas y por último de las electroválvulas a las boquillas.

El elemento encargado de realizar, propiamente dicho, la clasificación son las electroválvulas. Estas se accionarán en función de los resultados arrojados por el análisis de visión artificial así como de la información enviada por el controlador.

Por último las boquillas permiten que el chorro de aire expulsado sea más uniforme y de esa forma ser más preciso a la hora de incidir sobre una u otra semilla.



Figura 31. Boquilla para soplador (Modelo MJ6 Silvent)

Para finalizar este capítulo podemos decir que el diseño mecánico concebido tiene más un carácter práctico y que su futura realización fuera sencilla y económica, más que un diseño pensado para su futura comercialización. Esto es posible porque como hemos dicho no tenemos exigencias temporales debidas al proceso productivo.

Las mejoras que se han considerado que puede tener este diseño se comentarán en el capítulo 9 de la memoria, correspondiente a las conclusiones y líneas futuras.

Capítulo 5. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

El quinto capítulo de este trabajo va a estar centrado en el sistema de visión artificial de la máquina.

En primer lugar se hará una exposición de los elementos que lo conforman como la lente o la cámara y en segundo lugar se pasará a explicar el algoritmo que permite obtener las características de interés de las semillas.

5.1. Elementos físicos del sistema de visión artificial

Esta primera sección del capítulo va a estar dedicada a explicar los elementos *hardware* que forman el sistema de visión artificial así como justificar su inclusión.

La elección de estos elementos es una etapa crucial a la hora de implementar un sistema de visión artificial en una máquina. El que los resultados finales sean satisfactorios, en un alto porcentaje, depende de ellos.

Por otro lado, el que estos elementos se adecuen al entorno de trabajo facilita las labores del procesamiento de las imágenes con el algoritmo correspondiente. Unas condiciones de trabajo estables y de calidad requieren mucho menor tiempo de procesamiento que aquellas que tienen una mala iluminación y en las que la cámara no se encuentra en la misma posición entre cada toma.

5.1.1. Cámara

La etapa inicial de todo sistema de visión artificial es la de capturar la imagen. En dicha etapa entran en juego la cámara y la lente.

Cuando se hace un estudio para comprobar qué cámara se ajusta mejor a nuestras condiciones de trabajo, son varios los parámetros que se tienen en cuenta:

- Resolución.
- Tipo de muestreo.
- Tipo de sensor (CCD o CMOS).
- Número de imágenes por segundo o *fps*.
- Interfaz de conexión.

Cuando se habla de la resolución de una cámara, se está hablando de la cantidad de puntos, o píxeles, con los que se representa una imagen. Cuanto mayor sea ese número mejor calidad tendrá la imagen y por tanto se podrán observar detalles mucho más pequeños, como ejemplo podemos ver las imágenes de la figura 32.

La resolución va a depender del tipo de aplicación, pero no siempre va a interesar manejar valores altos ya que el tiempo de análisis de estas imágenes va a ser bastante mayor que el de aquellas que no contengan tanta información.

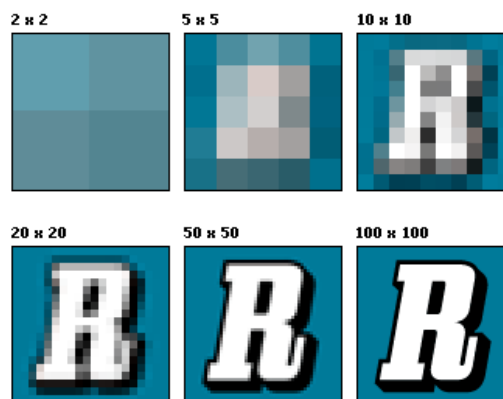


Figura 32. Tipografía con diferentes resoluciones

Los sensores de las cámaras se podrían entender como el elemento en el que se refleja la imagen tomada por la cámara. Están compuestos, a su vez, por millones de pequeños componentes sensibles a la luz que cada vez que tomamos una imagen, estos la capturan.

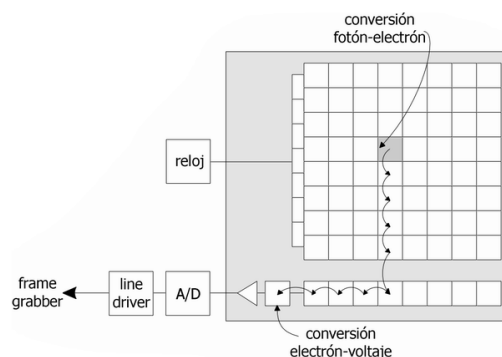


Figura 33. Funcionamiento de un sensor CCD

Se pueden encontrar dos tipos de sensores, los CCD y los CMOS. En la actualidad, en las aplicaciones de visión artificial, se han impuesto los sensores CCD.

Otro de los puntos a tener en cuenta a la hora de elegir una cámara u otra es la interfaz de conexión con el ordenador ya que de ella dependerá la velocidad de transmisión de los datos.

En relación con la velocidad de transmisión de los datos tenemos otro de los conceptos que se manejan en los estudios de viabilidad de visión artificial, los *fps* (*frames per second*) de la cámara. Este concepto hace referencia al número de tomas por segundo que es capaz de realizar la cámara. Un valor alto requerirá de una interfaz que tenga una alta velocidad de transmisión.



Figura 34. Cámara seleccionada para la aplicación (DFK 23U445)

Si nos centramos en las especificaciones de nuestra aplicación, la característica principal que tendría que cumplir nuestra cámara es que tomara el mayor número posible de imágenes en el menor tiempo posible sin que la calidad de la imagen se vea muy mermada.

Teniendo en cuenta esos requisitos, las características principales de la cámara seleccionada son las siguientes:

- Sensor CCD de 1/3"
- Global Shutter
- Resolución de 1,2 MP (1280 x 960)
- 30 *fps*
- Interfaz USB 3.0

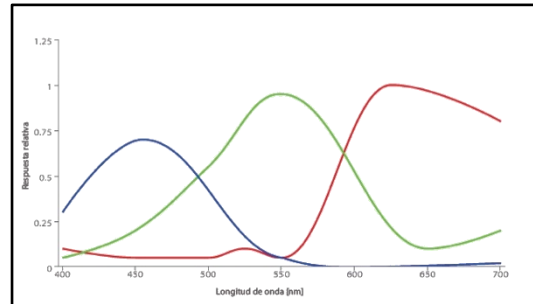


Figura 35. Curva espectral del sensor CCD de la cámara seleccionada

5.1.2. Óptica

En combinación con la elección de la cámara, se encuentra la elección de la óptica que esta portará.

Cuando se hace un estudio para elegir una óptica, las principales características que hay que tener en cuenta son la distancia focal “ f ” y la abertura del diafragma.

La distancia focal es la medida en mm relativa a la distancia entre la lente y el elemento sensor. Si se dijera con unas palabras más simples se podría entender como el alcance que tendría el objetivo o más sencillo aún como el *zoom* del objetivo. Valores altos de “ f ” implican que el alcance será mayor pero surge el problema que el campo de visión se reduce.



Figura 36. Óptica seleccionada para la aplicación (HF16HA-1B)

Según lo expuesto anteriormente, se tendrá que tener en cuenta la distancia a la que se va a disponer la cámara del plano de trabajo y también qué área vamos a querer inspeccionar.

Para calcular de una forma más exacta cual sería nuestra distancia focal podemos aplicar la siguiente fórmula:

$$f = \frac{b \cdot D}{B} \cdot c$$

El significado de cada uno de los términos es el siguiente:

- b, tamaño del sensor CCD en mm
- D, distancia al objeto en mm
- B, ancho del área de inspección en mm
- c, factor de conversión del tamaño del sensor

Para nuestra aplicación tenemos el siguiente resultado:

$$f = \frac{8,8 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} \cdot 0,72 = 16,12 \text{ mm} \rightarrow 16 \text{ mm}$$

La distancia focal para nuestra aplicación resulta de 16 mm asumiendo que la distancia de trabajo de la cámara será de 15 cm y que el área de inspección tendrá un ancho de 4 cm.

5.1.3. Iluminación

El otro elemento del cual hay que hacer un estudio específico para cada equipo de visión artificial, es el sistema de iluminación.

Como se pudo apreciar en la sección del trabajo correspondiente a los distintos tipos de iluminación (pág. 35), las diferencias entre las imágenes son notorias al elegir el tipo de iluminación adecuada o no.

Debido al diseño mecánico actual, sólo se va a poder incluir un tipo de iluminación y la que mejor resultados nos proporcionaría sería la iluminación difusa tipo domo. Con ella garantizaremos que la lectura de la tonalidad sea lo más real posible ya que no tendremos ni sombras ni reflejos en la imagen y además que el análisis de morfología también presente buenos resultados.

En el capítulo de mejoras y líneas futuras se comentarán otras opciones que se podrían tener en cuenta.

5.2. Algoritmo de visión artificial

Esta segunda sección va a estar dedicada a explicar qué características se buscan de los granos y cómo se ha decidido obtener dichas características.

Como se introdujera en la explicación del funcionamiento general de la máquina, la clasificación de los granos se va a realizar en base a su morfología y a su tonalidad.

El que la clasificación de los granos se realice en función de la morfología va a permitir distinguir entre aquellos que hayan tenido un problema de germinación en la planta y aquellos cuya germinación haya sido correcta.

En la figura 37. se puede ver una comparativa de granos que han tenido una buena germinación y de granos en los que ha sido defectuosa.

Las diferencias son bastante perceptibles. Los granos que han tenido algún problema de germinación se ven como si estuvieran arrugados o con unas dimensiones bastante inferiores a lo normal. En cambio aquellos granos que no presentan anomalías, se ven hinchados y robustos.



Figura 37. Comparación de granos bien y mal germinados

La clasificación realizada en base al color va a permitir, en primer lugar distinguir aquellos granos que se encuentren partidos y en segundo lugar subdividir a los granos en dos grandes grupos.

Esos dos grupos van a ser aquellos granos cuyo color tiende más hacia el marrón y aquellos cuyo color tiende más hacia el amarillo. Los primeros van a tener unas propiedades mejores que los segundos, por eso es de gran utilidad para las empresas productoras conocer qué cantidad hay en cada uno de estos grupos.

Para una mejor apreciación de las distintas tonalidades que pueden tener los granos en la figura 38. hay una serie de ejemplos.



Figura 38. Comparación de granos con distintas tonalidades

La detección de los granos fracturados va a ser sencilla ya que la característica principal es que se ven partes blancas correspondientes a la harina de su interior (ver figura 39.).



Figura 39. Comparación de granos partidos y sin partir

Ahora que sabemos qué información queremos obtener de cada grano, vamos a ir explicando la forma de proceder que se ha considerado más robusta y rápida.

5.2.1. Captura de la imagen

Lo primero que se hace es capturar una imagen en color del grano de trigo. Esta captura va a poder estar controlada bien vía *software*, programando un temporizador, o bien vía *hardware*, utilizando una señal externa de un sensor. Esta

señal se conoce como señal de *trigger* y es leída por el controlador Arduino y posteriormente enviada a la aplicación de visión artificial mediante los mecanismos de comunicación entre procesos (mecanismos IPC) oportunos.



Figura 40. Imagen RGB granos de trigo

5.2.2. Conversión a escala de grises

El segundo paso a dar es el de convertir la primera imagen capturada a una nueva en escala de grises.

Este paso se puede considerar como un paso intermedio ya que de esta imagen no vamos a obtener ninguna de las características deseadas, pero sí que nos va a facilitar el trabajo en las posteriores etapas del algoritmo.

La primera forma en la que nos va a ser de ayuda la imagen en escala de grises es que el tiempo de procesamiento de las imágenes va a ser menor. Esto se debe a que estamos reduciendo la cantidad de información que contiene la imagen.

Las imágenes en color, o imágenes RGB, representan el color de cada píxel con 3 bytes, haciendo posible un total de aproximadamente 16,7 millones de colores. Sin embargo, las imágenes en escala de grises representan el color del píxel con un único byte, lo que hace un total de 256 niveles.

La relación que nos permite obtener el nivel de gris del píxel a partir de los valores RGB de la imagen en color es la siguiente:

$$Y = R \cdot 0.3 + G \cdot 0.59 + B \cdot 0.11$$

El segundo motivo por el que nos es útil obtener esta imagen es porque es el paso previo de la siguiente etapa del algoritmo, la binarización.

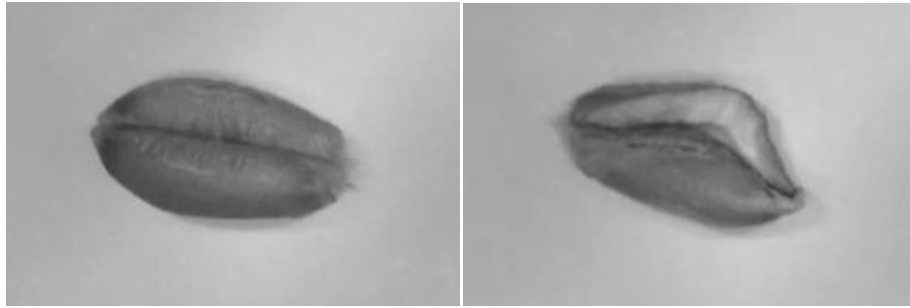


Figura 41. Imagen en escala de grises granos de trigo

5.2.3. Binarización de la imagen

La tercera etapa del algoritmo consiste en la obtención de una imagen binaria. Este tipo de imágenes están caracterizadas porque solo tienen dos niveles de gris, 1 para el blanco y 0 para el negro.

Aunque la potencia de cálculo de los ordenadores permitiría trabajar directamente con las imágenes en escala de grises, en una gran parte de las aplicaciones en las que la visión artificial se emplea para obtener características de objetos, es suficiente con utilizar una imagen binaria.

El proceso para obtener las imágenes binarias a partir de las imágenes en escala de grises se denomina binarización y va a permitir la creación de aplicaciones más robustas y simples además de que el tiempo de procesado de las imágenes sea aún menor.

Para obtener unos buenos resultados en la binarización hay que partir de imágenes en escala de grises que estén muy contrastadas. De esta forma se consigue que el histograma tenga un fuerte carácter bimodal y se puedan distinguir sin problemas las regiones del fondo y el objeto.

A partir del histograma lo que se pretende es fijar un umbral de tal forma que todos aquellos píxeles que tuvieran un valor mayor que dicho umbral tomarían el valor de 1 y formarían parte del fondo y aquellos píxeles con un valor menor tomarían el valor 0 y formarían parte del objeto.

Como se puede adivinar, la elección del valor del umbral de binarización es un punto clave en este proceso.

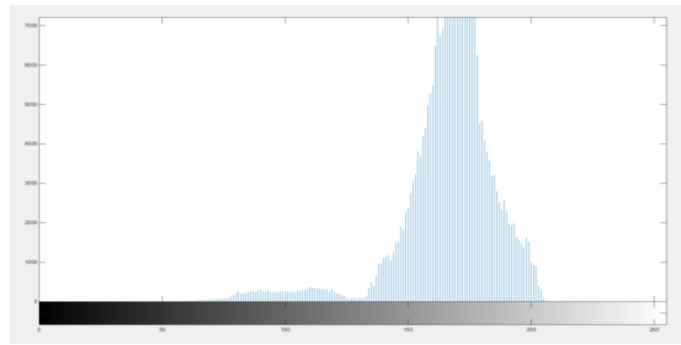


Figura 42. Histograma imagen escala de grises

Una primera manera de fijar el umbral es tomar el punto medio de la escala de grises es decir, el umbral valdría 128. Esta opción no suele ser la más acertada ya que las imágenes no suelen abarcar todo el rango de niveles de gris.

La segunda forma de proceder, sería fijar ese valor en otro punto del histograma. Esa elección va a depender de la distribución que tengan los valores de gris. Dicho valor pertenecerá al valle del histograma cuando se tenga una distribución bimodal y en caso de tener un histograma con distribuciones más solapadas la elección se hace más complicada ya que el valle no es tan evidente.

De hecho en este último tipo de imágenes la binarización no suele tener buenos resultados.

Si se observa la figura 42. se puede ver el histograma correspondiente a las imágenes de la figura 41. Se puede concluir que el umbral de binarización se encuentra en torno a 135-140. Para comprobar los efectos que tiene el elegir un umbral adecuado o no se pueden ver las figuras 43. y 44.

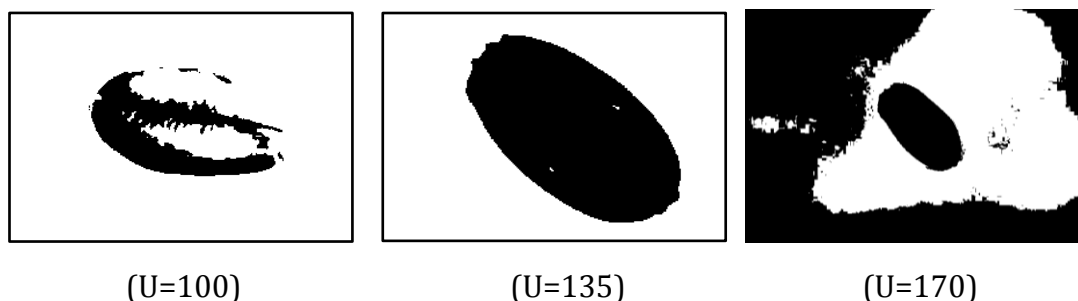


Figura 43. Imágenes de granos enteros binarizadas con distintos umbrales

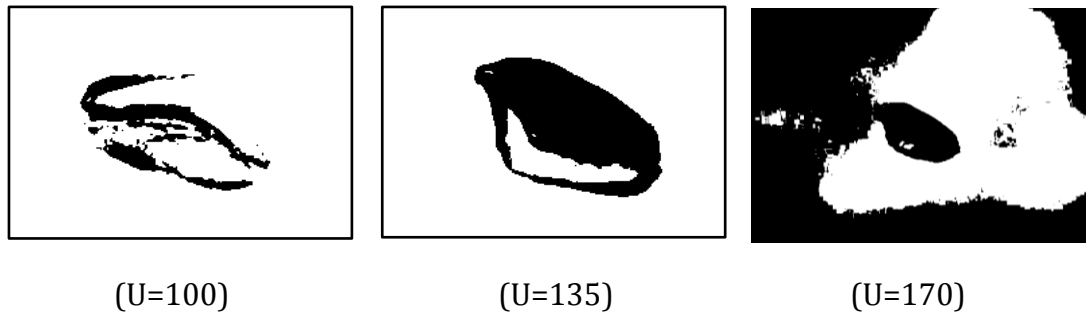


Figura 44. Imágenes de granos partidos binarizadas con distintos umbrales

5.2.4. Detección de contornos. Método de Canny

La siguiente etapa del algoritmo está centrada en la detección de los contornos del grano. Esta detección es de gran utilidad ya que permite reconocer los objetos fácilmente y realizar posteriores labores de segmentación.

Por contorno se entiende toda aquella transición brusca en la intensidad de la imagen o como la frontera entre dos regiones que presentan dos niveles de gris muy distintos.

Hay varios procedimientos para la detección de bordes, pero debido a su amplio uso y a los buenos resultados que proporciona, el método que vamos a emplear en nuestro algoritmo es el método de Canny.

Este método está basado en el uso de máscaras de convolución y el análisis de la primera derivada. Como las imágenes son bidimensionales en lugar de emplear el término de derivada, emplearemos el término de gradiente. Dicho gradiente indicará la dirección en la cual se haya producido el cambio de intensidad.

$$\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right)$$

Los criterios que sigue el método de Canny para la detección de bordes son los siguientes:

- **Criterio de detección:** este criterio indica la importancia que tiene tanto evitar que se eliminen bordes importantes como que se detecten bordes falsos.
- **Criterio de localización:** este criterio indica que tiene que haber una distancia mínima entre las posiciones real y detectada del contorno.

- **Criterio de respuesta:** este criterio indica que en la respuesta final se integran las múltiples respuestas para obtener un único contorno.

A continuación vamos a describir los pasos que da el método de Canny:

- **Obtención del gradiente**

En este primer paso del algoritmo lo que se calcula es la orientación y magnitud, en cada píxel, del vector gradiente.

Previo al cálculo del gradiente se aplicará un filtro gaussiano a la imagen. Este filtro permite eliminar el posible ruido que tuviera la imagen así como suavizarla pero teniendo la precaución de que no se pierda información relevante.

La magnitud y la orientación del gradiente estarán definidas de la siguiente forma:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}} \right)$$

- **Supresión no máxima**

Este segundo paso está dedicado a adelgazar el ancho de los bordes que han sido detectados con el gradiente en el paso anterior. Los bordes obtenidos tendrán un ancho de un único píxel.

La forma de proceder es la siguiente. Partiendo de cuatro direcciones principales 0°, 45°, 90°, y 135°, de cada píxel se analiza qué dirección es la que mejor se aproxima a la que tiene el gradiente.

A continuación se compara el módulo del gradiente de dicho píxel con el de los dos píxeles vecinos en la dirección anteriormente obtenida. Si el valor es menor, se asigna un valor de 0 al píxel y si no se le asigna el valor que tenga el gradiente.

- **Histéresis de umbral**

El último paso del método es el de eliminar el ruido de la imagen obtenida en el paso anterior y así evitar obtener contornos falsos.

Para la reducción de dicho ruido se empleará una función de histéresis del umbral.

Para terminar la explicación de este método, se van a mostrar una serie de imágenes (figuras 45. y 46.) en las que se muestran los resultados obtenidos al variar los umbrales de la función de histéresis.

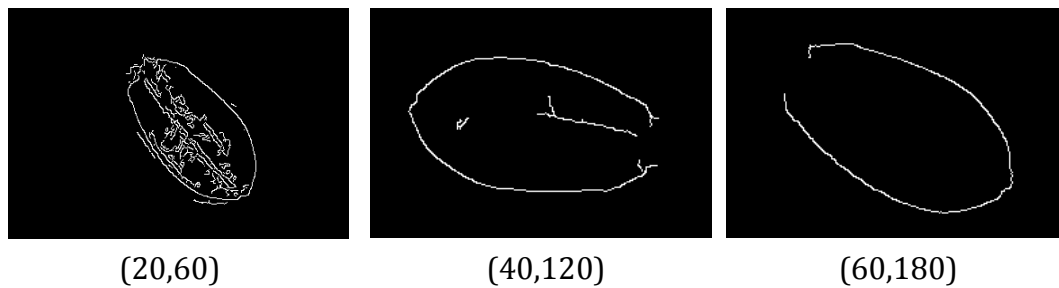


Figura 45. Imágenes Canny de granos partidos con distintos parámetros



Figura 46. Imágenes Canny de granos partidos con distintos parámetros

5.2.5. Cálculo del rectángulo de menor área

La forma de proceder para obtener este rectángulo es la siguiente. Haciendo uso de una función predefinida en la librería OpenCV se obtienen los puntos que pertenecen al contorno de la imagen binarizada. Esos puntos quedarán almacenados en el programa en una variable de tipo vector.

El obtener el rectángulo de menor área a partir de esos puntos es inmediato volviendo a hacer uso de una función propia de la librería.

Por último solo quedaría dibujar sobre la imagen binarizada cada uno de los puntos anteriormente calculados. En la figura 47. se pueden ver los resultados obtenidos.

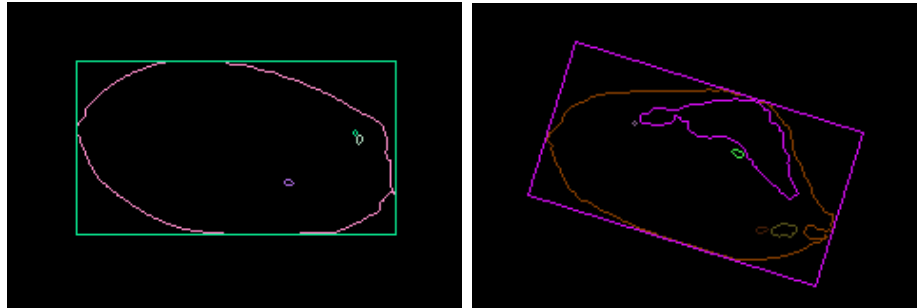


Figura 47. Imagen rectángulo menor área

5.3. Análisis de las semillas

Esta tercera sección del capítulo se va a centrar en explicar, ahora que se conocen las distintas etapas del algoritmo, a partir de qué imágenes y de qué forma se obtiene la información deseada de los granos.

5.3.1. Análisis de morfología

El análisis de morfología va a consistir en obtener las medidas principales del grano, ancho y largo. De esta forma seremos capaces de clasificar los granos por su tamaño.

La imagen de la cual extraeremos esta información es en la que se tiene el contorno del grano junto con el rectángulo de menor área.

Cuando se calcula el rectángulo que mejor se ajusta al contorno del grano, este queda almacenado en el programa como una estructura de datos. Es de esta variable de la cual obtendremos las medidas que nos interesan. Esos valores serán comparados con unos valores de referencia para estimar si el grano presenta o no tara en su crecimiento.

No sólo va a interesar conocer qué granos presenta tara o no, sino que también va a interesar conocer el tamaño promedio de la muestra. Para tal fin, cada vez que se examine un grano sus medidas se irán almacenando en variables del programa. Cuando el proceso llegue a su fin la obtención de la media será inmediata.

5.3.2. Análisis de tonalidad

En el análisis de tonalidad lo que se pretende es obtener los valores L, a, b del grano de trigo.

La imagen de la cual se van a extraer estos datos es de la imagen de color inicial. La forma de proceder será la siguiente:

- Se recorre la imagen pixel por pixel y se almacenará el valor RGB correspondiente siempre que dicho pixel no pertenezca al fondo.
- Una vez se tienen almacenados los valores RGB de todos los píxeles de la imagen se procede a realizar una media.
- Por último esos valores se convierten al formato de color Lab con las ecuaciones correspondientes.

Una vez se tienen los valores en *Lab se procedería a comparar con unos valores de referencia introducidos para determinar la calidad del grano. Los valores de referencia se obtienen a partir de los datos del proveedor o realizando unas medidas experimentales, con un colorímetro, sobre la muestra.

Además de los valores *Lab, en el análisis de tonalidad se podría incluir la detección de los granos partidos ya que esta se realiza en base al color que estos presentan.

Los pasos necesarios para determinar si un grano está partido o no son los siguientes:

- Contar el número de píxeles negros que tiene la imagen binarizada combinada con a de contorno.
- Calcular la elipse teórica a partir de las medidas del rectángulo de menor área y hallar su área.
- Realizar un promedio entre el número de píxeles negros y el área de la elipse.

Con ese promedio se determinará si el grano está partido o no.

Capítulo 6. SISTEMA DE CONTROL

Este capítulo del trabajo se va a ocupar en explicar todo el sistema de control de la máquina. Se comenzará con la explicación de cuál ha sido el controlador elegido para el proyecto, también se mencionarán las entradas y salidas del sistema y se finalizará con la explicación de las acciones de control que tendrán lugar a lo largo del proceso.

6.1. El controlador

Cuando se está diseñando un sistema automático uno de los puntos clave es la elección del controlador.

Este elemento será el encargado de actuar sobre los distintos accionamientos mecánicos en función de las lecturas realizadas en los sensores o de las señales emitidas vía *software*.

Los controladores más empleados actualmente en la industria son los autómatas programables o controladores lógicos programables (PLC). Algunas de las características que hacen que estos computadores industriales se usen con tanta frecuencia son: uso de múltiples entradas y salidas, inmunidad ante el ruido eléctrico o gran resistencia a las vibraciones.

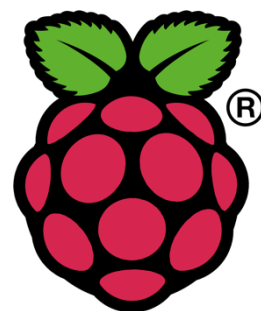


Figura 48. Logotipos comerciales Arduino y Raspberry Pi

Aunque los PLC sean el elemento de control más usado, no quita que existan otros sistemas que nos permitan realizar dichas labores. Entre esos sistemas podemos destacar Raspberry Pi y Arduino.

Ambas plataformas están basadas en la filosofía *open source* o de libre distribución lo cual quiere decir que están en continua evolución al haber una gran comunidad de usuarios detrás de ellas.

El tipo de controlador que se va a emplear en la máquina, teniendo en cuenta las características del sitio de trabajo, el número de entradas y salidas del sistema, las necesidades de procesamiento y la valoración económica, es la placa Arduino.

Como se ha dicho antes, Arduino es una plataforma de *hardware* libre basada en el uso de un microcontrolador, normalmente Atmel AVR, junto con un entorno de desarrollo. El proyecto nació en el año 2005, de la mano del profesor Massimo Banzi, con la idea de facilitar las labores a los estudiantes del Instituto IVREA, en Ivrea (Italia).

Son muchos los modelos de placas que hay en el mercado pero la que se ha optado por usar en este proyecto es la Arduino Mega 2560.



Figura 49. Placa Arduino Mega 2560

Las especificaciones técnicas de la placa seleccionada se recogen a continuación:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de trabajo de 5V.
- Voltaje de entrada recomendado entre 7V y 12V.
- 54 pines de entradas/salidas digitales de los cuales 15 producen una salida de PWM.
- 16 pines de entradas analógicas.
- Corriente de 20 mA. en los pines de entrada/salida.
- Memoria flash de 256 KB para almacenar el código.
- Memoria SRAM de 8 KB.
- Memoria EEPROM de 4 KB.

- Velocidad del reloj de 16 MHz

La alimentación de la placa se podrá realizar mediante el puerto USB, conectando unas baterías al jack provisto o bien conectando a los pines correspondientes un adaptador de corriente.

6.2. Entradas y salidas del sistema

En la sección anterior se ha descrito el controlador que se va a usar. Ahora toca realizar el estudio de cuáles serán sus entradas y cuáles las salidas.

Las entradas de los controladores suelen ser las señales de los elementos sensores que registran ciertas propiedades del sistema aunque en otras ocasiones, como es nuestro caso, además también se pueden incluir señales emitidas vía software.

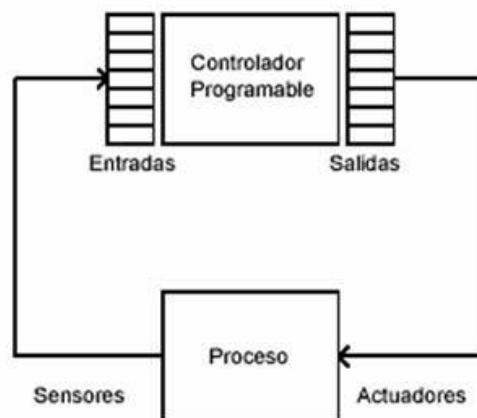


Figura 50. Ciclo de control de un proceso

Las salidas serán las señales que se emitirán a los actuadores para que estos modifiquen el estado del proceso. Estas señales dependerán de la programación del autómata y de las entradas que le lleguen.

En la figura 50. se muestra un diagrama con el típico ciclo de control de un proceso. En él se ve más claro cómo las entradas provienen de los sensores y cómo las salidas van hacia los actuadores.

A continuación vamos a listar las entradas y salidas de nuestro sistema:

- **Entradas**

- Señal analógica correspondiente a la lectura del encoder de la cinta transportadora.
- Señal analógica correspondiente a la lectura del motor paso a paso de la cinta transportadora.
- Señal del *software* de análisis de visión artificial.

- **Salidas**

- Señal binaria para accionar las electroválvulas.
- Señal binaria para accionar el motor del dosificador vibratorio.
- Señal binaria para accionar el motor paso a paso de la cinta transportadora.

El elemento controlador se podría considerar como el cerebro del proceso y de ahí la importancia que tiene su elección.

A lo largo del capítulo se ha justificado la elección del controlador Arduino desde un punto de vista teórico pero hay que decir que la parte correspondiente al algoritmo de control no se pudo desarrollar completamente al no disponer de los distintos elementos sensores y actuadores del sistema.

Para comprobar que el algoritmo de visión artificial funcionaba correctamente sí que se hizo un pequeño montaje con leds de colores y ver cuál se encendía en función del resultado obtenido.

Capítulo 7. INTERFAZ DE USUARIO

Este capítulo del trabajo se va a dedicar a la interfaz de usuario desarrollada para el programa de análisis de las semillas. Para su escritura se ha empleado la librería de código abierto GTK+.

Cuando se desarrolla un programa informático uno de los puntos más importantes es que el uso, desde el punto de vista del usuario final, sea fácil e intuitivo. Es por este motivo por el que diseñar una interfaz gráfica sencilla y visual es un proceso muy importante.

A lo largo de las distintas secciones se van a ir explicando cada una de las funcionalidades que se ha considerado que debería tener el programa así como una descripción de cada una de las ventanas de las que está compuesto y cómo se debería interaccionar con ellas para al final obtener unos buenos resultados al realizar el análisis de las semillas.

7.1.1. El menú principal del programa

La primera ventana que aparece, cuando se ejecuta el programa, es la que se corresponde con el menú principal. En la figura 51. se puede observar su apariencia.

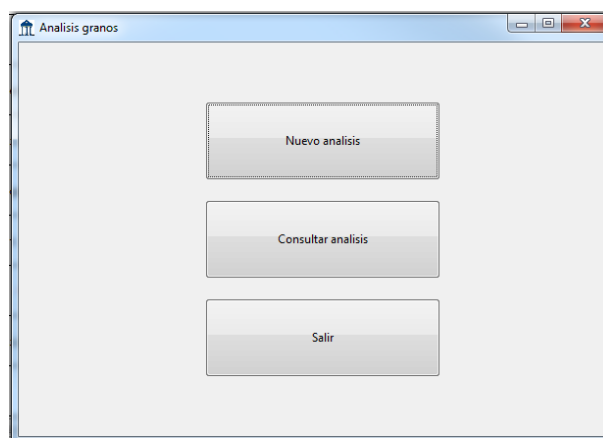


Figura 51. Menú principal del programa

En dicha ventana se pueden ver tres botones distintos: nuevo análisis, consultar análisis y salir. El propósito de cada uno de esos botones es el de realizar un nuevo análisis, consultar ficheros de análisis que ya fueron realizados y abandonar el programa, respectivamente.

En las siguientes secciones se explicará con más detalle las distintas funcionalidades que proporciona cada uno de ellos.

7.1.2. Ventana de nuevo análisis

Cuando se haga *click* con el botón izquierdo del ratón sobre el botón correspondiente a “Nuevo análisis” aparecerá la ventana que se muestra en la figura 52.

En dicha ventana se pueden ver cuatro campos para introducir texto (referencia del lote, parámetro L, parámetro a y parámetro b) y dos botones (cancelar y comenzar análisis).

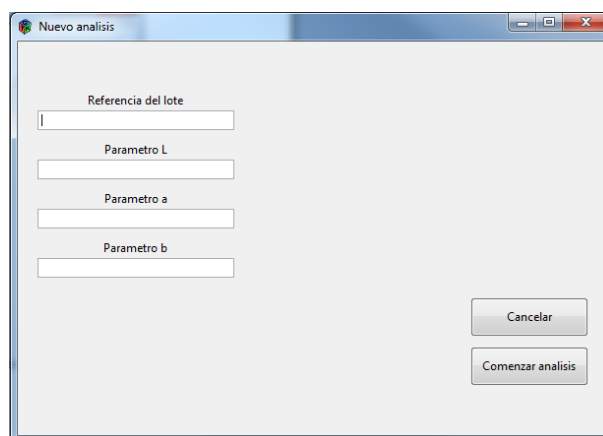


Figura 52. Ventana de análisis nuevo

El significado de cada uno de los campos de texto se explica a continuación:

- Referencia del lote: En este campo se deberá introducir la referencia del lote del cual se va a realizar el análisis. El motivo principal de solicitar este campo es que a la hora de realizar el informe de resultados se incluye esta información y así el usuario final lo podrá interpretar mejor.

- Parámetros L, a y b: En los siguientes tres campos se deberá introducir unos valores que sirvan de referencia para la clasificación por tonalidad. Dichos valores pueden ser obtenidos experimentalmente por medios como el análisis con NIR o mediante un colorímetro.

Para ir cambiando de un campo a otro se puede hacer pulsando la tecla *Tab* del teclado, pulsando la flecha de dirección abajo o haciendo *click* con el botón izquierdo del ratón en cada uno de ellos.

Para asegurarse de que los resultados que se obtienen sean correctos, se deberán rellenar todos los campos antes de comenzar el análisis.

Cuando se quiera comenzar el análisis bastará con que cuando se haya terminado de rellenar el último campo se presione la tecla *Intro* del teclado o bien se haga *click* con el botón izquierdo del ratón sobre el botón “Comenzar análisis”.

Por último si se decide cancelar el análisis, se hará *click* con el botón izquierdo del ratón sobre el botón “Cancelar”.

7.1.3. Ventana de análisis en ejecución

Cuando se han terminado de completar todos los campos de texto y o bien se ha pulsado el botón de “Comenzar análisis” o se ha pulsado la tecla *Intro* cuando se terminó de rellenar el último campo, aparecerá la ventana de la figura 53.

En dicha ventana se pueden ver tres imágenes. Las imágenes se corresponden con la foto original del grano, con la imagen del contorno del grano inscrito en el rectángulo de menor área y por último con la imagen binarizada del grano. La información que se extrae de cada una de estas imágenes quedó explicada en el capítulo del sistema de visión artificial en la sección correspondiente al algoritmo.

Estas imágenes se van a ir actualizando según se va realizando el análisis y así de esta forma se puede observar qué se está realizando.

Por otro lado se puede ver una barra de progreso que permitirá comprobar el estado en el que se encuentra el análisis. A medida que se van analizando granos va aumentando el porcentaje completado.

Por último se tiene un botón “Salir” que permite salir de esta ventana una vez el análisis haya terminado.

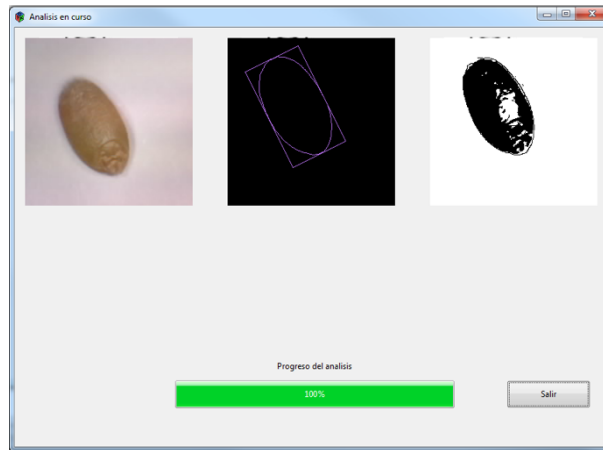


Figura 53. Ventana de análisis en ejecución

7.1.4. Ventana de fin del análisis

Cuando el análisis haya terminado aparecerá una ventana emergente la cual se puede ver en la figura 54.

Esa ventana es una ventana de diálogo que pregunta si se desea ver el informe que se ha generado con los resultados del análisis o no.

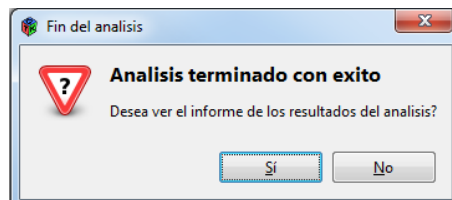


Figura 54. Ventana de fin de análisis

En caso de que se responda "Sí", esa ventana se cerrará y se abrirá una nueva con el contenido del informe. En caso de que la respuesta sea "No" se cerrará la ventana y se vuelve a la ventana de "Análisis en ejecución".

Para marcar una de las dos respuestas se tiene que hacer *click* con el botón izquierdo del ratón sobre el botón correspondiente. Otra forma es seleccionando, mediante las flechas de dirección izquierda y derecha, el botón correspondiente y pulsar la tecla *Intro* del teclado.

7.1.5. Ventana de consultar análisis

La ventana que se muestra en la figura 55. aparecerá cuando se haya actuado sobre el botón “Consultar análisis” del menú principal del programa.

En ella se pueden ver un campo de texto y dos botones.

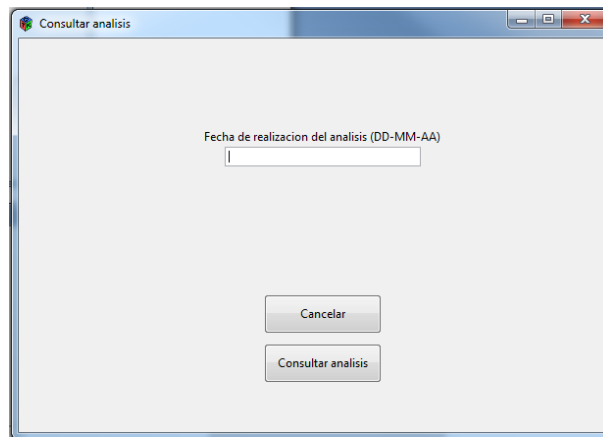


Figura 55. Ventana de consultar análisis

En el campo de texto se tiene que introducir la fecha en la que se realizó el análisis que se quiere consultar con el formato indicado en la etiqueta del campo de texto (DD-MM-AA). El motivo de solicitar esta informa con ese formato es porque los ficheros que contienen los informes de resultados tienen ese nombre.

Una vez rellenado el campo de se puede hacer *click* con el botón izquierdo sobre el botón “Consultar análisis” o bien pulsar la tecla *Intro* para que se muestre el contenido del fichero.

En caso de que se quiera cancelar la consulta se pulsará el botón “Cancelar” para que se cierre esta ventana y se vuelva a mostrar el menú principal del programa.

7.1.6. Ventana de salir del programa

Cuando se decide abandonar el programa, se puede hacer de dos formas distintas. Haciendo *click* sobre el botón “Salir” del menú principal o bien sobre la “x” situada en la esquina superior derecha de la pantalla.

En caso de que se actúe sobre el botón “Salir” aparecerá la ventana de la figura 56. en la que se solicita la confirmación de abandonar el programa. En caso de respuesta afirmativa se cerrarán todas las ventanas que estuvieran abiertas y se termina el programa. Por el contrario si la respuesta fuera “No” se cerraría esta ventana y se volvería a mostrar el menú principal del programa.

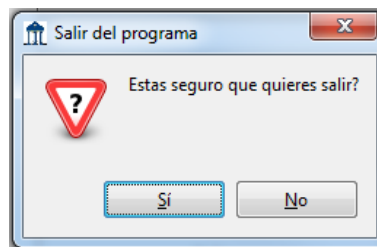


Figura 56. Ventana de salir del programa

7.1.7. Informe de resultados

En esta sección, aunque no tenga mucha relación con lo que es la interfaz de usuario propiamente dicha, se va a describir el informe de resultados generado cuando finaliza el análisis de una muestra.

El informe creado no es más que un archivo con extensión “.txt” cuyo nombre se genera a partir de la fecha de realización del análisis. El nombre del fichero resultante tendría la siguiente forma “DD-MM-AA.txt”.

```
ANALISIS REALIZADO CON FECHA Y HORA
29/05/15 11:46:26
REFERENCIA DEL LOTE:
El numero total de granos analizados es :3
El numero de granos buenos es :3 (100%)
El numero de granos partidos es :6 (200%)
El numero de granos con tara es :0 (0%)
El ancho medio de los granos es :66
El largo medio de los granos es :66
Los valores de tonalidad medios (Lab) son :101 17 56
```

Figura 57. Ejemplo del informe de resultados

La información que se incluye en el informe se detalla a continuación:

- Fecha y hora a la que se ha realizado el análisis
- Referencia del lote del cual proviene la muestra analizada

- Número de granos totales analizados, granos buenos, granos partidos y granos con tara en la germinación. Todos ellos acompañados del porcentaje que representarían.
- Valores medios de las medidas principales de las semillas.
- Valores medios de la tonalidad de las semillas en formato *Lab

En la figura 57. se muestra un ejemplo de cómo sería el informe generado.

Como resumen de este capítulo podemos decir que cuando se diseña una interfaz de usuario hay que hacerlo pensando en facilitar las labores del usuario final. Como se puede ver a lo largo del capítulo las ventanas diseñadas incluyen la información más relevante sin incurrir en un exceso de complicación para el usuario final.

Las posibles mejoras que podría tener se comentarán en el capítulo de conclusiones y líneas futuras de esta memoria.

Capítulo 8. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo de la memoria se pretende analizar y valorar, desde un punto de vista objetivo, el funcionamiento del algoritmo de visión artificial que se ha desarrollado.

En cada uno de los ensayos se van a mostrar tres imágenes distintas, la imagen original en color, la imagen del contorno junto con el rectángulo de menor área y por último la imagen binarizada. Se han elegido estas imágenes porque suponen los pilares principales del algoritmo y porque en base a ellas se realiza la clasificación de los granos.

Para hacernos una mejor idea del funcionamiento se han variado las condiciones de iluminación así como el grano de trigo analizado.

8.1. Condiciones de los análisis

Esta primera sección va a tratar de explicar en qué condiciones se han realizado los distintos ensayos.

La cámara empleada para tomar las imágenes es la que se describió en la quinto capítulo en la sección de los elementos que conformaban el sistema de visión artificial (ver pág. 53). Además se hizo uso de un trípode de fotografía para asegurarnos una buena estabilidad durante todo el ensayo.

Las condiciones de iluminación son las que sí que se fueron variando para poder comprobar la forma en la que afectaban a los resultados finales. Las distintas condiciones que se emplearon fueron las siguientes:

- Iluminación directa frontal
- Iluminación directa inclinada
- Iluminación a contraluz o *backlight*.

Para la iluminación directa se empleó un anillo de leds blancos y para la iluminación a contraluz, una matriz cuadrada, también de leds blancos, junto con un panel difusor para tener una iluminación más homogénea.

Por otro lado el color del fondo sobre el que se encontraban los granos de trigo se optó porque fuera blanco. El motivo es que como se trata de un producto

alimenticio y el entorno de trabajo, de momento, va a ser de un laboratorio los materiales que se emplean presentan este color.

Por último cabe decir que los ensayos se realizaron sobre los distintos tipos de granos en los que vamos a poder clasificarlos es decir, granos enteros, granos con tara en la germinación y granos partidos.

En las secciones que preceden se van a poder observar distintas imágenes con los diferentes resultados obtenidos.

8.2. Resultados sobre granos enteros

En esta segunda sección vamos a comprobar la bondad del algoritmo implementado realizando las diversas pruebas sobre granos enteros. Estos habrán podido tener un problema en la germinación o no, pero nunca van a presentar partes blancas debido a su fractura.

8.2.1. Iluminación directa frontal

En la figura 58. se puede observar la imagen en color obtenida y se comprueba que no presenta ni reflejos ni sombras y por tanto, se puede decir que la iluminación seleccionada es la correcta. Además el contraste entre el grano y el fondo es bastante notable lo que nos aseguraría una correcta lectura de los valores *Lab de la tonalidad.

Por otro lado vemos en la figura 59. que el rectángulo de menor área se ajusta perfectamente al contorno calculado. En esta imagen se aprecia perfectamente como las medidas del largo y ancho del rectángulo, efectivamente, coinciden con las medidas a analizar del grano.

Por último, en la figura 60. se observa la imagen binarizada. De ella se concluye que el umbral de binarización empleado en el algoritmo es el adecuado. Si no hubiera sido así, habrían aparecido manchas negras en la periferia del grano relativas al fondo o en su defecto el interior del grano no estaría completo.



Figura 58. Imagen color - iluminación directa frontal

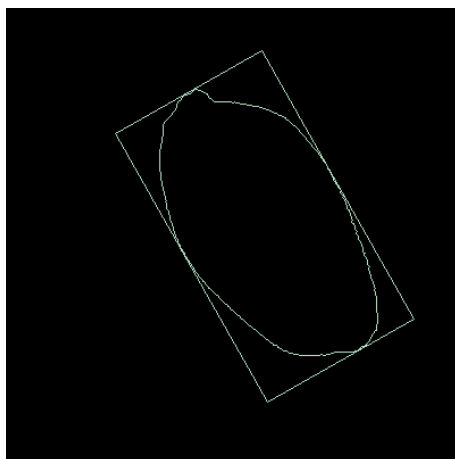


Figura 59. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa frontal



Figura 60. Imagen binaria - iluminación directa frontal

8.2.2. Iluminación directa inclinada

La primera imagen que se va a analizar es la imagen en color. En la figura 61. se puede observar cómo debido al tipo de iluminación seleccionada aparece una sombra.



Figura 61. Imagen color - iluminación directa inclinada

El hecho de que en la imagen haya una sombra provoca que los resultados obtenidos del análisis sean erróneos. Por ejemplo a la hora de calcular la tonalidad, aunque siga habiendo un alto contraste entre el fondo y el grano, la presencia de la sombra haría que el grano tuviera un tono más oscuro del que en realidad tiene. Esto se debe a que como se calcula el valor medio de los píxeles que no pertenecen al fondo, el algoritmo interpretaría que la sombra forma parte del grano al tener un tono más oscuro.



Figura 62. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa inclinada

Por otro lado, el valor de las medidas del grano también se vería afectado. Aunque en la figura 62. no se haya conseguido que se detectara el rectángulo de menor área, queda claro que la imagen de contorno se obtiene teniendo en cuenta la sombra y por tanto las medidas no hubieran sido las reales.

Lo mismo sucede con la imagen binaria de la figura 63. Al haberla generado teniendo en cuenta la sombra, cuando se contara el número de píxeles negros que esta contuviera se obtendría un valor erróneo. Además cuando se calculara la proporción entre el área de la elipse y ese número de píxeles, también se tendría una conclusión equivocada.

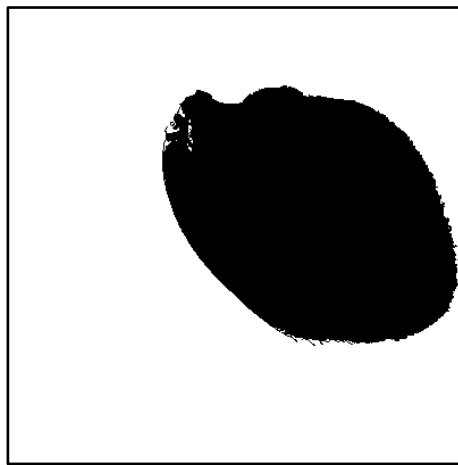


Figura 63. Imagen binaria - iluminación directa inclinada

8.2.3. Iluminación a contra luz

Al igual que en los dos ensayos anteriores, vamos a empezar comentando la imagen en color capturada.

Debido al tipo de iluminación empleada la imagen de la figura 64. presenta un mayor contraste respecto a las de los otros ensayos, esto va a facilitar las posteriores labores de detección del contorno y binarización. Sin embargo, la tarea del cálculo de la tonalidad se hace más complicada pues el color que presenta el grano no es el suyo real.

En las imágenes de las figuras 65. y 66. se confirma que los resultados obtenidos al tener una imagen de mayor contraste son mejores.



Figura 64. Imagen color - iluminación a contraluz

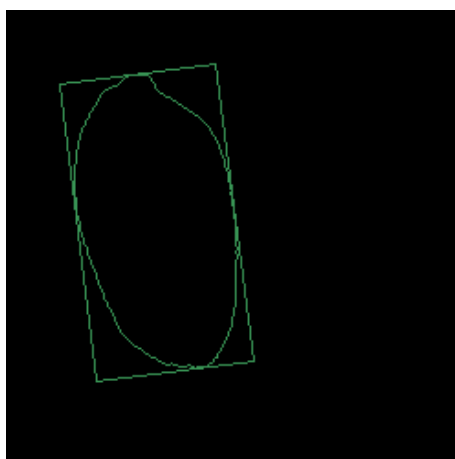


Figura 65. Imagen contorno + rectángulo - iluminación a contraluz

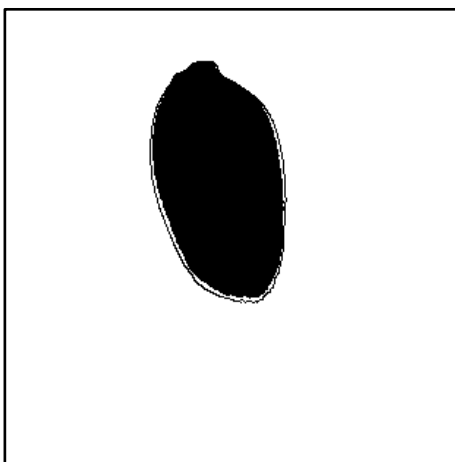


Figura 66. Imagen binaria - iluminación a contraluz

8.3. Resultados sobre granos partidos

En esta tercera sección vamos a comprobar la bondad del algoritmo implementado realizando las diversas pruebas sobre granos partidos. La característica principal de estos granos es que van a presentar partes blancas debido a su fractura. No nos va a importar si su germinación en la planta fue correcta o por el contrario tuvo algún problema.

8.3.1. Iluminación directa frontal

En primer lugar, vemos en la imagen de la figura 67. como gracias al tipo de iluminación empleada no hay ni brillos ni sombras.

Como este tipo de granos se va a excluir de la muestra que posteriormente será pesada, el dato de la tonalidad no nos serviría de mucho. Además el valor obtenido sería erróneo pues la parte blanca debida a la fractura lo alteraría.



Figura 67. Imagen color - iluminación directa frontal

Los resultados de la detección del contorno y del rectángulo de menor área se pueden ver en la imagen de la figura 68. Como sucediera en el caso del grano entero, son muy satisfactorios.

La imagen que más nos va a interesar para detectar este tipo de granos es la binaria. El obtener una buena imagen es muy importante pues el número de píxeles negros variará en función del umbral de binarización seleccionado. En la figura 69. se puede ver como el resultado es bastante bueno.

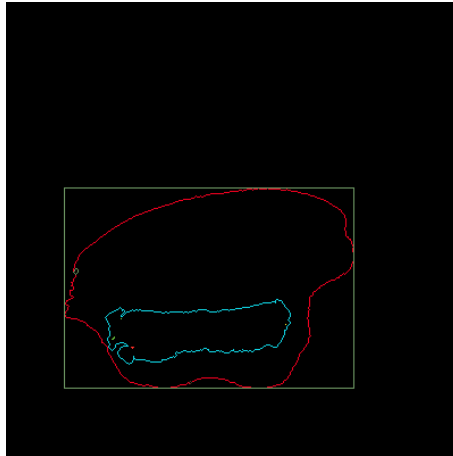


Figura 68. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa frontal

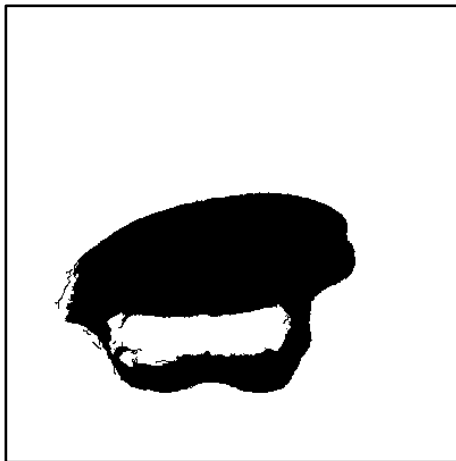


Figura 69. Imagen binaria - iluminación directa frontal

8.3.2. Iluminación directa inclinada

Al igual que en el ensayo con granos enteros, este tipo de iluminación provoca que tengamos sombras y por tanto, los resultados no sean los correctos.

Para comprobar cómo afecta esta iluminación a las imágenes se pueden ver las figuras 70. a 72.

Vemos que la característica más afectada son las medidas al parecer el grano de un mayor tamaño. Sin embargo la detección de la fractura sí que se podría seguir consiguiendo.



Figura 70. Imagen color - iluminación directa inclinada



Figura 71. Imagen contorno + rectángulo - iluminación directa inclinada

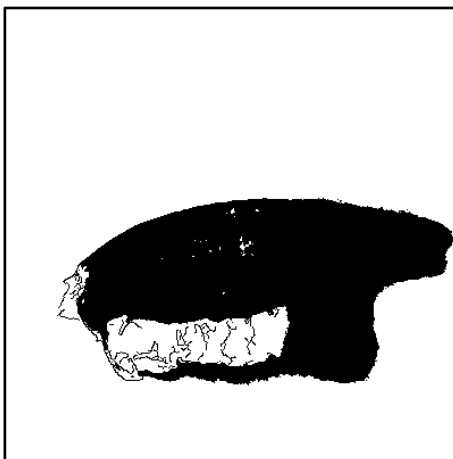


Figura 72. Imagen binaria - iluminación directa inclinada

8.3.3. Iluminación a contra luz

Para finalizar los ensayos experimentales, se van a analizar los resultados de la iluminación a contraluz en granos partidos.

La imagen en color de la figura 73. presenta un alto contraste lo que permite, al igual que con los granos enteros, obtener unos buenos resultados en la posterior detección de contornos (figura 74.).



Figura 73. Imagen color - iluminación a contraluz

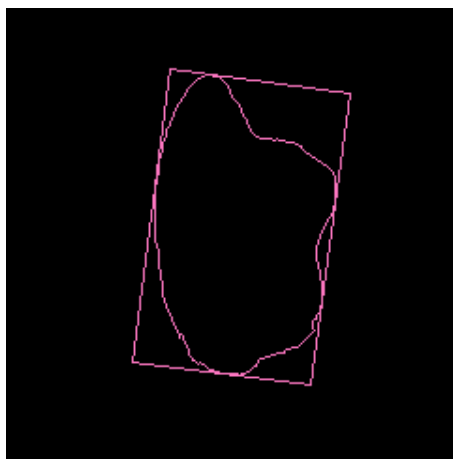


Figura 74. Imagen contorno + rectángulo - iluminación a contraluz

Sin embargo los resultados de la binarización no son los deseados. Al ubicar la fuente luminosa por detrás del objeto, no vamos a ser capaces de detectar la

fractura del grano. En la figura 75. vemos como el grano simplemente parece deformado en lugar de partido.

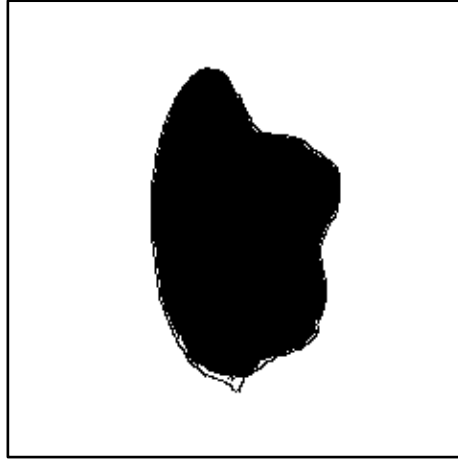


Figura 75. Imagen binaria - iluminación a contraluz

Para finalizar este capítulo podemos decir que el algoritmo tiene una buena respuesta cuando la iluminación es frontal y directa. Esta iluminación no se corresponde al 100% con la indicada en el estudio previo realizado puesto que en lugar de directa se dijo que fuera difusa pero aún así los resultados han sido muy satisfactorios.

Por otro lado se puede concluir que la mejor iluminación para obtener las medidas principales de los granos es la retro-iluminación pero habría que combinarla con una frontal para poder detectar las fracturas y los valores de tonalidad.

Por último cabe decir que ante todo hay que evitar una iluminación oblicua puesto que los resultados obtenidos han sido erróneos a consecuencia de las sombras generadas.

Capítulo 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este último capítulo de la memoria se presentan las conclusiones sobre la realización de este proyecto respecto a los objetivos marcados al inicio del mismo.

El objetivo fundamental del proyecto ha sido en el desarrollo de un prototipo para la clasificación de semillas. La parte fundamental de este trabajo, ha estado constituida por el diseño y desarrollo del sistema de visión artificial y es por ello que gran parte de la memoria se ha dedicado a justificar las distintas medidas adoptadas así como los resultados obtenidos.

A continuación se presentan las conclusiones considerando con más detalle todos los objetivos iniciales. Se finalizará incluyendo algunas de las mejoras que podría tener la máquina tanto desde un punto de vista mecánico como desde el punto de vista del software

9.1. Conclusiones

En esta sección vamos a comprobar si los objetivos que se marcaron al principio de la memoria se han cumplido.

El primero de ellos hablaba de realizar un estudio sobre los elementos que conformarían el equipo de visión artificial. Si se analizan las imágenes de los resultados obtenidos queda patente que la elección tanto de la cámara y óptica como de la iluminación son correctas.

Como segundo objetivo se marcó el desarrollo de un algoritmo de visión artificial capaz de obtener unas determinadas características de unas semillas. Cabe decir que para que los resultados sean todo lo buenos que deseamos las condiciones de trabajo se tienen que mantener estables. Cuando un algoritmo necesita de unas condiciones estables para que su funcionamiento sea bueno, es un algoritmo poco robusto; pero cuando hablamos de aplicaciones tan específicas en ocasiones se prefiere la eficacia antes que la robustez ante cambios en las condiciones de trabajo. Si observamos los resultados obtenidos, estos indican que el algoritmo desarrollado cumple las necesidades pedidas.

En tercer lugar se quería implementar un algoritmo de control para que junto con la placa Arduino el proceso quedara completamente automatizado.

Se podría decir que este objetivo se ha cubierto a medias ya que sí que se ha justificado que el uso del controlador Arduino permite controlar completamente el proceso pero lo que es propiamente el algoritmo no se ha podido completar al no contar con los distintos elementos sensores y actuadores del sistema. Cabe decir que se hicieron distintas pruebas iluminando distintos leds en función de los resultados arrojados por el algoritmo de visión artificial.

El último de los objetivos fijados era el de diseñar una interfaz de usuario que permitiera al usuario final realizar los análisis de una forma sencilla. En base a lo explicado en el capítulo 7 se podría decir que tal objetivo queda satisfecho.

Para finalizar la valoración de los objetivos, vamos a hacer algunos comentarios a cerca del diseño mecánico concebido. Podemos decir que tiene más un carácter práctico y que su futura realización fuera sencilla y económica, más que un diseño pensado para su futura comercialización. Como no se ha llegado a realizar físicamente tampoco se pueden hacer más valoraciones de si es acertado o no.

La realización de este proyecto ha supuesto un desafío pues se trata de un trabajo multidisciplinar y por tanto se encuentra muy cerca de lo que puede ser una futura experiencia laboral.

Si nos atenemos a los objetivos cumplidos podemos decir que se han logrado prácticamente en su totalidad y en consecuencias las exigencias marcadas quedarían cubiertas.

Se trata de un proyecto que se encuentra en mitad de su desarrollo y como veremos en la siguiente sección, quedan muchas cosas por mejorar e implementar y que podrían ser objeto de estudio en otros trabajos.

9.2. Líneas futuras

En esta sección se van a valorar posibles mejoras tanto a nivel mecánico y que en consecuencia mejoren el funcionamiento global de la máquina, como a nivel de *software* y que las mejoras se vean en el algoritmo de visión artificial y en la aplicación de usuario.

9.2.1. Mejoras a nivel mecánico

El diseño mecánico actual ha sido pensado para que la máquina se ubique en un laboratorio en el cual la importancia del tiempo del análisis, el transporte y almacenado sea bastante inferior respecto a la de obtener unos resultados muy exactos.

En el momento que este sistema se quiera incluir dentro del proceso productivo los tiempos antes mencionados tienen que reducirse de forma notoria y el diseño actual se verá afectado.

En primer lugar lo que habría que modificar sería el método de transporte de los granos, se pasaría del transporte mediante la cinta transportadora a un transporte por caída libre.



Figura 76. Sistema compacto de visión artificial

En segundo lugar habría que cambiar el sistema de adquisición de las imágenes. Actualmente se cuenta con una única cámara conectada vía puerto USB 3.0 a un ordenador y para esta nueva situación de trabajo lo ideal sería disponer de un equipo industrial de visión artificial.

Estos equipos cuentan con la posibilidad de conectar varias cámaras a un único ordenador, el cual está exclusivamente dedicado a ejecutar la aplicación de visión desarrollada.

Las cámaras más idóneas serían las cámaras de alta velocidad que son capaces de tomar muchas imágenes por segundo, estaríamos hablando de más de 300 fps.

Otro de los elementos a modificar sería el controlador. Habría que introducir un autómatas, o PLC, en lugar del Arduino actualmente usado. Con este nuevo controlador nos aseguramos que el funcionamiento en entornos industriales sea

correcto además de aumentar la velocidad de procesamiento y transmisión de datos entre los dispositivos.



Figura 77. PLC Siemens y módulos de expansión

Hasta ahora se han comentado los cambios necesarios para implantar el sistema dentro del proceso productivo, pero sobre el diseño mecánico actual también habría posibilidad de introducir mejoras.

Si nos centramos en la iluminación, uno de los cambios que se podrían plantear es el de introducir la iluminación a contraluz. Aunque habría que modificar el medio sobre el que se transportan los granos, nos estaríamos asegurando unos mejores resultados en el análisis. Gracias a la iluminación frontal detectaríamos fracturas y la tonalidad, mientras que con la nueva iluminación leeríamos las medidas.

Otra de las posibles modificaciones sería la de cambiar el tipo de fuente luminosa. En lugar de utilizar leds blancos, se podrían usar leds infrarrojos. De esta forma seríamos capaces de detectar otras características de los granos.

9.2.2. Mejoras a nivel de software

En este proyecto no solo se van a poder introducir mejoras en los elementos *hardware* de la máquina. La parte *software* tiene un gran peso dentro del proyecto y también se van a poder plantear distintas mejoras. A continuación se mencionan algunas de ellas.

Cuando al finalizar el análisis se genera el informe de resultados, no solo se crearía el archivo de texto, sino también existiría la posibilidad de exportar los resultados a una hoja de cálculo o a una base de datos.

De cara a facilitar el uso al usuario final y proporcionarle una mayor información, se podrán realizar distintas mejoras sobre la interfaz de usuario. Por ejemplo, cuando el análisis está en ejecución se podrían incluir los datos obtenidos así como un código de colores en función de la clasificación, en la ventana de “análisis en ejecución”.

Aunque este proyecto ha estado enfocado al análisis de granos de trigo, el código se podría optimizar de tal forma que se pudieran analizar más tipos de semillas. Esto también provocaría cambios en la interfaz de usuario en la cual se daría la opción de seleccionar qué tipo de semilla querría analizar y qué características desearía obtener.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARDUINO. *Tarjeta Arduino MEGA 2560*. < <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560> > [Consulta: 6 de octubre de 2015].
- [2] ARDUINO. *Getting started with Arduino*. < <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage> > [Consulta: 6 de octubre de 2015].
- [3] BUHLER. *Clasificación óptica*. < <http://www.buhlergroup.com/europe/es/tecnologias-de-procesos/clasificacion-optica.htm#VUeWXPztko> > [Consulta: 14 de mayo de 2015].
- [4] CALVO IVANOVIC, I. *Modelos de color*. < <http://www.proyectacolor.cl/aplicacion-del-color/modelos-de-color/> > [Consulta: 22 de mayo de 2015].
- [5] EASY RGB. *Color conversion math and formulas*. < <http://www.easyrgb.com/index.php?X=MATH&H=07#text7> > [Consulta: 22 de mayo de 2015].
- [6] DATA TECHNOLOGIES. *Data count S25 - Contador de semillas*. < http://es.data-technologies.com/es.data_count_s_25_seed_counter.html > [Consulta: 13 de abril de 2015].
- [7] FESTO DIDACTIC. *3/2-way single solenoid valve*. < <http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/00622556001075223683.pdf> > [Consulta: 13 de abril de 2015].
- [8] GLOSARIO GRÁFICO. *Iluminante estándar D65*. < http://www.glosariografico.com/iluminante_estandar_d65 > [Consulta: 20 de mayo de 2015].
- [9] GUEVARA HERNÁNDEZ, F. y GÓMEZ GIL, J. (2011). *A machine vision system for classification of wheat and barley grain kernels*. Valladolid, España: ETSI Telecomunicaciones.
- [10] IMAGEN DE INTERNET. *Clasificación manual de semillas*. < <https://i1.ytimg.com/vi/IIQ1ib7KAog/hqdefault.jpg> > [Consulta: 20 de mayo de 2015].
- [11] KONIKA MINOLTA. *Colorímetro CR-10*. < <http://www.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/products/colour-measurement/colour-readers/cr-10/features.html> > [Consulta: 20 de mayo de 2015].
- [12] LOS SEIBO. *Clasificadora por color*. < http://www.los-seibos.com/Clasificadora_de_color.html > [Consulta: 14 de mayo de 2015].

- [13] MORENO, L. *Propiedades de los colores*. < <http://www.desarrolloweb.com/articulos/1503.php> > [Consulta: 22 de mayo de 2015].
- [14] MILICA POJIĆ, Jasna Mastilović y NINETA Majcen (2012). *The Application of Near Infrared Spectroscopy in Wheat Quality Control*, Infrared Spectroscopy - Life and Biomedical Sciences, Prof. Theophanides Theophile (Ed.).
- [15] MUÑOZ MANSO, R. (2014). *Sistema de visión artificial para la detección y lectura de matrículas*. Trabajo final de grado. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- [16] NOGUÉ, A. y ANTIGA, J. (2012). *Aplicación práctica de la visión artificial en el control de procesos industriales*. Institut la Garrotxa. < <http://visionartificial.fpcat.cat/wp-content/uploads/Conocimientos.pdf> > [Consulta: 10 de septiembre de 2015].
- [17] OPENCV. *Creating Bounding boxes and circles for contours*. < http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/shapedescriptors/bounding_rects_circles/bounding_rects_circles.html#bounding-rects-circles > [Consulta: 13 de abril de 2015].
- [18] OPENCV. *Finding contours in your image*. < http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/shapedescriptors/bounding_rects_circles/bounding_rects_circles.html#bounding-rects-circles > [Consulta: 13 de abril de 2015].
- [19] ORTEGA DE LA FUENTE, D. (2014). *Desarrollo e implementación de un sistema de visión artificial para el reconocimiento de matrículas*. Trabajo final de grado. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- [20] PLATERO DUEÑAS, C. (2009). "Introducción a la visión artificial" en Platero Dueñas, C. *Apuntes de visión artificial*.
- [21] QUIMINET. *El análisis de color: colorimetría y colorímetro*. < <http://www.quiminet.com/articulos/el-analisis-de-color-colorimetria-y-colorimetro-2704601.htm> > [Consulta: 20 de mayo de 2015].
- [22] VALVERDE REBAZA, J. *Detección de borde mediante el algoritmo de Canny*. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- [23] WIKIPEDIA. *Colorimetría*. < <http://es.wikipedia.org/wiki/Colorimetr%C3%ADa> > [Consulta: 20 de mayo de 2015].
- [24] WIKIPEDIA. *Arduino*. < <https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino> > [Consulta: 6 de octubre de 2015].