



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL POSICIONAMIENTO DEL SERVOMECANISMO DE UNA CÁMARA DE IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS INFRACTORES POR SEMÁFORO MEDIANTE RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES UTILIZANDO VISIÓN ARTIFICIAL.”

CHRISTIAM XAVIER NÚÑEZ ZAVALA

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de Magíster en:

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

**RIOBAMBA - ECUADOR
(JULIO-2017)**



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “Desarrollo de un sistema de control para el posicionamiento del servomecanismo de una cámara de identificación de vehículos infractores por semáforo mediante reconocimiento de imágenes utilizando visión artificial”, de responsabilidad del Sr. **CHRISTIAM XAVIER NÚÑEZ ZAVALA** ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Wilson Zúñiga Vinueza; M.Sc.

PRESIDENTE

FIRMA

Ing. Henry Vallejo Vizhuete; M.Sc.

DIRECTOR

FIRMA

Ing. Jesús Rodríguez Flores; PhD.

MIEMBRO

FIRMA

Ing. Oswaldo Martínez Guashima; M.Sc.

MIEMBRO

FIRMA

Riobamba, Julio 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Christiam Xavier Núñez Zavala, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

CHRISTIAM XAVIER NÚÑEZ ZAVALA

No. Cédula: 060396498-2

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado para hijo Emilio y mi esposa Adriana que son el motor que impulsa mi vida, y sin ellos este trabajo no tendría sentido.

También dedico este trabajo a mi familia a mis padres y hermanas, mis abuelitos en especial a mi abuelita Cleofe que me acompaña desde el cielo, siendo ellos una ayuda incondicional durante mi formación académica y personal, al igual que a la familia de mi esposa quienes me prestaron toda su ayuda y colaboración.

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por guiarme mi camino y darme la sabiduría para comprender y ser paciente, para razonar y entender.

Hago extenso mis agradecimientos a mis compañeros de estudio que me acompañaron durante este tiempo, al igual que docentes que de alguna forma supieron brindarme su apoyo y conocimientos.

Agradecer también a un gran amigo y miembro del Tribunal de este trabajo de investigación Jesús Rodríguez quien me colaboró con sus conocimientos durante el proceso de realización de este trabajo. Por último, agradecer a mi Director de titulación Henry Vallejo y al segundo miembro del Tribunal Oswaldo Martínez quienes me guiaron para llegar a culminar este trabajo de titulación.

CONTENIDO GENERAL

| | Pág. |
|-----------------------------|------|
| PORTADA..... | i |
| CERTIFICACIÓN: | ii |
| DERECHOS INTELECTUALES..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| CONTENIDO GENERAL..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xii |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS | xvi |
| INDICE DE ECUACIONES | xvii |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | xx |
| RESUMEN..... | xxi |
| SUMMARY | xxii |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

| | | |
|--------------|--|---|
| 1.1 | Situación Problemática | 2 |
| 1.2 | Formulación del Problema..... | 3 |
| 1.3 | Preguntas directrices o específicas de la investigación..... | 3 |
| 1.4 | Justificación de la Investigación | 3 |
| 1.5 | Objetivos de la Investigación..... | 5 |
| 1.5.1 | Objetivo General | 5 |
| 1.5.2 | Objetivos Específicos..... | 5 |
| 1.5.3 | Hipótesis General | 5 |

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

| | | |
|--------------|---|---|
| 2.1 | Sistemas de Control | 6 |
| 2.1.1 | Definición de Sistemas de Control..... | 6 |
| 2.1.2 | Sistemas de control de lazo abierto | 7 |
| 2.1.3 | Sistema de Control de Lazo Cerrado..... | 7 |
| 2.1.4 | Modelos matemáticos de los sistemas..... | 7 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.1.5 | Aproximación lineal de Sistemas físicos | 8 |
| 2.1.6 | La función de transferencia..... | 9 |
| 2.1.7 | Función de transferencia de un sistema de lazo abierto | 11 |
| 2.1.8 | Función de transferencia de un sistema de lazo cerrado | 11 |
| 2.1.9 | Error en estado Estacionario ($E(s)$) | 13 |
| 2.1.9.1 | Error en estado estacionario en lazo abierto Eas | 13 |
| 2.1.9.2 | Error en estado estacionario en lazo cerrado $E(s)$ | 14 |
| 2.1.10 | Comportamiento de los sistemas de control de segundo orden..... | 14 |
| 2.1.11 | Estabilidad de los sistemas de control lineales con realimentación continuos..... | 17 |
| 2.1.11.1 | Estabilidad bajo el criterio de Ruth and Hurwitz..... | 18 |
| 2.1.12 | Sistemas de control en tiempo discreto | 19 |
| 2.1.12.1 | Tipos de señales..... | 19 |
| 2.1.12.2 | Sistema en tiempo discreto..... | 20 |
| 2.1.12.3 | Sistema de control digital | 20 |
| 2.1.12.4 | Muestreador | 20 |
| 2.1.12.5 | Bloqueador..... | 21 |
| 2.1.12.6 | Convertidor AD/DA | 21 |
| 2.1.13 | Transformada z para los sistemas discretos | 21 |
| 2.1.14 | Transformada z inversa para los sistemas discretos..... | 22 |
| 2.1.15 | Función de transferencia en los sistemas discretos | 22 |
| 2.1.15.1 | Muestreo y bloqueo | 22 |
| 2.1.15.2 | Función de transferencia discreta en z | 25 |
| 2.1.16 | Análisis de estabilidad en los sistemas discretos | 26 |
| 2.1.16.1 | Criterio de estabilidad de Jury | 26 |
| 2.1.17 | Controladores P.I.D..... | 27 |
| 2.1.17.1 | Análisis controladores PID en tiempo continuo | 27 |
| 2.1.17.2 | Discretización de controladores P.I.D | 28 |
| 2.2 | Visión Artificial..... | 32 |
| 2.2.1 | Procesos de visión artificial | 33 |
| 2.2.1.1 | Adquisición..... | 34 |
| 2.2.1.2 | Procesamiento de la Imagen | 34 |
| 2.2.1.3 | Representación y descripción (extracción de características)..... | 35 |
| 2.2.1.4 | Reconocimiento e interpretación | 36 |
| 2.2.2 | Sistemas de visión artificial | 37 |
| 2.2.2.1 | Fuente de Luz | 37 |
| 2.2.2.2 | Sensores de Imagen | 38 |
| 2.2.2.3 | Sistema de Adquisición | 38 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.2.4 | Aplicación de Procesado:..... | 38 |
| 2.2.3 | Operaciones en el procesamiento de imágenes | 39 |
| 2.2.3.1 | Operaciones básicas entre píxeles..... | 39 |
| 2.2.3.2 | Filtrado..... | 42 |
| 2.2.4 | Operaciones de filtrado en Matlab | 48 |
| 2.2.4.1 | Filtro en el dominio espacial..... | 50 |
| 2.2.4.2 | Filtro de Umbralización | 55 |
| 2.3 | Servomecanismos | 55 |
| 2.3.1 | Servomecanismos Neumáticos..... | 56 |
| 2.3.2 | Servomecanismos Hidráulicos | 56 |
| 2.3.3 | Servomecanismo Electromecánicos..... | 56 |
| 2.4 | Servomotor | 57 |
| 2.4.1 | Composición del servo..... | 58 |
| 2.4.2 | Funcionamiento del servomotor y control pwm | 59 |
| 2.4.3 | Modelamiento de un servomotor corriente continua controlado por armadura | 60 |

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Enfoque de Investigación..... | 62 |
| 3.2 | Alcance de la Investigación. | 62 |
| 3.3 | Tipo y Diseño de Investigación. | 63 |
| 3.4 | Planteamiento del esquema del medio de operación del sistema..... | 63 |
| 3.5 | Esquema General del Sistema Requerido a Implementar | 67 |
| 3.5.1 | Medio indicador – semáforo | 67 |
| 3.5.2 | Sensor de visión artificial – cámara. | 68 |
| 3.5.3 | Procesador de imagen – Matlab. | 68 |
| 3.5.4 | Arduino1 – Dedicado para comunicación con Matlab..... | 69 |
| 3.5.5 | Arduino 2 – Dedicado y embebido para implementar el controlador del sistema | 69 |
| 3.5.6 | Servo motor..... | 70 |
| 3.5.7 | Sensor de posicionamiento angular – potenciómetro..... | 70 |
| 3.5.8 | Mecanismo para el desplazamiento angular de la cámara | 70 |
| 3.6 | Procesamiento de imagen en Matlab | 71 |
| 3.6.1 | Comunicación Matlab -Arduino | 73 |
| 3.6.2 | Comunicación Cámara web-Matlab..... | 75 |
| 3.6.3 | Selección del filtro de visión artificial | 75 |

| | | |
|--------------|---|----|
| 3.6.4 | Almacenamiento de imágenes de vehículos detentados por infracción | 78 |
| 3.7 | Modelo de la planta del sistema..... | 78 |
| 3.8 | Diseño e implementación del controlador del sistema | 88 |
| 3.8.1 | Ecuaciones de estado para la implementación del controlador del sistema | 90 |
| 3.8.2 | Ganancia de error de posición..... | 93 |
| 3.8.3 | Ecuaciones de estado del controlador Proporcional..... | 94 |
| 3.8.4 | Ecuaciones de estado del controlador Integral | 94 |
| 3.8.5 | Control Integral con un filtro del controlador | 95 |
| 3.8.6 | Implementación de circuitos y comunicación entre Arduinos. | 97 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

| | | |
|---------------|--|-----|
| 4.1 | Análisis de resultados del sistema de control. | 100 |
| 4.1.1 | Resultado del proceso de identificación de la señal de salida en lazo abierto del servo mecanismo. | 101 |
| 4.1.2 | Resultado del proceso de modelado de la planta del sistema en Simulink. | 101 |
| 4.1.3 | Resultado del proceso de obtención de señal del bit testigo en el osciloscopio, valido para la implantación del controlador. | 102 |
| 4.1.4 | Resultado del proceso de comparación de curvas con y sin controlador. | 102 |
| 4.1.5 | Obtención de la señal de salida del servo mecanismo aplicando el controlador en lazo cerrado y variando parámetros K_p , K_i | 104 |
| 4.1.6 | Análisis del comportamiento del controlador en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un controlador rápido con n muestras en 24 horas. | 106 |
| 4.1.7 | Análisis del comportamiento del controlador en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un controlador lento con n muestras en 24 horas. | 115 |
| 4.2 | Análisis de resultados de visión artificial. | 121 |
| 4.2.8 | Proceso de obtención de imágenes en función del algoritmo de visión artificial. | 122 |
| 4.2.9 | Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador rápido, con n muestras en 24 horas..... | 129 |
| 4.2.10 | Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador lento, con n muestras en 24 horas..... | 142 |
| | CONCLUSIONES | 152 |
| | RECOMENDACIONES | 155 |
| | BIBLIOGRAFIA | 156 |
| | ANEXOS | 159 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1-2: Resumen de variables para sistemas físicos | 8 |
| Tabla 2-2: Métodos y opresiones a utilizar en filtros para realce de imágenes | 43 |
| Tabla 3-2: Métodos y opresiones a utilizar en filtros para restauración de imágenes..... | 43 |
| Tabla 4-2: Métodos y opresiones a utilizar en filtros para restauración de imágenes..... | 51 |
| Tabla 5-2: Funciones de filtros para aplicar en Matlab..... | 54 |
| Tabla 1-3: Lectura de grados en el recorrido del servo mecanismo de 0 a 20° con 40 muestra | 79 |
| Tabla 2-3: Lectura del sensor de realimentación en posición y sus equivalencias | 89 |
| Tabla 1-4: Valores para un controlador rápido | 104 |
| Tabla 2-4: Valores para un controlador lento | 104 |
| Tabla 3-4: Información sobre periodos de estudio en la comprobación del controlador | 106 |
| Tabla 4-4: Condiciones de prueba para un controlador | 108 |
| Tabla 4-5: Evaluación de la prueba de un controlador | 108 |
| Tabla 4-6: Condiciones de prueba para un controlador rápido durante la tarde. | 111 |
| Tabla 4-7: Evaluación de la prueba de un controlador rápido durante la tarde..... | 111 |
| Tabla 8-4: Condiciones de prueba para un controlador | 114 |
| Tabla 9-4: Evaluación de la prueba de un controlador | 114 |
| Tabla 4-10: Condiciones de prueba para un controlador | 116 |
| Tabla 11-4: Evaluación de la prueba de un controlador | 116 |
| Tabla 4-12: Condiciones de prueba para un controlador | 118 |
| Tabla 13-4: Evaluación de la prueba de un controlador | 118 |
| Tabla 4-14: Condiciones de prueba para un controlador | 119 |
| Tabla 15-4: Evaluación de la prueba de un controlador | 120 |
| Tabla 16-4: Información sobre periodos de estudio en la identificación de vehículos. | 129 |
| Tabla 4-17: Condiciones de prueba para captura de vehículos en el día | 131 |
| Tabla 18-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en el día | 132 |
| Tabla 4-19: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la tarde | 136 |
| Tabla 4-20: Evaluación del sistema de identificación de vehículos..... | 136 |
| Tabla 21-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la noche..... | 140 |
| Tabla 4-22: Evaluación del sistema de identificación de vehículos..... | 140 |
| Tabla 23-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en el día | 143 |
| Tabla 24-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en el día | 143 |
| Tabla 25-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la tarde | 146 |
| Tabla 26-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la..... | 146 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Tabla 27-4: | Condiciones de prueba para captura de vehículos en la noche..... | 148 |
| Tabla 28-4: | Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la..... | 149 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1-2: Sistema de control de lazo abierto | 7 |
| Figura 2-2: Sistema de control de lazo cerrado | 7 |
| Figura 3-2: Sistema de lazo abierto en función del dominio de la frecuencia..... | 11 |
| Figura 4-2: Sistema de lazo cerrado en función del dominio de la frecuencia | 12 |
| Figura 5-2: Representación de polos y ceros en los planos | 15 |
| Figura 6-2: Respuestas generada por un sistema de segundo orden..... | 16 |
| Figura 7-2: Diferentes respuestas generadas por un sistema de segundo orden..... | 17 |
| Figura 8-2: Identificación de estabilidad por ubicación de la respuesta de un sistema | 18 |
| Figura 9-2: Señal continua | 19 |
| Figura 10-2: Señal discreta..... | 19 |
| Figura 11-2: Bloque muestreador de un sistema de control digital | 20 |
| Figura 12-2: Bloqueador de un sistema de control digital..... | 21 |
| Figura 13-2: Bloques de convertidores AD/ DA | 21 |
| Figura 2-14: Funcionamiento de un muestreador ideal | 23 |
| Figura 2-15: Respuesta de un muestreador con T_0 de periodo de muestreo | 23 |
| Figura 16-2: Bloqueador de orden cero | 24 |
| Figura 17-2: Bloques de Muestreador con Bloqueador | 24 |
| Figura 18-2: Sistema de discretización de una señal continua | 25 |
| Figura 19-2: Relación de un sistema discreto en función de la frecuencia..... | 26 |
| Figura 20-2: El arreglo de Jury para sistemas discretos | 27 |
| Figura 21-2: Sistema clásico de control lazo cerrado | 27 |
| Figura 22-2: Área bajo la integral Método de Euler I..... | 29 |
| Figura 23-2: Área bajo la integral Método de Euler II | 29 |
| Figura 24-2: Área bajo la integral Método de Trapezoidal (Tustin)..... | 31 |
| Figura 25-2: Diagrama de bloques del proceso de la visión artificial | 33 |
| Figura 26-2: Diagrama de bloques del proceso de la visión artificial | 33 |
| Figura 27-2: Adquisición de una imagen por cámara de 180°..... | 34 |
| Figura 28-2: Proceso para binarizar una imagen | 35 |
| Figura 29-2: Extracción de caracteres de una imagen | 36 |
| Figura 30-2: Segmentación de una imagen..... | 36 |
| Figura 31-2: Elementos de un sistema de visión artificial..... | 37 |
| Figura 32-2: Ejemplos de operaciones aritméticas y lógicas entre pixeles..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 33-2: Ejemplos de rotación. (a) Imagen original que se desea rotar en torno al punto P de coordenadas (x,y); (b) resultado de la primera traslación; (c) resultado del giro; (d) resultado final después de la última traslación. | 42 |
| Figura 34-2: Aplicación de un filtrado espacial de suavizado. | 46 |
| Figura 35-2: Filtrado de Sobel en la dirección de x en un valor absoluto | 47 |
| Figura 36-2: Filtrado de la Laplaciano | 48 |
| Figura 37-2: Letra G escaneada sin ruido y con ruido..... | 49 |
| Figura 38-2: Ejecución de una operación sobre vecindades..... | 51 |
| Figura 39-2: Proceso de operación en el filtrado de media | 54 |
| Figura 40-2: Esquema básico de un servomecanismo | 55 |
| Figura 41-2: Servomecanismo Neumático..... | 56 |
| Figura 42-2: Servomecanismo Hidráulico..... | 56 |
| Figura 43-2: Servomecanismo Electromecánico | 57 |
| Figura 44-2: Servomotor..... | 58 |
| Figura 45-2: Servomotor ideal con sus partes..... | 58 |
| Figura 46-2: Rango del PWM a recorrer para operación del servo | 59 |
| Figura 47-2: Tren de pulsos para el control de un servomotor | 60 |
| Figura 48-2: Servomotor corriente continua controlado por armadura | 61 |
| Figura 49-2: Diagrama del servomotor cc controlado por armadura..... | 61 |
| Figura 1-3: Semáforos con soporte del tipo poste | 64 |
| Figura 2-3: Modelo de ubicación de estudio en la vía del poste y cámara de visión..... | 65 |
| Figura 3-3: Vista frontal distancias y variables del medio de ubicación del sistema a..... | 65 |
| Figura 4-3: Vista superior de la ubicación de postes de semáforo y cámara de visión..... | 66 |
| Figura 5-3: Esquema general del sistema implementado. | 67 |
| Figura 6-3: Diagrama de flujo de proceso de visión artificial | 73 |
| Figura 7-3: Gráfica de Grados vs muestras del recorrido del servo mecanismo de 0 a 20° .. | 79 |
| Figura 8-3: Análisis del comportamiento de la respuesta del servo mecanismo | 80 |
| Figura 9-3: Diagrama de bloques estructura ARX. | 81 |
| Figura 10-3: Diagrama de bloques estructura ARX. | 82 |
| Figura 11-3: Diagrama de bloque de la estructura ARX donde $E(z)=0$ | 82 |
| Figura 12-3: Modelo de un diagrama de bloques del comportamiento lineal del sistema..... | 86 |
| Figura 13-3: Modelo para la obtención de la máxima razón de cambio para Y | 87 |
| Figura 14-3: Diagrama de bloques en consideración de no linealidad y la lineal del sistema. | 87 |
| Figura 15-3: Comportamiento del sistema obtenida analíticamente..... | 87 |
| Figura 16-3: Sistema de control propia del servo-motor | 88 |
| Figura 17-3: Comparación entre regulación y control. | 88 |
| Figura 18-3: Tiempo de establecimiento sistema lazo abierto..... | 90 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura 19-3: | Esquema general maestro esclavo del sistema..... | 90 |
| Figura 20-3: | Esquema del sistema de control general P.I del sistema..... | 91 |
| Figura 21-3: | Esquema de sistema de control discreteado..... | 91 |
| Figura 22-3: | Bit testigo o Tiempo testigo (T_testigo) | 92 |
| Figura 23-3: | Sistema de control para una lectura del proceso en grados..... | 92 |
| Figura 24-3: | Estructura de control realimentado básica con error de posición E(s)..... | 93 |
| Figura 25-3: | Estructura del sistema de control incorporado un filtro exponencial..... | 96 |
| Figura 26-3: | Estructura del sistema de control y planta. | 98 |
| Figura 27-3: | Esquema de conexión electrónica. | 98 |
| Figura 28-3: | Diagrama unifilar del circuito del sistema. | 99 |
| Figura 1-4: | Señal de salida del sistema en lazo abierto excitada directamente por Matlab. | 101 |
| Figura 2-4: | Modelado de la planta en lazo abierto del servo mecanismo en Matlab..... | 102 |
| Figura 3-4: | Señal de salida en lazo abierto del servo mecanismo modelado en Matlab..... | 102 |
| Figura 4-4: | Lectura del bit testigo por medio del osciloscopio. | 102 |
| Figura 4-5: | Comparación de la respuesta de posicionamiento del sistema con y sin controlador expuesto a una perturbación..... | 103 |
| Figura 6-4: | Señal de lectura posicionamiento, servo mecanismo con un control rápido..... | 105 |
| Figura 4-7: | Señal lectura posicionamiento, servo mecanismo con un control lento..... | 105 |
| Figura 8-4: | Señal de lectura de posicionamiento control rápido a) vs control lento b) | 105 |
| Figura 9-4: | Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo día..... | 109 |
| Figura 10-4: | Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo tarde. | 112 |
| Figura 11-4: | Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo noche..... | 115 |
| Figura 12-4: | Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo dia..... | 117 |
| Figura 4-13: | Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo tarde..... | 119 |
| Figura 14-4: | Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo noche | 121 |
| Figura 15-4: | Fotografía prueba algoritmo de visión artificial tres colores | 123 |
| Figura 16-4: | Lectura imagen a procesar en Matlab. | 123 |
| Figura 17-4: | Imagen a color procesada filtrada en Matlab..... | 124 |
| Figura 18-4: | Imagen de detención del plano bidimensional rojo en Matlab. | 125 |
| Figura 19-4: | Imagen a escala de grises de la imagen a procesar. | 125 |
| Figura 20-4: | Imagen de detención del color rojo por diferencia en Matlab..... | 126 |
| Figura 21-4: | Imagen de detención del color rojo por diferencia aplicado un filtro en Matlab. | 126 |
| Figura 22-4: | Proceso de Umbralización imagen escala de grises con identificación en Matlab. | 127 |
| Figura 23-4: | Proceso de eliminación de pixeles pequeños en Matlab. | 128 |
| Figura 24-4: | Imagen final de detención de color rojo del semáforo en Matlab..... | 129 |

| | |
|---|-----|
| Figura 25-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de | 133 |
| Figura 26-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de | 137 |
| Figura 27-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo..... | 141 |
| Figura 28-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención | 144 |
| Figura 29-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo..... | 147 |
| Figura 30-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en la noche con un control lento | 150 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Gráfico 1-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante el día | 109 |
| Gráfico 2-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante la tarde. | 111 |
| Gráfico 3-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante la noche..... | 114 |
| Gráfico 4-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante el día..... | 117 |
| Gráfico 5-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante la tarde..... | 118 |
| Gráfico 6-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante la noche | 120 |
| Gráfico 7-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante el día, | 134 |
| Gráfico 8-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la tarde, con un control rápido | 138 |
| Gráfico 4-9: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la noche, con un control rápido | 142 |
| Gráfico 10-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante el día, con un control lento | 145 |
| Gráfico 11-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la tarde, con un control lento. | 148 |
| Gráfico 12-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la noche, con un control lento. | 151 |

INDICE DE ECUACIONES

| | |
|----------------------------|----|
| Ecuación 1-2 | 9 |
| Ecuación 2-2 | 10 |
| Ecuación 3-2 | 10 |
| Ecuación 4-2 | 10 |
| Ecuación 5-2 | 10 |
| Ecuación 6-2 | 10 |
| Ecuación 7-2 | 10 |
| Ecuación 8-2 | 10 |
| Ecuación 9-2 | 11 |
| Ecuación 10-2 | 12 |
| Ecuación 11-2 | 13 |
| Ecuación 12-2 | 13 |
| Ecuación 13-2 | 13 |
| Ecuación 14-2 | 14 |
| Ecuación 15-2 | 14 |
| Ecuación 16-2 | 15 |
| Ecuación 17-2 | 15 |
| Ecuación 18-2 | 16 |
| Ecuación 19-2 | 16 |
| Ecuación 20-2 | 16 |
| Ecuación 21-2 | 16 |
| Ecuación 22-2 | 16 |
| Ecuación 23-2 | 16 |
| Ecuación 24-2 | 16 |
| Ecuación 25-2 | 16 |
| Ecuación 26-2 | 16 |
| Ecuación 27-2 | 16 |
| Ecuación 28-2 | 18 |
| Ecuación 29-2 | 18 |
| Ecuación 30-2 | 19 |
| Ecuación 31-2 | 21 |
| Ecuación 32-2 | 23 |
| Ecuación 33-2 | 23 |

| | |
|----------------------------|----|
| Ecuación 34-2 | 23 |
| Ecuación 35-2 | 24 |
| Ecuación 36-2 | 25 |
| Ecuación 37-2 | 25 |
| Ecuación 38-2 | 25 |
| Ecuación 39-2 | 27 |
| Ecuación 40-2 | 28 |
| Ecuación 41-2 | 29 |
| Ecuación 42-2 | 30 |
| Ecuación 43-2 | 30 |
| Ecuación 44-2 | 31 |
| Ecuación 45-2 | 31 |
| Ecuación 46-2 | 32 |
| Ecuación 47-2 | 32 |
| Ecuación 48-2 | 39 |
| Ecuación 49-2 | 41 |
| Ecuación 50-2 | 41 |
| Ecuación 51-2 | 41 |
| Ecuación 52-2 | 46 |
| Ecuación 53-2 | 47 |
| Ecuación 1-3 | 66 |
| Ecuación 2-3 | 80 |
| Ecuación 3-3 | 81 |
| Ecuación 4-3 | 81 |
| Ecuación 5-3 | 82 |
| Ecuación 6-3 | 83 |
| Ecuación 7-3 | 83 |
| Ecuación 8-3 | 84 |
| Ecuación 9-3 | 85 |
| Ecuación 10-3 | 85 |
| Ecuación 11-3 | 85 |
| Ecuación 12-3 | 86 |
| Ecuación 13-3 | 86 |
| Ecuación 14-3 | 88 |
| Ecuación 15-3 | 89 |
| Ecuación 16-3 | 91 |
| Ecuación 17-3 | 92 |

| | |
|----------------------------|-----|
| Ecuación 18-3 | 93 |
| Ecuación 19-3 | 93 |
| Ecuación 20-3 | 93 |
| Ecuación 21-3 | 94 |
| Ecuación 22-3 | 94 |
| Ecuación 1-4 | 107 |
| Ecuación 2-4 | 107 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | | |
|-----------------|-------|-----|
| Anexo 1: | | 159 |
| Anexo 2: | | 160 |

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de control para el posicionamiento del servomecanismo de una cámara de identificación de vehículos infractores por semáforo mediante reconocimiento de imágenes utilizando visión artificial en la ciudad de Riobamba, y comprobar la hipótesis que se planteó. El tipo de investigación es experimental siendo la más indicada para relaciones de causa-efecto, la investigación se realizó en dos fases: sistemas de control y visión artificial. La fase de sistemas de control se realizó un estudio para determinar la dinámica de la planta expresada en una función de transferencia, empleando la identificación ARX (auto-regresivo con entrada exógena) para identificación del comportamiento lineal, posterior se desarrolló un controlador P.I el cual se adaptó al sistema para su control, se realizó un diseño para un control lento con valores de $K_p = 0.1$ y $K_i = 0.3$ y $N = 0.8$, y para un control rápido con valores de K_p (ganancia proporcional) = 1 y $K_i = 0$ y $N = 1E-9$. En la segunda fase se desarrolló en Matlab un algoritmo para el procesamiento de imágenes cuyo objetivo fue identificar el color rojo del semáforo empleando filtros, esta señal de detención excitó al controlador del servo mecanismo para que se mueva según el set point. Las pruebas y resultados del controlador se las realizo en tres periodos: día, tarde, noche en cada uno se aplicó un control rápido y un lento, mediante un tamaño de muestras aleatorio simple el cual mostró una efectividad del 100% en el periodo día y tarde tanto con un control rápido y lento, para la prueba con un controlador rápido en el periodo noche con una muestra de 392 se tuvo un porcentaje de ejecución con fallas del 1% y de ejecuciones acertadas del 99%, para la prueba del controlador lento en el periodo noche con una muestra de 392 se tuvo el mismo porcentaje de ejecuciones fallidas y acertadas que el mostrado con el controlador rápido. Como conclusión se puede utilizar la visión artificial para el proceso de posicionamiento de un servo mecanismo de una cámara web capaz de reaccionar a la activación de la luz roja del semáforo para identificar un vehículo infractor utilizando una sola cámara de visión y procesamiento de imágenes por computadora. Se recomienda utilizar un sensor de desplazamiento angular calibrado y adaptado al mecanismo para una lectura correcta del error de posicionamiento.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <VISIÓNARTIFICIAL>, <SISTEMAS DE CONTROL >, <DETENCIÓN DE VEHÍCULOS POR SEMÁFORO ROJO>, <INGENIERÍA ELECTRÓNICA>, <CONTROLADOR>, <RIOBAMBA (CANTÓN)>

SUMMARY

The present work aimed at developing a control system for the servo device positioning of a webcam detecting red light violations with image recognition using artificial vision in the city of Riobamba and verifying the hypothesis. The investigation was experimental due to the cause-effect relationship. This investigation consisted of two phases: control systems and artificial vision. In the control system phase, a study was carried out to determine the dynamics of the plant system phase in a transfer function using ARX (autoregressive with exogenous input) to identify the linear behavior. Then a proportional integral (PI) controller was developed adapting to the system for its control. A design was done for a slow control with values of K_p (proportional gain) = 0.1, K_i = 0.3 and N = 0.8 and for a fast control with values of K_p = 1, K_i = 0 and N = $1E-9$. In the second phase, an algorithm was developed in Matlab to process images aiming at identifying the red light using filters. This stop sign made the servo device controller move according to set point. The controller test and results were carried out during day, afternoon and evening using a fast and slow control for each one. Using the simple random samples showed an efficiency of 100% during day and afternoon with a fast and slow control. For the fast controller test during evening with a sample of 392, failures of 1% and success of 99% were gotten. For the slow controller test during evening with a sample of 392, the same failures and successes were gotten. It is concluded that artificial vision may be used for the servo device position of a webcam capable of reacting to the red light activation to identify violations using a vision camera and processing images on computer. It is recommended to use a sensor of angular displacement calibrated and adapted to the device to read the positioning error appropriately.

KEY WORDS: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCE>, <ARTIFICIAL VISION>, <CONTROL SYSTEMS>, <RED-LIGHT VIOLATION VEHICLE DETAINMENT>, <ELECTRONICS ENGINEERING>, <CONTROLLER>, <RIOBAMBA (CANTON)>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

La automatización nace por la necesidad de auto ayudarse el hombre en su trabajo diario, donde engranes y piñones mecánicos ayudaron a las primeras máquinas industriales hacer automatizadas, posterior la electricidad y la electrónica ayudaron a que la automatización sea más exacta en labores específicas y detalladas de las máquinas. Posterior a esto el hombre busca tener control sobre los sistemas automatizados donde los estudios de varias asignaturas complementan la ingeniería de los sistemas de control automático.

El realizar una ingeniería de control de un sistema es realmente entender comprender la dinámica misma del sistema a controlar siendo esta el pilar fundamental para desencadenar un sin número de formulación y propiedades lógicas que lleven a la solución.

Hoy en día los estudios de sistemas de control en robots, drones, biotecnología y aviones han sido los actuales estudios de mayor enfoque en la actualidad ayudando siempre hacerle más fácil a la vida al hombre.

La investigación que se presenta en este documento hace relación a una problemática de la sociedad que puede desencadenar incidente y accidentes, esto es infracción que se comete a menudo en la vía de cualquier ciudad cuando un vehículo infringe la luz roja de un semáforo, llegando esta acción a causar varios problemas desde una multa económica hasta la muerte de peatones y conductores de vehículos. Uno de los mayores antecedentes por los cuales los conductores invaden la luz roja es por estar en estado etílico, disminuyendo su capacidad de cobertura visual del conductor.

Aplicando el estudio de la ingeniería de sistemas de control y la de visión por computadora se presenta el estudio del desarrollo de un sistema de control de un servo mecanismo de una cámara de control de invasión de semáforo utilizando visión artificial, cuyo objetivo final será verificar si realmente se puede realizar un control a este tipo de sistemas utilizando visión artificial y con una sola cámara de video.

1.1 Situación Problemática

La gran demanda de hoy en día de vehículos circulando por las calles ha generado diversos inconvenientes como estrés, contaminación, choques entre vehículos, y hasta en el peor de los casos accidentes dejando como víctimas a peatones inocentes.

Una de las principales causas de accidentes de tránsito en el Ecuador se debe a fallas humanas, según estudio. En 2013 fallecieron casi 2.000 personas y se registraron 173.047 accidentes de tránsito en Ecuador, el 97% por fallas humanas, de acuerdo a un informe estadístico de la Federación Internacional del Automóvil (FIA). (<http://www.andes.info.ec/es/noticias/mayoria-accidentes-transito-ecuador-debe-fallas-humanas-segun-estudio.html>)

Entre los factores que contribuyen a los accidentes en Ecuador están: impericia, imprudencia, embriaguez, mal rebasamiento, invadir carril, irrespeto a luz roja, mal estacionamiento, no respetar señales, embriaguez e imprudencia del peatón esto genera un 97%. En un porcentaje ínfimo (2%) las causas están relacionadas con mal estado de la vía, factores climáticos, fallas de iluminación y obstáculos en la vía. Un 1% de los accidentes se debe a daños mecánicos y frenos.

Con el fin de reducir los accidentes de tránsito mediante multas a los infractores las autoridades de turno con la ayuda de la tecnología de cámaras de seguridad han logrado instalar en las vías del país cámaras que captan a infractores de tránsito ya sea por exceso de velocidad, por invadir carriles.

En la actualidad hay sistemas de multas que captan en video vehículos por una posible infracción que pueden también captar infractores que se pasan la luz roja del semáforo, pero dicho sistema no es dedicado únicamente para controlar a vehículos que invaden la luz roja del semáforo.

El no tener un sistema dedicado exclusivamente para control de vehículos infractores por invadir o pasarse la luz roja ha lleva a tener datos como imágenes borrosas, imágenes inconsistentes y que muchas veces estas pueden ser un causal importante para ayudar o perjudicar a un chofer de un vehículo.

La multa por violación de luz roja equivale al treinta por ciento de la remuneración básica unificada del trabajador en general y la reducción de 6 puntos en su licencia de conducir, esto

según contravención de tránsito de cuarta clase Art 389 del CODIGO ORGANICO INTEGRAL PENAL, COIP.

1.2 Formulación del Problema

¿Se puede implementar un sistema de control automático con visión artificial capaz de reaccionar a la activación de la luz roja del semáforo para identificar un vehículo infractor con la utilización de una sola cámara de visión y procesamiento de imágenes por computadora?

1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación

- ¿Cuál es la mejor ubicación de una cámara de visión artificial para capturar tanto imágenes del color actual de un semáforo como también de la placa de un automóvil en movimiento ubicado en un tiempo determinado por detrás del semáforo, en un medio a la intemperie de forma real?
- ¿Cuáles serán las características de una cámara de visión artificial, que en fusión a la localización me permita obtener imágenes claras y estables para poder operar el procesamiento de dichas imágenes?
- ¿Se deberá implementar algoritmos de filtrado de imágenes para poder mejorar la calidad de las mismas, en estados donde: el tiempo, clima modifique el medio de visión de la cámara?
- ¿Cuáles deberán ser las características del servomecanismo que pueda realizar el desplazamiento del ángulo de posicionamiento de la cámara de visión artificial, con un desplazamiento rápido y estable sin vibración?
- ¿Qué tipo de sistema de control se adaptará para controlar de mejor manera el ángulo de posicionamiento del servomecanismo de la cámara de detención de vehículos?

1.4 Justificación de la Investigación

En la actualidad los sistemas de control han tenido un crecimiento en función a nuevas tecnologías de desarrollo con lo cual se ha dado apertura a muchas investigaciones en las cuales su objetivo es la de facilitar la vida al ser humano, dichas investigaciones se han basado en la manipulación de nuevas variables de control, unas de ellas son las imágenes procesadas que

luego de ser llevadas a una forma digitalizada y posterior a una sistema binaria ya puede ser tratar dicha imagen y según condiciones de trabajo ejecutar una acción, el tratamiento de las imágenes han llevado a desarrolladores a crear algoritmos de procesamiento de imágenes los cuales en la mayoría de casos dichos algoritmos solo han quedado en forma de prototipo sin ser implementados bajo condiciones de campo en ambientes hostiles con factores externos que puedan modificarlos.

El objetivo central del proyecto de investigación es poder desarrollar un sistema de control para el posicionamiento de una cámara utilizando la visión artificial como accionamiento, utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes o también poner en práctica algoritmos ya existentes y acoplarlos a un sistema de control de seguridad de infracciones vehiculares y así poderlos poner a prueba bajo condiciones naturales de la intemperie de la calle.

El sistema de control de visión artificial acorde a las características de implementación podrá ayudar al Servicio Integrado de Seguridad ECU 911, como también a la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) ya que ninguna de estas dos instituciones no maneja este tipo de tecnología bajo la problemática que pretendemos dar solución con nuestra investigación.

En la actualidad ninguna de estas dos entidades antes mencionadas maneja el procesamiento de imágenes por computadora, si bien el sistema de foto multas existentes toma una foto digital dependiendo de la velocidad del automotor y la almacena, pero no la procesa para saber realmente las características del vehículo, con lo cual muchas veces ha llevado a tener una mala captura de imagen llegando hacer problemática para el usuario del vehículo.

Mediante esta investigación lo que se pretenderá es implementar un sistema de control de visión artificial para reconocer vehículos infractores por luz roja de semáforo, con la finalidad de adquirir información del vehículo que ha ocasionado tal infracción con imágenes de los caracteres de la placa del vehículo infractor, para posteriormente generar un reporte de todos los vehículos que no están cumpliendo con esta norma de tránsito. Este sistema va encaminado a reducir los accidentes que se presentan en la actualidad los cuales se generan por cometer este tipo de infracción, ayudando de esta manera a la ciudadanía y al país. contribuyendo con el eje de seguridad ciudadana de la matriz de tensiones y problemas del Plan Nacional del Buen Vivir.

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de control para el posicionamiento del servomecanismo de una cámara de identificación de vehículos infractores por semáforo mediante reconocimiento de imágenes utilizando visión artificial

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un algoritmo del proceso a automatizar, en función de la secuencia de colores del semáforo, tiempos de duración y distancias de invasión de vehículos infractores, para cumplir con los requerimientos de funcionamiento del sistema de control.
- Implementar un mecanismo para el control del ángulo de visión de la cámara, con el propósito de tener un mejor control sobre la adquisición de toma fotográfica.
- Desarrollar un algoritmo de programación para el procesamiento de imágenes y comunicación con el servomecanismo con la finalidad de poder realizar el control sobre el posicionamiento del ángulo de visión de la cámara utilizando Matlab y una tarjeta electrónica de adquisición.
- Implementar un sistema de control apropiado para el funcionamiento automático del posicionamiento de la cámara fotográfica considerando el medio donde se va a ejecutar el proceso.
- Validar el sistema realizando pruebas de laboratorio en torno a los posibles casos que se pueda dar en condiciones reales al sistema diseñado.

1.5.3 Hipótesis General

¿Se puede utilizar la visión artificial para el proceso de control de posicionamiento de un servomecanismo de una cámara para la identificación de un vehículo que ha infringido a la luz roja del semáforo utilizando una sola cámara de visión?

CAPÍTULO II

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 Sistemas de Control

Hoy en día hay muchos dispositivos eléctricos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos que están siendo controlados mediante sistemas de control ayudando a realizar ciertos procesos de manera eficiente y eficaz no solamente a la vida útil del dispositivo sino también del proceso que efectúa, para ello la ingeniería de los sistemas de control realiza un estudio a fondo del proceso y del dispositivo a controlar tomando pasos fundamentales para lograr un resultado final, en todo proceso a diseñar un controlador se deberá siempre localizar el controlar el actuador y el proceso.

Para poder atender el diseño y los resultados de la investigación se resaltan ciertas terminologías que ayudaran al entendimiento de este trabajo de titulación

2.1.1 *Definición de Sistemas de Control*

Un sistema de control es una interconexión de elementos que forman una configuración del sistema que proporcionara un resultado deseado. El pilar fundamental del análisis de un sistema basa en la teoría de los sistemas lineales que supone una relación causa y efecto.

Todo proceso a controlar tiene una causa y un efecto y el mismo se lo representa mediante un bloque con una o varias entradas y con una o varias salidas. El análisis parte del estudio del proceso.

Los sistemas de control pueden dividirse en dos tipos:

- Sistemas de control de lazo abierto
- Sistemas de control de lazo cerrado

2.1.2 *Sistemas de control de lazo abierto*

Un sistema de control de lazo abierto (SCLA) es aquel que utiliza un dispositivo de actuación para el proceso directamente sin utilizar una realimentación respecto a la entrada y salida del proceso como se muestra en la figura 1-2.

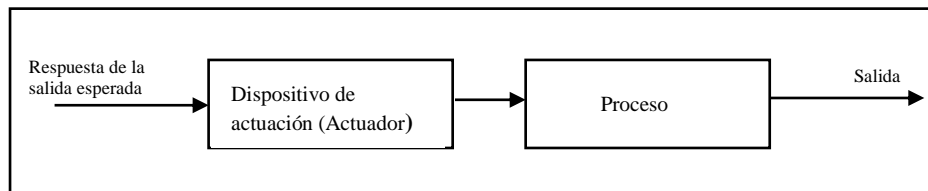


Figura 1-2: Sistema de control de lazo abierto

Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017

2.1.3 *Sistema de Control de Lazo Cerrado*

Un sistema de control de lazo cerrado utiliza una medida de la salida real, para compararla con la respuesta de la salida deseada. Dicha medida de salida se denomina señal de realimentación.

Entonces un sistema de control de lazo cerrado usa una medida de la salida y la realimentación de esta señal para compararla con la salida deseada. En la figura 2-2 se muestra un ejemplo de un sistema de control de lazo cerrado.

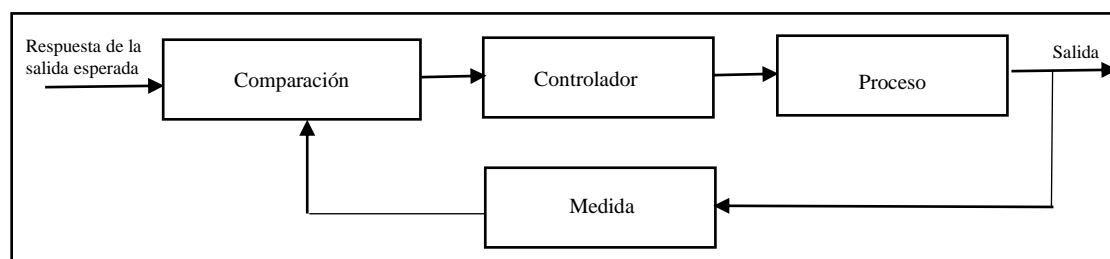


Figura 2-2: Sistema de control de lazo cerrado

Realizado por: NÚÑEZ, Christiam, 2017

2.1.4 *Modelos matemáticos de los sistemas*

Para el desarrollo de cualquier sistema de control parte el estudio del diseño en los modelos matemáticos cuantitativos, los mismos que se utilizan para diseñar y analizar sistemas de control. La conducta dinámica de cualquier proceso se describe generalmente mediante ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO).

Se toma en cuenta que la mayoría de sistemas físicos no son lineales para ello se deberá realizar una aproximación lineal que permita utilizar los métodos de análisis de la transformada de Laplace, entonces toda ecuación diferencial que represente la dinámica de cualquier sistema (eléctrico, mecánico, electrónico, hidráulico, neumático) y su vez pueda liberalizarse se puede utilizar la transformada de Laplace.

El tratamiento de los problemas de sistemas dinámicos puede establecerse siguiendo el siguiente orden (Dorf, R. C; Bishop, R. H, 2007, p.38).

1. Definir el sistema y sus componentes
2. Formular el modelo matemático y anular las suposiciones necesarias.
3. Escribir las ecuaciones diferenciales que describan el modelo
4. Resolver las ecuaciones para las variables de salida deseadas
5. Examinar las soluciones y las hipótesis
6. Si es necesario, volver a analizar o diseñar el sistema.

En la tabla 1-2 se muestra un breve resumen de variables para sistema físicos, mismas que se parte para la obtención de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Tabla 1-2: Resumen de variables para sistemas físicos

| SISTEMA | ELEMENTPO DE VARIABLE ACROSS | VARIABLE THROUGH INTGRADA | ELEMENTO DE VARIABLE ACROSS | VARIABLE ACROSS INTEGRADA |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|---|--|
| Eléctrica | Corroente ,i | Carga,q | Diferencia de voltaje v_{21} | Flujo magnetico λ_{21} |
| Mecánica Traslacional | Fuerza, F | Momento translacional,P | Diferencia de velocidad v_{21} | Diferencia de desplazamiento y_{21} |
| Mecánica Rotacional | Par,T | Momento angular,h | Diferencia de velocidad angular ω_{21} | Diferencia de desplazamiento angular θ_{21} |
| Fluido | Caudal volumetrico de fluido,Q | Volumen, V | Diferencia de preseion, P_{21} | Momento de presión γ_{21} |
| Térmico | Caudal de calor, q | Energía calorifica, H | Diferencia de temperatura T_{21} | |

Fuente: Dorf, R. C. Bishop, R. C. (2007). Sistemas de control moderno (10ma ed).
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017 .

2.1.5 Aproximación lineal de Sistemas físicos

En su gran mayoría los sistemas físicos son lineales dentro de algún rango de las variables. Sin embargo, todos los sistemas acaban siendo lineales si sus variables aumentan sin ningún límite.

Un sistema se define como lineal en términos de su excitación y respuesta. Ejemplo en el caso de los circuitos eléctricos, la excitación es la corriente de entrada $r(t)$ y la respuesta es el voltaje $v(t)$. En general, para un sistema lineal puede determinarse una condición necesaria en función de la excitación $x(t)$, proporcionada por la respuesta $y(t)$.

Cuando el sistema en reposo está sujeto a una excitación $x_1(t)$ proporciona una respuesta $y_1(t)$. Además, cuando el sistema está sometido a una excitación $x_2(t)$ proporciona una respuesta $y_2(t)$. Para que un sistema sea lineal, es necesario que la excitación $x_1(t) + x_2(t)$ dé como resultado una respuesta $y_1(t) + y_2(t)$ esto se conoce como principio de superposición.

Además, es necesario que un sistema lineal se conserve la magnitud del factor escala. Considérese otra vez un sistema con entrada x que da como resultado una salida y . Entonces es necesario que la respuesta de un sistema lineal a una entrada x multiplicada por una constante β sea igual a la respuesta de la entrada multiplicada por la misma constante, de forma que la salida sea igual a βy a esto se le denomina la propiedad de homogeneidad (Dorf, R. C; Bishop, R. H, 2007, p.43).

En función a lo anterior expuesto se dirá entonces que un sistema lineal satisface las propiedades de homogeneidad y de superposición.

Cuando se lleve a la aproximación lineal un sistema, se deberá tener en cuenta el rango de evaluación de la aproximación y el método adecuado para efectuar dicha aproximación. Uno de los métodos más utilizados para realizar la aproximación lineal es mediante la serie de Taylor como a continuación mostramos en la ecuación 1-2.

Ecuación 1-2

$$y = h(x) = h(x_0) + \left. \frac{dh}{dx} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)}{1!} + \left. \frac{d^2h}{dx^2} \right|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots$$

2.1.6 *La función de transferencia*

La función de transferencia de un sistema se define como la razón entre la transformada de Laplace de la señal de salida para la transformada de Laplace de la señal de entrada, tomando en consideración que todas las condiciones iniciales del sistema son igual a cero.

La relación que describe la dinámica del sistema se la puede expresar mediante la función de transferencia. Dado un circuito RC en serie del cual el voltaje de salida está en paralelo al

capacitor al aplicar leyes de voltajes de Kirchhoff (Lazos) se puede llegar a relacionar la señal de la salida con la señal de la entrada llevándolo del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Laplace.

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff en la primera malla de izquierda a derecha del circuito tenemos, asumiendo condiciones iniciales igual a 0.

$$-v_1 + R \cdot i + \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt = 0$$

Ecuación 2-2

Aplicando la transformada de Laplace y tomando factor común:

$$-V_1(s) + R \cdot I(s) + \frac{I(s)}{C \cdot s} = 0$$

Ecuación 3-2

Ecuación 4-2

$$I(s) \left(R + \frac{1}{Cs} \right) = V_1(s)$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff en la segunda malla del circuito RC tenemos, asumiendo condiciones iniciales igual a 0.

$$v_2 = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt$$

Ecuación 5-2

Aplicando la transformada de Laplace y tomando factor común:

$$I(s) = V_2(s) \cdot Cs$$

Ecuación 6-2

Finalmente reemplazamos la ecuación 6-2 en la ecuación 4-2 y operamos de tal manera:

$$V_2(s) \cdot C \cdot s \left(R + \frac{1}{Cs} \right) = V_1(s)$$

Ecuación 7-2

Ecuación 8-2

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{C \cdot s \cdot R + 1}$$

La ecuación 8-2 nos muestra la relación existente entre la transformada de Laplace de la señal de salida con la transformada de Laplace de la señal de entrada llamándolo a esta relación como la función de transferencia también se la conoce como la ganancia del sistema.

2.1.7 *Función de transferencia de un sistema de lazo abierto*

La función de transferencia de unos sistemas de lazo abierto queda determinada por la razón de la salida y la entrada de las señales expresadas en el dominio de la frecuencia, tomando como consideración las señales de entrada y salida de la ganancia total del sistema o proceso. A la ganancia total del proceso la nombraremos como $G(s)$, a la señal de entrada y a la señal de salida de la ganancia total del proceso se la representara como $R(s)$ y $Y(s)$ respectivamente como indica la figura 3-2.

Asumiendo que $G(s)$ puede ser cualquier polinomio o polinomios en fracción, tomando en consideración solo las fracciones parciales propias. Si $G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)}$ siendo $P(s)$ y $Q(s)$ polinomios, Se dice que una función racional es una fracción propia si el grado del polinomio $P(x)$ es menor que el grado del polinomio $Q(x)$.

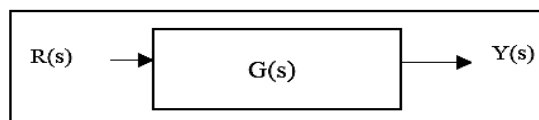


Figura 3-2: Sistema de lazo abierto en función del dominio de la frecuencia

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017

En función a la anterior figura podemos obtener la función de transferencia del sistema de lazo abierto:

Ecuación 9-2

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)}$$

2.1.8 *Función de transferencia de un sistema de lazo cerrado*

La función de transferencia de un sistema de control de lazo cerrado es de estudio particular e importante dentro del estudio de los sistemas de control, ya que el sistema como tal está en función de una medida de realimentación que a su vez puede ser positiva o negativa esta se la compara con la señal de entrada, tomando en consideración que la ganancia total del sistema

queda de igual manera determinada por la razón de la señal de salida con respecto a la señal de entrada en función del dominio de la frecuencia.

Para llegar a expresar la ganancia total del sistema en un solo bloque o procesos es necesario reducir aplicando la fórmula de realimentación como lo veremos en la ecuación 10-2.

Se dirá entonces que un sistema en lazo cerrado toma una medida de la señal de la salida y realiza una comparación con la salida deseada para generar una señal (E_a) de error que se aplica al actuador.

A diferencia de la obtención de la función de transferencia de un sistema de control de lazo abierto en este tipo de sistemas se tomará en cuenta dos ganancias, la primera ganancia conocida como ganancia directa que es la misma que se trata anteriormente en la función de transferencia de lazo abierto y la función de realimentación donde la llamamos $H(s)$ la misma puede ser cualquier polinomio o polinomios en fracción, tomando en consideración solo las fracciones parciales propias, en la figura 4-2 mostramos un sistema de realimentación negativa, y posterior la ecuación que determina la función de transferencia de un sistema de lazo realimentado o cerrado.

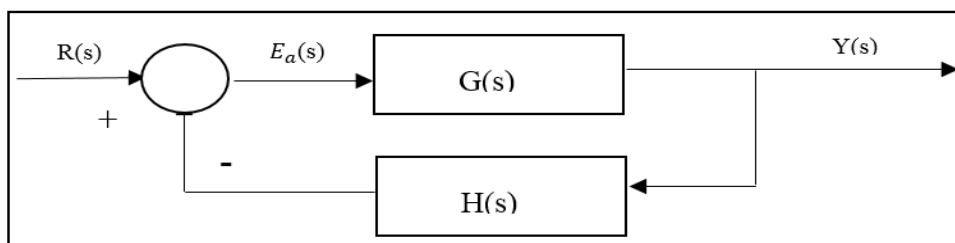


Figura 4-2: Sistema de lazo cerrado en función del dominio de la frecuencia
 Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017

Partiendo de la figura anterior podemos obtener la ecuación de la función de transferencia para sistemas de que son realimentados o de lazo cerrado esto será igual a obtener la ganancia total del sistema.

Ecuación 10-2

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G_T(s) = \frac{G(s)}{1 \pm G(s) \cdot H(s)}$$

El signo del denominador dependerá del tipo de realimentación del sistema siendo el signo opuesto a la realimentación del sistema.

2.1.9 Error en estado Estacionario ($E(s)$)

Es el error después de que la respuesta transitoria haya decaído permaneciendo únicamente la respuesta transitoria. Una de las causas fundamentales para utilizar la realimentación en los sistemas de control es la de mejorar la reducción del error en el estado estacionario del sistema.

Entonces la señal de actuación del sistema, que es una medida del error de éste, se representa por $E_o(s)$. Sin embargo, el error real del sistema es $E(s) = R(s) - Y(s)$.

Se describe la obtención del error en estado transitorio tanto en lazo abierto como en lazo cerrado:

2.1.9.1 Error en estado estacionario en lazo abierto $E_a(s)$

De acuerdo a la figura 3-2 se puede plantear que:

$$E_a(s) = R(s) - Y(s)$$

$$E_a(s) = R(s) - [R(s) \cdot G(s)]$$

Ecuación 11-2

$$E_a(s) = R(s) \cdot [1 - G(s)]$$

Aplicando el teorema del valor final

Ecuación 12-2

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E_a(s)$$

Remplazo la ecuación 11-2 en 12-2 aplicando una entrada tipo escalón unitario tenemos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot [R(s)[1 - G(s)]]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left[\frac{1}{s} [1 - G(s)] \right]$$

Aplicando el límite tenemos el error en estado transitorio para un sistema en lazo abierto

Ecuación 13-2

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = [1 - G(0)]$$

2.1.9.2 Error en estado estacionario en lazo cerrado $E(s)$

De acuerdo a la figura 4-2 y asumiendo una realimentación de $H(s)=1$ se puede plantear que:

$$E(s) = R(s) - H(s).Y(s)$$

$$E(s) = R(s) - [E(s).G(s)]$$

$$E(s) + E(s).G(s) = R(s)$$

Ecuación 14-2

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)}$$

Aplicando el teorema del valor final ecuación 12-2 tenemos y remplazando la ecuación 14-2, se asume una entrada tipo escalón unitario

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s.E(s)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s. \left[\frac{R(s)}{1 + G(s)} \right]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s. \left[\frac{1}{s} \cdot \left[\frac{1}{1 + G(s)} \right] \right]$$

Resolviendo el límite tenemos el error en estado transitorio para in sistema en lazo cerrado

Ecuación 15-2

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \left[\frac{1}{1+G(0)} \right]$$

2.1.10 Comportamiento de los sistemas de control de segundo orden

Para analizar un sistema de segundo orden se parte del criterio de polos y ceros de un sistema asumiendo una ganancia total $G(S) = \frac{P(s)}{Q(s)}$, tomando en consideración solo fracciones parciales propias, siendo $P(s)$ y $Q(s)$ polinomios. Se dice que los polos son todas las soluciones o raíces del polinomio $Q(s)$ y los ceros serán todas las soluciones o raíces del polinomio $P(s)$. Para representar a los polos y ceros se usa la siguiente nomenclatura: Polos (x), Ceros (0) como se muestra en la figura 4-2 asumiendo una función de transferencia $G(S) = \frac{s+3}{s^2+4}$, para el criterio

de estabilidad de los sistemas de control los polos son los ponderan dicha estabilidad como vera a continuación:

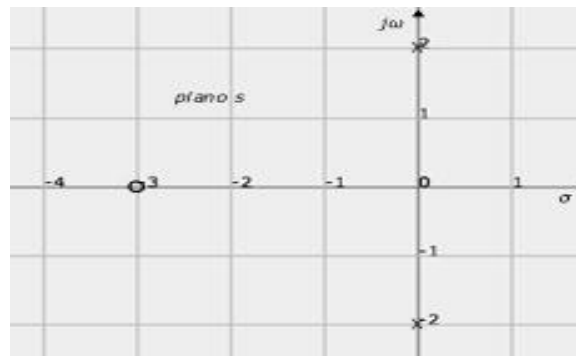


Figura 5-2: Representación de polos y ceros en los planos

Fuente: <https://0ptimo.wordpress.com/paginas/transformadas-de-laplace/capitulo-i/diagrama-de-polos-y-ceros/>

Para entender el criterio de estabilidad de los sistemas de segundo orden se parte el siguiente sistema realimentado como se muestra en la figura 4-2 asumiendo una entrada $R(s) = \mu(s)$ [escalón unitario], una ganancia directa $G(s) = \frac{k}{s(s+p)}$, y una ganancia de realimentación unitaria se obtiene el siguiente resultado de la función de transferencia del sistema:

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \cdot R(s)$$

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot 1} \cdot R(s)$$

$$Y(s) = \frac{\frac{k}{s(s+p)}}{1 + \frac{k}{s(s+p)}} \cdot R(s)$$

Ecuación 16-2

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k}{s^2 + sp + k}$$

Si a la ecuación 16-2 la comparamos con la forma estándar de un sistema de segundo orden ecuación 17-2 obtenemos los siguientes parámetros necesarios para el estudio de los sistemas de segundo orden.

Ecuación 17-2

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{wn^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot wn \cdot s + wn^2}$$

Donde wn^2 es la frecuencia natural no amortiguada y ζ es el factor de amortiguamiento, igualando la ecuación 16-2 con la 17-2.

k = Ganancia estática.

Ecuación 18-2

δ = Atenuación y está dada por: $\delta = \zeta \cdot \omega_n$

Ecuación 19-2

ω_d = Frecuencia de amortiguamiento: $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}$

Ecuación 20-2

o también por la ecuación: $\omega_d = \delta \cdot \text{tg}(\theta)$

Ecuación 21-2

θ = Angulo de incidencia: $\theta = \text{Cos}^{-1}(\zeta)$

Ecuación 22-2

o también por la ecuación: $\theta = \text{Tg}^{-1}\left(-\frac{\pi}{\ln(M_p)}\right)$

Ecuación 23-2

M_p = Sobre impulso Máximo o Sobre elongación $M_p = e^{-\frac{\zeta \cdot \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

Ecuación 24-2

o también por la ecuación $M_p = e^{-\frac{\pi}{\text{Tg}(\theta)}}$

Ecuación 25-2

t_{ss} = Tiempo de establecimiento $t_{ss} = \frac{\pi}{\delta}$

Ecuación 26-2

t_r = Tiempo de subida o crecimiento $t_r = \frac{\pi - \theta}{\omega_d}$

Ecuación 27-2

t_p = Tiempo pico $t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$

Las variables antes mencionada se las puede observar en la figura 6-2 , donde se representa la salida $c(t)$ versus tiempo, se verifica los parámetros de la respuesta temporal.

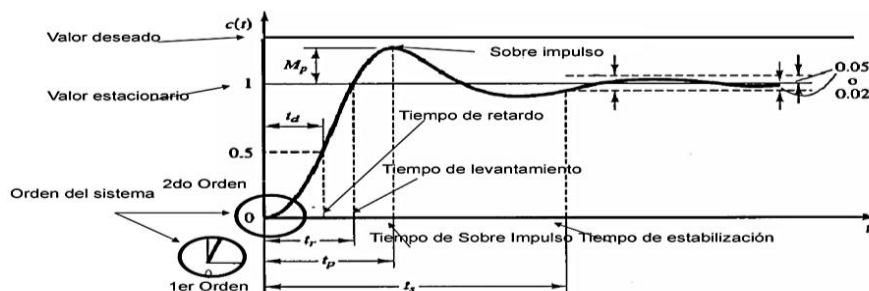


Figura 6-2: Respuestas generada por un sistema de segundo orden.

Fuente: <http://es.slideshare.net/camilorene/clase-1-especificaciones-de-desempeo-en-sistemas-de-control>

Excitándolo al sistema de segundo orden con una entrada tipo escalón unitario ($\mu(t)$) y variando el factor de amortiguamiento tenemos algunas respuestas como mostramos en la figura 7-2

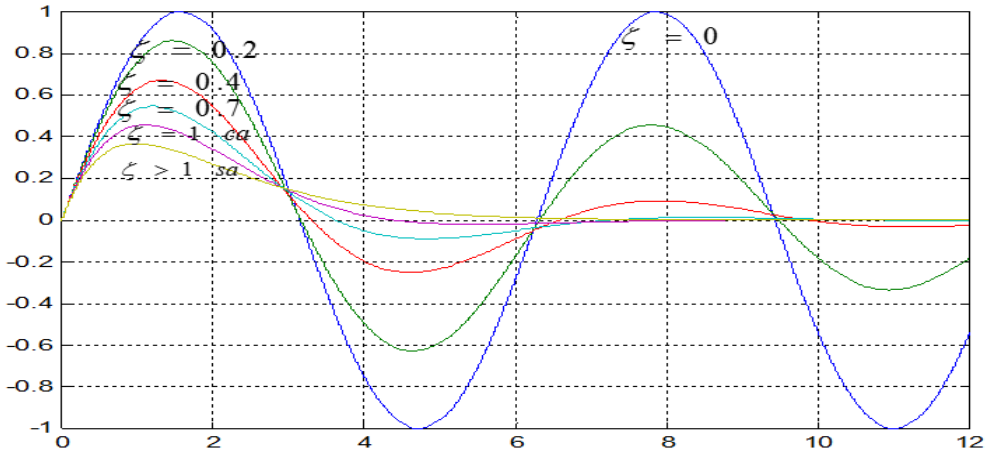


Figura 7-2: Diferentes respuestas generadas por un sistema de segundo orden
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017

Observando la figura 7-2 podemos clasificar los sistemas de segundo orden en:

- Sistema Sobre Amortiguado, cuando $\zeta > 1$
- Sistema Amortiguado, cuando $\zeta = 1$
- Sistema Sub Amortiguado, cuando $0 < \zeta < 1$
- Sistema Oscilante, cuando $\zeta = 0$
- Sistema Inestable, cuando $\zeta < 0$

2.1.11 Estabilidad de los sistemas de control lineales con realimentación continuos

Un sistema estable se define como aquel que tiene una respuesta limitada. Se dice que el sistema es estable si, estando sujeto a una entrada o perturbación limitada su respuesta es de magnitud limitada.

Un sistema estable es un sistema dinámico con una respuesta acotada para una entrada acotada (Dorf, R. C; Bishop, R. H, 2007, p.312). En la figura 8-2 se muestra la ubicación de la respuesta para un sistema con una señal salida con respecto al tiempo:

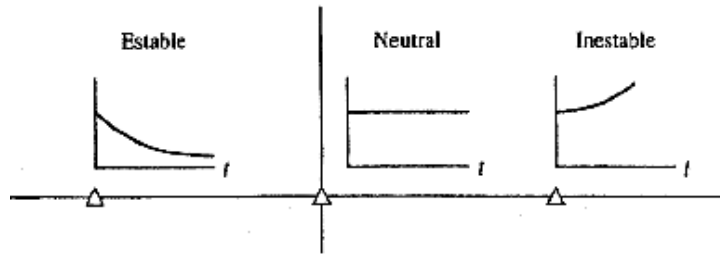


Figura 8-2: Identificación de estabilidad por ubicación de la respuesta de un sistema
Fuente: Dorf, R. C. Bishop, R. C. (2007). Sistemas de control moderno (10ma ed).

La localización de las raíces del polinomio del denominador de una función de transferencia (polos) en el plano s indica la respuesta transitoria resultante. La estabilidad se la puede observar mediante la ubicación de los polos en el plano s asumiendo el criterio que del 0 al $+\infty$ (Parte izquierda del plano s) entra en la porción de la inestabilidad y del 0 al $-\infty$ (Parte derecha del plano s) entra en la porción de la estabilidad.

2.1.11.1 Estabilidad bajo el criterio de Ruth and Hurwitz

El modelo de verificación de la estabilidad por Ruth and Hurwitz proporciona una respuesta al problema de la estabilidad, considerando la ecuación característica del sistema.

Ecuación 28-2

$$T(s) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i \cdot P_i}{\Delta(s)}$$

La representación de la ecuación 28-2 dada por la formulación de flujo gramas de Masson, es de interés para la estabilidad el determinante $\Delta(s)$ que está dado por un polinomio, mismo que al ordenar los coeficientes en forma descendente de tal manera como se muestra en la ecuación 2-29

El criterio de Ruth and Hurwitz se basa en el análisis de dicho polinomio ordenado, aplicando un arreglo en función de los coeficientes del polinomio.

Ecuación 29-2

$$\Delta(s) = q(s) = a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + a_{n-2} \cdot s^{n-2} + \dots + a_1 \cdot s + a_0$$

El anterior polinomio se lo lleva a un arreglo el mismo que se puede ver de la siguiente matriz, conociéndolo a este como el arreglo de Ruth and Hurwitz.

$$\begin{array}{cccc}
 s^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\
 s^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\
 s^{n-2} & b_{n-1} & b_{n-3} & b_{n-5} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \\
 s^0 & h_{n-1} & \cdot &
 \end{array}$$

El criterio de Ruth and Hurwitz basado en el arreglo 30-2 establece que es necesario y suficiente para la estabilidad de los sistemas lineales. El número de raíces de $q(s)$ con partes reales positivas es igual al número de cambios de signos de la primera columna del refiriéndose al arreglo 30-2. Para que un sistema lineal sea estable se requiere que no hay cambios de signo en la primera columna del arreglo.

2.1.12 Sistemas de control en tiempo discreto

Para comprender el estudio de los sistemas discretos se enuncia las definiciones de señales continuas y discretas, tomando en consideración que los enfoques o definiciones que se dieron anteriormente fueron con un análisis de señales continuas.

2.1.12.1 Tipos de señales

- Continua: Está definida sobre un intervalo continuo de tiempo.

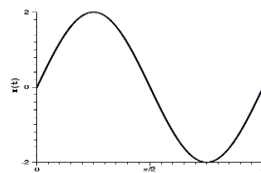


Figura 9-2: Señal continua

Fuente: Katsuhiko Ogata.. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto.

- Discreta: Es una secuencia de valores que corresponden a instantes particulares de tiempo.

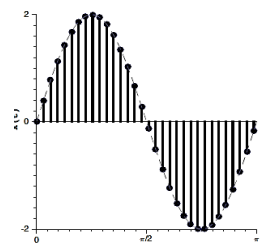


Figura 10-2: Señal discreta

Fuente: Katsuhiko Ogata.. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto.

2.1.12.2 Sistema en tiempo discreto.

Un sistema en tiempo discreto es un sistema en el cual la magnitud de una o más de sus variables varía en instantes específicos de tiempo. Los sistemas continuos muestreados son sistemas discretos que se obtienen a partir del muestreo (usualmente periódico) de las variables de un sistema continuo.

- Muestreo por medición.

Ejemplos: radar, recolección de muestras y análisis de materiales, Sistemas económicos, etc.

- Digitalización de señales.

2.1.12.3 Sistema de control digital

Sistema de control digital, es un sistema de control que incluye un computador digital en el bucle de control para realizar un procesamiento de señal.

Los componentes principales de un sistema de control digital son:

- Muestreador
- Bloqueador
- Convertidor AD/DA

2.1.12.4 Muestreador

Genera una señal discreta mediante la detección periódica de una señal continua. Se modela como un interruptor con periodo de muestreo T_0 como se muestra en la figura 11-2

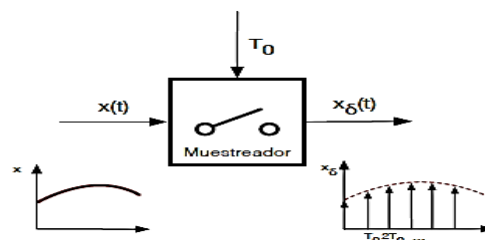


Figura 11-2: Bloque muestreador de un sistema de control digital
Fuente: Katsuhiko Ogata.. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto.

Donde la señal muestreada se la interpreta $x(t) \rightarrow x(kT_0) / k = 0,1,2,3$

2.1.12.5 Bloqueador

Circuito que recibe como entrada una señal discreta y mantiene dicha señal en un valor constante por un tiempo específico. En la figura 12-2 se muestra un diagrama del bloqueador.

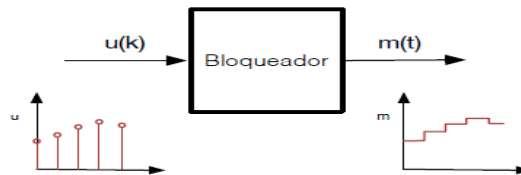


Figura 12-2: Bloqueador de un sistema de control digital
Fuente: Katsuhiko Ogata.. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto

Donde: [señal discreta] $u(k) \rightarrow m(t)$ [Continua definida por partes]

2.1.12.6 Convertidor AD/DA

Son dispositivos que codifican (descodifican) una señal analógica (digital) en una señal digital (analógica) y viceversa como se muestra en la figura 13-2

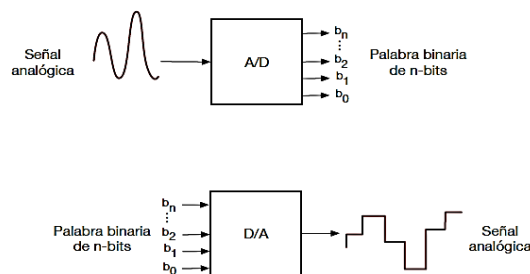


Figura 13-2: Bloques de convertidores AD/ DA
Fuente: Katsuhiko Ogata.. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto

2.1.13 Transformada z para los sistemas discretos

Para poder realizar un cambio del dominio de la frecuencia a muestras o cantidades muestreadas en sistemas discretos se utiliza la transformada z, donde que dada una secuencia de números $x(k)$, donde $k = k \cdot T_0$, se define la transformada z de dicha secuencia como se muestra la ecuación 31-2 (Ogata, K, 1996, p.24)

$$x(z) = Z[x(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(k)z^{-k}$$

Ecuación 31-2

Tomando en consideración que la ecuación anterior se la conoce como la transformada Z unilateral debiéndose cumplir para $x(k) = 0$ para $k < 0$

2.1.14 Transformada z inversa para los sistemas discretos

La transformada z inversa de $x(z)$ da como resultado la correspondiente secuencia de tiempo $x(k)$. Esta operación se denota como z^{-1} . Cabe observar que a partir de la transformada z inversa sólo se obtiene la secuencia de tiempo en los instantes de muestreo de la señal.

Para obtener la transformada z inversa, se supone, que la secuencia de tiempo $x(k)$ es cero para $k < 0$.

Existen varios métodos para obtener la transformada z inversa:

- Método de la integral de inversión
- Método de expansión en fracciones parciales
- Método de la división directa

2.1.15 Función de transferencia en los sistemas discretos

Se enfatizará en ciertos criterios de análisis antes de proceder a la obtención de una función de transferencia discreta.

2.1.15.1 Muestreo y bloqueo

Se dice que un muestreador ideal transforma la señal continua en un tren de impulsos con un periodo de muestreo T_0 , se nombra a h como la duración del interruptor cerrado en el bloque del muestreador.

Se toma en cuenta las condiciones de funcionamiento del muestreador ideal donde: Primero La duración del interruptor es mucho menor al período de muestreo ($h \ll T_0$) y segundo la salida del muestreador está conectada a un sistema lineal realizable $G(s)$.

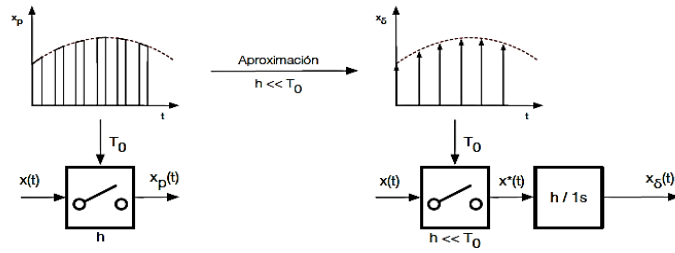


Figura 2-14: Funcionamiento de un muestreador ideal
Fuentes: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

La señal muestreada se define por:

Ecuación 32-2

$$x\delta(t) = \frac{h}{1s} \sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) \delta(t - kT_0)$$

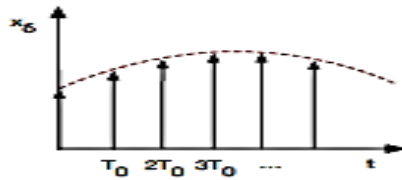


Figura 2-15: Respuesta de un muestreador con T_0 de periodo de muestreo
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems. Volume I

Donde T_0 es el periodo de muestreo, y $\delta(t - kT_0)$ expresa un impulso unitario en el instante $t = kT_0$. Por simplicidad asumimos $h = 1$, y obtenemos la señal muestreada normalizada en la ecuación 33-2

Ecuación 33-2

$$x^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) \delta(t - kT_0)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 33-2 se tiene:

$$x^*(s) = \mathcal{L}[x^*(t)] = \mathcal{L}\left[\sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) \delta(t - kT_0)\right]$$

$$x^*(s) = \mathcal{L}[x^*(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) e^{-kT_0 s}$$

Como $e^{T_0 s} = z$ se tiene:

Ecuación 34-2

$$x^*(s) \Big|_{s=\frac{1}{T_0} \ln z} = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) e^{-k} = X(z)$$

La transformada de Laplace de una señal discreta es periódica con frecuencia $\omega_0 = \pi/T_0$.

Se dice que la función de un bloqueador es Generar una señal continua $y(t)$ a partir de una secuencia en tiempo discreto $x(kT_0)$, mediante extrapolación polinomial de la señal discreta durante el intervalo de tiempo $kT_0 \leq t < (k + 1)T_0$.

Bloqueador de orden cero. Mantiene constante el valor de amplitud de la señal de entrada de un instante de muestreo al siguiente como se muestra en la figura 16-2.

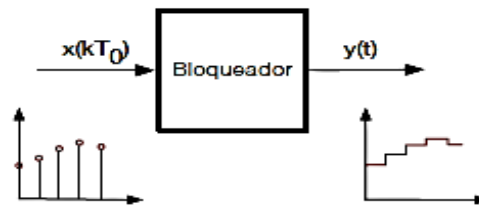


Figura 16-2: Bloqueador de orden cero
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

Para obtener la ecuación del bloqueador partimos del análisis de un sistema discreto con muestreador y bloqueador como se indica en la figura 17-2

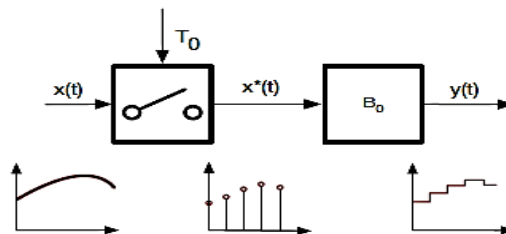


Figura 17-2: Bloques de Muestreador con Bloqueador
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

La señal continua se expresa como:

$$y(t) = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT_0) [\mu_0(t - kT_0) - \mu_0(t - (k + 1)T_0)]$$

Ecuación 35-2

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 35-2 tenemos:

$$Y(s) = \frac{1 - e^{-T_0s}}{s} X^*(s)$$

Asumiendo el criterio de una función de transferencia continua se tiene la ecuación del bloqueador:

Ecuación 36-2

$$B_0(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s}$$

2.1.15.2 Función de transferencia discreta en z

Teniendo claro los conceptos de muestreador y bloqueador y sus ecuaciones partimos de un sistema discreto suficiente expresado en diagramas de bloques donde se ve que a partir de una señal continua $\mu(t)$ se obtiene señales discretas en forma de muestras $y(k)$. Como se observa en la figura 18-2

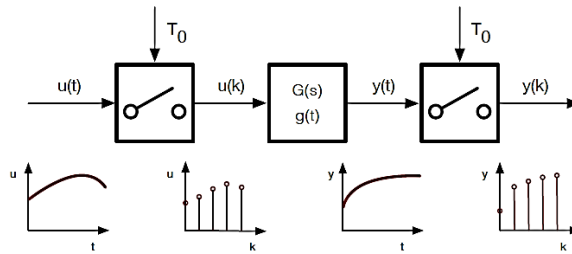


Figura 18-2: Sistema de discretización de una señal continua

Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems. Volume I

Partiendo de la figura 18-2 se tiene la señal de la salida como se muestra:

$$y(nT_0) = \sum_{k=0}^{\infty} \mu(kT_0)g((n-k)T_0)$$

$$Y^*(s) = G^*(s)U^*(s)$$

Ecuación 37-2

$$G^*(s) = \frac{Y^*(s)}{U^*(s)} = \sum_{q=0}^{\infty} g(qT_0)e^{-qT_0 s}$$

Se observa la ecuación 36-2 como la función de transferencia pulso. Para obtener la función de transferencia en z se toma en cuenta que $z = e^{T_0 s}$ y se obtiene la ecuación 38-2

Ecuación 38-2

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \sum_{q=0}^{\infty} g(qT_0)z^{-q} = Z[g(q)]$$

Por observación a partir de la figura 19-2 se puede obtener la siguiente propiedad al aplicar la función de transferencia se observa.

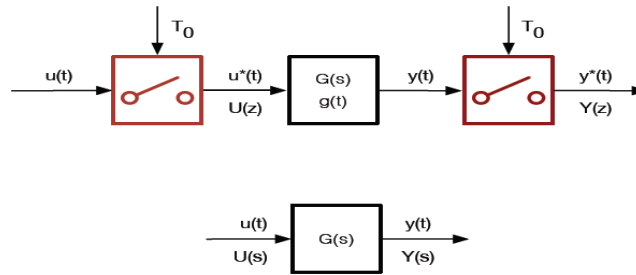


Figura 19-2: Relación de un sistema discreto en función de la frecuencia
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems. Volume I

$$Y^*(s) = [G(s)U(s)]^* = G^*(s)U^*(s)$$

$$Y^*(s) = [G(s)U(s)]^* = [GU(s)]^*$$

En términos de la transformada z:

$$Y(z) = z[Y(s)] = z[G(s)U(s)] = z[GU(s)] = GU(z) \neq G(z) \cdot U(z)$$

2.1.16 Análisis de estabilidad en los sistemas discretos

Una de las maneras de comprobar la estabilidad en los sistemas discretos es bajo el criterio de estabilidad de Jury el cual se base en función de un arreglo.

2.1.16.1 Criterio de estabilidad de Jury

Partiendo de un sistema con ecuación característica general de modo:

$$A(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0, \quad a_n > 0$$

$$b_k = \begin{vmatrix} a_0 & a_{n-k} \\ a_n & a_k \end{vmatrix}$$

$$c_k = \begin{vmatrix} b_0 & b_{n-1-k} \\ b_{n-1} & b_k \end{vmatrix}$$

$$b_k = \begin{vmatrix} c_0 & c_{n-2-k} \\ c_n & c_k \end{vmatrix}$$

Se observa en la figura 20-2 el arreglo de Jury en función de las constantes obtenidas matricialmente a partir de la ecuación característica.

| z^0 | z^1 | z^2 | ... | z^{n-k} | ... | z^{n-1} | z^n |
|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|-----|-----------|-------|
| a_0 | a_1 | a_2 | ... | a_{n-k} | ... | a_{n-1} | a_n |
| a_n | a_{n-1} | a_{n-2} | ... | a_k | ... | a_1 | a_0 |
| b_0 | b_1 | b_2 | ... | b_{n-k} | ... | b_{n-1} | |
| b_{n-1} | b_{n-2} | b_{n-3} | ... | b_{k-1} | ... | b_0 | |
| c_0 | c_1 | c_2 | ... | c_{n-k} | ... | | |
| c_{n-2} | c_{n-3} | c_{n-4} | ... | c_{k-2} | ... | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | | |
| u_0 | u_1 | u_2 | u_3 | | | | |
| u_3 | u_2 | u_1 | u_0 | | | | |
| v_0 | v_1 | v_2 | | | | | |

Figura 20-2: El arreglo de Jury para sistemas discretos
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

2.1.17 Controladores P.I.D

2.1.17.1 Análisis controladores PID en tiempo continuo

A partir de un sistema de control lineal continuo en lazo cerrado se obtiene la función de transferencia del mismo cuyo objetivo es determinar una señal de control de forma que la variable del sistema que se desea controlar siga a una señal de referencia y cierto comportamiento dinámico en bucle cerrado. En la figura 21-2 se muestra un sistema clásico de control con las variables dominantes del sistema.

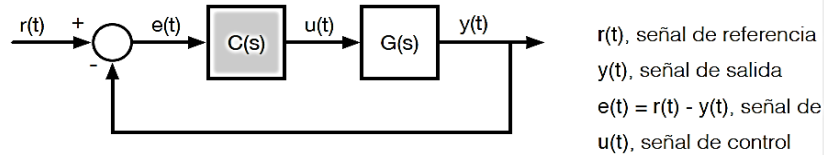


Figura 21-2: Sistema clásico de control lazo cerrado
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

En este sistema clásico a más de la planta $G(s)$ del sistema se puede observar un bloque $C(s)$ comúnmente llamado controlador del sistema. La función de transferencia de un sistema clásico con controlador se expresa en la ecuación 39-2

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

Ecuación 39-2

Las especificaciones de diseño son características dinámicas que describen el comportamiento transitorio y/o estacionario del sistema que se desea alcanzar al introducir un controlador.

Podemos encontrar en forma general dos tipos de controladores en los sistemas de control los de estructura fija y estructura variable.

Controladores con estructura fija:

La función de transferencia del controlador $C(s)$ tiene una estructura definida a priori. El más común de estos controladores son los denominados controladores P.I.D. Este controlador combina tres acciones de control: proporcional, integral, y derivativa.

Controladores con estructura variable:

No presenta una estructura de función de transferencia predefinida, sino que se obtiene como resultado de las especificaciones deseadas para el sistema de control. En este tipo se incluyen a los controladores por síntesis directa.

Así podemos describir la ecuación diferencial de un controlador a partir de un sistema de control clásico ecuación 40-2, a partir de la en la figura 21-2

Ecuación 40-2

$$\mu(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Donde:

K_p , constante acción proporcional

T_i , constante acción integral

T_d , constante acción derivativa

2.1.17.2 Discretización de controladores P.I.D

Para poder discretizar el controlador P.I.D se realiza una aproximación numérica de los términos integral y derivativo véase la ecuación 40-2. Una forma común de obtener el

controlador discreto es sustituir estos términos (K_p , T_i , T_d) usando el método de Euler o aproximación trapezoidal.

Método de Euler:

El área bajo la integral se aproxima por un rectángulo de base T_0 (periodo de muestreo) y altura el valor de la señal del error en el instante k .

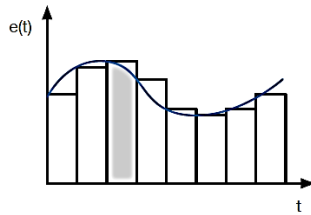


Figura 22-2: Área bajo la integral Método de Euler I
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

De la figura 22-2 se dice:

$$\mu(k + 1) = \mu(k) + T_0 e(k)$$

Tomando en cuenta la transformada z donde se tiene

$$G_e(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T_0 z}{z - 1}$$

Donde:

Ecuación 41-2

$$s = \frac{z - 1}{T_0}$$

El área bajo la integral se aproxima por un rectángulo de base T_0 (periodo de muestreo) y altura el valor de la señal del error en el instante $k + 1$ como se muestra en la figura 23-2. Se conoce como el método de Euler II

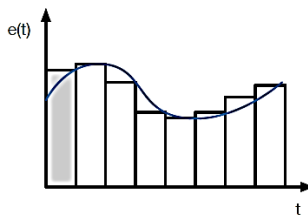


Figura 23-2: Área bajo la integral Método de Euler II
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

De la figura 23-2 se dice:

$$\mu(k + 1) = \mu(k) + T_0 e(k + 1)$$

Tomando en cuenta la transformada z donde se tiene

$$G_e(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T_0}{z - 1}$$

Donde:

$$s = \frac{z - 1}{T_0 z}$$

Ecuación 42-2

Utiliza el método de Euler. Sustituimos el término derivativo por la diferencia de primer orden y el integral por la aproximación rectangular hacia adelante de Euler, y obtenemos:

$$\mu(k) = K_p [e(k) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T_0} (e(k) - e(k - 1))]$$

Para obtener una expresión recursiva, escribimos la expresión en $k-1$

$$\mu(k - 1) = K_p [e(k - 1) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^{k-2} e(i) + \frac{T_d}{T_0} (e(k - 1) - e(k - 2))]$$

Restando las dos expresiones anteriores se tiene la ecuación de la señal respuesta de un controlador discretizado P.I.D ecuación 43-2

$$\mu(k) = \mu(k - 1) + [q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2)]$$

Ecuación 43-2

Donde:

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T_d}{T_0}\right)$$

$$q_1 = k_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_0} - \frac{T_0}{T_i}\right)$$

$$q_0 = k_p \frac{T_d}{T_0}$$

La función de transferencia en z del controlador P.I.D discreto queda de la forma:

Ecuación 44-2

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Método trapezoidal (Tustin):

El área bajo la integral se aproxima promediando los valores de la señal de error en los instantes k y k+1 y multiplicando por T_0 (periodo de muestreo). Como se muestra en la figura 24-2

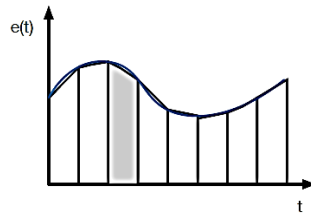


Figura 24-2: Área bajo la integral Método de Trapezoidal (Tustin)
Fuente: Rolf Isermann. (1989). Digital control systems.

De la figura 24-2 se dice:

$$\mu(k+1) = \mu(k) + \frac{T_0}{2} [e(k) + e(k+1)]$$

Tomando en cuenta la transformada z donde se tiene

$$G_e(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T_0(z+1)}{2(z-1)}$$

Donde:

Ecuación 45-2

$$s = \frac{2(z-1)}{T_0(z+1)}$$

Utilizando el método de Tustin (aproximación trapezoidal), la expresión para u(k) queda:

$$\mu(k) = k_p [e(k) + \frac{T_0}{T_i} \left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{e(0) - e(k)}{2} \right) + \frac{T_d}{T_0} (e(k) - e(k-1))]$$

Repitiendo el proceso que se realizó en el método de Euler, se tiene la ecuación de la señal respuesta de un controlador discretizado P.I.D ecuación 46-2

Ecuación 46-2

$$\mu(k) = \mu(k - 1) + q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2)]$$

Donde:

$$q_0 = k_p \left(1 + \frac{T_d}{T_0} + \frac{T_0}{2T_i}\right)$$

$$q_1 = -k_p \left(1 + 2\frac{T_d}{T_0} - \frac{T_0}{2T_i}\right)$$

$$q_2 = k_p \frac{T_d}{T_0}$$

La función de transferencia en z del controlador P.I.D discreto queda de la forma:

Ecuación 47-2

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

2.2 Visión Artificial

Visión artificial o visión por computador es una disciplina científica que incluye métodos para adquirir, procesar, analizar y comprender la realidad de imágenes del mundo con el fin de entregar información numérica o simbólica para que puedan ser entendidos y tratados por un procesador, para luego realizar acciones de acuerdo a propósito general.

Al igual que los seres humanos usan el proceso de visualizar por medio de los ojos y del cerebro para poder procear las imágenes observadas, la visión por computador trata de realizar el mismo efecto para que las computadoras puedan percibir y comprender una imagen o secuencia de imágenes y actuar según convenga en una determinada situación utilizando su procesador.

La visión artificial o visión por computadora está formada por un conjunto de procesos orientados a realizar el análisis o entendimiento de imágenes. Estos procesos son: captación de imágenes, memorización de la información, procesado e interpretación de los resultados.

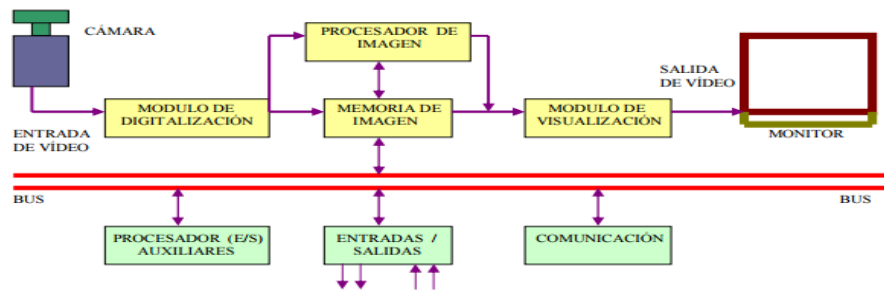


Figura 25-2: Diagrama de bloques del proceso de la visión artificial
Fuente: <http://www.etitudela.com/celula/downloads/visionartificial.pdf>

Módulo de digitalización: Convierte la señal analógica proporcionada por la cámara a una señal digital (para su posterior procesamiento).

Memoria de imagen: Almacena la señal procedente del módulo de digitalización.

Módulo de visualización: Convierte la señal digital residente en memoria, en señal de vídeo analógica para poder ser visualizada en el monitor de TV. Procesador de imagen: Procesa e interpreta las imágenes captadas por la cámara.

Módulo de entradas/salidas: Gestiona la entrada de sincronismo de captación de imagen y las salidas de control que actúan sobre dispositivos externos en función del resultado de la inspección.

Comunicaciones: Vía I/O, ethernet, usb, Rs232, Rs485

2.2.1 *Procesos de visión artificial*

Una vez entendido el concepto de la visión artificial por computadora se detallará los procesos que hacen posible poder captar y procesar imágenes con fines particulares como son: Adquisición, procesamiento de la imagen, representación y descripción (extracción de características), reconocimiento e interpretación.

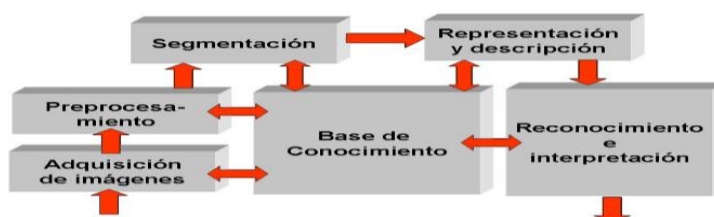


Figura 26-2: Diagrama de bloques del proceso de la visión artificial
Fuente: <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/>

2.2.1.1 Adquisición.

La adquisición consiste en obtener una representación digital de la imagen de interés dentro del ordenador o controlador. A partir de ese momento será éste el que permita realizar las operaciones sobre dicha imagen para lograr manipular dicha representación digital. La adquisición de la imagen deberá ser lo más clara y estable para poder tener un buen procesamiento y tratamiento de la imagen.



Figura 27-2: Adquisición de una imagen por cámara de 180°

Fuente: https://www.alibaba.com/product-detail/system-video-surveillance-wireless-cctv-IP_60116315574.html

2.2.1.2 Procesamiento de la Imagen

En esta etapa se procesa la imagen con el objetivo de hacer de la misma una fuente de información, lo más precisa y confiable, dentro de lo que será el proceso de reconocimiento, la calidad del procesador del controlador o computador será clave para poder procesar mucho más rápido esta información. Se divide en los siguientes puntos: binarización, segmentación.

Binarización: La mayor parte de los algoritmos para el reconocimiento de la escritura están enunciados a partir de imágenes binarias, por lo que se hace conveniente el paso de una imagen en niveles de gris (o color) a una binaria: esto permite, además, reducir el volumen de los datos que serán procesados.

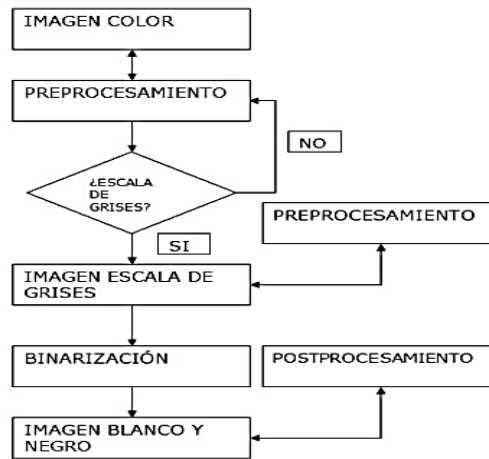


Figura 28-2: Proceso para binarizar una imagen

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/4021868/>

Segmentación: La segmentación es una parte de la procesada digital de imágenes que consiste en la detección de objetos o regiones de interés en ellas. El éxito del proceso depende del paso anterior.

2.2.1.3 Representación y descripción (extracción de características)

Ya dividida la imagen en zonas con características de más alto nivel se pasará a la extracción de las características o formas a analizar. Básicamente son de tipo morfológico, tales como área, perímetro, excentricidad, momentos de inercia, esqueletos, pero también se puede emplear características basadas en la textura o en el color.

Nótese que se ha pasado de una información visual primaria o básica a algo más elaborado, se ha obtenido información numérica de una imagen. Con las características analizadas ahora cada región se debe de clasificar e interpretar.

Entonces, se elaborará clasificadores que le dé a cada área segmentada una etiqueta de alto nivel, como, por ejemplo, en un rostro que parte es la boca, nariz, oreja etc. Existe un elenco de técnicas de clasificación, como lógica difusa, redes neuronales, sistemas expertos, clasificadores estadísticos, etc.

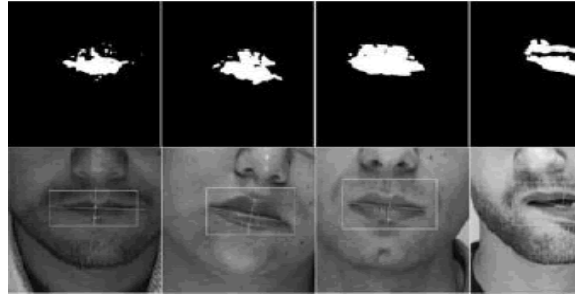


Figura 29-2: Extracción de caracteres de una imagen

Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532008000100018

2.2.1.4 Reconocimiento e interpretación

Cuando la imagen ha sido satisfactoriamente segmentada en un alto nivel y han sido extraídas las características necesarias, el procesador puede hacer una serie de pruebas, mediciones y cálculos en los elementos de interés que aparecen en la escena. Existen multitud de algoritmos que nos ayudan a obtener los resultados deseados. Entre ellos, cabe destacar sus funcionalidades:

- Detección de formas
- Análisis geométrico
- Comparación con patrones
- Medición de objetos
- Detección de objetos difusos

Estos algoritmos, usados estratégicamente, nos permiten decidir si una pieza se ha fabricado correctamente o no, guiar un robot hacia un objeto concreto o reajustar la maquinaria de producción automáticamente

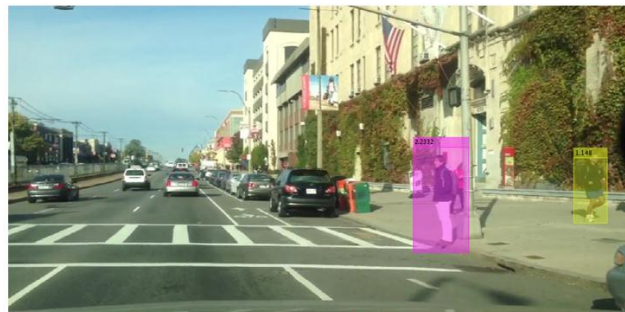


Figura 30-2: Segmentación de una imagen

Fuente: <https://es.mathworks.com/discovery/vision-artificial.html>

2.2.2 *Sistemas de visión artificial*

Los sistemas de visión artificial aparecen a partir del desarrollo de la inteligencia artificial, con el propósito de programar un computador (CPU) para que sea capaz de entender y procesar una escena o las características de una imagen en particular.

Por lo que se define a un sistema de visión artificial como el proceso de extracción de información del mundo físico a partir de imágenes utilizando para esto un procesador, hoy en la actualidad no únicamente se utiliza una computadora si no también sistema embebidos como: Arduinos, Raspberry

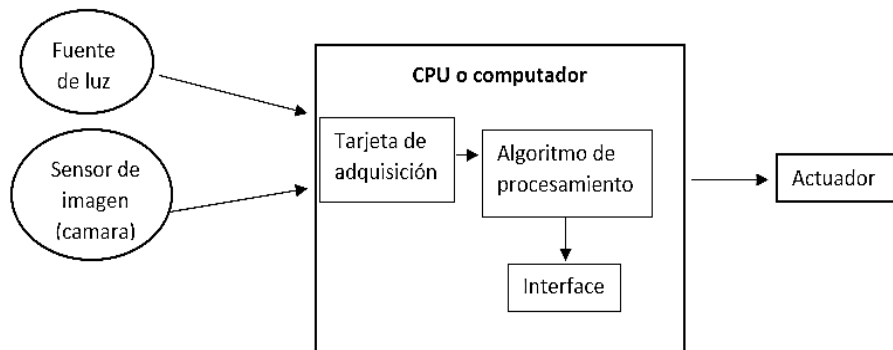


Figura 31-2: Elementos de un sistema de visión artificial
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017

Todo sistema de visión artificial se compone de los siguientes elementos como son:

- Fuente de luz
- Sensores de Imagen
- Sistemas de Adquisición
- Aplicación de procesado

2.2.2.1 *Fuente de Luz*

Lograr una iluminación correcta es de esencial importancia para la implantación de cualquier sistema de control de visión artificial, ya que debe proporcionar unas condiciones de iluminación uniforme e independiente del entorno, con la finalidad de extraer los rasgos de interés de no hacerlo tiene a exigir al procesador para que pueda conseguir con más trabajo la obtención de rasgos o caracteres. Existen diferentes tipos de iluminación como: Direccional, difusa, contraluz, estructurada, estroboscópica.

2.2.2.2 *Sensores de Imagen*

Un sensor de imagen es la medida que se encarga de tomar las características del objeto bajo estudio, son componentes sensibles a la luz que modifican su señal eléctrica en función a la intensidad luminosa que perciben pudiendo estar linealizados o no matemáticamente.

Unos de los ejemplos o más comunes de un sensor de imagen es la cámara, existen diferentes tipos de cámara, entre las más utilizadas podemos citar las basadas en dispositivos de acoplamiento de carga (CCD), caracterizándose principalmente por su bajo coste, bajo consumo de energía, buena resolución, durabilidad y facilidad en el manejo, hoy en la actualidad se utilizan en cámaras ip bajo redes de comunicación

Hay otros tipos de cámaras que dependen del tipo de aplicación, por ejemplo: las progresivas son muy buenas para trabajar con imágenes en movimiento rápidos. Las lineales se usan en inspecciones de piezas de gran tamaño. Las infrarrojas cuando se desean medir rasgos a una atenuada imagen sin mucha luz.

2.2.2.3 *Sistema de Adquisición*

Un sistema de Adquisición de imagen es el encargado de tomar la información proveniente desde la cámara y para luego convertirla en una señal digital que puede ser procesada e interpretada por una computadora o CPU.

Las características más importantes a ser tomadas en cuenta al momento de seleccionar la tarjeta del sistema de adquisición son las siguientes:

- Velocidad de transmisión.
- Medios de comunicación.
- Formato de procesamiento de datos.
- La profundidad del pixel.
- La capacidad de captura por disparo.

2.2.2.4 *Aplicación de Procesado:*

Una vez adquirida la imagen, las aplicaciones de procesamiento operan sobre la señal y extraen la información útil de la misma. El tratamiento que se aplicará a la imagen va a depender del tipo de análisis a realizar.

El procesamiento de adquisición de las imágenes es similar al sistema humano de visión:

- La imagen es adquirida por la cámara a través de un sistema de sensores basados en dispositivos de acoplamiento de carga (CCD).
- El sistema de adquisición que se encarga de la conversión analógica de la señal, para que ésta pueda ser procesada.
- La información digital es utilizada como dato de entrada para un computador que, dependiendo del programa de aplicación que se haya diseñado se encargará de realizar los cálculos correspondientes.

2.2.3 Operaciones en el procesamiento de imágenes

Luego de ser digitalizada, una imagen puede ser representada por una matriz de orden $N \times M$ o por un vector de $N \times M$ elementos, así se tiene que:

Ecuación 48-2

$$i = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & \dots & i_{1M} \\ i_{21} & i_{22} & \dots & i_{2M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ i_{N1} & i_{N2} & \dots & i_{NM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{11} \\ \dots \\ i_{1M} \\ \dots \\ i_{NM} \end{bmatrix}$$

Cada elemento i_{jk} representa un píxel. Esta matriz puede ser almacenada como un archivo y posteriormente procesada matricialmente en una computadora. La notación vectorial es muy conveniente para la descripción de las operaciones de procesamiento de imágenes.

En una imagen binaria o monocromática cada elemento i_{jk} será 1 o 0. Un píxel de una imagen a color puede ser considerado como un vector tridimensional C cuyos elementos $C_1 C_2 C_3$ representan los tres colores primarios como rojo, verde y azul.

2.2.3.1 Operaciones básicas entre píxeles

Las operaciones directas sobre píxeles se pueden clasificar en operaciones aritmético-lógicas y operaciones geométricas.

Operaciones aritmético-lógicas:

Estas operaciones son, con diferencia, las más usadas a cualquier nivel en un sistema de tratamiento de imágenes, ya que son las que se utilizan para leer y dar valores a los píxeles de las imágenes. Las operaciones básicas son:

Conjunción. - Operación lógica AND entre los bits de dos imágenes. Se usa para borrar píxeles en una imagen.

Disyunción. - Operación lógica OR entre los bits de dos imágenes. Se usa para añadir píxeles a una imagen.

Negación. - Inversión de los bits que forman una imagen. Se usa para obtener el negativo de una imagen.

Suma. - Suma de los valores de los píxeles de dos imágenes.

Resta. - Resta de los valores de los píxeles de dos imágenes.

Multiplicación. - Multiplicación de los valores de los píxeles de una imagen por los de otra. Se usa para añadir textura a una imagen.

División. - División de los valores de los píxeles de una imagen entre los de otra.

Se ha visto que en imágenes en niveles de gris se suele utilizar el valor 255 para representar el blanco y el 0 para el negro. Así, la operación de conjunción entre negro y blanco da como resultado negro. Cuando se realiza operaciones aritméticas se debe tener la precaución de verificar que el resultado R de una operación cae dentro del dominio de valores permitidos.

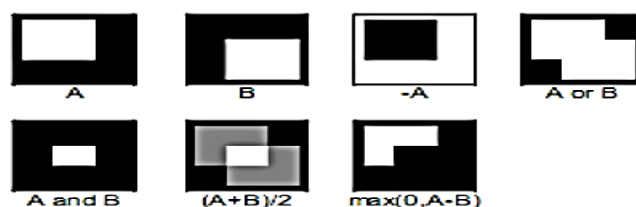


Figura 32-2: Ejemplos de operaciones aritméticas y lógicas entre píxeles

Fuente: <http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10007/>
PFC_FranciscoJavier_Garcia_Fernandez.df

Operaciones Geométricas:

Si se expresa los puntos en coordenadas homogéneas, todas las transformaciones se pueden tratar mediante multiplicación de matrices. Las operaciones geométricas más usuales son:

Traslación. - Movimiento de los píxeles de una imagen según un vector de movimiento. La siguiente transformación muestra el resultado de trasladar el punto (x, y) , según el vector (d_x, d_y) , obteniendo el punto (x', y') .

Ecuación 49-2

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

Escalado. - Cambio del tamaño de una imagen. La siguiente transformación muestra el resultado de escalar el punto (x, y) en un factor (s_x, s_y) , obteniendo el punto (x', y') .

Ecuación 50-2

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

Rotación. - Giro de los píxeles de una imagen en torno al origen de coordenadas. La siguiente transformación muestra el resultado de rotar el punto (x, y) un ángulo θ , obteniendo el punto (x', y') .

Ecuación 51-2

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

Las operaciones geométricas matriciales se pueden agrupar multiplicando las matrices. De esta forma, por ejemplo, es posible tener una única matriz que realice un desplazamiento, un giro, otro desplazamiento, y un escalado en un solo paso.

Al realizar esta composición de operaciones se debe recordar que el producto de matrices no cumple la propiedad conmutativa.

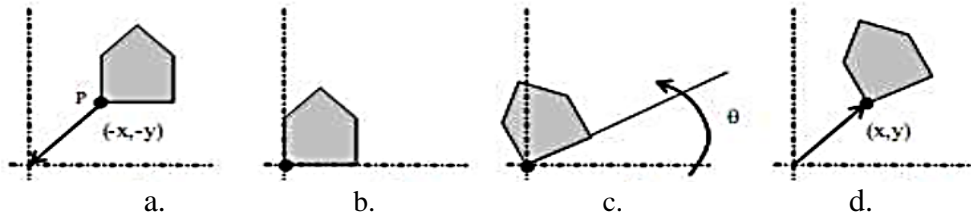


Figura 33-2: Ejemplos de rotación. (a) Imagen original que se desea rotar en torno al punto P de coordenadas (x,y) ; (b) resultado de la primera traslación; (c) resultado del giro; (d) resultado final después de la última traslación.

Fuente: http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10007/PFC_FranciscoJavier_Garcia_Fernandez.pdf

2.2.3.2 Filtrado

Los filtros son un medio muy efectivo para mejorar la calidad de las imágenes ya que permiten, entre otras cosas, eliminar ruido presente en las mismas. Gracias a su simplicidad y propiedades especiales, los filtros lineales han sido utilizados ampliamente, pero existen sistemas sobre los cuales los filtros lineales no tienen una buena respuesta (sistemas con ruido no aditivo o con características de no linealidad).

En aplicaciones de procesamiento de imágenes, los filtros lineales tienden a hacer borrosos los contornos, no remueven efectivamente el ruido impulsivo y no actúan bien en presencia de señales dependientes del ruido. Además, estudios indican que los primeros niveles de nuestro sistema visual poseen características no lineales. Debido a esto, a partir de 1958 se empezó una investigación seria sobre las técnicas no lineales de filtrado utilizadas para procesamiento de señales e imágenes en particular. Desde entonces el filtrado no lineal ha tenido un rápido desarrollo debido a su gran difusión y amplio espectro de aplicaciones en telecomunicaciones, procesamiento de imágenes y procesamiento de señales geofísicas.

La mayoría de paquetes de software para procesamiento de imágenes utilizan filtros no lineales tales como filtros de mediana y filtros morfológicos.

Existen algunos tipos de filtros mayormente utilizados en el realce de la imagen y en la restauración de la imagen en las tablas 2-2 y 3-2 muestra a los filtros dentro del campo de los métodos antes indicados.

Tabla 2-2: Métodos y operaciones a utilizar en filtros para realce de imágenes

| REALCE DE LA IMAGEN | |
|--|---|
| MÉTODO | OPERACIONES |
| Operadores de punto y locales | Mapas de intensidad (ecuaciones de histogramas), operaciones locales (promedio selectivo, máscara tenue), modelación ocular, pseudocoloración, realce de contornos. |
| Filtros lineales invariantes a la traslación | Pasa bajos, pasa altos, de gran énfasis de respuesta finita (FIR), de respuesta infinita (IIR) |
| Filtros no lineales | De orden estadístico (de mediana), morfológicos, de media no lineal, morfológicos y polinomiales. |
| Filtros adaptativos | Métodos heurísticos |

Fuente: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5249/1/T171.pdf>

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017 .

Tabla 3-2: Métodos y operaciones a utilizar en filtros para restauración de imágenes

| RESTAURACIÓN DE IMÁGENES | |
|--|---|
| MÉTODO | OPERACIONES |
| Filtros lineales invariantes a la traslación | Inverso, pseudo-inverso, Wiener, ecualización del espectro de potencia, Wiener generalizado. Filtros morfológicos invariantes a la traslación |
| Filtros adaptivos no lineales | Homomórfico, de máxima entropía, Bayesiano, probabilidad máxima a posterior |
| | Filtros de Kalman, Filtros de Kalman para realce de los contornos |

Fuente: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5249/1/T171.pdf>

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017

Un filtro en general se define como un operador L que transforma una señal x en una señal y, de la siguiente manera:

$$y = L(x)$$

En general, los filtros se dividen básicamente en filtros lineales y no lineales. A continuación, se describirá a cada uno de estos tipos de filtros. También pueden nombrar algunos de carácter específico como continuación:

Filtros lineales:

En los filtros lineales, el operador L es un operador lineal, esto quiere decir que L satisface los principios de superposición y proporcionalidad. La señal de salida, por lo tanto, será la convolución de la entrada y de la respuesta impulsiva del filtro. A continuación, se muestra la clasificación de los filtros lineales:

- De acuerdo a su invarianza a las traslaciones:
 - ✓ F. L. no invariantes a la traslación (LNSI).
 - ✓ F. L. invariantes a la traslación (LSI).

- De acuerdo a su número de etapas los filtros lineales pueden ser
 - ✓ Unidimensionales.
 - ✓ bidimensionales.
 - ✓ m-dimensionales.

- De acuerdo a su dependencia de la señal de salida:
 - ✓ F. L. Recursivos. - Requieren muestras de la señal de entrada junto a muestras evaluadas de la señal de salida, para evaluar la señal de salida.
 - ✓ F. L. No recursivos. - Requieren solo muestras de la señal de entrada para evaluar la señal de salida.

Filtros no lineales

En el caso de los filtros no lineales, el operador L es no lineal; esto quiere decir que no cumple la propiedad de superposición, la de proporcionalidad o ninguna de las dos. La salida no será igual por tanto a la convolución de la señal de entrada y la respuesta impulsiva del filtro. En procesamiento digital de imágenes, se utiliza la función de transformaciones de escala de gris y $t(x)$ para pasar de una escala x a otra y . También suele utilizarse la modificación de histograma (gráfico de ocurrencia de tonos de gris) que pasa de un nivel de gris a otro.

Un caso especial es la ecualización del histograma, aquí se comparan dos imágenes bajo condiciones diferentes de iluminación y se las pasa a una base común (estándar) que tiene un histograma distribuido uniformemente.

Los tipos de filtros no lineales son los siguientes:

- Filtros de orden estadístico
 - ✓ Filtro de mediana.

- ✓ Filtros de pila
- ✓ Filtros híbridos de mediana
- ✓ Filtros de orden clasificado
- ✓ Filtros de media de estado α
- ✓ Filtros L
- ✓ Filtros M
- ✓ Filtros R
- Filtros morfológicos
- Filtros homomórficos
- Filtros polinomiales
- Filtros adaptivos

Como uso de orden específico se puede nombrar los siguientes filtros

Filtrado espacial

Los filtros espaciales son filtros que se realizan directamente sobre la imagen y por tanto en el dominio del espacio. Aunque hay diferentes tipos de filtros espaciales, los más usados son los filtros espaciales de convolución.

Filtros de Suavizado

El filtrado de suavizado espacial se basa en el promediado de los píxeles adyacentes al píxel que se evalúa. Quizás el filtro de suavizado más simple que se puede diseñar se corresponde con una matriz de 3x3 con todos los elementos a 1.

El resultado de la convolución de cada píxel se deberá dividir por 9 para asegurar el obtener valores dentro del rango de la paleta. En la figura adjunta se puede apreciar el resultado de la aplicación de este filtro.

Las siguientes matrices de convolución definen otros filtros de suavizado:

$$h = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad h = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Otro filtro de suavizado es el *filtro de la mediana*. Éste se basa en sustituir el valor de un píxel por el de la mediana del conjunto formado por el mismo y sus ocho vecinos.

El filtro del bicho raro es otro ejemplo de filtro suavizado. Consiste en comparar la intensidad de un píxel con la de sus 8 vecinos. Si la diferencia es superior a cierto umbral U (que debe elegirse previamente), se sustituye tal píxel por el valor promedio de los píxeles vecinos, en otro caso se mantiene su valor de intensidad.

Debe observarse que tanto el filtro de la mediana, como el filtro del “bicho raro” son filtros no lineales, y por tanto no se pueden obtener mediante una operación de convolución.

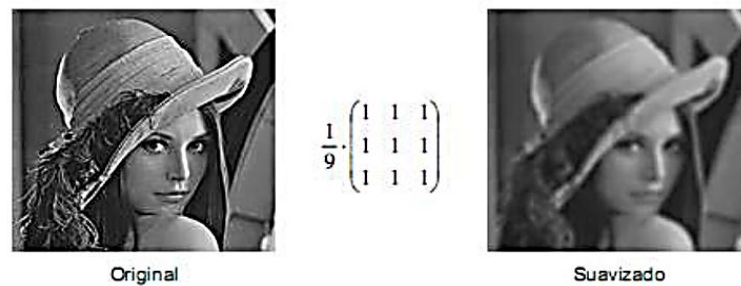


Figura 34-2: Aplicación de un filtrado espacial de suavizado.

Fuente: http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10007/PFC_FranciscoJavier_Garcia_Fernandez.pdf

Filtros de Obtención de contornos

El cálculo de la derivada direccional de una función permite conocer cómo se producen los cambios en una dirección determinada. Tales cambios suelen corresponder a los contornos de los objetos presentes en las imágenes. Partiendo de que el operador gradiente se define como:

Ecuación 52-2

$$\nabla(I(x, y)) = \frac{\partial I}{\partial x} \bar{u}_x + \frac{\partial I}{\partial y} \bar{u}_y$$

Se definen los filtrados de convolución G_x y G_y :

$$G_x = \frac{\partial I}{\partial x} = I(x, y) * h_1(x, y)$$

$$G_y = \frac{\partial I}{\partial y} = I(x, y) * h_2(x, y)$$

$$h_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad h_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Por ejemplo, el matriz h_1 proporciona un filtrado en el que un cambio de brillo entre dos píxeles adyacentes en horizontal produce un valor distinto de cero.

En particular los cambios de claro a oscuro se marcan con un valor positivo y los cambios de oscuro a claro con un valor negativo. Por otro lado, cuando dos pixeles adyacentes tienen el mismo valor la convolución con $h1$ en ese punto devuelve cero.

$$h1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad h2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}$$

Estas matrices se conocen como *ventas de Sobel*, que fue quien las propuso. Mediante estas se calcula el gradiente en las direcciones horizontales y verticales. En la figura 36-2 se puede ver el resultado de aplicar $h1$ sobre una imagen, el resultado es una nueva imagen donde aparecen los contornos horizontales de la figura de la imagen original. Ese resultado se obtiene utilizando un factor de división de 4 y presentado el valor absoluto de la convolución, utilizando niveles de gris en escala desde 0 como blanco hasta 255 en negro.

Una alternativa muy común al uso de valor absoluta para evitar los valores fuera de rango consiste en el uso de un factor de suma que se aplica tras la convolución y la división. Por ejemplo, en el caso del filtro de Sobel un factor de división de 8 y un factor de suma de 128 evitarían los valores fuera de rango.

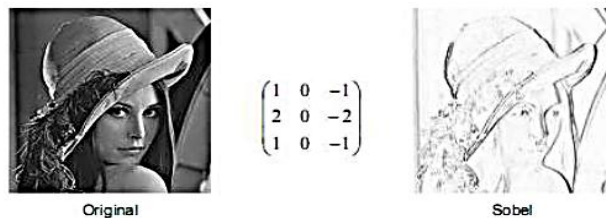


Figura 35-2: Filtrado de Sobel en la dirección de x en un valor absoluto
Fuente: http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10007/PFC_FranciscoJavier_Garcia_Fernandez.pdf

Filtro de la Laplaciano.

El operador laplaciano de una función bidimensional $I(xy)$ es escalar:

Ecuación 53-2

$$\Delta(I(x, y)) = \nabla(\nabla(x, y)) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \bar{u}_x + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \bar{u}_y$$

Este operador, que se basa en la segunda derivada se hace cero cuando la primera derivada se hace máximo, es decir cuando aparece un cambio de signo en la primera derivada. Su cálculo parte de la primera derivada. En la siguiente figura 37-2 se muestra una imagen con un filtro

Laplaciano a 255 niveles de gris se ha usado un factor de división de 8 y un factor de suma de 128

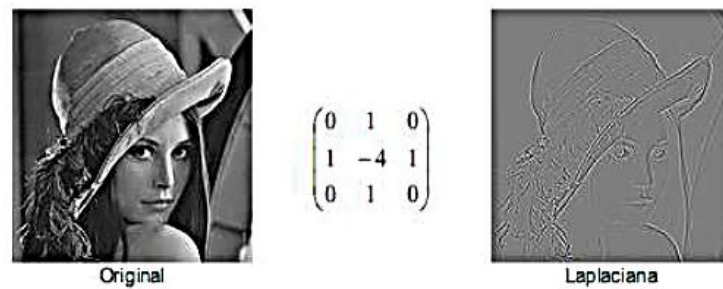


Figura 36-2 : Filtrado de la Laplaciano

Fuente: http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10007/PFC_FranciscoJavier_Garcia_Fernandez.pdf

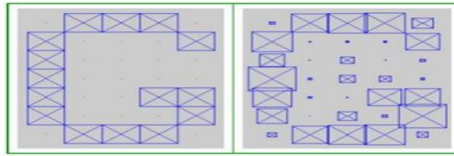
2.2.4 Operaciones de filtrado en Matlab

La fotografía de una imagen se obtiene actualmente por métodos foto electrónicos, teniendo estos sensores de enfoque de estabilidad que muchas veces no son tan precisos o en el peor de los casos no tienen estos sensores, este tipo de método de obtención de imagen genera que la calidad de la imagen capturada tenga deformaciones por ruido. Estas deformaciones hacen que la calidad de la imagen sea bastante pobre ya que sufre modificaciones geométricas.

Para realizar un buen procesamiento de imagen en Matlab se requiere que la imagen a procesar tenga una buena calidad, es por ello que se necesita mejorar la imagen que capturemos por la cámara web, utilizando técnicas de restauración de imágenes, haciendo que de esta manera el proceso sea más rápido de con un buen resultado.

El ruido lo interpreta Matlab como cualquier perturbación que puede sufrir una señal en el proceso de adquisición, transmisión y almacenamiento de una imagen en valores numéricos de información.

El ruido se lo puede apreciar en píxeles aislados que toman valores completamente distintos a los originales en la imagen que se muestra a continuación se puede apreciar este ejemplo.



```
G = 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
G_ruidosa = 0.1337 0.9859 1.0447 1.0773 -0.5392 1.0712 0.0547 0.0860
-0.0817 0.9028 0.6783 0.0299 0.3474 -0.0147 0.1335 1.2666 0.0991
0.3885 -0.2928 0.1002 1.0181 -0.0948 0.0390 0.8881 0.9455 0.8147
0.0208 0.4779 0.1484 1.2493 -0.2367 0.9407 1.0204 1.0842 -0.2981
```

Figura 37-2: Letra G escaneada sin ruido y con ruido

Fuente: <http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>

Podemos citar algunos tipos de ruido que opera Matlab como:

Aditivo: cuya característica es: $d(i,j) = I(i,j) + n(i,j)$ donde:

$d(i,j)$ es la distorsión de la imagen original

$n(i,j)$ se lo conoce como ruido gaussiano aditivo.

$I(i,j)$ es la imagen original

Impulsivo: Característica cuando el ruido es generado por una transmisión digital en la que:

$d(i,j) = (1-p) * I(i,j) + p * im(i,j)$ donde:

$d(i,j)$ es la distorsión de la imagen original

p pertenece a $\{0,1\}$ generados por transmisión

$I(i,j)$ es la imagen original

$im(i,j)$ es el ruido impulsivo

Multiplicativo: El aspecto del ruido genera una imagen granulada en la que:

$d(i,j) = I(i,j) * m(i,j)$ donde:

$d(i,j)$ es la distorsión de la imagen original

$I(i,j)$ es la imagen original

$m(i,j)$ es el ruido multiplicativo.

Lo que se busca es corregir o eliminar este tipo de ruidos sobre las imágenes de tal manera que se pueda tener una mejor información matricial y a su vez una lectura de imagen clara, para esto se utilizan los llamados filtros que anteriormente se estudió sobre ellos.

Lo que hace un filtro es mediante una operación lograr que la imagen cuente con los valores originales de sus píxeles. Para ellos citaremos los diferentes tipos de filtros que maneja Matlab como se muestra.

- Filtro en el dominio espacial:
 - ✓ Filtros de orden
 - Mediana
 - Moda
 - Máximos
 - Mínimos
 - ✓ Filtros de medias
 - Lineales
 - Media (paso bajo espacial)
 - Media geométrica
 - Media armónica
 - Media contra-armónico
 - De Gauss
 - No lineales
 - Outlier
- Filtros en el dominio de la frecuencia:
 - ✓ Paso bajo
 - ✓ Paso banda
 - ✓ Paso alto
 - ✓ Rechazo banda

2.2.4.1 *Filtro en el dominio espacial*

El objetivo de este tipo de filtros es modificar un píxel elegido en función de los valores de un subconjunto de píxeles cercanos en relación a un contorno llamados ‘vecinos a aquel’

Operaciones sobre vecindades:

Son operaciones en las que se realizan sobre bloques o contornos definidos dentro de la imagen, en vez de procesar toda la imagen como se puede apreciar en la figura 39-2.



Figura 38-2: Ejecución de una operación sobre vecindades
Fuente: <http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>

Una de las funciones que maneja Matlab para realizar este tipo de operaciones es *imfilter* donde se tiene los siguientes campos:

imfilter ('La_imagen.jpg', máscara, relleno, salida)

Dónde:

La máscara será una matriz a libre albedrío por el programador para ser procesada con la matriz de la imagen .jpg Matlab maneja los siguientes tipos de máscaras como se muestra en la tabla 4-2.

Tabla 4-2: Métodos y opresiones a utilizar en filtros para restauración de imágenes

| TIPO | SINTÁSIS Y PARÁMETROS |
|-------------|---|
| 'average' | >> fspecial('average',[r c]) filtro de la media r x c. Por defecto, aplica el filtro 3 x 3. Si ponemos un solo n |
| 'gaussian' | >> fspecial('gaussian',[r c],sigma) filtro gaussiano r x c con desviación típica sigma. Por defecto, aplica filtro gaussiano 3 x 3 con sigma=0,5 |
| 'prewitt' | >> fspecial('prewitt') filtro gradiente Prewitt 3 x 3. Devuelve la máscara mx que aplica el gradiente vertical. La máscara que aplica el gradiente horizontal se obtiene con la traspuesta de la anterior, es decir, >> my=mx'. |
| 'sobel' | >> fspecial('sobel') filtro gradiente Sobel 3 x 3. Devuelve la máscara mx que aplica el gradiente vertical. La máscara que aplica el gradiente horizontal se obtiene con la traspuesta de la anterior, es decir, >> my=mx'. |
| 'laplacian' | >> fspecial('laplacian', alpha) filtro laplaciano 3 x 3 cuya forma viene dada por alpha (valor entre 0 y 1). Por defecto, alpha = 0,5. |

Fuente: http://asignatura.us.es/imagendigital/Matlab_PID_1314.pdf
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017

El relleno será un valor numérico constante entero a libre albedrío por el programador.

La salida puede tomar: 'same' Mismo tamaño imagen original o 'full' Tamaño resultante con relleno (mayor).

Aplicando las propiedades de vecindad se puede mostrar la operación siguiente:

imfilter(f,w,25,'full')

Donde f será una matriz de 5 x 5 cuyos valores son:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & -3 & -2 & -1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ -1 & -2 & -3 & -2 & -1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Donde w:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Cuyo resultado será:

$$\begin{pmatrix} 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & -1 & -2 & -3 & -2 & -1 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & -1 & -2 & -3 & -2 & -1 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 1 & 2 & 3 & 2 & 1 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 \\ 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 & 25 \end{pmatrix}$$

2.2.4.1.1 Filtrado de la mediana

Partiendo del concepto de la mediana que dice a conjunto con un número impar de datos es, una vez ordenados los mismo, el dato que ocupa el lugar central se le denomina como la mediana.

El filtro de la mediana lo que realiza es sustituir el valor del pixel en análisis, por la mediana de los valores que están en un contorno de selección. De esta forma se homogeneizan los píxeles de intensidad muy diferente con respecto a la de los vecinos. Este tipo de filtro es bastante indicado cuando se tiene ruido aleatorio.

En Matlab la función que realiza este tipo de filtrado es *medfilt2*. Donde:

$$\text{Mediana} = \text{medfilt2}(\text{fg}, [n \times m]);$$

fg : es la matriz de entrada a la que se le aplica el filtro de la mediana utilizando por defecto una vecindad de 3X3, es la información matricial de una imagen capturada.

$[n \times m]$: es el contorno de la vecindad del pixel a analizar si no se la ubica por defecto será una matriz de contorno $[3 \times 3]$.

El proceso que realiza el filtrado de la mediana es ordenar los valores de la matriz de menor a mayor y en un número impar de datos el dato ubicado en el medio de los datos es la mediana:

$$d_1 \quad d_2 \quad d_3 \quad \dots \quad d_{(n-1)/2} \quad \dots \quad d_{n-2} \quad d_{n-3} \quad d_{n-4}$$

$$d_1 = \text{dato menor}$$

$$d_{n-4} = \text{dato mayor}$$

$$d_{(n-1)/2} = \text{mediana}$$

De una matriz de pixeles $p = \begin{matrix} & 3 & 35 & 12 \\ 6 & \mathbf{25} & 45 & \\ 15 & 17 & 22 & \end{matrix}$ sustituimos la mediana en el pixel estudiando (25).

3 6 12 15 **17** 22 25 35 45

17 es la mediana de tal forma que la nueva matriz será:

$$pf = \begin{matrix} & 3 & 35 & 12 \\ 6 & \mathbf{17} & 45 & \\ 15 & 17 & 22 & \end{matrix}$$

En este caso Matlab recibirá el código: `pf=medfilt2(p,[3 3]);`

2.2.4.1.2 Filtrado de la media lineal

Dado el concepto de media aritmética que dice la suma de todos los datos dividida entre el número total de datos.

Tomando una imagen $I(i,j)$, el proceso de media lineal o simplemente media consiste en crear una nueva imagen $g(i,j)$ donde cuya intensidad para cada píxel se obtiene promediando los valores de intensidad de los píxeles $I(i,j)$ incluidos en un entorno de vecindad predefinido, utilizando una máscara como las observadas en la tabla 4-2, este filtro obtiene el valor promedio de los pixeles.

En Matlab la función que realiza este tipo de filtrado es *imfilter* Donde:

$$media = imfilter(fg,h,option1,option2,...)$$

fg: es la matriz de entrada a la que se le aplica el filtro de la media.

h: es una máscara de filtro multidimensional pudiendo usar cualquier mascara tabla 4-2.

option1, option2, ...,: son opciones de frontera, de tamaño del array de salida y opciones de correlación o convolución.

El proceso que realiza el filtrado de la media se puede apreciar mejor en la figura 40-2.

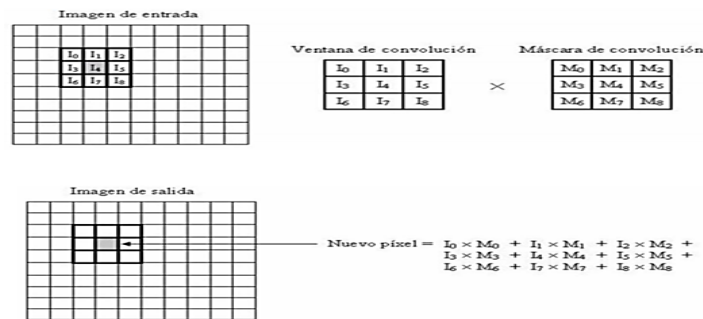


Figura 39-2: Proceso de operación en el filtrado de media

Fuente: <http://www.dc.uba.ar/materias/t1/2015/c2/archivos/ClaseRuidoFiltrado2C2015.pdf>

En Matlab también se pueden ocupar otros tipos de filtros donde se recomienda analizarlos con toma de datos en el lugar o medio donde se planea implementarlo, a continuación, se muestra una tabla de comandos útiles para la utilización de filtros en Matlab:

Tabla 5-2: Funciones de filtros para aplicar en Matlab

| Tipo de filtrado | Función en Matlab |
|------------------|--|
| Mediana | Filtrada = medfilt2(Imagen,[tamaño de ventana]) Por defecto: ventana = 3 x 3 |
| Máximo | Filtrada = ordfilt2 (Imagen,9,ones(tamaño de ventana)) |
| Mínimo | Filtrada = ordfilt2 (Imagen,1,ones(tamaño de ventana)) |
| Media aritmética | Filtrada = imfilter (Imagen,fspecial('average',[tamaño de ventana])) Por defecto: ventana = 3 x 3 |
| Gaussiano | Filtrada = imfilter (Imagen,fspecial('gaussian',[tamaño de ventana],varianza)) Por defecto: ventana = 3 x 3 |

Fuente: http://dmi.uib.es/~ygonzalez/VI/Material_del_Curso/Teoria/Tema5_Filtrado.pdf

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

2.2.4.2 Filtro de Umbralización

Función de Matlab que ayuda a segmentar los umbrales de intensidad de una imagen a escala de grises, tomando en cuenta un nivel de umbral del cual dependerá que los pixeles dependiendo del mismo se hagan 0 (color negro) o 1 (color blanco). La función que ayuda a realizar la umbralización es: $im2bw(I,U)$;

Donde U es el nivel de umbral del cual dependerá si el nivel de intensidad está o no por debajo de su valor para convertirlos en uno o cero. El nivel de umbral se puede obtener con la función: $U=graythresh(I)$;

Esta función aplica el método de Otsu, llamado en honor al Nobuyuki Otsu el cual utiliza métodos estadísticos, para resolver el problema. El utiliza la varianza (medida de dispersión de valores), en este caso el caso de un proceso de imagen a escala de grises (blanco y negro) la varianza será los niveles de gris de la imagen.

2.3 Servomecanismos

Un servomecanismo es un sistema formado por partes electrónicas y mecánicas y elementos móviles o fijos. Puede estar formado también de partes neumáticas, hidráulicas la función de un servomecanismo es poder ser controlado para tener precisión en una acción determinada. En la figura 2-41 muestra un esquema básico de lo que contiene un servomecanismo

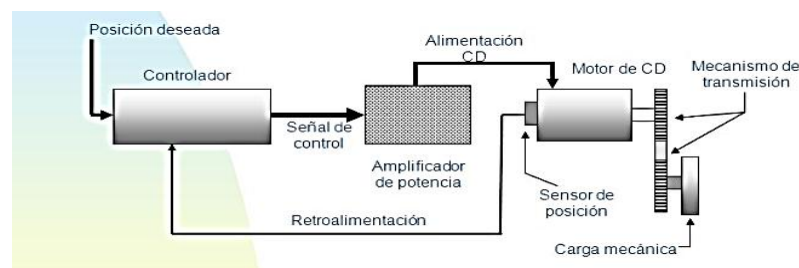


Figura 40-2: Esquema básico de un servomecanismo

Fuente: <http://www.datuopinion.com/servomecanismo>

Se puede clasificar a los servomecanismos en tres tipos:

- Servomecanismo Electromecánicos
- Servomecanismos Hidráulicos
- Servomecanismos Neumáticos

2.3.1 *Servomecanismos Neumáticos*

Son sistemas que usan la fuerza neumática con aire para realizar una acción de desplazamiento lineal o rotacional. Éstos se usan para niveles de potencia medios y en ambientes en los que resulta imposible instalar líneas eléctricas; son similares a los servomecanismos hidráulicos salvo en el servomotor, que en estos casos es un motor neumático (en base al aire comprimido).



Figura 41-2: Servomecanismo Neumático
Fuente: <https://www.emaze.com/@AICORLTC/Presentation-Name>

2.3.2 *Servomecanismos Hidráulicos*

Son sistemas que usan la fuerza hidráulica con aceite industrial para realizar una acción de desplazamiento línea o rotacional, son sistemas adaptados para niveles de potencia medios y altos, se caracterizan por utilizar un servomotor de tipo hidráulico dirigido por una sencilla válvula, aunque en los casos de potencias grandes también incorporan una bomba hidráulica. Estos servomecanismos por lo general se observan en grúas o en brazos donde se necesite mayor torque.



Figura 42-2: Servomecanismo Hidráulico
Fuente: <http://www.cytecta.com/>

2.3.3 *Servomecanismo Electromecánicos*

Son sistemas que usan la corriente eléctrica para realizar una acción de desplazamiento lineal o rotacional. Éstos se usan para niveles de potencia medios y bajos para ambientes en los que se necesita menos ruido y limpieza. En este tipo de sistemas se toma en cuenta un sistema

electrónico el cual controla el mecanismo. Dentro de este grupo podemos citar a los servomotores.



Figura 43-2: Servomecanismo Electromecánico

Fuente: <http://www.tresdprinttech.com/que-son-los-servomotores/>

2.4 Servomotor

Los servos son un tipo especial de motor de corriente continua, que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación.

Para ello, el servomotor espera un tren de pulsos que se corresponde con el movimiento a realizar. Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por ruedas dentadas y un circuito de realimentación, todo en una misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de 180° aproximadamente.

Se dice que el servo es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que exista una señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje.

Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar elementos de control como palancas, pequeños ascensores y timones. También se usan en radio-control, marionetas y, por supuesto, en robots.

Los Servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños. Un motor como el de las imágenes superiores posee internamente una circuitería de control y es sumamente potente para su tamaño. Un servo normal o estándar como el HS-300 de Hitec proporciona un par de 3 kg-cm a 4.8 V, lo cual es bastante para su tamaño, sin consumir mucha energía. La corriente que requiere depende del tamaño del servo. Normalmente el fabricante indica cual es la corriente que consume. Eso no significa mucho si todos los servos van a estar moviéndose todo el tiempo.

La corriente depende principalmente del par, y puede exceder un amperio si el servo está enclavado (http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/motores_servo.htm)



Figura 44-2: Servomotor

Fuente: <https://at89c52proyect.wordpress.com/2010/09/07/servomotores/>

2.4.1 Composición del servo

En la siguiente figura se muestra la composición interna de un servomotor. Se puede observar el motor, la circuitería de control, un juego de piñones, y la caja. También se pueden ver los 3 cables de conexión externa: uno (rojo) es para alimentación, Vcc (~ +5volts); otro (negro) para conexión a tierra (GND); el último (blanco o amarillo) es la línea de control por la que se le envía la señal codificada para comunicar el ángulo en el que se debe posicionar.

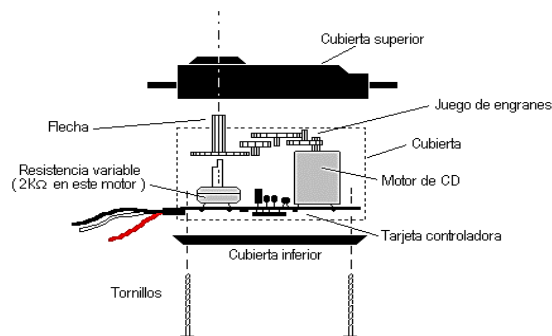


Figura 45-2: Servomotor ideal con sus partes

Fuente: <http://www.tresdprinttech.com/que-son-los-servomotores/>

El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro conectado al eje central del motor.

El potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es correcto, el motor volverá a la dirección correcta, hasta llegar al ángulo que es correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados. Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante.

Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

El voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si este necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor girará a menor velocidad. A esto se le denomina control proporcional.

2.4.2 *Funcionamiento del servomotor y control pwm*

Una modulación por anchura de pulso, PWM (Pulse Width Modulation), es uno de los sistemas más empleados para el control de servos. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período (normalmente), con el objetivo de modificar la posición del servo según se desee.

Para la generación de una onda PWM en un micro controlador, lo más habitual es usar un timer y un comparador (interrupciones asociadas), de modo que el micro controlador quede libre para realizar otras tareas, y la generación de la señal sea automática y más efectiva.

El mecanismo consiste en programar el timer con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción de overflow del timer, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produzca la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo. En la actualidad, muchos micro controladores, como el 68HC08, disponen de hardware específico para realizar esta tarea, eso sí, consumiendo los recursos antes mencionados (timer y comparador).



Figura 46-2: Rango del PWM a recorrer para operación del servo

Fuente: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/motores_servo.htm

La acción del sistema de control de un servo se limita a indicar en cual posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo que deberá girar el motor.

Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que dejarían al motor en ambos extremos (0° y 180°).

El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180°. Si se sobrepasan los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

El período entre pulso y pulso (tiempo de OFF) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso. Se suelen emplear valores ~ 20 ms (entre 10 ms y 30 ms). Si el intervalo entre pulso y pulso es inferior al mínimo, puede interferir con la temporización interna del servo, causando un zumbido, y la vibración del eje de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a estado dormido entre pulsos. Esto provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.

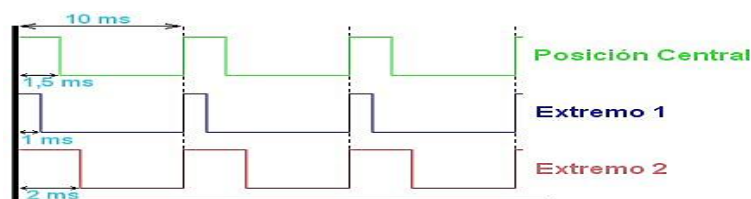


Figura 47-2: Tren de pulsos para el control de un servomotor

Fuente: http://platea.pntic.mec.es/vgonzalez/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/motores_servo.htm

2.4.3 Modelamiento de un servomotor corriente continua controlado por armadura

Se puede obtener un modelo matemático para el servomotor cc controlado por armadura considerando el circuito equivalente de la figura siguiente, donde $v_a(t)$ e $i_a(t)$ representan,

respectivamente, la tensión de entrada y la corriente en el circuito de armadura, $\omega(t)$ es la velocidad de giro y J y f son, respectivamente, la inercia de carga y la fricción. (Dorf, 2001).

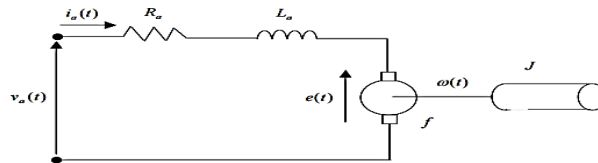


Figura 48-2: Servomotor corriente continua controlado por armadura
Fuente: <http://paginaspersonales.deusto.es/jgude/Sistemas%20Lineales/Pr%E1ctica4.pdf>

De la anterior figura se puede obtener:

$$\Omega(s) = \frac{\frac{k_m}{R_a \cdot f}}{(\tau_e s + 1) \cdot (\tau_m s + 1) + k_e \cdot \frac{k_m}{R_a f}} V_a(s) - \frac{\frac{(\tau_e s + 1)}{f}}{(\tau_e s + 1) \cdot (\tau_m s + 1) + k_e \cdot \frac{k_m}{R_a f}} T_d$$

Donde $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$, $\tau_m = \frac{J}{f}$, $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$, K_m es el par constante, T_d es el par de perturbación.

En función a la analogía de la ecuación antes mostrada se puede plantear un diagrama de bloques como se muestra en la figura 50-2

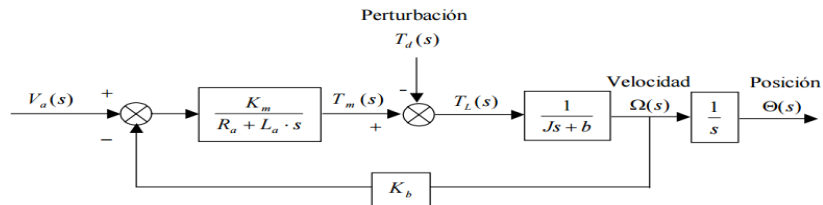


Figura 49-2: Diagrama del servomotor cc controlado por armadura
Fuente: <http://paginaspersonales.deusto.es/jgude/Sistemas%20Lineales/Pr%E1ctica4.pdf>

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍA

3.1 Enfoque de Investigación.

El enfoque que se le da a este trabajo de investigación es un enfoque cuantitativo cuyas características a emplear son la experimentación y el análisis causa y efecto, la misma que genera un proceso: secuencial, probatorio el mismo que analiza la realidad objetiva.

La bondad por las que se decide optar por el enfoque cuantitativo es debido a los siguientes fenómenos:

- Generalización de resultados
- Replica
- Predicción

Al estar inmerso en este proyecto de investigación se maneja porcentajes de accidentes, vehículos infractores, porcentajes de multas. A través de mediciones numéricas se busca cuantificar, reportar, medir que sucede, nos proporciona información específica de una realidad que podemos explicar y predecir; utiliza la estadística para entregar reportes de los acontecimientos investigados.

3.2 Alcance de la Investigación.

El alcance del proyecto es la de implementar y comprobar el funcionamiento del controlador para el servomecanismo de la cámara de visión artificial realizando pruebas para identificar mediante una toma de imagen el vehículo que infringió la luz roja del semáforo, mediante el control del servo mecanismo de la cámara de visión no se realizara el procesamiento de imagen por detención de caracteres de placa ya que se entiende que al existir ya algoritmos de reconocimiento y tratamiento de caracteres de placa este ya se lo pueda aplicar a la investigación. Con la identificación del vehículo lo que se pretende es mostrar la factibilidad de utilizar este tipo de sistema ya en procesos reales en avenidas transitadas donde se necesite de la ayuda de esta implementación.

Por último, se toma un porcentaje de aciertos en tomas de imágenes a vehículos infractores con el controlador incorporado al sistema emitiendo conclusiones sobre lo logrado.

3.3 Tipo y Diseño de Investigación.

Ya que el proyecto a investigar trata de verificar si es posible realizar un sistema de control de posicionamiento de un servomecanismo de identificación de vehículos que infringieran la luz roja del semáforo, se utilizó un tipo de investigación experimental ya que es el procedimiento más indicado para investigar relaciones de causa-efecto.

Con el fin de recolectar la información necesaria para responder a las preguntas de investigación, se utilizará un tipo de diseño de investigación experimental o de laboratorio.

3.4 Planteamiento del esquema del medio de operación del sistema

El medio o la población donde se realizó el estudio es en la ciudad de Riobamba – Ecuador de tal manera que se enfocara el problema para la solución del mismo como elementos equipos y normativas de la ciudad.

Antes de realizar el estudio de la investigación se plantea un esquema donde se muestra el medio donde se desarrollará el sistema a implementar tomando en cuenta algunas variables que se muestra a continuación en las respectivas figuras. Las opciones para implementar el sistema en los diferentes tipos de semáforos han sido muchas ya que un semáforo puede tener varios tipos de montajes como:

- Semáforos con soporte del tipo poste.
- Semáforos con soporte del tipo ménsula larga (postes tipo codo).
- Semáforos suspendidos por cables.

Por ser el más común el semáforo con soporte ménsula larga (postes tipo codo) en la ciudad donde se ha realizado el estudio y a su vez existe mayor afluencia de vehículos en alta velocidad, es este tipo de semáforo con soporte al que dedicaremos el estudio ver figura 1-3

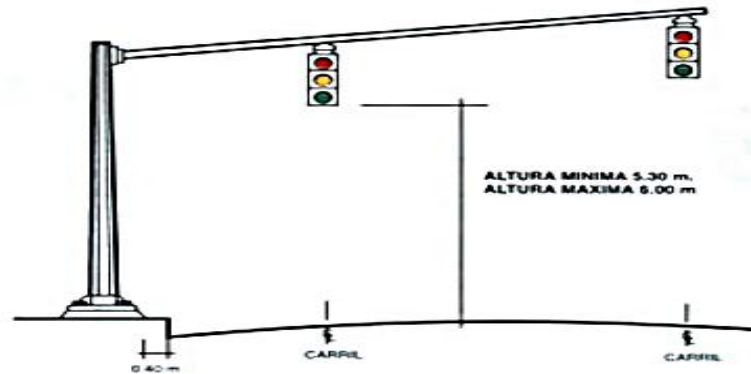


Figura 50-3: Semáforos con soporte del tipo poste

Fuente: https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Transito/cap5/seccion52.htm#fig56

El estudio de un proyecto de investigación en visión artificial debe analizar el medio donde se va a exponer la captura de imágenes a procesar por ello se ha visto la necesidad de que en función de la cámara web de video se analicen las variables de interés tanto dependientes como independientes del estudio.

VARIABLES DEPENDIENTES

- Distancia cámara - objeto vehículo (x)
- Distancia entre poste semáforo – poste cámara (d)
- Angulo de control de visión- set point (θ)
- Nivel de voltaje Lógico
- Nivel de resistencia Potenciómetro (Sensor de realimentación)
- Enfoque y Brillo de la cámara

VARIABLES INDEPENDIENTES

- Distancia suelo – poste (5m)

Se toma en cuenta que la ubicación de la cámara juega un papel fundamental en el estudio ya que dependiendo de una buena ubicación se tendrá una mejor recepción de imagen y con ello una mejor lectura al procesar imágenes de colores.

Alguna de las razones por las que se ubicó la cámara como se muestra en la figura 2-3 fueron:

- Incidencia en el grado de captura de video de la cámara
- Impedimento en la visión por parte de conductores para el semáforo

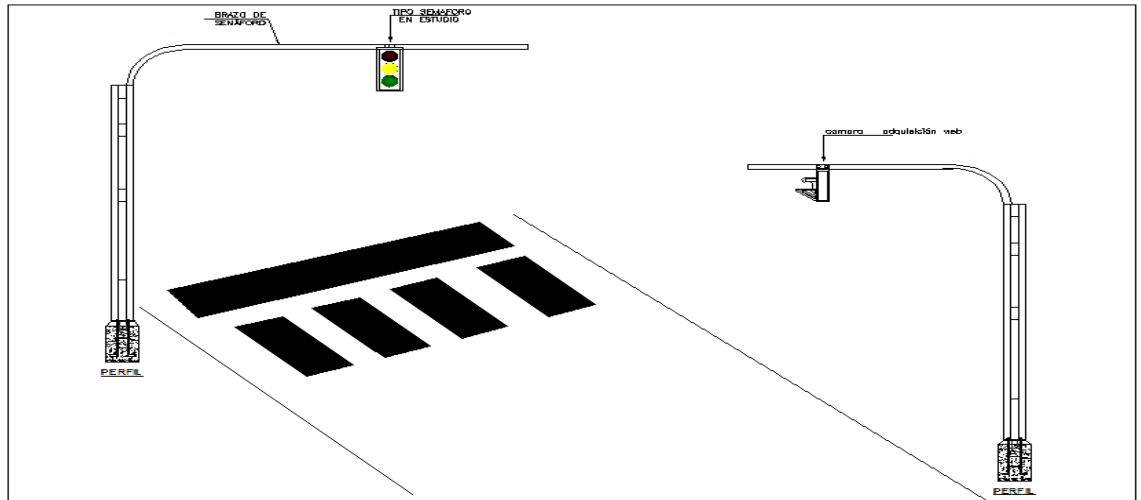


Figura 51-3: Modelo de ubicación de estudio en la vía del poste y cámara de visión.
 Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017.

Para localizar de mejor manera distancia y variables del medio donde se implementará el sistema se muestra figura 3-3 una vista frontal del medio a operar el sistema:

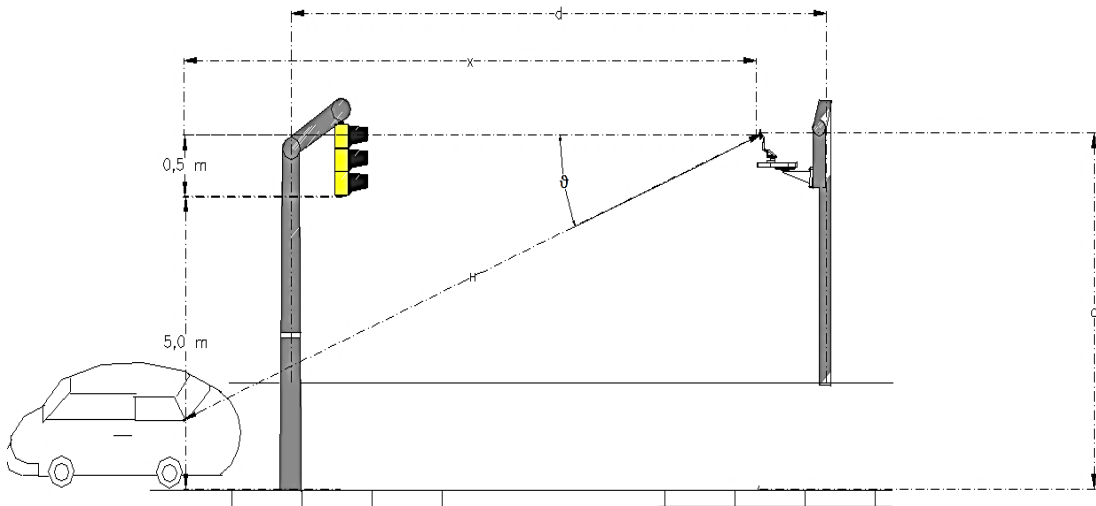


Figura 52-3: Vista frontal distancias y variables del medio de ubicación del sistema a implementar

Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017.

Tomando en cuenta la figura anterior se puede realizar los siguientes cálculos considerando siempre el enfoque de la cámara de visión.

Teniendo los datos de:

- Altura del suelo poste designándolo como $A_p=5,0$ m
- Distancia de la base del semáforo al color rojo $A_r=0,5$ m
- Distancia del suelo a la base del semáforo a.

Se puede obtener $a = Ap + Ar$; $a = 5,0 + 0,5$; $a = 5,5m$

Por estudio en campo se pudo observar que a una distancia de 15,11 m de la cámara al objeto a identificar (carro) se tiene un enfoque muy bueno, tomando en cuenta que a más distancia de separación entre postes se evita poder tapar la visión del semáforo a los conductores.

Ya con los datos de:

$a=5,5$ m
 $x=15,11$ m

Se puede aplicar el teorema de Pitágoras para encontrar el ángulo de control de visión Set-Point:

Ecuación 54-3

$$\text{tang}(\vartheta) = \frac{a}{x}$$

$$\text{tang}(\vartheta) = \frac{5,5}{15,11}$$

$$\vartheta = \text{tang}^{-1}\left(\frac{5,5}{15,11}\right)$$

$$\vartheta = 20^\circ$$

Es este ángulo con el que se trabajó como el Set-Point del sistema.

Una vista superior nos ayudara a ver la localización de los postes tanto del semáforo como de la cámara web como se aprecia en la figura 4-3.

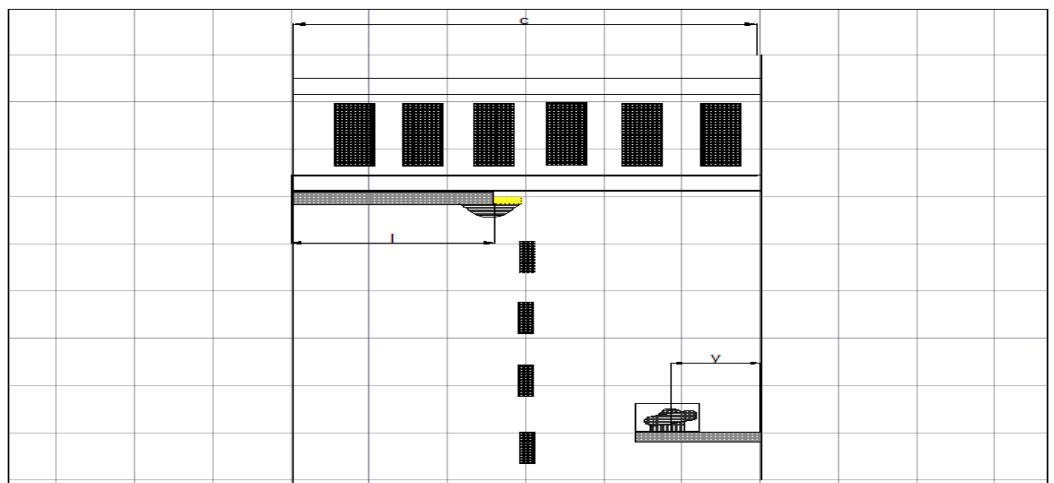


Figura 53-3: Vista superior de la ubicación de postes de semáforo y cámara de visión
Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017

En la figura anterior se muestra la vista superior de la cámara de visión la cual tuvo la efectividad para lograr cubrir el ángulo de visión es decir todo el paso cebra en este caso la variable c .

Otro punto fundamental que se mencionara luego es el brillo al que se somete la cámara de visión para lo cual en su momento se desarrollara un filtro de visión artificial.

3.5 Esquema General del Sistema Requerido a Implementar

Para empezar con el análisis de la investigación se muestra un esquema general el cual se llegó a implementar mediante el estudio y la investigación pertinente, dicho esquema muestra los equipos y el orden de pasos con los que cuenta la implementación del sistema como se puede apreciar en la figura 5-3.

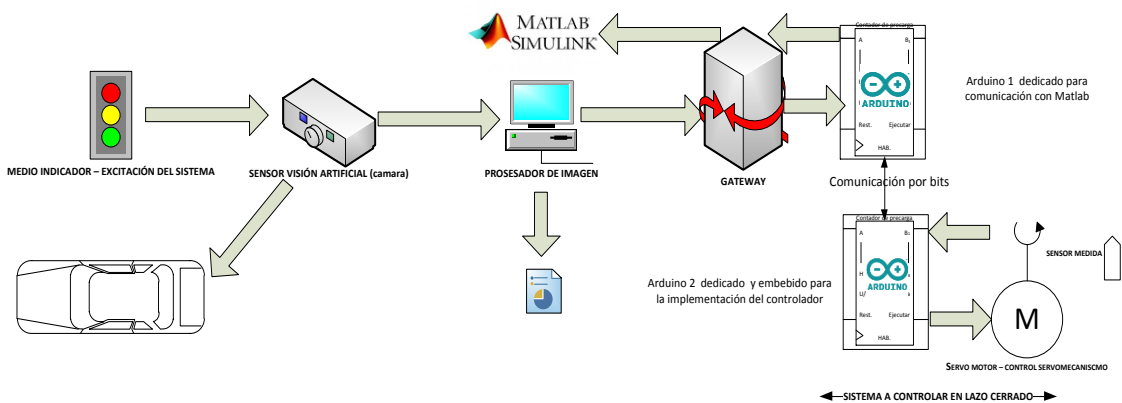


Figura 54-3: Esquema general del sistema implementado.
Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017

3.5.1 Medio indicador – semáforo

El semáforo es quien excita al sistema para que el servo motor del mecanismo de la cámara pueda posicionarse en los grados adecuados para capturar una imagen del vehículo que ha infringido la luz roja. El semáforo emite contantemente tres tipos de colores: rojo, verde, amarillo y nuevamente rojo verde amarillo, tomando en cuenta el tiempo entre colores dependiendo del lugar o avenida donde esté ubicado por lo general los tiempos de encendido de los colores dentro del perímetro urbano en estudio la ciudad de Riobamba – Ecuador son:

Color rojo: 30 segundos

Color verde: 30 segundos

Color amarillo: 5 segundos

Estos tiempos son importante para el comportamiento del sistema el cual para actuar tendrá en cuenta únicamente el color rojo del semáforo, color por el cual excitará al sistema para que se posicione adecuadamente para capturar algún carro infractor, el tiempo que demora el semáforo en rojo será el mismo tiempo que la cámara este en modo de captura de imagen, cuando el semáforo regrese al color verde automáticamente el servomecanismo se posicionara en estado de reposo o posición normal.

3.5.2 *Sensor de visión artificial – cámara.*

La cámara de visión artificial en el sensor que emite los datos de recepción de colores al computador los mismo que serán procesados en un programa de visión artificial, la cámara que se utiliza para este proyecto de investigación es:

Cámara Web Logitech B910 HD pantalla panorámica 16:9, 10mpx.

Esta cámara web es de tipo plug and play y se conecta al computador vía USB. Se debe mencionara que la cámara que se selecciono fue adecuada para el medio en el que se necesita probar el sistema la misma que tiene una alta definición para ayudar a capturar mejor el contraste de colores y así ayudar a la detención de color ayudando al diseño de un filtro de imagen que posterior se hablara.

3.5.3 *Procesador de imagen – Matlab.*

Se ha seleccionado a Matlab como el software de procesamiento de imagen por la flexibilidad, procesamiento, análisis matemático, enfoque en resoluciones de control y adaptabilidad de comunicación con tarjetas de adquisición de datos (DAQ), en el mismo se ha programado un algoritmo para el reconocimiento de imágenes de color rojo.

Matlab recibe datos por medio del sensor de visión artificial los mismo que son procesados y según su algoritmo emitirá ordenes de posicionamiento para el servomecanismo mediante una tarjeta de adquisición y envío de datos (Arduino 1).

Este software tiene una comunicación de enlace con Arduino instalando ciertas librerías de código abierto.

Matlab también cuenta con algunas desventajas al momento de una implementación industrial en tiempo real ya que sería recomendable utilizar un programa dedicado embebido de procesamiento de imagen para que sea más rápido al momento de analizar imágenes y colores.

3.5.4 *Arduino1 – Dedicado para comunicación con Matlab.*

Mediante el análisis de ventajas y desventajas que ofrece una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), se ha seleccionado para esta investigación una tarjeta Arduino Mega por estar adecuada a las necesidades que requiere la implementación tanto por su poder de comunicación y lectura de datos.

Teniendo en consideración el Arduino 1 no es orientada a cumplir una acción embebida es decir no tiene un programa de ejecución en su memoria, solo sirve para específicamente dos funciones la primera función comunicarse entre el software de procesamiento de imagen y el servomecanismo (indirectamente) y la segunda función enviar datos para el posicionamiento al controlador implementado en un Arduino 2.

Las características de esta tarjeta de procesamiento, adquisición y escritura de datos, Arduino mega son:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de – 7-12V.
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM).
- 16 entradas análogas.
- 256k de memoria flash.
- Velocidad del reloj de 16Mhz.

3.5.5 *Arduino 2 – Dedicado y embebido para implementar el controlador del sistema*

Esta tarjeta de adquisición y escritura de datos tiene las mismas características del Arduino 1, es decir será un Arduino Mega.

Esta etapa es la más importante del sistema ya que en esta tarjeta lleva un programa que es el controlador del sistema y efectúa la comunicación directamente con el servo motor.

El Arduino 2 se esta comunicado siempre con el Arduino 1. El Arduino 1 envía un bit al Arduino 2 para que efectué el proceso de desplazamiento del servo motor utilizado el algoritmo de control implementado en el Arduino 2.

El Arduino 2 realiza las funciones de:

- Lectura del bit del posicionamiento.
- Escritura de la posición angular al servo motor.
- Lectura del sensor de posición del servo motor en lazo cerrado.
- Ejecución del controlador.

3.5.6 *Servo motor*

El servo motor apropiado para el mecanismo a implementar es un Sg90 el cual se adapta al objetivo de implementación, se lo puede controlar de 0° a 180°, tomado en consideración que el que activa este servo motor es el Arduino 2. El servo motor tiene que desplazarse de 0° a un set point de 20° para el enfoque de la cámara. Este servo motor a su vez estará montado fijo con el mecanismo que sostiene a la cámara de video.

3.5.7 *Sensor de posicionamiento angular – potenciómetro*

Un potenciómetro de 10 Kohm es el sensor que lee el posicionamiento del servo mecanismo, el mismo que esta adecuado e instalado de forma precisa para su lectura. Este sensor o potenciómetro es aquel que me permite realizar el control del sistema en lazo cerrado, tomando en consideración el divisor de voltaje que tome por sufrir un desplazamiento angular.

3.5.8 *Mecanismo para el desplazamiento angular de la cámara*

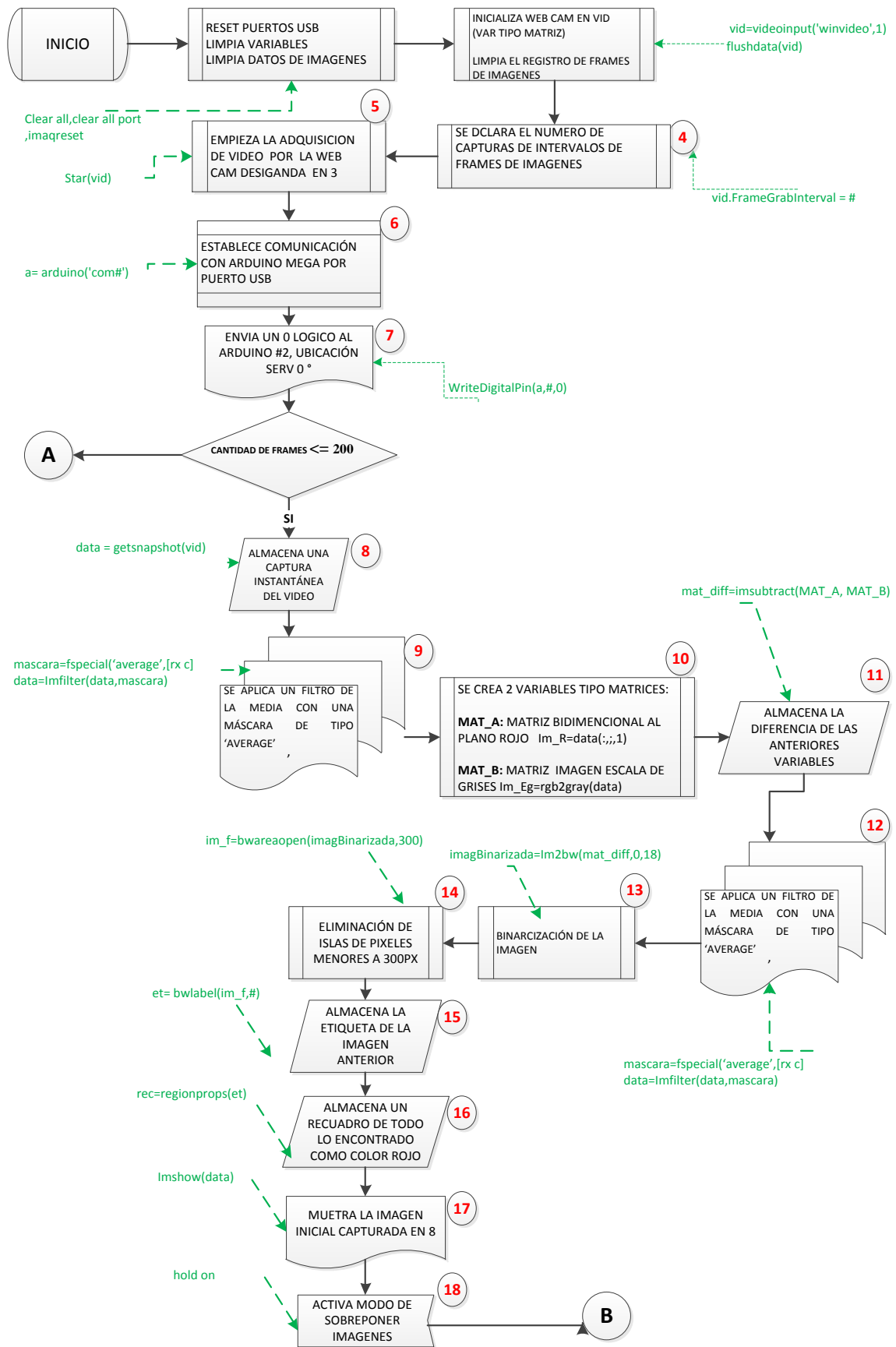
El mecanismo que sostiene la cámara web es un mecanismo pan tilt para servos con dos grados de libertad útiles para este caso un solo grado de libertad.

El grado de libertad a utilizar es el del eje 'y' para el control de la altitud de la cámara que será desde 0° a un set point de 20°. El servo motor se lo incorpora en la ranura del grado libertad adecuado para que este realice el desplazamiento, todo el servo mecanismo está fijado al controlador del Arduino 2.

3.6 Procesamiento de imagen en Matlab

Para el procesamiento de imagen se estableció un algoritmo de trabajo el cual fue el que sirvió para codificar el programa de visión artificial en Matlab.

Se deberá tomar consideración que el análisis para realizar este algoritmo se basó en pruebas de laboratorio con miras a realizar pruebas de campo posterior a su implementación y correcto funcionamiento, en la figura 6-3 se muestra el algoritmo basado en código de Matlab con conexión Arduino Mega.



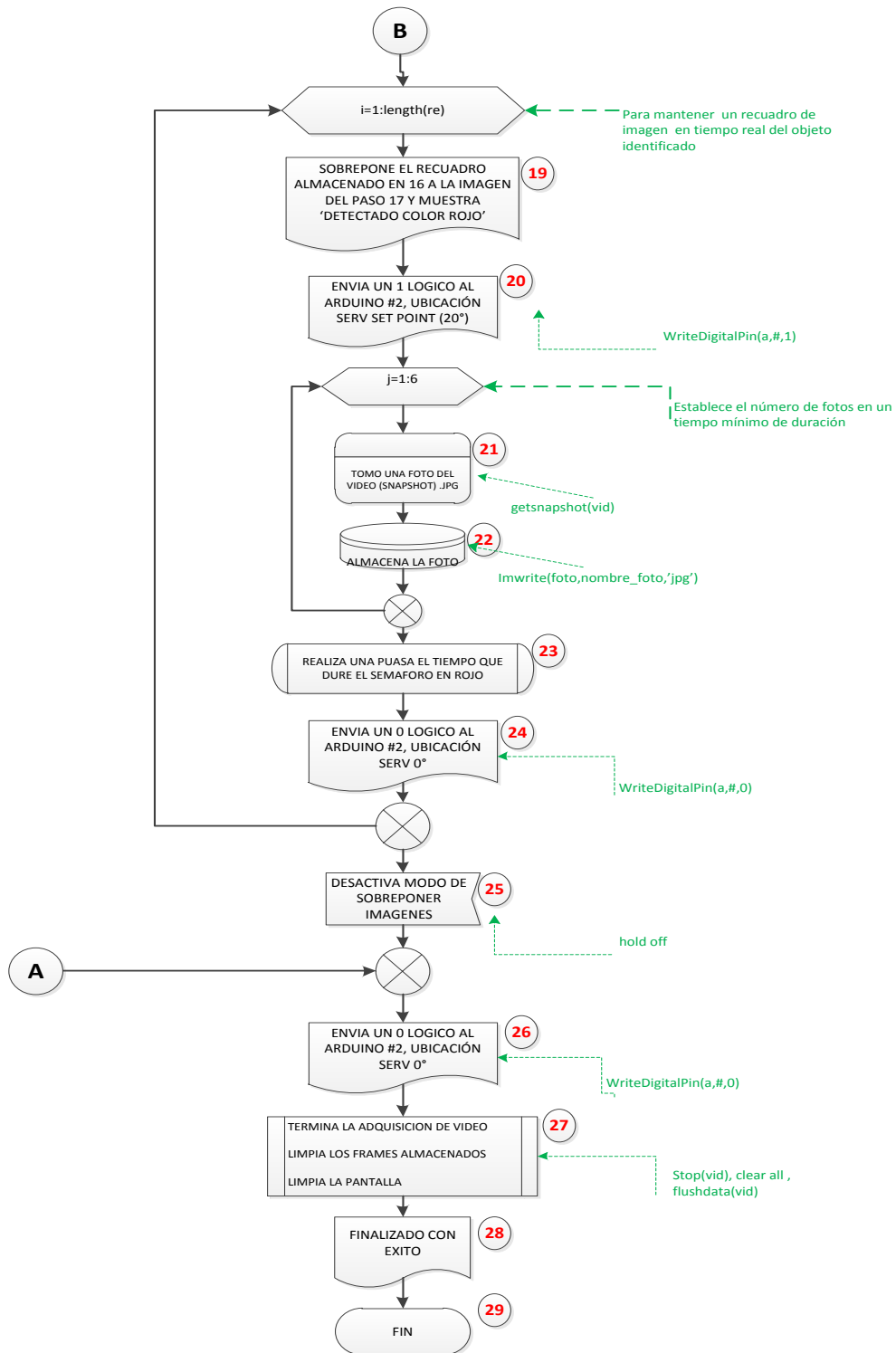


Figura 55-3: Diagrama de flujo de proceso de visión artificial
 Realizado por: NÚÑEZ, Christiam. 2017

3.6.1 Comunicación Matlab -Arduino

El análisis previo a la codificación del programa de visión artificial en Matlab es la comunicación entre Matlab y Arduino estableciendo una puerta de enlace (Gateway) de

comunicación, esta puerta de comunicación proporciona Matlab con librerías las cuales se instalan desde la misma página web de Matlab.

Posterior se indica a la placa de Arduino que va establecer comunicación con Matlab mediante una codificación que se deberá correr en la misma placa Arduino, código libre que está disponible en la web.

Una de las primeras órdenes que probó desde Matlab es la identificación de la placa Arduino por el puerto USB pertinente:

```
a=arduino('COM#')
```

donde # es el número de puerto que la misma maquina o computador designa arbitrariamente a la placa Arduino. Si la comunicación esta perfecta no existirá error de compilación, ahora la variable 'a' tiene privilegios de las librerías de Matlab-Arduino.

Posterior se llamó a la librería servo para poder comunicar en forma directa desde Matlab al servo-motor con la orden:

```
s=servo(a , #p)
```

Dice que en la variable 's' asigne la orden de la función servo de la comunicación Arduino de la variable 'a'. Done #p es el número de pin de la salida de Arduino en la que se conectara el color del cable amarillo del servo motor posterior el color café a Gnd y rojo a 5V.

Para poder enviar una orden de giro desde Matlab a servo motor se deberá escribir:

```
writePosition(s, G)
```

Dice escriba en el servo de la comunicación Arduino de la variable 'a' Ggrados. Donde G es la orden para mover el servo, el valor que puede tomar G puede tomar valores de 0 a 1.

- 0 para enviar una orden de 0° al servo
- 1 para enviar una orden de 180° al servo

Para enviar una orden entre 0 -1 es decir un valor en grados entre 0 – 180 se debe realizar una regla de tres, por ejemplo, si e necesita escribir 20°

1..... 180°

?.....20°

$$? = \frac{20}{180} = 0.111111111$$

De tal manera que al escribir: *writePosition* (s, 0.111111111111) el servo se posicionara en 20°.

3.6.2 *Comunicación Cámara web-Matlab.*

Para poder tener comunicación con la cámara web y poder recibir imágenes en Matlab desde cualquier cámara web se debe instalar las librerías correspondientes:

DCAM Hadware

USB Webcams

USB Video

Una vez instalados estos paquetes de librerías se procede a comprobar la comunicación ya puesto el usb de la cámara en el computador y ahora digitando en el editor de texto de Matlab lo siguiente:

```
webcamlist
```

```
cam = webcam(@)
```

```
%cam = webcam(@)
```

```
preview(cam);
```

```
pause (50);
```

```
clear cam;
```

Donde @ será el número correspondiente a la cámara que se quiere que se muestre por defecto si ponemos 1 nos mostrara la propia cámara del computador si esta lo tiene:

3.6.3 *Selección del filtro de visión artificial*

Una de las desventajas al usar visión artificial en el medio expuesto es que los niveles de luxes son muy grandes y no se comparan con los del laboratorio o con lugares cerrados de 750 lux.

El nivel de luxes en el medio puede variar con el clima así tenemos:

Luz diurna 120000 – 110000 lux

Sombra iluminada por cielo completamente azul al medio día 20000 lux

Típico día nublado al medio día 10000- 25000 lux

Eventualmente para toma de datos en la implementación de nuestro proyecto se debe tomar en cuenta este análisis ya que a mayor luxes se tiene más distorsión de nivel de luz para capturar una imagen, por esta razón se ha diseñado un filtro de visión artificial para poder apreciar y operar mejor las imágenes capturadas por el video , a las capturas instantáneas del video las nombraremos frames o cuadros, estos frames deberán ser imágenes lo más comprensibles para el computador y así poder operar matemáticamente durante el algoritmo, es por eso que según el estudio realizado hemos visto factible ocupar en dos instancias el proceso de filtrado de una imagen.

En la figura 6-3 en los pasos 9 y 12 se observa el proceso de filtrado. Tómese en cuenta que operar matemáticamente un frame o cuadro es operar una matriz ($n \times m$) donde n serán las filas y m las columnas de una matriz.

Al realizar un filtro también se realiza una operación matricial, el filtro que se ha diseñado conocido como filtro de media con mascara de tipo 'average' y se lo implementa de la siguiente manera:

Dada una imagen en formato matricial $I(i,j)$, obtenida a través de un frame o cuadro de video, el proceso para la creación de un filtro consiste en crear una nueva imagen $I_m(i,j)$, donde la intensidad para cada pixel es el resultado de promediar los valores de intensidad de los píxeles $I(i,j)$ incluidos en un entorno de vecindad predefinido.

Cabe mencionar que los filtros implementados en Matlab pueden usarse con dos tipos de imágenes:

- Full color
- Escala de grises

El filtro de tipo *media* para un filtrado de full color

El filtro de tipo *mediana* para un filtrado de una imagen a escala de grises.

En un filtrado en tiempo real de la captura de un cuadro de imagen o frame se deberá usar eventualmente dos instancias de filtrado:

1. Captura del frame o cuadro a full color
2. Durante el procesamiento del frame o cuadro (proceso en el cual la imagen se trata en escala de grises)

La primera instancia de filtrado ayudara a corregir atenuaciones de color y ruido de la imagen que por incidencias del medio alteró la toma de captura del frame o cuadro.

La segunda instancia de filtrado ayudara a corregir o aclarar ciertas lecturas que por defectos del sensor de visión (cámara web) se presenten durante el procesamiento de la imagen.

Para el diseño del filtrado se analizó en campo dos capturas de cuadros de imagen, en la que el semáforo en detención se encuentra en un nivel de luxes medio en color rojo y color verde, sin incidencia directa de una luz hacia la cámara.

A cada captura de imagen (semáforo en rojo, semáforo verde) se la almacena como una variable tipo matriz llamada `dato_rojo` , `dato_verde`.

Donde `dato_verde` o `dato_rojo` tendrá una matriz de rango 747x1328x3 uint8 enteros de 8 bits en el rango de [0,255].

Para aplicar el análisis de filtrado por media se necesita una máscara para que pueda ser evaluado y promediada con el valor de `dato_rojo` o `dato_verde`, para ello se utilizara la máscara 'average' usando la función `fspecial('average')`, la cual es una matriz del tipo 3x3 double:

Mascara `fspecial('average')`=

$$\begin{pmatrix} 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 \\ 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 \\ 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 & 0.1111111111111111 \end{pmatrix}$$

Con una máscara de tipo 'average' se puede aplicar la función de filtrado por media utilizando la función:

`imfilter(data,m1)`

Donde:

data = La matriz de la imagen capturada ya sea *dato_rojo* o *dato_verde*.

mI = La máscara fspecial('average')

Posteriormente en la etapa de resultados se muestra las imágenes del filtro aplicado bajo respuesta de varias instancias de luces del medio.

3.6.4 Almacenamiento de imágenes de vehículos detentados por infracción

El poder identificar el vehículo que infringió la luz roja es de interés mas no el de identificar por caracteres su número de placa, tómesese en cuenta que el tiempo máximo que dura en roja un semáforo dentro de la ciudad de Riobamba es de 30 segundos, limitando a que se realice una identificación por caracteres de placa en 30 segundos en tiempo real, para lo cual se ha visto de acuerdo a un previo a análisis que el mayor número de infracciones por luz roja en el ínstate que el semáforo cambia a rojo. Por esta razón se necesitará que la captura de imagen sea relativamente rápida con respecto al vehículo en movimiento.

En la figura 6-3 se puede observar en el paso 21 y 22 el proceso de almacenamiento el cual se los realiza por capturas instantáneas en un numero de 5 fotografías, las mismas que serán gravadas en el disco del computador donde correrá en tiempo real Matlab en formato .jpg.

Posterior estas imágenes se las podrá aplicar otro programa el cual no es el estudio para el caso de esta investigación en la cual se pueda aplicar identificación de caracteres.

3.7 Modelo de la planta del sistema

Para obtener el modelo de la planta del sistema se realiza pruebas en lazo abierto del sistema dando órdenes de escritura desde Matlab al servo motor y dando lectura de la posición del mismo utilizando funciones de Matlab como:

```
writePosition(s,0) % escriba la posición en 0°
```

```
writePosition(s,0.33333) % escriba la posición en 20°
```

```
pos(contador) = readPosition(s)*180
```

Donde:

- s la variable tipo servo declarada a partir de una comunicación con la placa Arduino.
- pos(contador) en un vector que almacenara las distintas posiciones que tome en un recorrido de 0° a 20° el servo motor.
- 0.33333333 son los 20° en una regla de tres para que interprete Matlab, este es el Set-point del sistema anteriormente encontrado.

La lectura de datos que se arrojó este proceso con una cantidad de 40 muestras se observa en la tabla 1-3.

Tabla 6-3: Lectura de grados en el recorrido del servo mecanismo de 0 a 20° con 40 muestras

| Muestras | Lectura en grados | Muestras | Lectura en grados | Muestras | Lectura en grados | Muestras | Lectura en grados |
|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
| 1,00E-01 | 0 | 1,10E+00 | 19,8 | 2,10E+00 | 19,8 | 3,10E+00 | 0 |
| 2,00E-01 | 1,8 | 1,20E+00 | 19,8 | 2,20E+00 | 18 | 3,20E+00 | 0 |
| 3,00E-01 | 3,6 | 1,30E+00 | 19,8 | 2,30E+00 | 16,2 | 3,30E+00 | 0 |
| 4,00E-01 | 5,4 | 1,40E+00 | 19,8 | 2,40E+00 | 14,4 | 3,40E+00 | 0 |
| 5,00E-01 | 7,2 | 1,50E+00 | 19,8 | 2,50E+00 | 12,6 | 3,50E+00 | 0 |
| 6,00E-01 | 10,8 | 1,60E+00 | 19,8 | 2,60E+00 | 10,8 | 3,60E+00 | 0 |
| 7,00E-01 | 12,6 | 1,70E+00 | 19,8 | 2,70E+00 | 7,2 | 3,70E+00 | 0 |
| 8,00E-01 | 14,4 | 1,80E+00 | 19,8 | 2,80E+00 | 5,4 | 3,80E+00 | 0 |
| 9,00E-01 | 16,2 | 1,90E+00 | 19,8 | 2,90E+00 | 3,6 | 3,90E+00 | 0 |
| 1,00E+00 | 18 | 2,00E+00 | 19,8 | 3,00E+00 | 1,8 | 4,00E+00 | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Con la tabla anterior se generar la siguiente figura que representa la señal respuesta de salida del sistema.

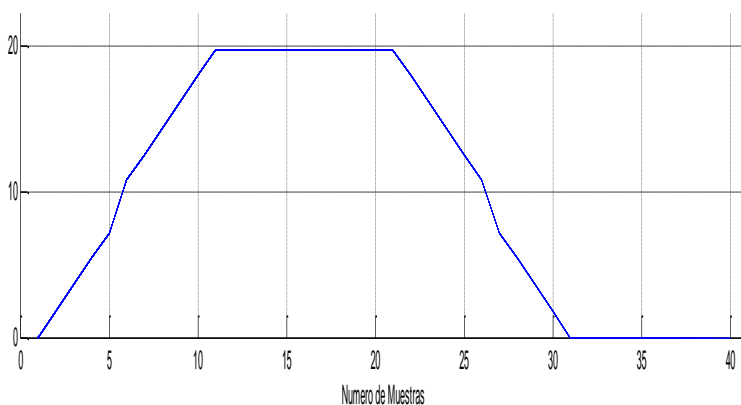


Figura 56-3: Grafica de Grados vs muestras del recorrido del servo mecanismo de 0 a 20°
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

1.- A partir de la curva de respuesta del servomecanismo figura 7-3 obtenida a través de la lectura de la posición del servo. Se procede a realizar un análisis concerniente a la obtención de la función de transferencia de la planta del sistema.

Los datos de la tabla 1-3 son llevados a Matlab, posterior graficados y observamos haciendo un cercamiento al contorno justo antes que se estabilice a 20° el servo mecanismo como se puede observar en la figura 8-3.

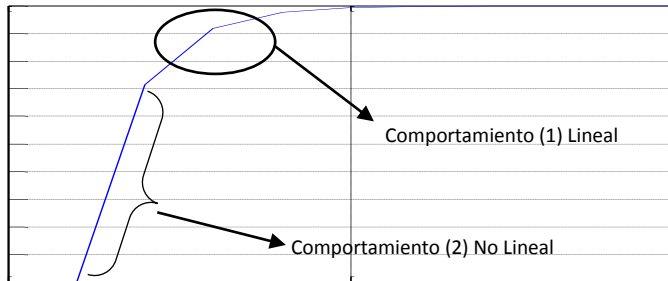


Figura 57-3: Análisis del comportamiento de la respuesta del servo mecanismo
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En el comportamiento número 1 de la figura 8-3 se observa un comportamiento lineal equivalente a un sistema de primer orden, tipo cero semejante a $G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$, tómesese en cuenta que la curva de la respuesta del sistema mostrada en la figura 8-3 está siendo representada: en el eje de las ordenadas $y(t)$ a la posición del servo, y en el eje de las abscisas t al tiempo de evaluación como se muestra en la tabla 1-3.

El comportamiento número 2 de la figura 8-3 se puede observar un comportamiento no lineal semejante al control de gradiente, donde la velocidad de cambio en el dispositivo se encuentra saturada, siendo esto equivalente a una gobernación de velocidad la cual no puede ser superada, lo que conlleva a un desplazamiento a velocidad constante en ese intervalo de no linealidad.

2.- Empleando la identificación ARX (AutoRegresive with exogenous input, auto-regresivo con entrada exógena) para la identificación del comportamiento lineal bajo la asunción o procedencia del modelo $G(s)$ planteado se llega a obtener la función de transferencia de la planta del sistema donde:

Ecuación 55-3

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

3.- Una vez definida la función de transferencia de la planta del sistema se procede a seleccionar el método de discretización de la ecuación de la función de transferencia de la planta del sistema $G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$, se toma en consideración aplicar los conceptos del capítulo 2 referente al tema de discretización de señales en el cual por ser un sistema de primer orden, y dado que se desea

tener un control expedito sobre el estado discreto respecto a una equivalencia con el estado continuo, resulta conveniente aplicar el método Euler en atraso (Back- Euler) que su fundamenta en el método de la aproximación de la integral empleando rectángulos inscritos, planteado por Rieman, y que ha sido presentado en este documento como el método de Euler II , cuyos equivalentes continuo y discretos, presentados empleando las transformadas tanto de Laplace como discreta en Z es:

Ecuación 56-3

$$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T_0 S}{z - 1}$$

4.- Ya con el método de discretización procedemos a obtener la función de transferencia de la plata $G(z)$

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

$$\therefore s = \frac{z - 1}{T_0 S}$$

$$G(z) = \frac{k}{\tau \left(\frac{z - 1}{T_0 S}\right) + 1}$$

$$G(z) = \frac{k}{\frac{\tau}{T_0 S} \cdot z - \frac{\tau}{T_0 S} + 1}$$

Ecuación 57-3

$$G(z) = \frac{k}{\frac{\tau}{T_0 S} \cdot z + \left(1 - \frac{\tau}{T_0 S}\right)}$$

5.- Se considera el diagrama de bloque de la estructura ARX de la forma:

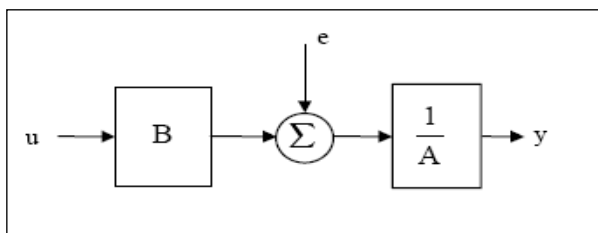


Figura 58-3: Diagrama de bloques estructura ARX.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Donde observándola en forma discreta se tiene

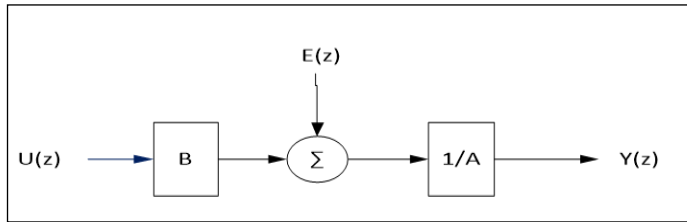


Figura 59-3: Diagrama de bloques estructura ARX.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

De la figura anterior donde B y A son polinomios en función de z de la variable discreta.

6.- En consideración de la estructura planteada bajo el esquema de identificación considerando en el diagrama de bloque de la estructura ARX donde $E(z) = 0$

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)}$$

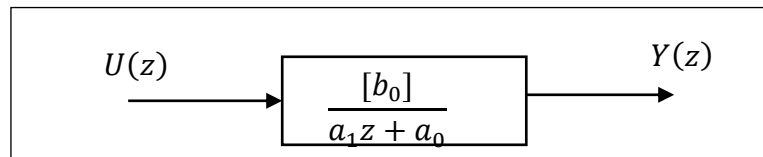


Figura 60-3: Diagrama de bloque de la estructura ARX donde $E(z)=0$
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

$$Y(z)[a_1 z + a_0] = b_0 U(z)$$

$$a_1 \cdot z \cdot Y(z) + a_0 \cdot Y(z) = b_0 U(z)$$

Al dividir para z

$$a_1 \cdot Y(z) + a_0 \cdot z^{-1} \cdot Y(z) = b_0 \cdot z^{-1} \cdot U(z)$$

$$Y(z) = \frac{1}{a_1} [b_0 \cdot z^{-1} \cdot U(z) - a_0 \cdot z^{-1} \cdot Y(z)]$$

$$Y(z) = \frac{b_0}{a_1} \cdot z^{-1} \cdot U(z) - \frac{a_0}{a_1} \cdot z^{-1} \cdot Y(z)$$

Ecuación 58-3

$$Y(z) = \theta_1 \cdot z^{-1} \cdot U(z) - \theta_2 \cdot z^{-1} \cdot Y(z)$$

7.- Bajo el concepto de identificación la obtención de parámetros en conjunto con los atrasos se las señales se entrada- salida, permiten predecir la salida de la misma.

Ecuación 59-3

$$\hat{Y}(z) = \theta_1 \cdot z^{-1} \cdot U(z) - \theta_2 \cdot z^{-1} \cdot Y(z)$$

8.- Los datos $Y(z)$ y su predicción $\hat{Y}(z)$ empleando una función de costo globalizadora permite encontrar el valor de los parámetros θ que permiten el mejor ajuste de la predicción de $\hat{Y}(z)$. La función de costo analítica a minimizar es la que totaliza la suma del cuadrado del error de predicción.

Ecuación 60-3

$$J = \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z))^2$$

Siendo N la cantidad de muestras tomadas.

9.- La función de costos planteada fue propuesta por Gauss y su minimización nos lleva a LSE, que es la minimización del error cuadrático (Less square error). El análisis matemático es como se plantea a continuación.

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_1} = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 0$$

10.- Partiendo de $\frac{\partial J}{\partial \theta_1}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z))^2}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_1} &= 2 \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z)) \cdot \frac{\partial (Y(z) - \hat{Y}(z))}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_1} &= 2 \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z)) \cdot (-1) \frac{\partial \hat{Y}(z)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_1} &= 2 \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z)) \cdot (-1) \cdot (z^{-1} \cdot U(z)) \\ \frac{\partial J}{\partial \theta_1} &= -2 \sum_{i=1}^N Y(z)(z^{-1} \cdot U(z)) - \hat{Y}(z)(z^{-1} \cdot U(z)) \end{aligned}$$

Remplazando la ecuación que se observa en el paso 7 se tiene:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_1} = -2 \sum_{i=1}^N Y(z)(z^{-1} \cdot U(z)) - (\theta_1 \cdot (z^{-1} \cdot U(z))^2 - \theta_2 \cdot (z^{-1} \cdot Y(z)) \cdot (z^{-1} \cdot U(z)))$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_1} = -2 \sum_{i=1}^N [Y(z)(z^{-1}.U(z)) - \theta_1.(z^{-1}.U(z))^2 + \theta_2.(z^{-1}.Y(z)).(z^{-1}.U(z))]$$

Si: $\frac{\partial J}{\partial \theta_1} = 0$

$$\sum_{i=1}^N [Y(z)(z^{-1}.U(z)) - \theta_1(z^{-1}U(z))^2 + \theta_2(z^{-1}Y(z)).(z^{-1}U(z))] = 0$$

$$-\theta_1 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2] + \theta_2 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}Y(z)).(z^{-1}U(z))] = - \sum_{i=1}^N [Y(z).(z^{-1}.U(z))]$$

Ecuación 61-3

$$-\theta_1 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2] + \theta_2 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}Y(z)).(z^{-1}U(z))] = - \sum_{i=1}^N [Y(z).(z^{-1}.U(z))]$$

10.- Ahora Partimos de la segunda expresión del paso 9 $\frac{\partial J}{\partial \theta_2}$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = \frac{\partial \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z))^2}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 2 \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z)).(-1) \frac{\partial \hat{Y}(z)}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 2 \sum_{i=1}^N (Y(z) - \hat{Y}(z)).(z^{-1}.Y(z))$$

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 2 \sum_{i=1}^N Y(z).(z^{-1}.Y(z)) - \hat{Y}(z).(z^{-1}.Y(z))$$

Remplazando la ecuación que se observa en el paso 7 se tiene:

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 2 \sum_{i=1}^N [Y(z).(z^{-1}.Y(z)) - \theta_1.(z^{-1}U(z)).(z^{-1}Y(z)) + \theta_2(z^{-1}Y(z))^2]$$

Si: $\frac{\partial J}{\partial \theta_2} = 0$

$$\sum_{i=1}^N [Y(z).(z^{-1}.Y(z)) - \theta_1.(z^{-1}U(z)).(z^{-1}Y(z)) + \theta_2(z^{-1}Y(z))^2] = 0$$

$$\sum_{i=1}^N [Y(z).(z^{-1}.Y(z))] - \theta_1 \sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)).(z^{-1}Y(z)) + \theta_2 \sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2 = 0$$

$$\theta_1 \sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z)) - \theta_2 \sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2 = \sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot Y(z))]$$

11.- Con las ecuaciones 8-3 y 9-3 se plantea un sistema matricial de la siguiente manera:

$$-\theta_1 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2] + \theta_2 \sum_{i=1}^N [(z^{-1}Y(z)) \cdot (z^{-1}U(z))] = - \sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot U(z))]$$

$$\theta_1 \sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z)) - \theta_2 \sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2 = \sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot Y(z))]$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2] & - \sum_{i=1}^N [(z^{-1}Y(z)) \cdot (z^{-1}U(z))] \\ \sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z)) & - \sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot U(z))] \\ \sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot Y(z))] \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2] \cdot [\sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot U(z))]] - [\sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2]] \cdot [\sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot Y(z))]]}{[\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z))^2] [\sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2] - [\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z))^2] [\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z))]}$$

$$\theta_2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z))] \cdot [\sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot U(z))]] - [\sum_{i=1}^N [(z^{-1}U(z))^2]] \cdot [\sum_{i=1}^N [Y(z) \cdot (z^{-1} \cdot Y(z))]]}{[\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z))^2] [\sum_{i=1}^N (z^{-1}Y(z))^2] - [\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z))^2] [\sum_{i=1}^N (z^{-1}U(z)) \cdot (z^{-1}Y(z))]}$$

12.- Al tener un modelo expresado de θ_1 y θ_2 en función de la variable discreta z de acuerdo al paso 6 se tiene:

$$\theta_1 = \frac{b_0}{a_1} = \frac{k}{\left(\frac{\tau}{T_0 S}\right)}$$

$$\theta_2 = \frac{a_0}{a_1} = \frac{1 - \frac{\tau}{T_0 S}}{\left(\frac{\tau}{T_0 S}\right)}$$

13.- Se procede a encontrar el valor de τ :

$$\theta_2 \cdot \left(\frac{\tau}{T_0 S}\right) = 1 - \frac{\tau}{T_0 S}$$

$$\tau \cdot \theta_2 = T_0 S - \tau$$

Ecuación 65-3

$$\tau = \frac{T_0 S}{\theta_2 + 1}$$

$\therefore T_0 S$ ya es un valor conocido, por lectura previa en la dinamica del sistema

14.- Del paso 12 podemos obtener la ganancia k:

$$\theta_1 = \frac{k}{\left(\frac{\tau}{T_0 S}\right)}$$

$$k = \theta_1 \cdot \left(\frac{\tau}{T_0 S}\right)$$

Del paso 13.

$$k = \frac{\theta_1}{T_0 S} \cdot \left(\frac{T_0 S}{\theta_2 + 1}\right)$$

$$k = \frac{\theta_1}{\theta_2 + 1}$$

15.- La expresión obtenida tanto k como τ permiten parametrizar al modelo en la zona lineal del comportamiento 1 de la figura 8-3

Ecuación 66-3

$$G(z) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

Cuya representación en diagrama de bloques representado en simulink se muestra en la figura 12-3:

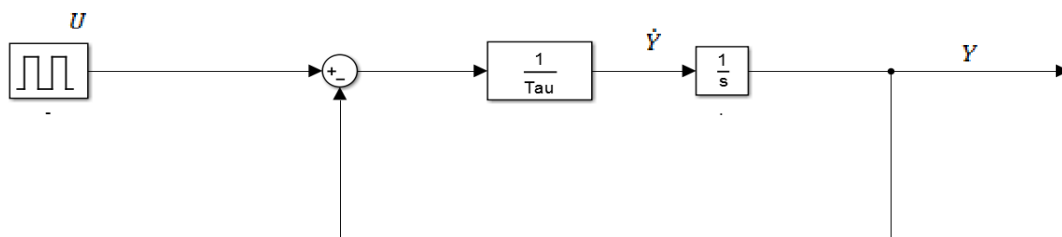


Figura 61-3: Modelo de un diagrama de bloques del comportamiento lineal del sistema
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

16.- El comportamiento 2 no lineal permite establecer la máxima razón de cambio para \dot{Y} figura 13-3, es decir plantear un control de gradiente:

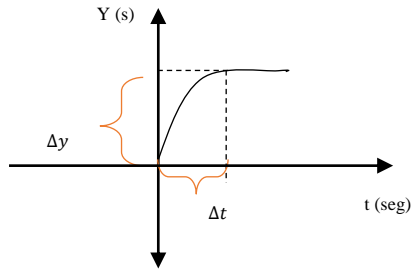


Figura 62-3: Modelo para la obtención de la máxima razón de cambio para \dot{Y}
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

De la figura anterior:

$$\dot{Y} \max = \frac{\Delta Y}{\Delta t}$$

17.- Bajo la consideración planteada de no linealidad y la consideración lineal del sistema se tiene un modelo de la planta misma que se pudo implementar en simulink figura 14-3 y verificar su funcionamiento al ubicar un scop a la salida del modelo de bloques se puede mostrar el resultado en la figura 15-3, la figura es la que representa el comportamiento del sistema obtenida analíticamente y la que se esperó obtener en función de la figura 7-3

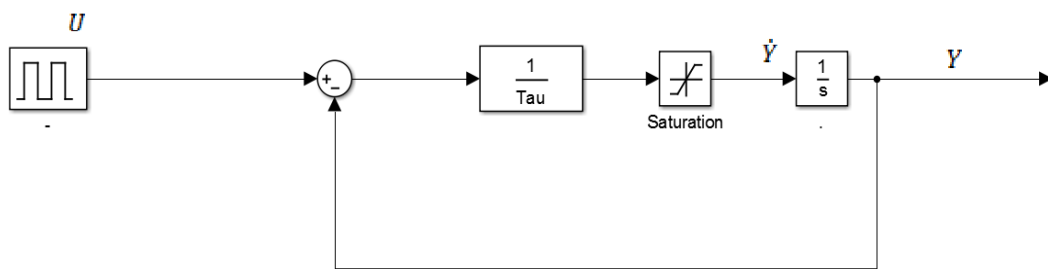


Figura 63-3: Diagrama de bloques en consideración de no linealidad y la lineal del sistema
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

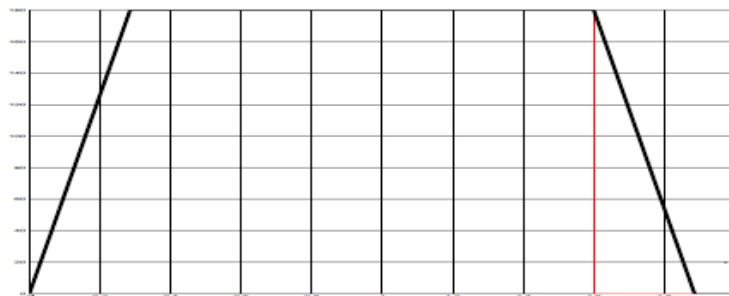


Figura 64-3: Comportamiento del sistema obtenida analíticamente.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

3.8 Diseño e implementación del controlador del sistema

Una vez obtenida la función del modelo de la planta del sistema se procede a diseñar el controlador para la misma, para el diseño del controlador se parte de una observación que dice:

Considerando, que el sistema, si es un servo controlado por una señal PWM se puede afirmar que, para fines prácticos, el sistema controlado es en conjunto un sistema de primer grado tipo cero, en el cual el set point viene dada por la señal PWM como se muestra en la figura 16-3.

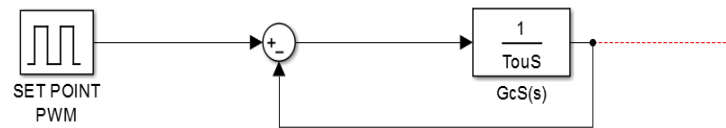


Figura 65-3: Sistema de control propia del servo-motor
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

El sistema de control viene incorporado internamente en la electrónica de la caja del servo motor.

Este análisis conlleva a diferenciar conceptualmente, entre significado de control y regulación, para ello se puede mostrar la siguiente figura 17-3.

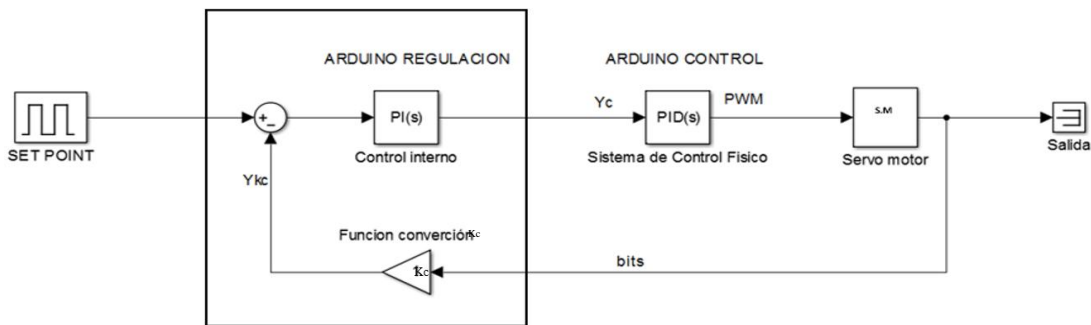


Figura 66-3: Comparación entre regulación y control.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

El análisis para el diseño del controlador parte en enfatizar que la variable Kc de la figura 17-3 es realmente una función de conversión de bits a grados y se la designa como función de escalonamiento.

Ecuación 67-3

$$Y_{kc} = \frac{(Y_{kc}MAX - Y_{kc}MIN)}{(b_{pos}MAX - b_{pos}MIN)} \cdot (b_{pos}LEIDA - b_{pos}MIN) + Y_{kc}MIN$$

Donde:

$Y_{kc}MAX$ = Lectura de conversión del valor en grado Máximo

$Y_{kc}MIN$ = Lectura de conversión del valor en grado Mínimo

$b_{pos}MAX$ = Valor Máximo en bits

$b_{pos}MIN$ = Valor Mínimo en bits

$b_{pos}LEIDA$ = Valor Leído por el sensor de realimentación en bits

Para corroborar la ecuación 14-3 se toma lectura de valores análogos con el sensor de realimentación obteniendo la siguiente información que sirvieron para la interpretación en el análisis del proyecto como lo indica la tabla 2-3.

Tabla 7-3: Lectura del sensor de realimentación en posición y sus equivalencias

| GRADOS | VOLTAJE PWM Arduino (voltios) | VALOR DIGITAL DECIMAL | VOLTAJE DEL POTENCIOMETRO (voltios) |
|--------|----------------------------------|--------------------------|--|
| 0 | 0,14 | 54 | 0,2539 |
| 5 | 0,16 | 62 | 0,3027 |
| 10 | 0,17 | 71 | 0,3418 |
| 15 | 0,18 | 75 | 0,3662 |
| 20 | 0,19 | 84 | 0,4053 |
| 25 | 0,20 | 87 | 0,4150 |
| 30 | 0,21 | 91 | 0,4346 |
| 35 | 0,22 | 98 | 0,4688 |
| 40 | 0,23 | 105 | 0,5029 |
| 45 | 0,25 | 110 | 0,5371 |

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Una vez realizada la medición de tiempos se puede aproximar los ajustes para el controlador P.I a partir de la síntesis del controlador tenemos:

Ecuación 68-3

$$\tau = \frac{tss}{5}$$

Donde tss es el tiempo de establecimiento igual a 5 veces τ , esto se puede apreciar en la figura 18-3 cuando se realiza una excitación del semáforo en lazo abierto, bajo la consideración de que el color del semáforo será la activación del set point del sistema.

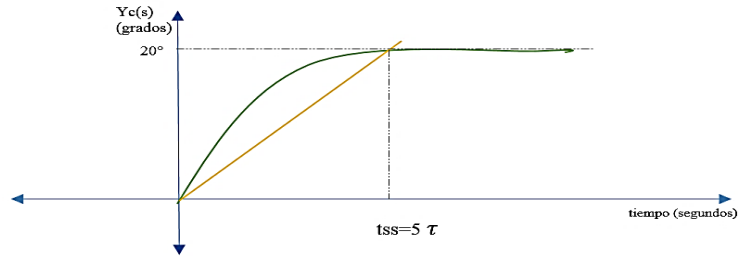


Figura 67-3: Tiempo de establecimiento sistema lazo abierto
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

3.8.1 Ecuaciones de estado para la implementación del controlador del sistema

Para la obtención de las ecuaciones de estado del controlador analizamos el esquema general del sistema figura 19-3 donde se puede apreciar un esquema general de un sistema maestro – esclavo, en el cual el esclavo pertenece al sistema donde se encuentra el Arduino número 2 y se implementará el controlador, y el maestro es el conjunto formado por el procesador de imagen de Matlab y el Arduino número 1.

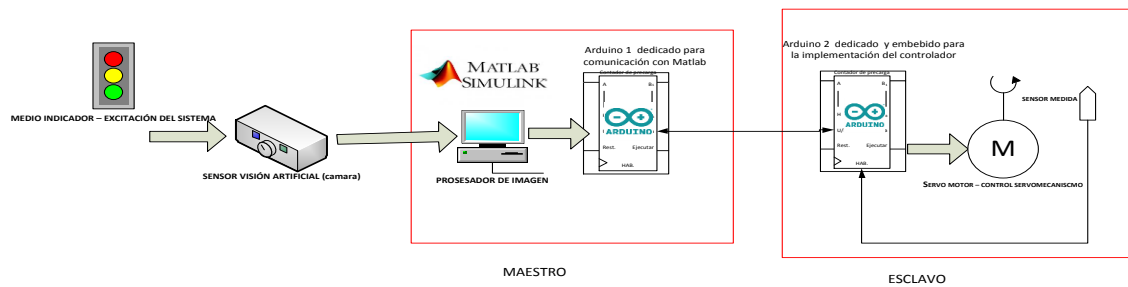


Figura 68-3: Esquema general maestro esclavo del sistema.
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Al tener un sistema con las características de respuesta de un servo motor en lazo abierto se implementa un controlado P.I (proporcional integrador), cuya acción de control integral genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error, esto asegura que, si aplicamos un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El controlador P.I. al incorporar un cero en el origen, transforma el sistema servo, en un sistema tipo 1, lo que conlleva a una constante K_p infinita y con ello a un error nulo en el posicionamiento una vez cumplido el tiempo de establecimiento, siendo el efecto proporcional un elemento acelerador en el proceso de corrección del error.

El esquema del controlador a implementar se puede apreciar en la figura 20-3

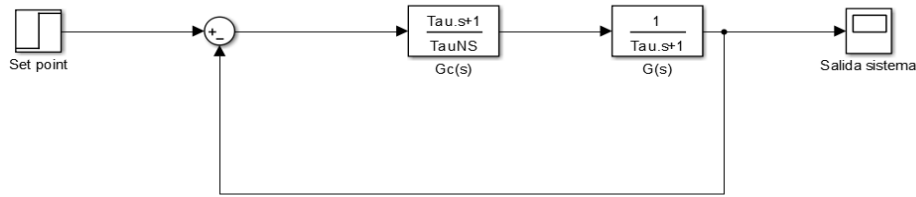


Figura 69-3: Esquema del sistema de control general P.I del sistema
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Donde:

$Tau = T$

Ecuación 69-3

$$G_c(s) = \frac{T}{TN} + \frac{1}{TN} \cdot \frac{1}{s}$$

Parte proporcional = $\frac{T}{TN}$

Parte Integral = $\frac{1}{TN} \cdot \frac{1}{s}$

Ya que el controlador a implementar se ejecuta dentro de un CPU (unidad de control de procesos de Arduino) digital el análisis se lo lleva a un sistema discreto como se muestra en la figura 21-3, donde se analiza el controlador a implementar de la figura anterior.

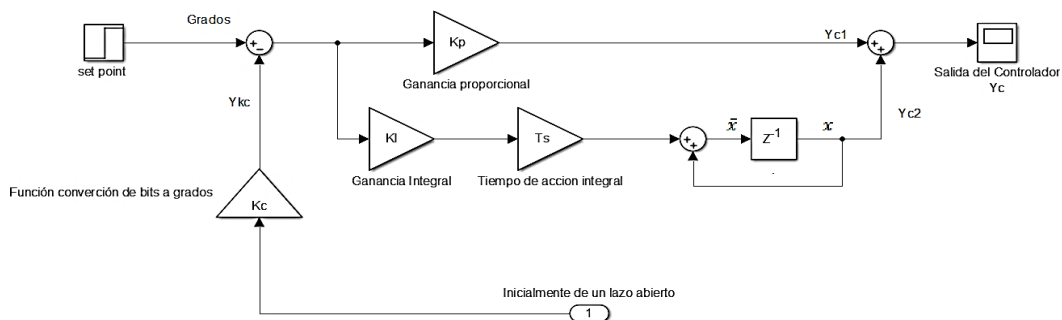


Figura 70-3: Esquema de sistema de control discretizado.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Con la representación de la figura 21-3 se puede escribir un algoritmo de funcionamiento del controlador con ecuaciones de estado como se puede ver en la siguiente estructura de repetición.

```

While (sistema = activo)

$$Y_{kc} = \frac{(Y_{kc}MAX - Y_{kc}MIN)}{(b_{pos}MAX - b_{pos}MIN)} \cdot (b_{pos}LEIDA - b_{pos}MIN) + Y_{kc}MIN$$


$$Bx = x + Ts.KI.(set\ point - Y_{kc})$$


$$Yc = x + k.(set\ point - Y_{kc})$$


$$b_{testigo} = not(b_{testigo})$$

end

```

Tomando en cuenta que:

- $\bar{x}=Bx$ (Barra x): Es el futuro del estado discreto, cuyo valor se tiene en grados gracias a la ecuación de escalamiento.
- Ecuación de escalamiento: $Y_{kc} = \frac{(Y_{kcMAX} - Y_{kcMIN})}{(b_{posMAX} - b_{posMIN})} \cdot (b_{posLEIDA} - b_{posMIN}) + Y_{kcMIN}$, para convertir los datos leídos de bits a grados .
- *set point* : Es la orden que deberá mover el servo en grados anteriormente obtenida de 20°.
- $b_{testigo}$: Es aquella variable que apunta a medir el número de interacciones en segundos denominada Tiempo testigo ($T_{testigo}$), cuya finalidad es obtener mediante este proceso el tiempo de muestreo (T_s) como se aprecia en la figura 22-3, donde en el eje de las abscisas se encuentran los periodos de computo.

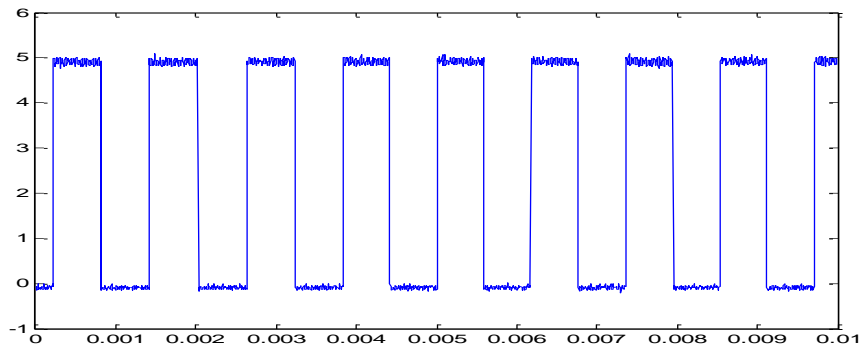


Figura 71-3: Bit testigo o Tiempo testigo ($T_{testigo}$)

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Observando la figura se puede obtener el valor del tiempo de muestreo.

Ecuación 70-3

$$T_s = \frac{T_{Testigo}}{2}$$

Con la ayuda de la función de escalamiento y la tabla número 2-3 podemos obtener un mejor tratamiento de datos a partir de un sistema de control por grados como se muestra la figura 23-3.

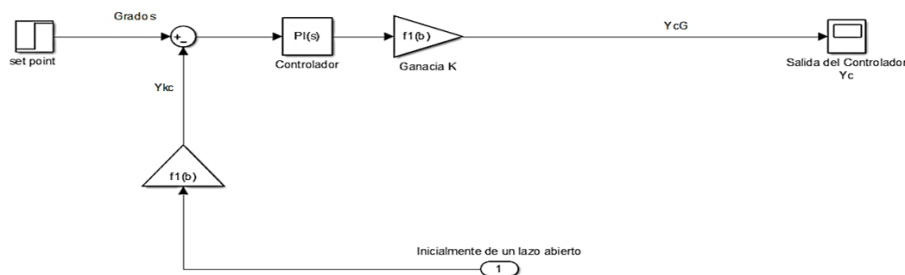


Figura 72-3: Sistema de control para una lectura del proceso en grados

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

De tal manera que la función de conversión o escalonamiento con los datos de la tabla 2-3, donde la función $f1(b)$ es la función de conversión de bits a grados, ya que la lectura de información que donde se procesan los datos en el controlador del Arduino2 :

$$f1(b) = Y_{kc} = Y_{cG}$$

$$Y_{kc} = \frac{(Y_{kcMAX} - Y_{kcMIN})}{(b_{posMAX} - b_{posMIN})} \cdot (b_{posLEIDA} - b_{posMIN}) + Y_{kcMIN}$$

Ecuación 71-3

$$Y_{kc} = \frac{(20^\circ - 0^\circ)}{(85 - 54)} \cdot (b_{posLEIDA} - 54) + 0^\circ$$

3.8.2 Ganancia de error de posición

Partiendo de la consideración básica de sistema de control realimentado con controlador de ganancia proporcional como la figura 24-3.

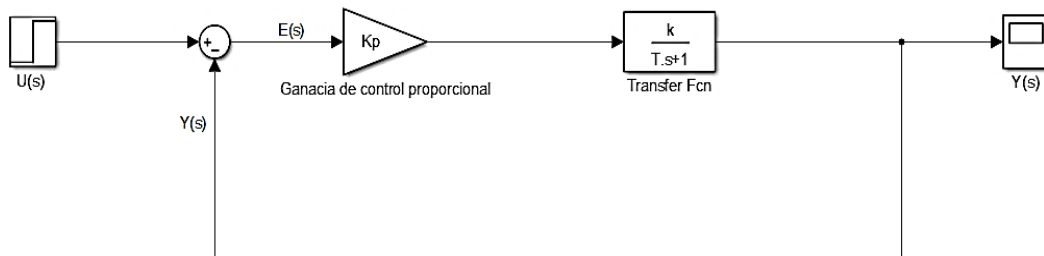


Figura 73-3: Estructura de control realimentado básica con error de posición $E(s)$.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

De la figura 24-3 se puede obtener la ecuación del error de posición $E(s)$:

Ecuación 72-3

$$E(s) = U(s) - Y(s)$$

$$Y(s) = \frac{K}{Ts + 1} \cdot kp \cdot E(s)$$

$$E(s) = U(s) - \frac{K}{Ts + 1} \cdot kp \cdot E(s)$$

$$U(s) = E(s) + \frac{K}{Ts + 1} \cdot kp \cdot E(s)$$

Ecuación 73-3

$$\frac{E(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + kp \cdot \frac{k}{ts + 1}}$$

Aplicando el teorema del valor final, frente a una entrada $U(s) = \frac{1}{s}$, se podrá tener el error en estado estacionario.

Ecuación 74-3

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s)$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1 + k \cdot kp}$$

De esta manera la ganancia de error de posición será:

Ecuación 75-3

$$Ep = 1 + k \cdot kp$$

3.8.3 Ecuaciones de estado del controlador Proporcional

Tomando en consideración el error de posición que dice que es la diferencia entre la señal de entrada ($U(s)$) que es el set point del sistema y el valor del estado de lectura del potenciómetro de realimentación leído en ese momento, a esta diferencia se deberá multiplicar por un constante de ganancia proporcional como lo indica la figura 24-3.

$Sp =$ Set point (valor enviado desde matlab al controlador)

$Ep =$ Estado del potenciómetro, lectura que proporciona en ese instante este sensor

$bt =$ Bit testigo, un contador de pulsos altos y bajos que mide periodos de computo

$Yc =$ Señal de salida del controlador, se aplica a la planta del sistema (Servo motor)

$Kp =$ Constante de ganancia proporcional, valor fijado en la implementación

```

bt = 0
While (sistema = activo)
Sp = lectura de matlab en grados
EpLEIDA = lectura del estado del potenciómetro en bits
Ep =  $\frac{(EpMAX - EpMIN)}{(b_{pos}MAX - b_{pos}MIN)} \cdot (EpLEIDA - b_{pos}MIN) + EpMIN$ , (conversión de bits a
grados)
Errorpos = Sp - Ep
Yc = Errorpos * Kp
Escribir al servo motor (Yc)
bt = not(bt)
end
    
```

3.8.4 Ecuaciones de estado del controlador Integral

Con la finalidad de corregir el error del controlador proporcional se incorpora la parte integral como se observa en la figura 21-3. Destacando que es fundamental obtener el tiempo de tiempo

de muestreo T_s mediante la lectura en el osciloscopio del bit testigo, el cual será el tiempo de la acción integral para el controlador P.I (Proporcional integrador).

x = Estado actual discreto

T_s = Tiempo de muestreo

Sp = Set point (valor enviado desde matlab al controlador)

Ep = Estado del potenciómetro, lectura que proporciona en ese instante este sensor

$Yc1$ = Señal de salida del controlador parte proporcional

$Yc2$ = Señal de salida del controlador integral

Kp = Constante de ganancia proporcional, valor fijado en la implementación

Ki = Constante de ganancia integral, valor fijado en la implementación

Bx = \bar{x} , Futuro del estado discreto

```

x = 0
Ts = inicial 0
While (sistema = activo)
Sp = lectura de matlab en grados
EpLEIDA = lectura del estado del potenciómetro en bits
Ep =  $\frac{(EpMAX - EpMIN)}{(b_{pos}MAX - b_{pos}MIN)} \cdot (EpLEIDA - b_{pos}MIN) + EpMIN$ , (conversión de bits a
grados)
Errorpos = Sp - Ep
Yc1 = Errorpos * Kp
Yc2 = x
Yc = Yc1 + Yc2
Bx = Errorpos * Ki * Ts + x
x = Bx
Escribir al servo motor (Yc)
end

```

Tómese en consideración:

Que el análisis de propagación de errores es producto de la incertidumbre de la medición y la digitalización por parte de sensores y el computador.

Se obtuvo el modelo en el entorno del comportamiento lineal partiendo de la relación en diferencia de la variable y efectuando un análisis de regresión lineal validado con el factor cuadrático multivariable R^2 .

3.8.5 Control Integral con un filtro del controlador

Para poder tener una corrección válida de la propagación de errores en el controlador integral, se implementa un sistema de filtrado que ayude a que el sistema tenga más exactitud al momento de cumplir una designación por parte de la orden del controlador, el diagrama de bloques que

muestra el filtrado del sistema de control se observa en la figura 25-3. Un valor muy grande de N hace que se invalide el efecto de realimentación del filtro mostrado al contrario un valor pequeño propenderá a un sistema de lazo cerrado.

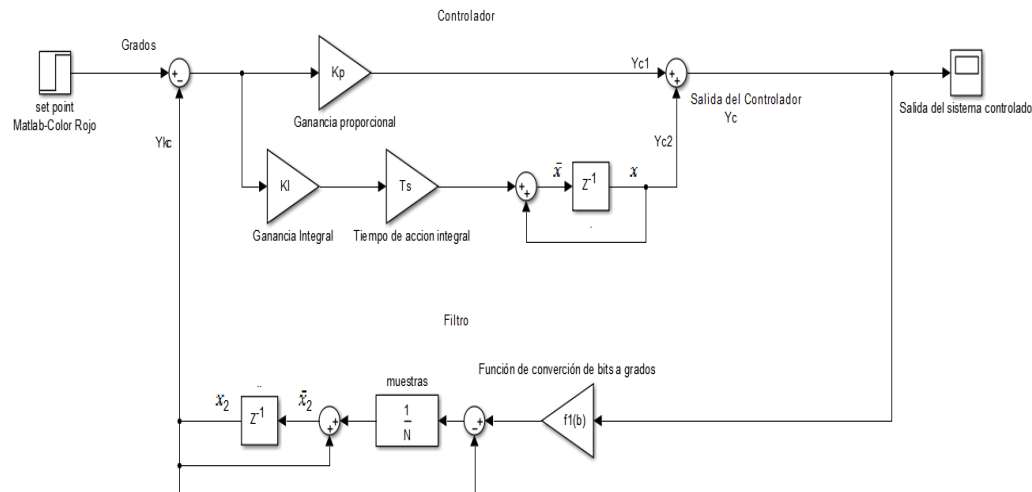


Figura 74-3: Estructura del sistema de control incorporado un filtro exponencial
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En función al grafico anterior se puede obtener las siguientes ecuaciones de estado:

```

bt = 0
x = 0
x2 = 0
Ts = inicial 0
While (sistema = activo)
Sp = lectura de matlab en grados
EpLEIDA = lectura del estado del potenciometro en bits

$$Ep = \frac{(Ep_{MAX} - Ep_{MIN})}{(b_{posMAX} - b_{posMIN})} \cdot (Ep_{LEIDA} - b_{posMIN}) + Ep_{MIN}$$
, (conversión de bits a
grados)
Errorpos = Sp - x2
Yc1 = Errorpos * Kp
Yc2 = x
Yc = Yc1 + Yc2
Bx = Errorpos * KI * Ts + x

$$Bx2 = x2 + \frac{1}{N} (f1(b) - x2)$$

x = Bx
x2 = Bx2
- Escribir al servo motor (Yc)
bt = not(bt)
end

```

De donde:

$x, x2$ = Son estados actuales discretos
 Ts = Tiempo de muestreo

S_p = Set point (valor enviado desde matlab al controlador)
 E_p = Estado del potenciómetro, lectura que proporciona en ese instante este sensor
 Y_{c1} = Señal de salida del controlador parte proporcional
 Y_{c2} = Señal de salida del controlador integral
 K_p = Constante de ganancia proporcional, valor fijado en la implementación
 K_i = Constante de ganancia integral, valor fijado en la implementación
 $Bx, Bx2 = \bar{x}, \bar{x}2$, Valores futuros del estado discreto.
 N = Cantidad de muestras ponderadas de exponencial, considerando necesario
 5 veces la cantidad de muestras a necesitar para el establecimiento del valor.

Una vez implementado el controlador en el Arduino 2 bajo las ecuaciones de estado anteriores se procedió a tomar lectura en el osciloscopio del bit testigo por la salida número 5 analógica del Arduino número 2. Por identificación y lectura mediante osciloscopio que se puede observar en el capítulo siguiente figura 4-4 se obtiene el valor del bit testigo o tiempo testigo, mediante el cual se puede obtener el tiempo de muestreo T_s , tomando en cuenta la ecuación 17-3:

$$T_s = \frac{0,00122}{2}$$

$$T_s = 0,00061 \text{ seg}$$

Este es el nuevo valor a reemplazar en las ecuaciones de estado en el controlador del Arduino 2 para que el mismo realice la acción de corrección, ya que es el tiempo de muestreo que se demora en ejecutar el controlador y a su vez esto desencadena a que las ecuaciones de estado del filtro funcionen.

3.8.6 Implementación de circuitos y comunicación entre Arduinos.

Una vez que se tiene las ecuaciones de estado para implementar en el controlador del Arduino 2 este será el circuito de sistema con el controlador y la planta figura 26-3.

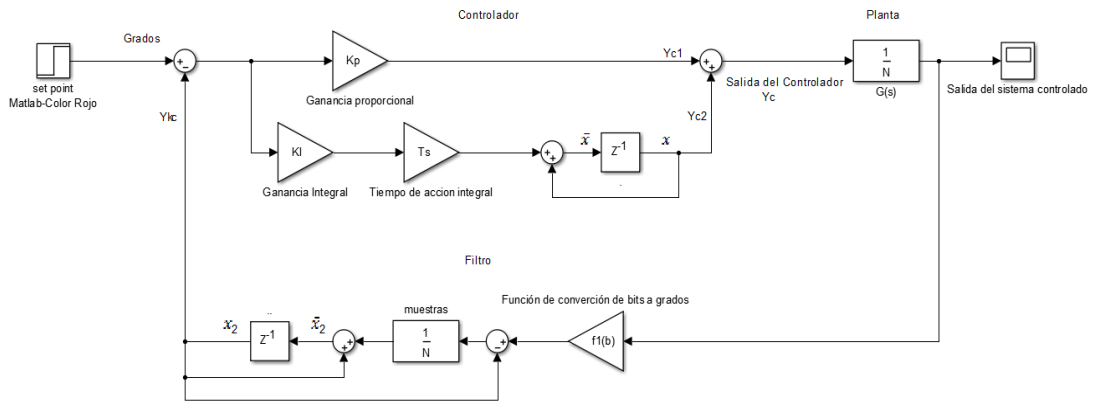


Figura 75-3: Estructura del sistema de control y planta.
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

La implementación posterior es la construcción de un algoritmo en base a las ecuaciones de estado del control P.I y del filtrado, en el Arduino número 2. Enfatizando que el Arduino 2 deberá tener el control del sistema cuando Matlab envié a orden de set point dependiendo del estado del semáforo.

El esquema de conexión se muestra en la figura 27-3, y el diagrama unifilar de conexiones en la figura 28-3.

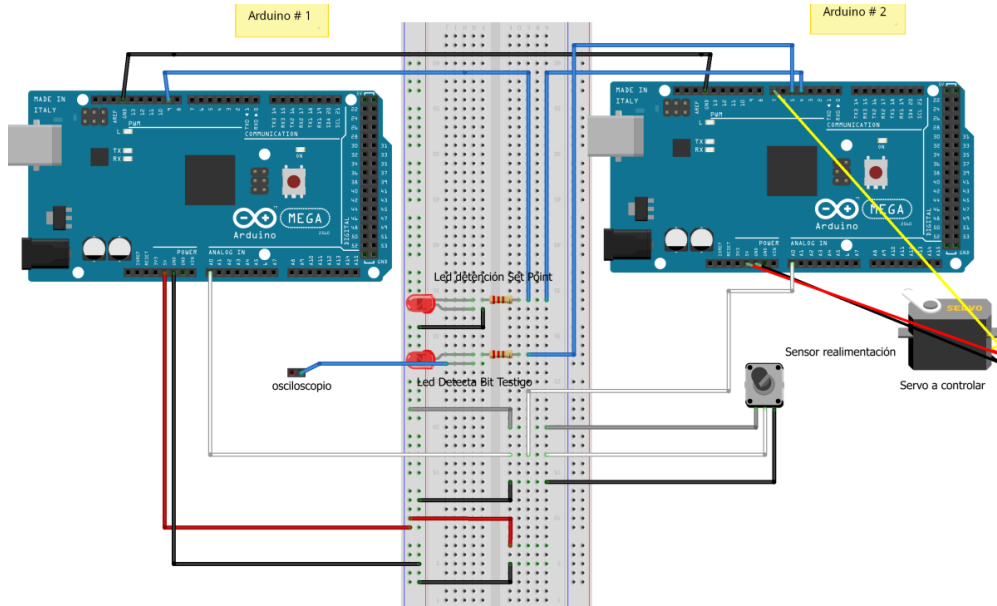


Figura 76-3: Esquema de conexión electrónica.
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

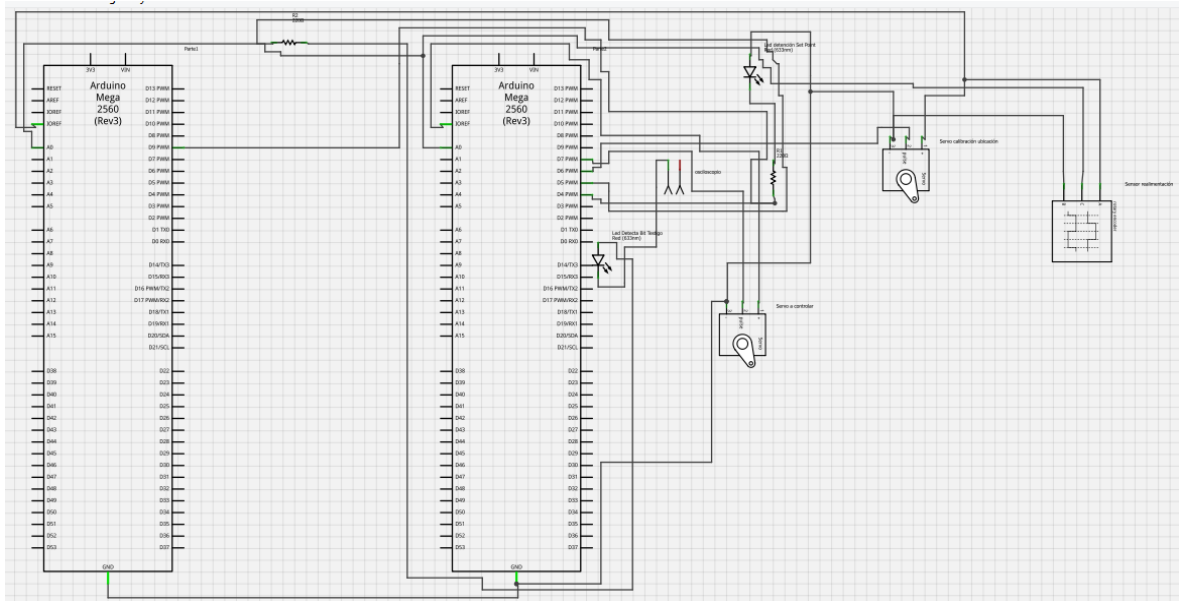


Figura 77-3: Diagrama unifilar del circuito del sistema.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS.

Los resultados mostrados en el siguiente capítulo se basaron en las pruebas obtenidas en la implantación en campo del sistema debiéndose obtener los resultados de visión artificial, de sistema de control de la planta, mediciones y datos de lectura de variables, lecturas de datos y porcentajes de validación de datos.

El ambiente donde se realizaron las pruebas para la obtención de resultados es lo más adaptado a la realidad del medio donde se supone brindara el servicio el sistema implementado.

Los ambientes que fueron parte para la obtención de resultados fueron tres: durante la luz del día, durante la luz de medio día, y durante la luz de la noche.

Tomando en cuenta que la investigación no se basa en la identificación de placas vehiculares si no de la detención o captura de imágenes del vehículo que infringió la luz roja del semáforo utilizando un sistema de control activado por visión artificial.

4.1 Análisis de resultados del sistema de control.

Para analizar los resultados obtenidos en la etapa del sistema de control se mencionarán algunos procesos de pruebas de los que se obtuvo los siguientes resultados:

- Resultado del proceso de identificación de la señal de salida en lazo abierto del servo mecanismo:
- Resultado del proceso de modelado de la planta del sistema en Simulink.
- Resultado del proceso de obtención de señal del bit testigo en el osciloscopio, valido para la implantación del controlador.
- Resultado del proceso de comparación de curvas con y sin controlador.
- Obtención de la señal de salida del servo mecanismo aplicando el controlador en lazo cerrado y variando parámetros K_p , K_i .

- Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un análisis del controlador lento con n muestras en un día.
- Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un análisis del controlador rápido con n muestras en un día.

4.1.1 *Resultado del proceso de identificación de la señal de salida en lazo abierto del servo mecanismo.*

En este proceso se obtuvo la gráfica de señal de salida del servo mecanismo posición vs tiempo. Esta señal mostrada en la figura 1-4 es la señal de salida del sistema en lazo abierto excitada directamente por Matlab. Esta señal fue la que nos ayudó para tener referencia sobre el tipo de modelo de la función de la planta del sistema, y posterior para con esta función de la planta encontrar el controlador. Para ello se realizó un programa de lectura de posición del servo mecanismo en Matlab. Cabe mencionar que el tiempo que tarda en subir y bajar el servo mecanismo no es precisamente el que se muestra en la figura ya que este tiempo de reacción es mucho más rápido, la lectura que nos proporciona el computador es esta ya que realiza al mismo tiempo escritura y lectura de datos habiendo un retardo en estos dos pasos, pero para la identificación del sistema es válido.

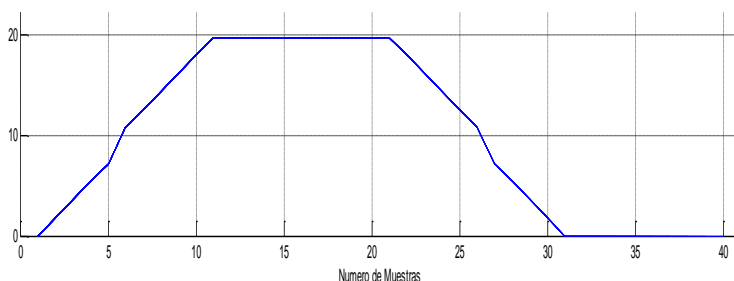


Figura 78-4: Señal de salida del sistema en lazo abierto excitada directamente por Matlab
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017..

4.1.2 *Resultado del proceso de modelado de la planta del sistema en Simulink.*

Para poder tener un modelo de gráfica más real con tiempos reales se realiza un modelado en simulink figura 2-4 del sistema en lazo abierto con excitación desde Matlab, obteniendo en la figura 3-4 la respuesta de la señal de salida.

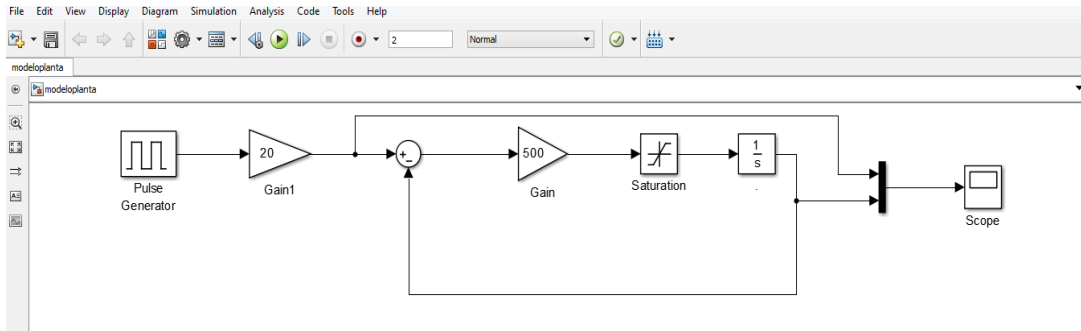


Figura 79-4: Modelado de la planta en lazo abierto del servo mecanismo en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017..

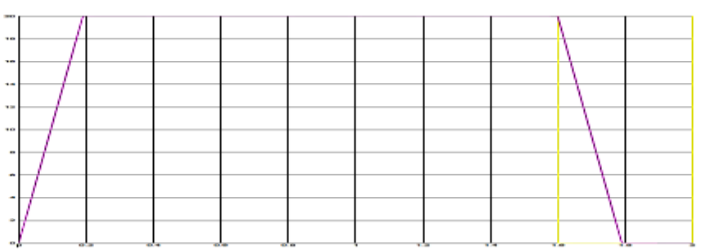


Figura 80-4: Señal de salida en lazo abierto del servo mecanismo modelado en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

4.1.3 *Resultado del proceso de obtención de señal del bit testigo en el osciloscopio, valido para la implantación del controlador.*

Para poder implementar las ecuaciones de estado del controlador PI (Proporcional integrador) Arduino 2 y a su vez corregir los errores del controlador proporcional, se toma la lectura del bit testigo que demora en ejecutar el controlador proporcional, esta lectura se la de denomino como tiempo testigo y se la leyó por medio del osciloscopio y posterior encontrando el tiempo de muestreo T_s , se puede ver en la figura 4-4 la lectura del bit testigo que se la realizo con el osciloscopio.

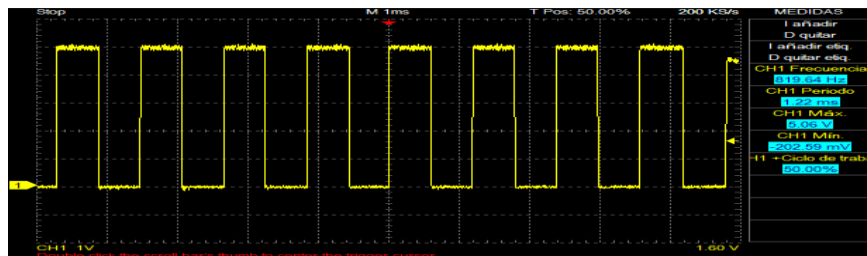


Figura 81-4: Lectura del bit testigo por medio del osciloscopio.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

4.1.4 *Resultado del proceso de comparación de curvas con y sin controlador.*

Para observar el funcionamiento del controlador se realiza una prueba en la que se somete al servomecanismo de la cámara web una perturbación la misma que es un peso de 32,2 gramos.

La prueba de lectura de posicionamiento se la realiza:

- a) Lectura del servo mecanismo sin controlador frente a la señal del sistema del servo mecanismo aplicado un controlador rápido figura 5-4 a).

Mediante la incidencia del peso se puede observar en la señal sin control que al aplicar una excitación del semáforo en rojo el servo mecanismo sobrepasa los 20° del set point con unos pocos grados y se mantiene hasta que posterior el color rojo del semáforo cambia. Se relaciona con una señal en la cual se añade un controlador de acción rápida en la que se puede ver que a diferencia de la señal sin control esta al ser excitada con la señal roja del semáforo si llega a posicionarse en los 20° manteniéndose hasta que el color rojo del semáforo cambie.

- b) Lectura del servo mecanismo sin controlador frente a la señal del sistema del servo mecanismo aplicado un controlador lento figura 5-4 b).

En este caso también se puede observar que al aplicar la señal del servo mecanismo sin control esta sobrepasa los 20° del set point y también la del origen 0°, relacionándole con la señal del servo mecanismo ahora aplicando un control lento se puede ver que la señal llega lento y haciendo escalas a su set point situándose hasta que deje de ver la luz roja del semáforo, se observa que también el control de posición de origen 0° es mejor que el sistema son control.

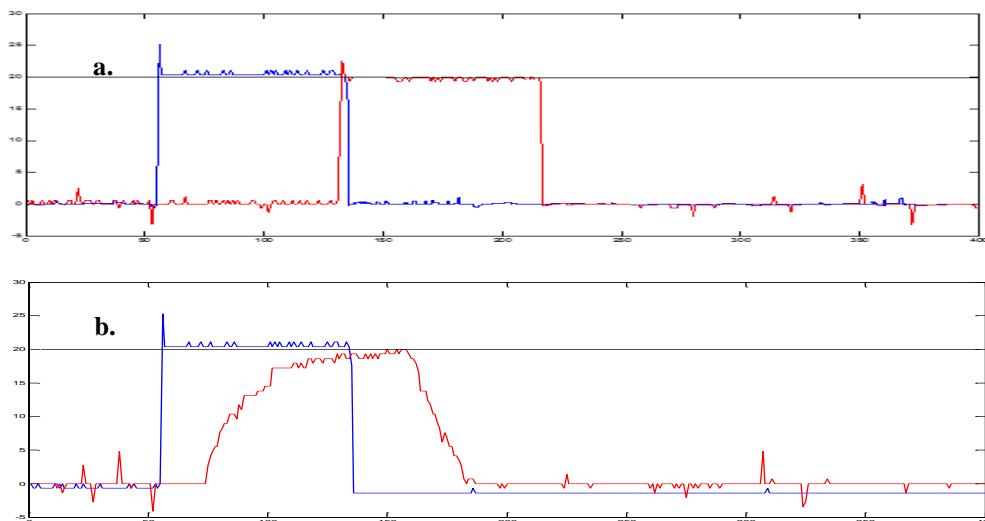


Figura 4-82: Comparación de la respuesta de posicionamiento del sistema con y sin controlador expuesto a una perturbación

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

4.1.5 Obtención de la señal de salida del servo mecanismo aplicando el controlador en lazo cerrado y variando parámetros K_p , K_i .

Para realizar estas pruebas y obtener un resultado bastante claro se pudo encontrar mediante sintonía del controlador dos acciones de control.

- Acción Rápida
- Acción Lenta

Estas dos acciones se las obtuvo mediante pruebas de sintonía cuyos valores de ganancia de K_i , K_p y corrección de filtrado N fueron variadas para obtener el resultado esperado, en la tabla 1-4 se observa los valores para un controlador rápido y en la tabla 2-4 los valores para un controlador lento.

Tabla 8-4: Valores para un controlador rápido

| Valores Controlador Rápido | | |
|---|-----------------|--------------|
| Denominación | Variable | Valor |
| Ganancia proporcional | K_p | 1 |
| Ganancia Integral | K_i | 0 |
| Cantidad de muestras ponderadas para el establecimiento del valor | N | 100000000 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Tabla 9-4: Valores para un controlador lento

| Valores Controlador Lento | | |
|---|-----------------|--------------|
| Denominación | Variable | Valor |
| Ganancia proporcional | K_p | 0,1 |
| Ganancia Integral | K_i | 0 |
| Cantidad de muestras ponderadas para el establecimiento del valor | N | 1,25 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estos valores se ingresaron al controlador observando su respuesta a una excitación del semáforo en rojo, tomando en cuenta que 0° es la posición normal del servo mecanismo de la cámara y 20° es la posición para detectar vehículos. En la figura 6-4 se observa una respuesta del servo mecanismo con un control rápido con los valores de la tabla 1-4. Esta señal de lectura de posicionamiento del servo mecanismo fue realizada en tiempo real de ejecución.

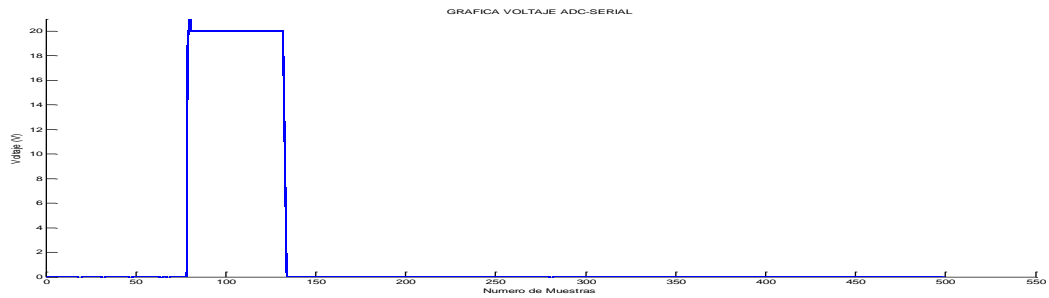


Figura 83-4: Señal de lectura posicionamiento, servo mecanismo con un control rápido
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Ahora en la figura 7-4 se muestra una señal de lectura del servo mecanismo de la cámara con un tipo de controlador lento con valores de la tabla 2-4.

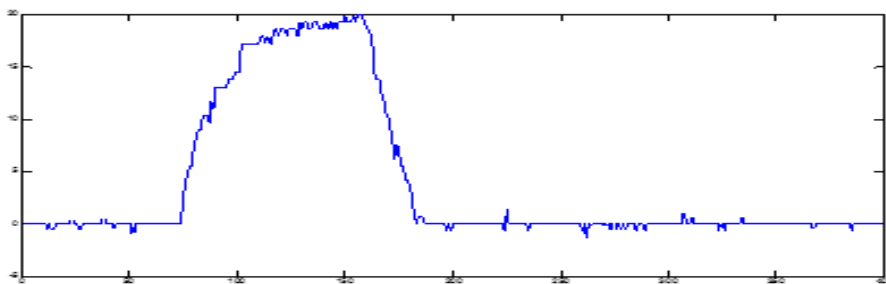


Figura 4-84: Señal lectura posicionamiento, servo mecanismo con un control lento
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Esta lectura de datos muestra ciertas pausas al momento de posicionarse en 20° y posterior a 0° tomando en consideración ciertas lecturas impropias generadas por la vibración del servo mecanismo.

Ahora se mostrará la lectura de datos en tiempo real de muestras de 1 min 30 segundos para el encendido del semáforo en rojo, resaltando a la diferencia entre el controlador rápido y el lento.

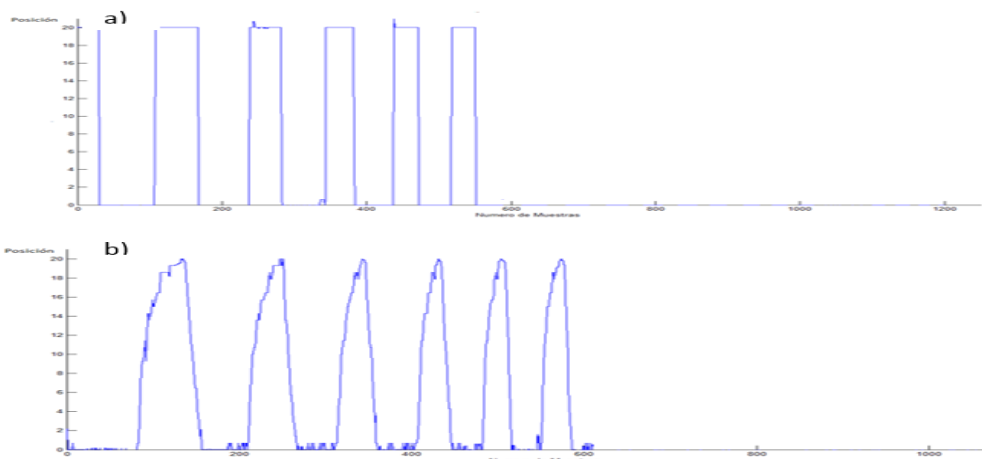


Figura 85-4: Señal de lectura de posicionamiento control rápido a) vs control lento b)
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

4.1.6 Análisis del comportamiento del controlador en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un controlador rápido con n muestras en 24 horas.

Tomando en cuenta que lo que se pretende obtener es el porcentaje de aciertos del controlador excitado por el color rojo del semáforo, se analizó el sistema en conjunto en funcionamiento.

Para mostrar los resultados obtenidos en este análisis se dividió los tiempos de lectura en: Periodo en día, Periodo en Tarde, Periodo en Noche.

Esta división de tiempos es necesaria ya que el controlador se verá afectado directamente por la excitación de la visión artificial captada por la cámara web, la misma que como se mencionó anteriormente se ve afectada por los cambios de luxes (niveles de luz), para ello se tomaron lecturas en periodos. Para poder leer el estado del sensor del potenciómetro (sensor de realimentación) se incorporó una tarjeta de Arduino extra con la finalidad que este dispositivo sea dedicado de lectura, conectando la señal de lectura analógica del Arduino extra en paralelo con la señal de lectura analógica del Arduino 2.

Para realizar un análisis estadístico del número de ejecuciones acertadas y las fallidas el análisis se lo realiza con tres poblaciones distintas una para cada periodo de análisis, esta división de periodos se la hace de acuerdo al nivel de luz que emite el sol durante un día completo, para ello se muestra la siguiente tabla que resume los datos mediante los cuales se realizan los resultados estadísticos como se muestra en la tabla 3-4. Tomando en cuenta que el tiempo que dura cada interacción de la luz roja del semáforo es 35 segundos.

Tabla 10-4: Información sobre periodos de estudio en la comprobación del controlador excitado

| | Intervalo de tiempo de estudio | Tiempo total horas | Tiempo total segundos | Total de interacciones luz roja (Población) |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|---|
| Periodo Día | 05h00 am - 13h00 pm | 8 | 28800 | 823 |
| Periodo Tarde | 13h00 pm - 18h00 pm | 5 | 18000 | 514 |
| Periodo Noche | 18h00 pm - 05h00 am | 11 | 39600 | 1131 |

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Periodo de análisis en el día:

Para el estudio de este periodo se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para este periodo de tiempo se tiene en el

orden: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$$N=823$$

$$1-\alpha=95\%$$

$$Z=1,96$$

$$e= 4 \text{ en valor decimal } 0,04$$

$$q=0,5$$

$$p=0,5$$

$$\text{Valor estimado de } p=0,5$$

$$\text{Asumiendo que } p+q=1$$

$$q= 0,5$$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

Ecuación 76-4

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$

$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,04)^2}$$

$$n = \frac{0,96}{0,0016}$$

$$n = 600$$

Teniendo ya la población se puede realizar una corrección al tamaño de la muestra anterior.

Ecuación 77-4

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$

$$nc = \frac{600}{1 + \frac{600-1}{823}}$$

$$nc = 347,25$$

Si lo redondeamos

$$nc = 347 \text{ veces}$$

Con este número de muestras reales se puede obtener un tiempo de ejecución asumiendo la siguiente relación.

35 segundos 1 iteración del semáforo en roja

¿Cuánto tiempo durara las 347 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades, el tiempo de duración de las 347 interacciones será:

$$td = 3,37 \text{ horas}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de luxes de 123340 y una lectura final de 133456 luxes, iniciando a las 08h00 am como lo indica la tabla 4-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo día.

Tabla 11-4: Condiciones de prueba para un controlador rápido durante el día

| Periodo de análisis en el día | |
|--------------------------------------|-------------|
| Hora inicio prueba | 8:00 AM |
| Hora final prueba | 11:37:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 123340 lux |
| Luxes Fin prueba | 133456 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 347 |

Realizado por: NÚÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 5-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo el controlador realizando una prueba de observación, en la gráfica 1-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 5-4.

Tabla 4-12: Evaluación de la prueba de un controlador rápido durante el día

| Evaluación ejecución controlador | |
|---|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 347 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NÚÑEZ, Christiam, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 9-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point.

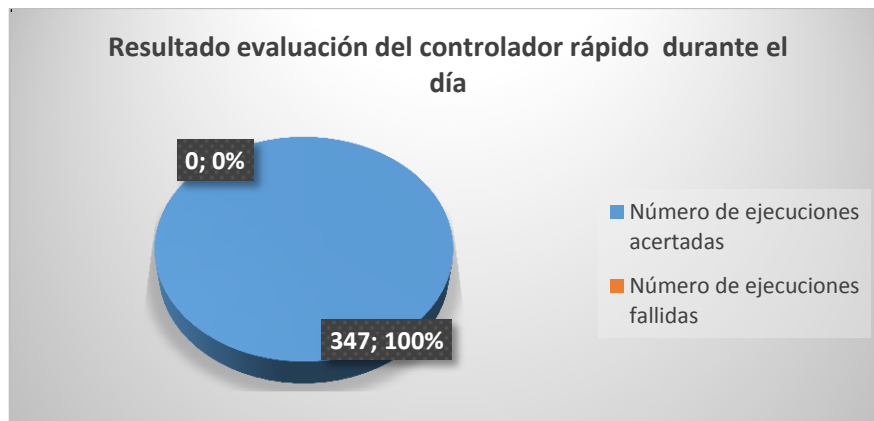


Gráfico 1-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante el día
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 9-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 347.

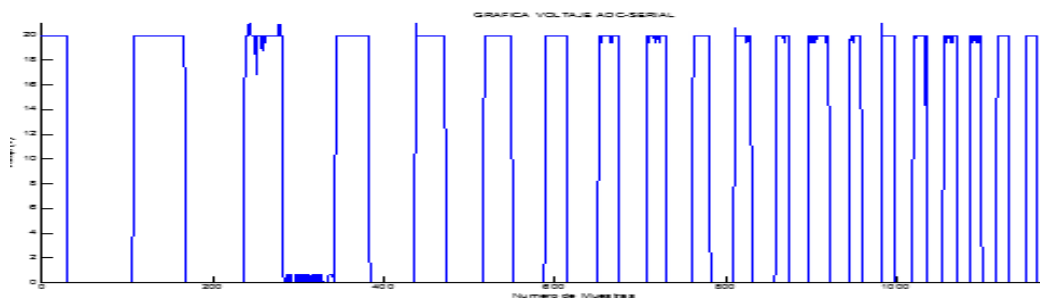


Figura 86-4: Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo día
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Periodo de análisis en la Tarde:

Para el estudio de este periodo se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para este periodo de tiempo se tiene en el orden: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$$N=514$$

$$1-\alpha=95\%$$

$$Z=1,96$$

$$e= 4 \text{ en valor decimal } 0,04$$

$$q=0,5$$

$$p=0,5$$

Valor estimado de $p=0,5$

Asumiendo que $p+q=1$

$$q= 0,5$$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$
$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,04)^2}$$
$$n = \frac{0,96}{0,0016}$$
$$n = 600$$

Como se sabe la población se puede hacer una corrección al tamaño de la muestra anterior.

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$
$$nc = \frac{600}{1 + \frac{600-1}{514}}$$
$$nc = 277,09$$

Si lo redondeamos

$$nc = 277 \text{ veces}$$

Con este número de muestras reales se puede obtener un tiempo de ejecución asumiendo la siguiente relación.

$$35 \text{ segundos} \quad 1 \text{ Interacción del semáforo en rojo}$$

¿Cuánto tiempo durara las 277 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades, el tiempo de duración de las 277 interacciones será:

$$tt = 2,69 \text{ horas}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de luxes de 113243 y una lectura final de 123442 luxes, iniciando a las 14:h00 pm como lo indica la tabla 6-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo tarde.

Tabla 4-13: Condiciones de prueba para un controlador rápido durante la tarde.

| Periodo de análisis en la tarde | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 14:00 PM |
| Hora final prueba | 16:42:00 PM |
| Luxes inicio prueba | 113243 lux |
| Luxes fin prueba | 123442 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 277 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 7-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo del controlador. Y en la gráfica 2-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 6-4.

Tabla 4-14: Evaluación de la prueba de un controlador rápido durante la tarde

| Evaluación ejecución controlador | |
|---|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 277 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 10-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point..

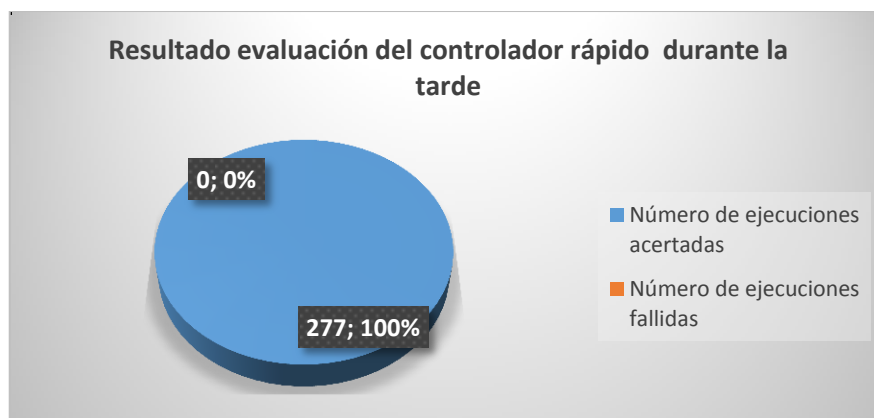


Gráfico 2-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante la tarde.
Fuente: Realizado por NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 10-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para

poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 277.

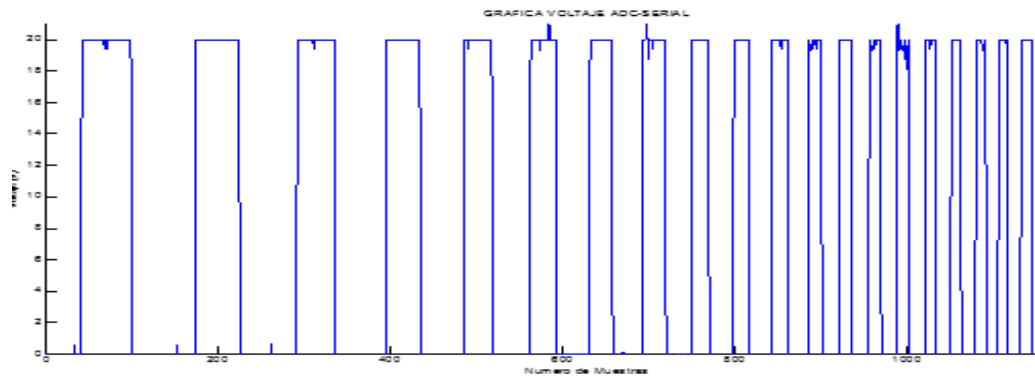


Figura 87-4: Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo tarde.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Periodo de análisis en la noche:

Para el estudio de este periodo se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para este periodo de tiempo se tiene en el orden: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$N=1131$

$1-\alpha=95\%$

$Z=1,96$

$e= 4$ en valor deciamal $0,04$

$q=0,5$

$p=0.5$

Valor estimado de $p=0,5$

Asumiendo que $p+q=1$

$q= 0,5$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$

$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,04)^2}$$

$$n = \frac{0,96}{0,0016}$$

$$n = 600$$

Como se sabe la población se pudo hacer una corrección al tamaño de la muestra anterior.

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$

$$nc = \frac{600}{1 + \frac{600-1}{1131}}$$

$$nc = 392,25$$

Si lo redondeamos

$$nc = 392 \text{ Veces}$$

Con este número de muestras reales se puede obtener un tiempo de ejecución asumiendo la siguiente relación.

$$35 \text{ segundos} \quad 1 \text{ Interacción del semaforo en rojo}$$

¿Cuánto tiempo durara las 392 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades el tiempo de duración de las 392 interacciones será:

$$tn = 3.81 \text{ horas}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de 210 luxes y una lectura final de 198 luxes, iniciando a las 20:h00 pm como lo indica la tabla 8-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo noche.

Tabla 15-4: Condiciones de prueba para un controlador rápido durante la noche

| Periodo de análisis en la noche | |
|-----------------------------------|-------------|
| Hora inicio prueba | 20:00 PM |
| Hora final prueba | 23:49:00 PM |
| Luxes inicio prueba | 210 lux |
| Luxes fin prueba | 198 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 392 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 9-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo del controlador. Y en la gráfica 3-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 9-4.

Tabla 16-4: Evaluación de la prueba de un controlador rápido durante la noche.

| Evaluación ejecución controlador | |
|----------------------------------|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 390 |
| Número de ejecuciones fallidas | 2 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 11-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point.

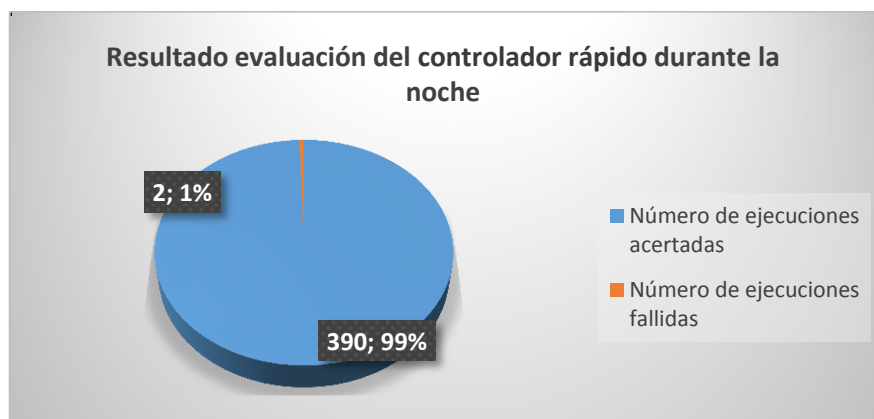


Gráfico 3-4: Resultado de evaluación del controlador rápido durante la noche
Fuente: Realizado por NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 11-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para

poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 392.

En este periodo de tiempo se observó que el servo mecanismo no actuó en 2 ocasiones de las cuales se puede deducir que no es referente a un problema del controlador si no sería un problema en la detención del color rojo por parte del proceso de visión artificial el cual se lo analizara posteriormente.

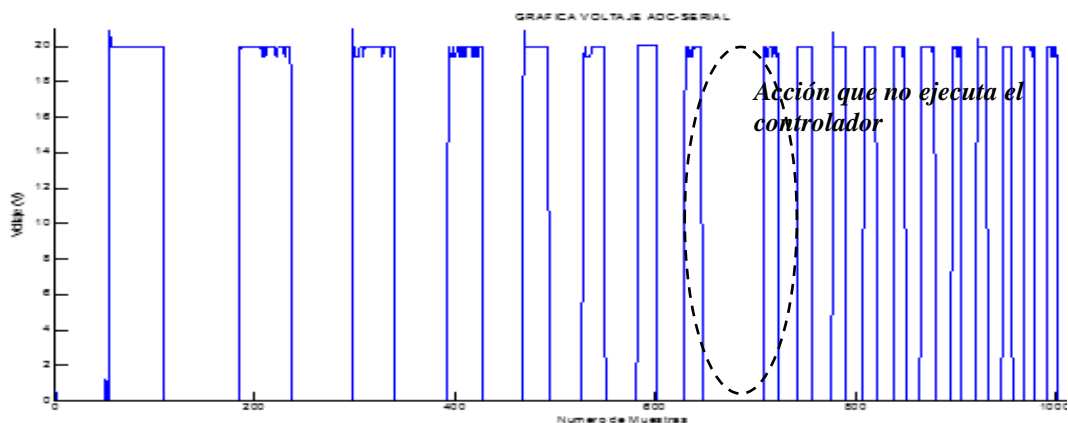


Figura 88-4: Señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo noche.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

4.1.7 *Análisis del comportamiento del controlador en la identificación de vehículos que invaden la luz roja con un controlador lento con n muestras en 24 horas.*

Valiéndonos de la información del anterior análisis ahora se obtendrá resultados del comportamiento del controlador actuando con las características de la tabla 2-4, nuevamente aclarando que el funcionamiento se medirá en conjunto con la actuación del proceso de visión artificial.

Al igual que el anterior análisis para mostrar los resultados obtenidos se dividió los tiempos de lectura en: Periodo en día, Periodo en Tarde, Periodo en Noche.

Como se indicó anteriormente la división de tiempos es necesaria ya que el controlador se verá afectado directamente por la excitación de la visión artificial captada por la cámara web, la misma que como se mencionó anteriormente se ve afectada por los cambios de luxes (niveles de luz), para ello se tomarán lecturas en periodos

Para realiza un análisis estadístico del número de ejecuciones acertadas y las fallidas el análisis se lo realiza al igual que el anterior análisis con tres poblaciones distintas una para cada periodo de análisis, esta división de periodos se la hace desacuero al nivel de luz que emite el sol durante un día completo, como lo muestra la tabla 3-4. Tomando en cuenta que el tiempo que dura cada interacción de la luz roja del semáforo es 35 segundos.

Periodo de análisis en el día:

Para el análisis con prueba en el controlador lento se toma el mismo número del tamaño de muestras que en el estudio del controlador rápido, asumiendo que se tomó en otro horario dentro del establecido por la tabla 3-4. Para realizar las pruebas y resultados de este análisis se parte con la información de la tabla 10-4 que se muestra a continuación:

Tabla 4-17: Condiciones de prueba para un controlador lento durante el día.

| Periodo de análisis en el día | |
|--------------------------------------|-------------|
| Hora inicio prueba | 9:00 AM |
| Hora final prueba | 12:37:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 133636 lux |
| Luxes Fin prueba | 143871 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 347 |

Fuente: NUÑEZ, Christian, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 11-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo del controlador. Y en la gráfica 4-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 17-4.

Tabla 18-4 : Evaluación de la prueba de un controlador lento durante el día.

| Evaluación ejecución controlador | |
|---|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 347 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 11-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point.



Gráfico 4-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante el día
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 12-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 347.

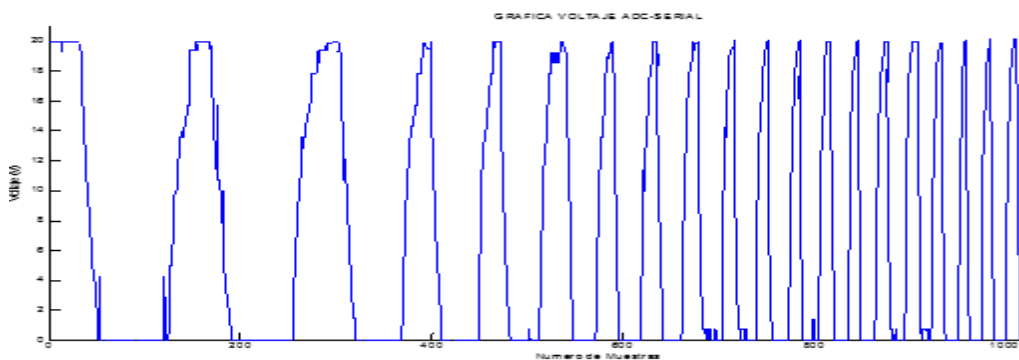


Figura 89-4: Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo día.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

A diferencia de la figura 9-4 donde se representa la señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo día, en esta figura 12-4 con un controlador lento se puede apreciar una lectura de forma de triángulo debido a la lectura escalonada que ejerce el controlador al servo motor.

Periodo de análisis en la tarde:

Para el análisis con prueba en el controlador lento se toma el mismo número del tamaño de muestras que en el estudio del controlador rápido, asumiendo que se tomó en otro horario dentro del establecido por la tabla 3-4. Para realizar las pruebas y resaludados de este análisis se parte con la información de la tabla 12-4 que se muera a continuación:

Tabla 4-19: Condiciones de prueba para un controlador rápido durante la tarde.

| Periodo de análisis en la tarde | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 15:00 PM |
| Hora final prueba | 17:42:00 PM |
| Luxes inicio prueba | 113243 lux |
| Luxes fin prueba | 123442 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 277 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 13-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo del controlador. Y en la gráfica 5-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 13-4.

Tabla 20-4: Evaluación de la prueba de un controlador lento durante la tarde.

| Evaluación ejecución controlador | |
|---|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 277 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 13-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point.



Gráfico 5-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante la tarde
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 13-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para

poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 277.

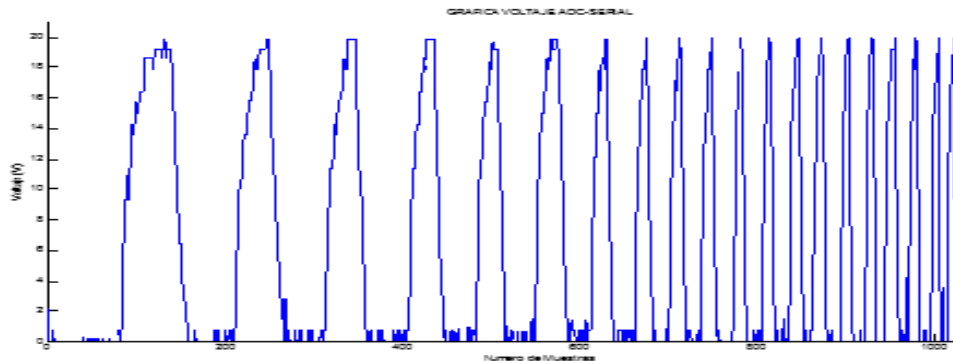


Figura 4-90: Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo tarde
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

A diferencia de la figura 10-4 donde se representa la señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo tarde, en esta figura 13-4 con un controlador lento se puede apreciar una lectura de forma de triángulo debido a la lectura escalonada que ejerce el controlador al servo motor.

Periodo de análisis en la noche:

Para el análisis con prueba en el controlador lento en este periodo, se toma el mismo número del tamaño de muestras que en el estudio del controlador rápido en el periodo noche, asumiendo que se tomó en otro horario con respecto al controlador rápido, dentro del establecido por la tabla 3-4. Para realizar las pruebas y resultados de este análisis se parte con la información de la tabla 14-4 que se muestra a continuación:

Tabla 4-21: Condiciones de prueba para un controlador lento durante la noche.

| Periodo de análisis en la noche | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 19:00 PM |
| Hora final prueba | 22:49:00 PM |
| Luxes inicio prueba | 179 lux |
| Luxes fin prueba | 296 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 15 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 35 seg |
| Número de muestras | 392 |

Realizado por: NUNEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 15-4 donde indica el número de veces que acertó o fallo del controlador. Y en la gráfica 6-4 se muestra un pastel que obedece a la tabla 15-4.

Tabla 22-4: Evaluación de la prueba de un controlador lento durante la noche.

| Evaluación ejecución controlador | |
|---|-----|
| Número de ejecuciones acertadas | 389 |
| Número de ejecuciones fallidas | 3 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Tomando en cuenta que se consideran fallidas la ejecución que no completaron los grados esperados en este caso 20°. En la figura 14-4 se puede apreciar una señal periódica en ejecutar 20 muestras de semáforo en rojo observando que todas llegaron a su set point.



Gráfico 6-4: Resultado de evaluación del controlador lento durante la noche
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Estas pruebas son validadas con el proceso de lectura del servomecanismo en tiempo real que se tomó durante este proceso, en la figura 14-4 se puede ver una lectura periódica acertada, para poder visualizar esta lectura teniendo una mejor apreciación de datos en el documento, y ver el trabajo del servo mecanismo solo se muestran la imagen a 20 muestras de las 392.

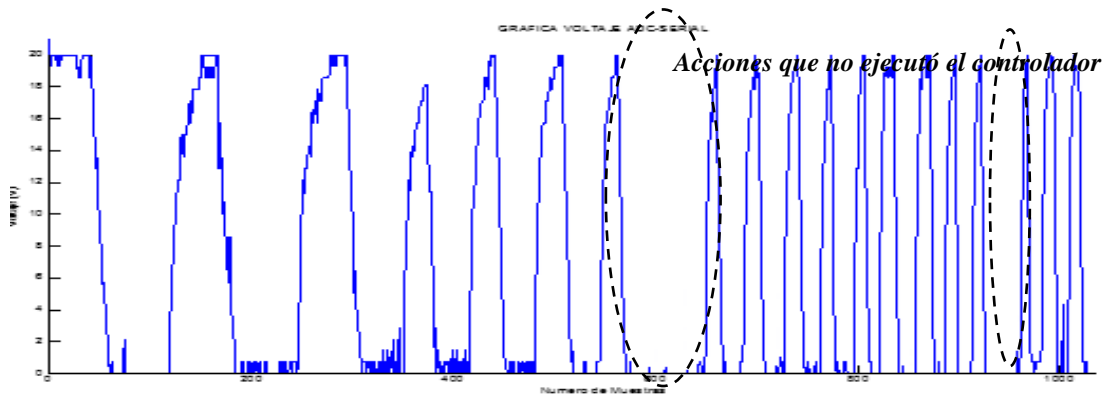


Figura 91-4: Señal de lectura de posicionamiento controlador lento, en periodo noche
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

A diferencia de la figura 11-4 donde se representa la señal de lectura de posicionamiento controlador rápido, en periodo tarde, en esta figura 13-4 con un controlador lento se puede apreciar una lectura de forma de triángulo debido a la lectura escalonada que ejerce el controlador al servo motor.

También se puede observar que existen 3 lecturas incorrectas en la lectura del sensor del posicionamiento del servo mecanismo, nuevamente enfatizando que esta lectura incorrecta se deberá al procesamiento de imagen que realiza Matlab, mas no por una acción incorrecta del controlador.

Esta lectura de datos no lleva a decir que tiende el sistema a cometer ciertas lecturas espontaneas incorrectas en la noche.

4.2 Análisis de resultados de visión artificial.

Para analizar los resultados obtenidos en el proceso de visión artificial se mencionarán algunos procesos de pruebas de los que se obtuvo los siguientes resultados

- Proceso de obtención de imágenes en función del algoritmo de visión artificial
- Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador rápido, con n muestras en 24 horas.
- Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador Lento, con n muestras en 24 horas.

Un buen resultado en la captura de imágenes de vehículos infractores dependerá del controlador implementado, por tal razón tanto el controlador y la visión artificial estarán ligados para la obtención de resultados ya que los dos forman parte del sistema.

Se muestra en este compendio los resultados de pruebas que en breve síntesis se menciona lo que se obtuvo por cada proceso de pruebas:

Primero las imágenes obtenidas durante el proceso del algoritmo de visión artificial utilizando Matlab.

Segundo se utiliza un controlador rápido en función de las variables K_p y K_i (ganancia proporcional e integral respectivamente), y se muestra las fotografías que captura la cámara web a la velocidad del controlador, verificando el número y el porcentaje de aciertos que tuvo para lograr identificar el o los vehículos infractores, esto en tres periodos de tiempo de prueba como se lo realizó anteriormente.

Tercero ahora se utiliza un controlador lento en función de las variables K_p y K_i (ganancia proporcional e integral respectivamente), y se muestra las fotografías que captura la cámara web a la velocidad del controlador, verificando el número y el porcentaje de aciertos que tuvo para lograr identificar el o los vehículos infractores, esto en tres periodos de tiempo de prueba como se lo realizó anteriormente.

4.2.8 *Proceso de obtención de imágenes en función del algoritmo de visión artificial.*

En este proceso se muestra los distintos pasos que genera el algoritmo de visión artificial mostrando en cada paso la imagen procesada. Considerando que para esta prueba de resultado se tomaron fotografías al semáforo en condiciones normales en el ambiente, con el cual se trabajó para la investigación y posterior se las paso por el algoritmo de visión y detención del semáforo en color rojo. Imágenes mostradas en la figura 15-4 son los diferentes colores que toma el semáforo en condiciones con luz ambiente exterior.



Figura 92-4: Fotografía prueba algoritmo de visión artificial tres colores
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Para mostrar el resultado de este proceso se analizó las imágenes anteriores en un programa de lectura de imágenes en Matlab y posterior los pasos del algoritmo implementado y comprobado el mismo el cual es identificar el color rojo del semáforo.

Paso 1:

```
data=imread('D:/sem3.jpg');
```

Se lee la imagen a procesar este caso la figura 15-4 tomando en cuenta la extensión del archivo y su ubicación

Paso 2:

```
figure(1);  
imshow(data);
```

Mostramos la imagen que se logró leer en el paso 1

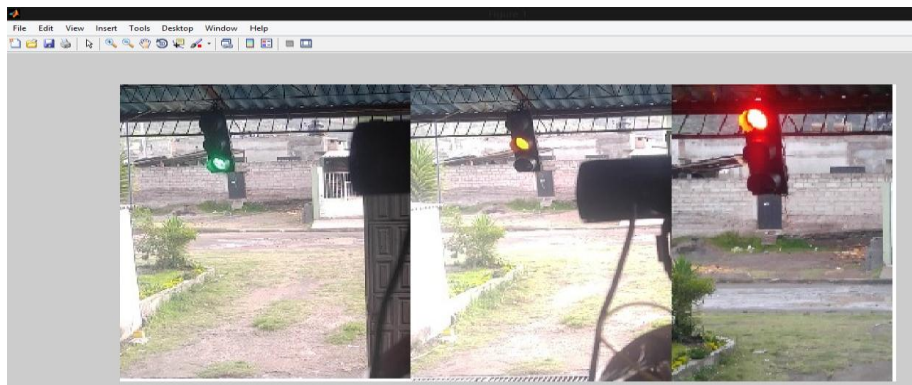


Figura 93-4: Lectura imagen a procesar en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Paso 3:

```
m1=fspecial('average');
```

asignamos en una variable la matriz de la máscara para el filtro a ocupar como se observó en el compendio del capítulo 2 sobre filtros.

Paso 4:

```
data1=imfilter(data, m1);
```

Asignamos en una nueva variable tipo matriz la imagen del paso 1 filtrada o aplicada un filtro de tipo media.

Paso 5:

Mostramos la imagen filtrada en tiempo real a colores, notando la diferencia con la original ya que en esta imagen se torna un poco borrosa el medio acentuando los colores rojos, verde, y tomate.

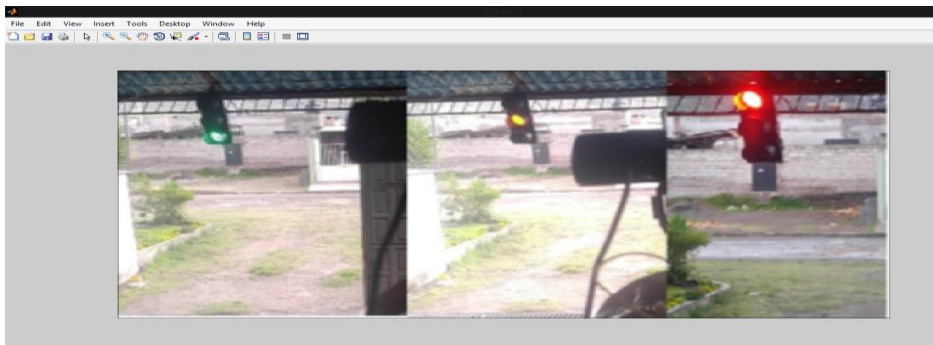


Figura 94-4: Imagen a color preseada filtrada en Matlab.

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Paso 6:

```
x1=data1(:, :, 1);
```

A la imagen filtrada aplicamos una función de detención para obtener uno los planos RGB en este caso el plano bidimensional RED o ROJO, y lo asignamos en una variable tipa matriz.

Paso 7:

```
figure (1);
```

```
imshow(x1);
```

Se muestra el proceso de representación del plano bidireccional Red o Rojo de la figura a procesar del paso 1, en esta figura 18-4 se puede mostrar un tono de brillo claro dentro del contorno donde está ubicado el color rojo de la figurara leída.



Figura 95-4: Imagen de detención del plano bidimensional rojo en Matlab.
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 8:

```
y1=rgb2gray(data1);
```

Llevo la imagen original del paso 1 a una imagen únicamente en una escala de grises es decir blanco y negro y la almaceno en un variable también de tipo matriz

Paso 9:

```
figure(1);  
imshow(y1);
```

Muestro al figura a escala de grises figura 19-4, diferenciado de la anterior figura su brillo donde está el color rojo



Figura 96-4: Imagen a escala de grises de la imagen a procesar.
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 10:

```
dif1=imsubtract(x1,y1);
```

Almacenos en una variable tipa matriz la sustracción de imágenes entre la imagen de detención del plano bidimensional Rojo con la imagen a escala de grises.

Paso 11:

```
figure(1);  
imshow(dif1);
```

Muestro a la imagen restada en el paso anterior., con lo cual nos quedara la detención del color rojo y lo demás en color negro como lo muestra la figura 20-4.

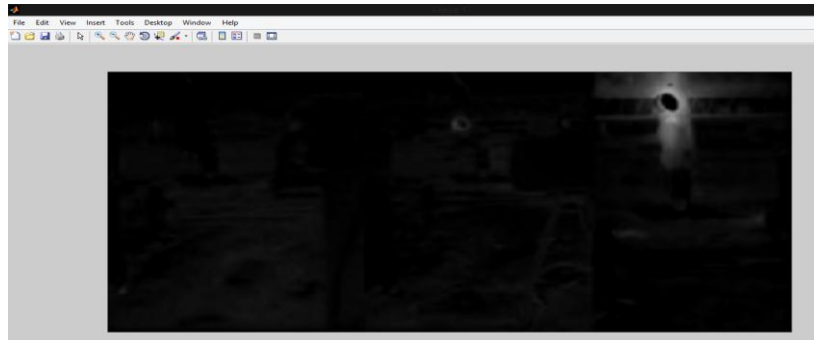


Figura 97-4: Imagen de detención del color rojo por diferencia en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 12:

```
diff1=imfilter(diff1,m1);
```

Nuevamente aplicamos el filtro elegido anteriormente con la finalidad resaltar la solución del contorno rojo ahora únicamente en color blanco y negro.

Paso 13:

```
figure(1);  
imshow(diff1);
```

Visualizamos la anterior operación de la figura 20-4, notando ahora un poco más oscuro todo lo externo al contorno de la detención de color rojo como lo muestra la figura 21-4

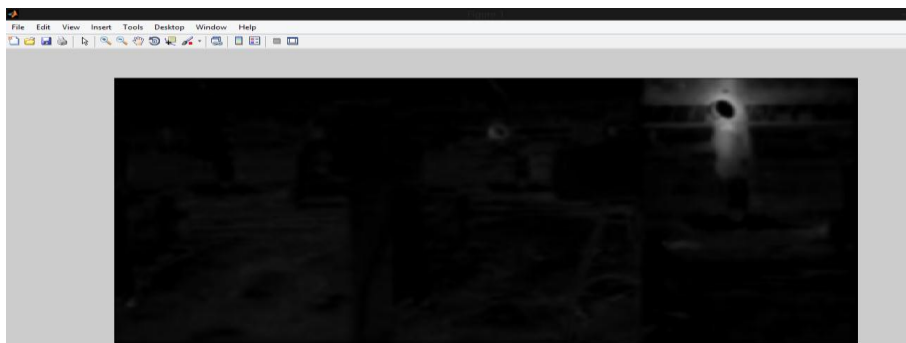


Figura 98-4: Imagen de detención del color rojo por diferencia aplicado un filtro en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 14:

```
diff1=im2bw(diff1,0.18);
```

Aplicamos la función de Umbralización tal que 0,18 es el umbral donde todos los niveles de intensidad por debajo de 0.18 los hace 0 (negro) y todos los que son mayores que 0,18 los hace 1 (blanco). Para encontrar la constante de 0,18 se aplicó a la función de Otsu (graythresh) mencionada antes en el capítulo 2, la misma que dependiendo de nuestro caso fue sintonizada o corregida para poder tener un mejor valor en práctica.

Paso 15:

```
figure(1);  
imshow(diff1);
```

Muestro la imagen aplicando la función de umbralización figura 22-4. Se puede notar que se forma una isla donde se ubica la detención del color rojo, y lo de toma un color negro a excepción de unos cuantos pixeles pequeños de color blanco, que serán eliminados con el siguiente paso:

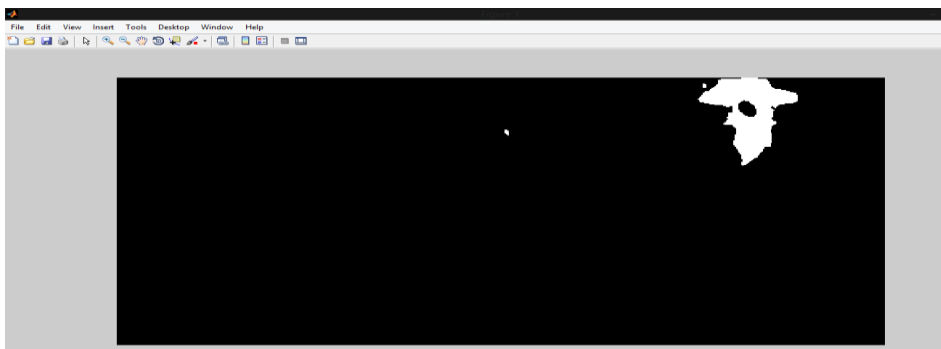


Figura 99-4: Proceso de Umbralización imagen escala de grises con identificación en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 16:

```
diff1=bwareaopen(diff1,300);
```

Aplicando esta función se logra eliminar (hacer negros los pixeles) menores o iguales a 300 pixeles, este valor de 300 se obtuvo en función a pruebas realizadas con detención de imágenes.

Paso 17:

```
figure(1);  
imshow(diff1);
```

Mostramos la imagen en la figura 23-4. Donde se puede observar que los pequeños pixeles de color blanco de la figura 22-4 fueron eliminados.

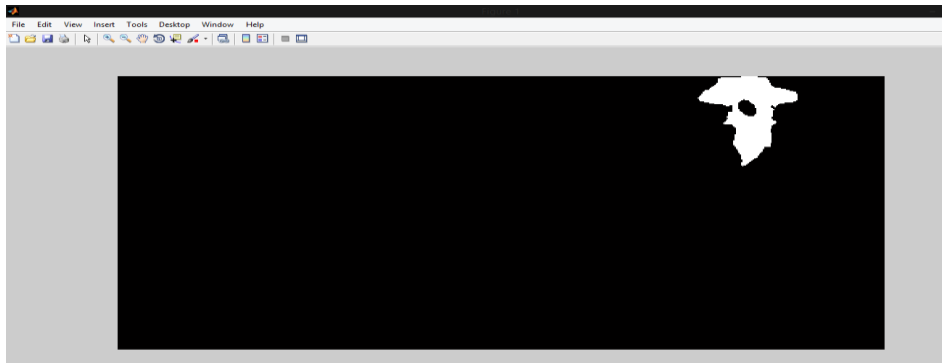


Figura 100-4: Proceso de eliminación de pixeles pequeños en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Paso 18:

```
figure(1);

bw = bwlabel(diff1, 8);
stats = regionprops(bw, 'BoundingBox', 'Centroid');
imshow(data)
hold on

for object = 1:length(stats)
    bb = stats(object).BoundingBox;
    bc = stats(object).Centroid;
    rectangle('Position',bb,'EdgeColor','r','LineWidth',2)
    plot(bc(1),bc(2), '-m+')
    a=text(bc(1)+15,bc(2), strcat('X:', num2str(round(bc(1))), 'Y:',
num2str(round(bc(2))), 'SEM.ROJO'));
    set(a, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12, 'Color', 'yellow');
end
hold off
```

En este paso lo que realizo es una operación de sobre montaje utilizando la función hold on (sobreponer imágenes), entre imagen original y del bordeado de la imagen de la figura 23-4 donde está identificado el color rojo, posterior muestro la imagen final la cual es la detención propia de un color rojo en el semáforo figura 24-4.

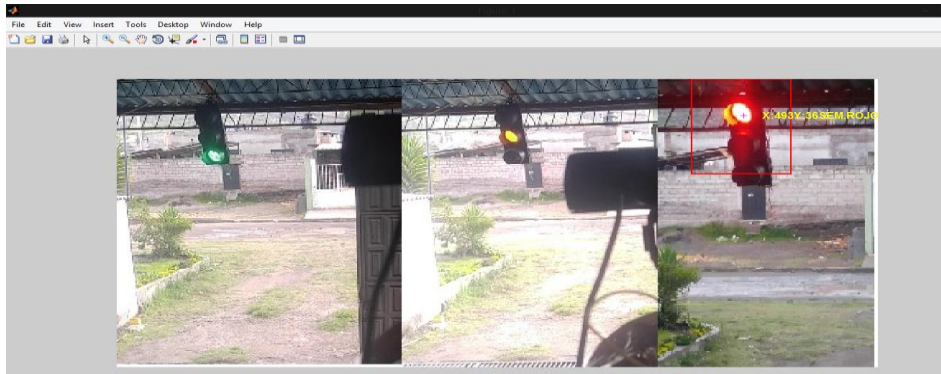


Figura 101-4: Imagen final de detección de color rojo del semáforo en Matlab.
Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

4.2.9 *Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador rápido, con n muestras en 24 horas.*

Para mostrar los resultados que se obtuvieron en la identificación de vehículos utilizando el sistema de control del servo mecanismo de la cámara web, se dividió en tres periodos de tiempo al igual que se mostró en los resultados de sistemas de control, en periodo día , periodo tarde, periodo noche, tomando en cuenta que en la evolución de resultados de visión artificial los niveles de luxes como se mencionó anteriormente pueden afectar al programa de visión artificial más aun cuando en este proceso se necesita presión para detectar vehículos que han infringido la luz roja del semáforo.

Ya que ahora se pretende enfocar el vehículo infractor los tiempos de duración de los colores del semáforo se ven afectados en un incremento y llevándolos a los tiempos reales de funcionamiento de los semáforos de las avenidas principales de la ciudad de Riobamba, con esto se logra tener un periodo real de captura de imágenes de vehículos.

Tomando en cuenta que el tiempo de duración del semáforo en rojo es 30 segundos, en verde 30 segundos, es decir que el ciclo de repetición para el color rojo es ahora 65 segundos en la tabla 16-4 se muestran la información sobre periodos de estudio en la identificación de vehículos.

Tabla 23-4: Información sobre periodos de estudio en la identificación de vehículos.

| | Intervalo de tiempo de estudio | Tiempo total horas | Tiempo total segundos | Total de interacciones luz roja (Población) |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|---|
| Periodo Día | 05h00 am - 13h00 pm | 8 | 28800 | 443 |
| Periodo Tarde | 13h00 pm - 18h00 pm | 5 | 18000 | 277 |
| Periodo Noche | 18h00 pm - 05h00 am | 11 | 39600 | 609 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Periodo de análisis en el día:

Para el estudio de este periodo se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para realizar este tipo de pruebas se necesita un numero considerado de repeticiones con el vehículo en movimiento siendo esto un limitante económico, se aumenta error máximo permitido del intervalo de confianza para que el tamaño de la muestra se reduzca como se indica a continuación en el siguiente orden: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$$N=443$$

$$1-\alpha=95\%$$

$$Z=1.96$$

$$e= 17,3 \text{ en valor decimal } 0,1730$$

$$q=0,5$$

$$p=0,5$$

$$\text{Valor estimado de } p=0,5$$

$$\text{Asumiendo que } p+q=1$$

$$q= 0,5$$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$
$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,1730)^2}$$
$$n = \frac{0,9604}{0,029929}$$
$$n = 32,09$$

Como se sabe la población se puede hacer una corrección al tamaño de la muestra anterior.

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$
$$nc = \frac{32.09}{1 + \frac{32.09 - 1}{443}}$$
$$nc = 29,98$$

Si lo redondeamos

$$nc = 30 \text{ veces}$$

Con este número de muestra real se puede obtener un tiempo de ejecución para obtener esta muestra asumiendo la siguiente relación.

$$65 \text{ segundos} \quad 1 \text{ Interacción del semaforo en rojo}$$

¿Cuánto tiempo durara las 30 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades, el tiempo de duración de las 30 interacciones será:

$$td = 32,5 \text{ minutos}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de luxes de 110272 y una lectura final de 138352 luxes, iniciando a las 08h00 am como lo indica la tabla 17-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo día.

Tabla 24-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en el día con un control rápido.

| Periodo de análisis en el día identificación de vehículos | |
|--|------------|
| Hora inicio prueba | 8:00 AM |
| Hora final prueba | 8:33:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 110272 lux |
| Luxes inicio prueba | 138352 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 30 |
| Lectura de velocidad promedio del vehículo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 18-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con las imágenes almacenadas en el computador.

Tabla 25-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en el día con un control rápido.

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 30 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

En la siguiente figura 25-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de la imagen siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.

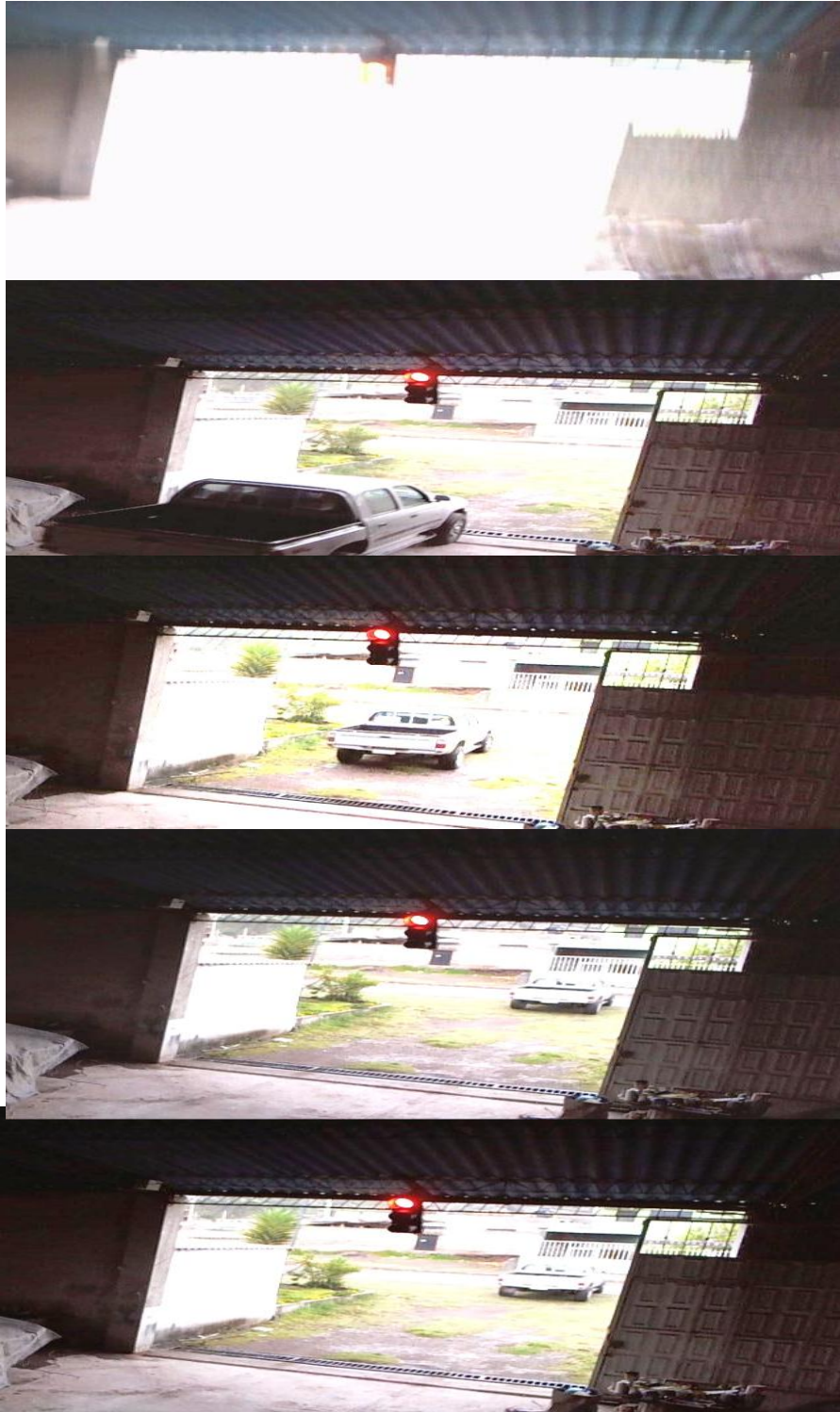


Figura 102-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en el día con un control rápido

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Luego de realizar las 30 pruebas se verificó los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 7-4.

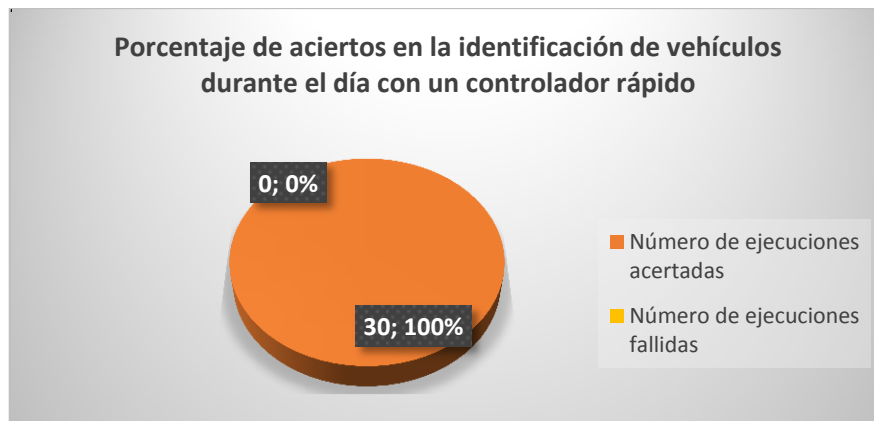


Gráfico 7-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante el día, con un control rápido
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la gráfica anterior se puede ver que el sistema de identificación de vehículos en el periodo del día tiene un 100% de ejecuciones acertadas es decir que la identificación del vehículo se la puede realizar sin ningún problema.

Periodo de análisis en la tarde:

Para el estudio del periodo de la tarde se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para realizar este tipo de pruebas se necesita un numero considerado de repeticiones con el vehículo en movimiento siendo esto un limitante económico, se aumenta error máximo permitido del intervalo de confianza para que el tamaño de la muestra se reduzca, como se indica a continuación en el siguiente orden se cuenta con las siguientes variables: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$N=277$

$1-\alpha=95\%$

$Z=1.96$

$e= 17,3$ en valor decimal $0,1730$

$q=0,5$

$p=0,5$

valor estimado de $p=0,5$

asumiendo que $p+q=1$

$q= 0,5$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$

$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,1730)^2}$$

$$n = \frac{0,9604}{0,029929}$$

$$n = 32,09$$

Como se sabe la población se puede hacer una corrección al tamaño de la muestra anterior.

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$

$$nc = \frac{32,09}{1 + \frac{32,09 - 1}{277}}$$

$$nc = 28,85$$

Si lo redondeamos

$$nc = 29 \text{ veces}$$

Con este número de muestra real se puede obtener un tiempo de ejecución para obtener esta muestra asumiendo la siguiente relación.

$$65 \text{ segundos} \quad 1 \text{ Interacción del semaforo en rojo}$$

¿Cuánto tiempo durara las 29 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades, el tiempo de duración de las 29 interacciones será:

$$tt = 31,42 \text{ minutos}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de luxes de 100272 y una lectura final de 108352 luxes, iniciando a las 15h00 pm como lo indica la tabla 19-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo tarde.

Tabla 4-26: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la tarde con un control rápido.

| Periodo de análisis en la tarde identificación de vehículos | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 15:00 PM |
| Hora final prueba | 15:32:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 100272 lux |
| Luxes inicio prueba | 108361 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 29 |
| Lectura de velocidad promedio del vehículo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 20-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con el grupo de imágenes almacenadas en el computador mostrando en la figura 26-4 un ejemplo de los 29 grupos de imágenes capturadas.

Tabla 4-27: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la tarde con un control rápido.

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 29 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la siguiente figura 26-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de la imagen siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.



Figura 103-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Luego de realizar las 29 pruebas se verifico los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 8-4.

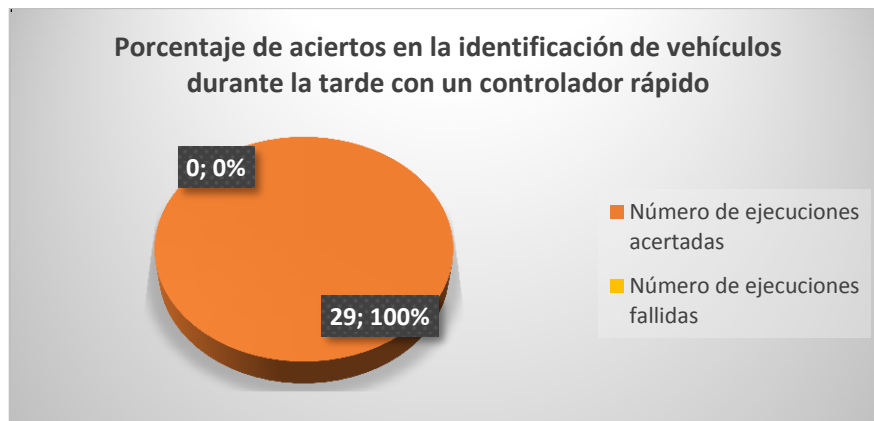


Gráfico 8-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la tarde, con un control rápido
 Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Al igual que se mostró los resultados en el proceso anterior, se puede ver que el sistema de identificación de vehículos en el periodo de la tarde, también tiene un 100% de ejecuciones acertadas es decir que la identificación del vehículo se la puede realizar sin ningún problema.

Periodo de análisis en la noche:

Para el estudio del periodo en la noche se obtiene primero el tamaño de la muestra para la evaluación de interacción del semáforo tomando en cuenta que para realizar este tipo de pruebas se necesita un numero considerado de repeticiones con el vehículo en movimiento siendo esto un limitante económico, se aumenta error máximo permitido del intervalo de confianza para que el tamaño de la muestra se reduzca, como se indica a continuación en el siguiente orden se cuenta con las siguientes variables: La población, el nivel de confianza, factor de probabilidad, error máximo permitido del intervalo de confianza y $p \cdot q$ la varianza de la proporción:

$$N=609$$

$$1-\alpha=95\%$$

$$Z=1,96$$

$$e= 17,3 \text{ en valor decimal } 0,1730$$

$$q=0,5$$

$$p=0,5$$

Valor estimado de $p=0,5$

Asumiendo que $p+q=1$

$$q= 0,5$$

Donde el tamaño de la muestra aleatoria simple n es:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{e^2}$$
$$n = \frac{(1,96^2) \cdot (0,5) \cdot (0,5)}{(0,1730)^2}$$
$$n = \frac{0,9604}{0,029929}$$
$$n = 32,09$$

Como se sabe la población se puede hacer una corrección al tamaño de la muestra anterior.

$$nc = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$
$$nc = \frac{32,09}{1 + \frac{32,09-1}{609}}$$

$$nc = 30,53$$

Si lo redondeamos

$$nc = 31 \text{ veces}$$

Con este número de muestra real se puede obtener un tiempo de ejecución para obtener esta muestra asumiendo la siguiente relación.

$$65 \text{ segundos} \quad 1 \text{ Interacción del semaforo en rojo}$$

¿Cuánto tiempo durara las 31 interacciones de la muestra?

Realizando una regla de tres y conversión de unidades, el tiempo de duración de las 31 interacciones será:

$$tn = 33,58 \text{ minutos}$$

Este periodo de evaluación se lo realizo con una lectura inicial de luxes de 172 y una lectura final de 194 luxes, iniciando a las 19h00 pm como lo indica la tabla 21-4 de las condiciones de evaluación de resultados en el periodo tarde.

Tabla 28-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la noche con un control rápido.

| Periodo de análisis en la noche identificación de vehículos | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 19:00 PM |
| Hora final prueba | 19:34:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 172 lux |
| Luxes inicio prueba | 194 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 31 |
| Lectura de velocidad promedio del vehículo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 22-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con el grupo de imágenes almacenadas en el computador mostrando en la figura 27-4 un ejemplo de los 29 grupos de imágenes capturadas. En este periodo como se vio en el análisis de resultados del controlador tiende a cometer una o dos lecturas incorrectas.

Tabla 4-29: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la noche con un control rápido.

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 28 |
| Número de ejecuciones fallidas | 3 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

El número de ejecuciones fallidas se interpreta como la incapacidad por la que el sistema de visión artificial no detecta el color rojo o detecta otro como el caso del semáforo con una incidencia que traslapa con el color tomate. En este caso las tres ejecuciones fallidas se debieron por lectura del color tomate, pero eso no implica que no se pudo detectar el vehículo infractor.

En la siguiente figura 27-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de dos vehículos como una de la ejecución fallida, ya que al detectar el color tomate el servo mecanismo es excitado para que se mueva 20°, siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.



Figura 104-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en la noche con un control rápido

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Luego de realizar las 31 pruebas se verificó los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 9-4.

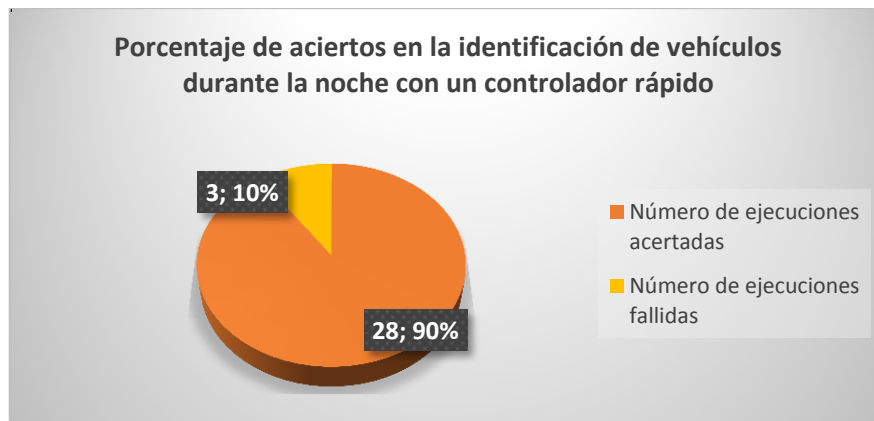


Gráfico 4-9: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la noche, con un control rápido

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

Como observación de los resultados de la gráfica 9-4 se puede que la definición de la cámara con la que se capture el video juega un papel muy importante ya que según esta se podrá lograr un mejor procesamiento de imágenes. Tomando en cuenta que la cámara usa para esta investigación es de tipo escritorio de alta definición no deja de ser una cámara exclusiva para ambientes que no están expuestos a la luz solar, pese a ello el número de ejecuciones fallidas no ha sido tan significativa por la misma razón que se utiliza un filtro de visión artificial para compensar este problema.

4.2.10 *Proceso de identificación de vehículos utilizando un controlador lento, con n muestras en 24 horas.*

Como último proceso para la obtención de resultados que fue sometido el sistema de control de visión artificial es la de experimentar la detención de vehículos con un sistema de control lento a diferencia del anterior proceso que se lo realizó con un sistema de control rápido.

Lo que se pretende mostrar en este proceso es si al regular la velocidad de posicionamiento del servo mecanismo, se logra tener una mejor identificación de vehículos, asumiendo por la velocidad con la que se desplaza la cámara web con un sistema de control lento.

Hay que tomar en consideración que el tiempo que demora el color rojo deberá ser mayor al tiempo que demora el servo mecanismo en posicionarse.

Al igual que los anteriores procesos para mostrar de mejor manera los resultados del experimento se lo dividió en tres periodos como son el día, la tarde y la noche. Valiéndose de la

información del anterior proceso se hará relación a la tabla 16-4. En función a esta partiremos el estudio de los tres periodos.

Periodo de análisis en el día:

Este periodo de análisis se lo realiza con el mismo número de muestras que el caso de las condiciones de prueba para captura de vehículos con un controlador rápido durante el día, cambiando en esta los niveles de luxes y el horario que se llevó la prueba. En la tabla 23-4 se muestra las de prueba para captura de vehículos con un controlador lento durante el día

Tabla 30-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en el día con un control lento.

| Periodo de análisis en el día identificación de vehículos | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 10:00 AM |
| Hora final prueba | 10:33:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 143601 lux |
| Luxes inicio prueba | 143311 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 30 |
| Lectura de velocidad promedio del vehiculo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 24-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con el grupo de imágenes almacenadas en el computador mostrando en la figura 28-4 un ejemplo de los 29 grupos de imágenes capturadas.

Tabla 31-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en el día con un control lento.

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 29 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la siguiente figura 28-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de vehículos, siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.



Figura 105-4. Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en el día con un control lento.

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Como se puede observar en la figura 28-4 al tener el servo mecanismo de la cámara web un controlador lento la imagen de detención del vehículo es retrasada a diferencia con el controlador rápido en la que se puede apreciar más pronto al vehículo que está infringiendo la luz roja, también se puede ver que el número de capturas de imágenes donde está el vehículo disminuye

Luego de realizar las 30 pruebas se verifico los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 10-4.

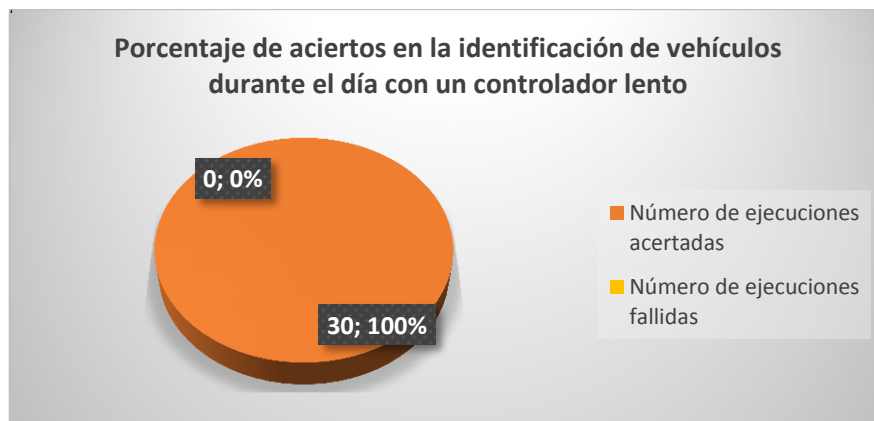


Gráfico 10-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante el día, con un control lento
Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

En la gráfica anterior se puede ver que el sistema de identificación de vehículos en el periodo del día con un controlador lento tiene un 100% de ejecuciones acertadas es decir que la identificación del vehículo se la puede realizar sin ningún problema.

Periodo de análisis en la tarde:

Este periodo de análisis se lo realiza con el mismo número de muestras que el caso de las condiciones de prueba para captura de vehículos con un controlador rápido durante la tarde, cambiando en esta los niveles de luxes y el horario que se llevó la prueba. En la tabla 25-4 se muestra las de prueba de vehículos con un controlador lento durante la tarde.

Tabla 32-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la tarde con un control lento

| Periodo de análisis en la tarde identificación de vehículos | |
|--|-------------|
| Hora inicio prueba | 17:00 PM |
| Hora final prueba | 17:32:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 107321lux |
| Luxes inicio prueba | 80195lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 29 |
| Lectura de velocidad promedio del vehiculo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 26-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con el grupo de imágenes almacenadas en el computador mostrando en la figura 29-4 un ejemplo de los 29 grupos de imágenes capturadas.

Tabla 33-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la tarde con un control lento

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 29 |
| Número de ejecuciones fallidas | 0 |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la siguiente figura 29-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de vehículos, siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.

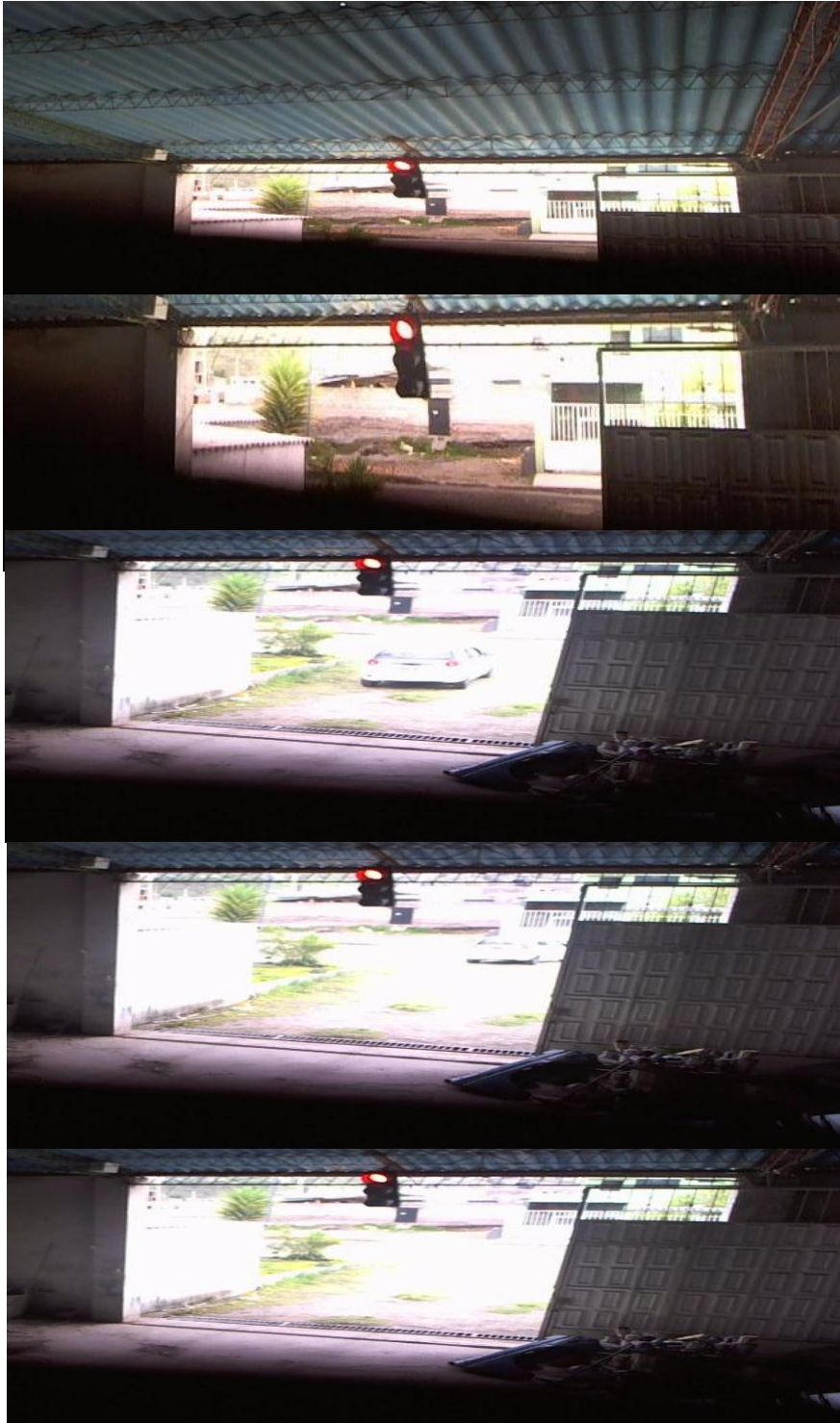


Figura 106-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo

en la tarde con un control lento

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Como se puede observar en la figura 29-4 al someter al servo mecanismo de la cámara web un controlador lento la imagen de detención del vehículo es retrasada a diferencia con el controlador rápido en la que se puede apreciar más pronto al vehículo que está infringiendo la

luz roja, también se puede ver que el número de capturas de imágenes donde está el vehículo disminuye. Luego de realizar las 29 pruebas se verifico los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 11-4

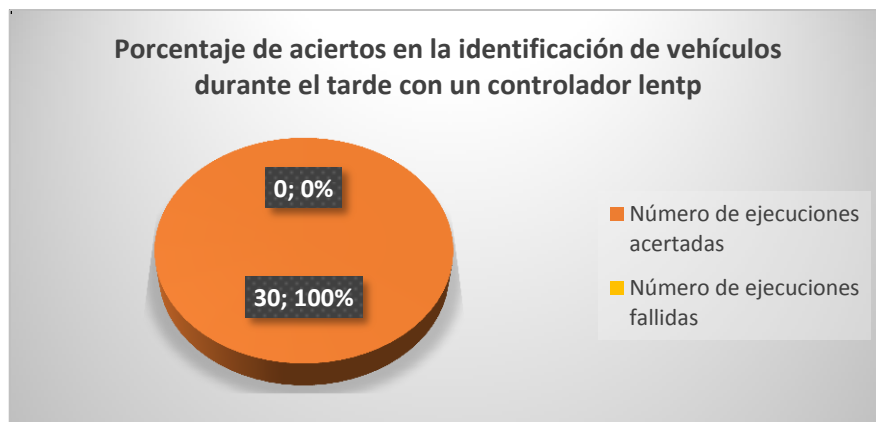


Gráfico 11-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la tarde, con un control lento.

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la gráfica anterior se puede ver que el sistema de identificación de vehículos en el periodo de la tarde con un controlador lento tiene un 100% de ejecuciones acertadas es decir que la identificación del vehículo se la puede realizar sin ningún problema.

Periodo de análisis en la noche:

Este periodo de análisis se lo realiza con el mismo número de muestras que el caso de las condiciones de prueba para captura de vehículos con un controlador rápido durante la noche, cambiando en esta los niveles de luxes y el horario que se llevó la prueba. En la tabla 27-4 se muestra las de prueba para captura de vehículos con un controlador lento durante la noche.

Tabla 34-4: Condiciones de prueba para captura de vehículos en la noche con un control lento

| Periodo de análisis en la noche identificación de vehículos | |
|---|-------------|
| Hora inicio prueba | 21:00 PM |
| Hora final prueba | 21:34:00 AM |
| Luxes inicio prueba | 115 lux |
| Luxes inicio prueba | 109 lux |
| Duración Tiempo prueba luz roja | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz verde | 30 seg |
| Duración Tiempo prueba luz tomate | 5 seg |
| Duración de un periodo completo | 65 seg |
| Número de muestras | 31 |
| Lectura de velocidad promedio del vehiculo | 35 km/h |

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Bajo estas condiciones de prueba se pudo obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 28-4 donde indica el número de veces que la cámara web de visión artificial pudo identificar al vehículo infractor, pudiendo hacer esta verificación con el grupo de imágenes almacenadas en el computador mostrando en la figura 30-4 un ejemplo de los 29 grupos de imágenes capturadas.

Tabla 35-4: Evaluación del sistema de identificación de vehículos en la noche con un control lento.

| Evaluación del sistema de identificación de vehículos | |
|--|----|
| Número de ejecuciones acertadas | 29 |
| Número de ejecuciones fallidas | 2 |

Realizado por: NUÑEZ, Christian, 2017.

En la siguiente figura 30-4 se muestra una película de imágenes verificando la detención de vehículos, siendo un total de 5 imágenes periódicas sucesivas por cada intervención del semáforo en rojo.

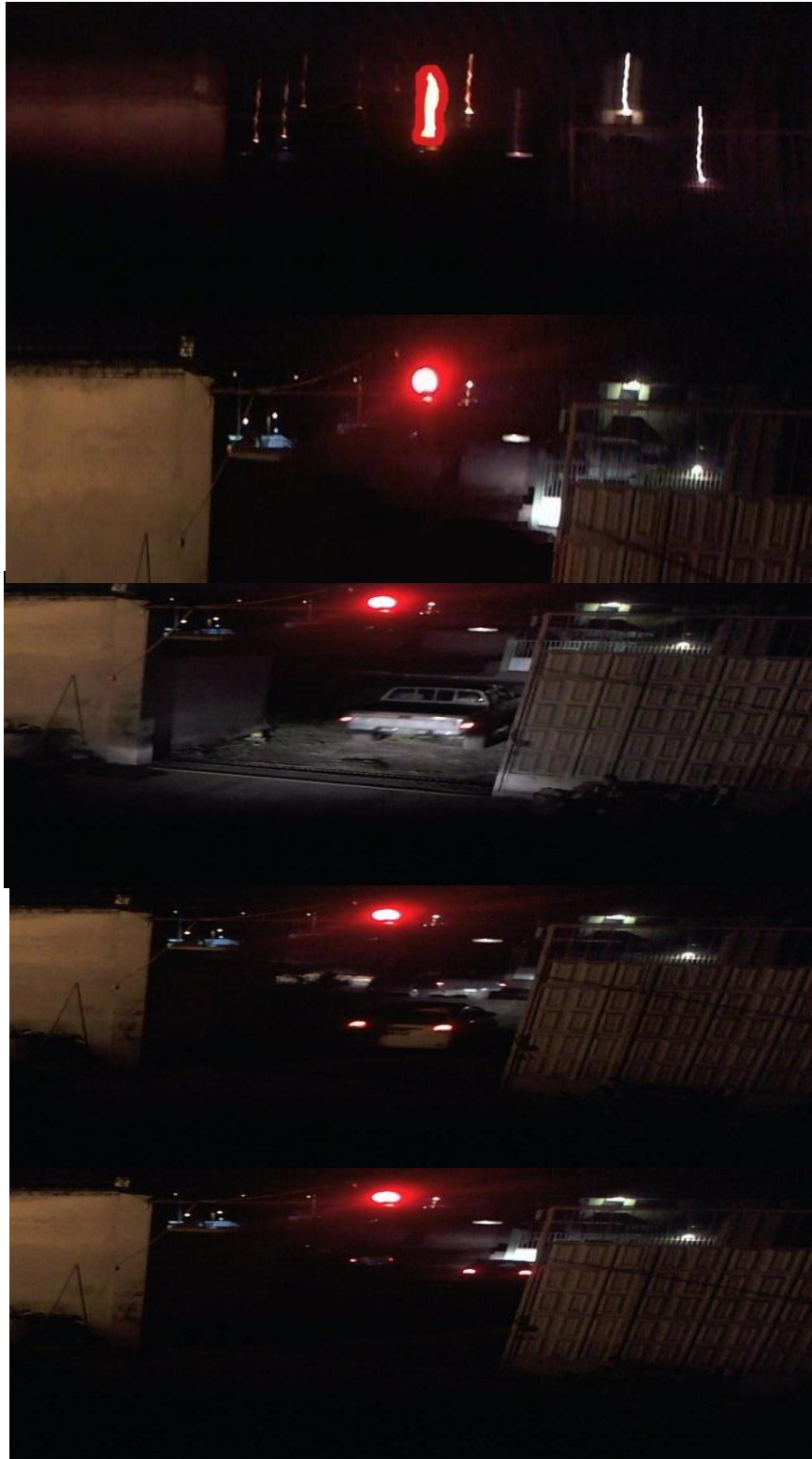


Figura 107-4: Película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en la noche con un control lento

Realizado por: NUÑEZ, Christiam, 2017.

Como se puede observar en la figura 30-4 al someter al servo mecanismo de la cámara web un controlador lento la imagen de detención del vehículo es retrasada a diferencia con el controlador rápido en la que se puede apreciar más pronto al vehículo que está infringiendo la

luz roja, también se puede ver que el número de capturas de imágenes donde está el vehículo disminuye.

En esta imagen se puede ver claramente la detención del color rojo y posterior la captura en imagen de los vehículos infractores, a diferencia de la figura 27-4 de la película del proceso de captura de imagen en la detención de vehículo en la noche con un controlador rápido, en la que se observó una anomalía en la detención ya que éxito al sistema cuando observo el color tomate.

Luego de realizar las 31 pruebas se verifico los siguientes porcentajes de resultados que se pueden ver en la gráfica 12-4

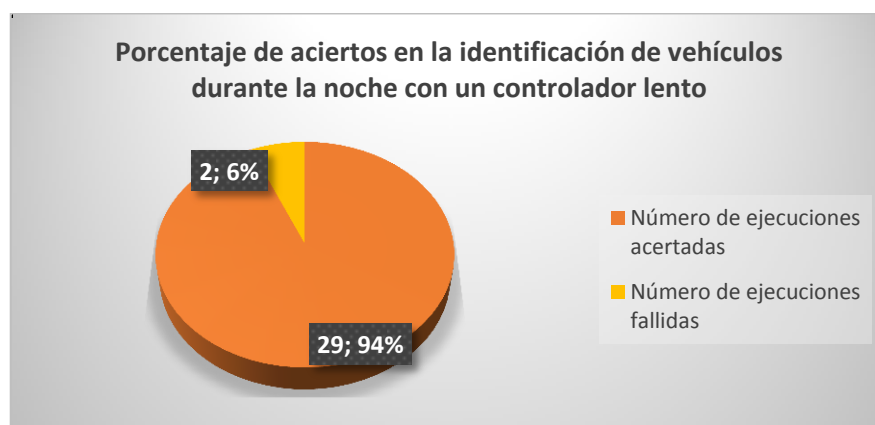


Gráfico 12-4: Porcentaje de aciertos en la identificación de vehículos durante la noche con un control lento.

Fuente: Realizado por NUÑEZ, Christiam, 2017.

En la gráfica anterior se puede ver que el sistema de identificación de vehículos en el periodo de la noche se ve afectado por un 6% de ejecuciones de lectura fallida del color rojo, como se mencionó anteriormente la ejecución fallida se deben principalmente a dos factores: mala lectura del color confundiendo el color tomate y el color rojo, cantidad de luz blanca que no permite la visualización de ningún color.

Este 2% se debe a la mala lectura de colores confundiendo el color tomate con el color rojo, principalmente esto debido a cambio drásticos de luces viéndose afectado en una mala lectura, y a su vez siendo un impedimento para que en ciertos cambios de luz el filtro de visión artificial haga su trabajo.

El problema de inconsistencia de lectura del color rojo no afecta en gran medida a la detención esporádica que se pueda dar de un vehículo infractor.

CONCLUSIONES

- Para realizar la investigación del desarrollo del camino de la solución del sistema a implementar se realizó un estudio en las avenidas y calles de la ciudad de Riobamba, considerando las variables a implementar en el sistema. Sin el estudio previo de estas variables como distancias, alturas, niveles de luz, tiempos de duración, colores de semáforo, velocidad de vehículos, no se hubiera podido interpretar la verdadera dinámica de funcionamiento del servo mecanismo, el cual se lo implemento bajo condiciones reales a las que estaría expuesto para un correcto funcionamiento.
- Se realizaron dos fases de desarrollo e investigación las cuales fueron: fase de desarrollo e investigación de sistemas de control y la fase de desarrollo e investigación de visión artificial. Se partió con la fase de sistemas de control ya que esta será la base fundamental para el sistema a implementar con la ayuda posterior de la fase de visión artificial. El sistema de visión artificial es quien excita al sistema de control para que actúe.
- En la fase de sistema de control, se partió el estudio identificando el modelo de la planta, empleado una identificación ARX (análisis de regresión exógena) para la identificación del comportamiento lineal, dicha identificación se pudo lograr con la lectura del comportamiento en posición del servo mecanismo en lazo abierto. La lectura del servo mecanismo mostró dos comportamientos: Un comportamiento no lineal semejante al control de gradiente y un comportamiento lineal equivalente a un sistema de primer orden de tipo cero.
- Se observó que el sistema si es un servo controlado por una señal PWM, por lo que se afirmó que, para fines prácticos reales, el sistema controlado es en conjunto un sistema de primer grado tipo cero, el cual el set point viene dado por una señal PWM.
- Pese a que el comportamiento de un servo motor es controlado el sistema implementado regula el control interno del motor del servo, por esta razón y por la lectura de la dinámica del comportamiento del sistema en condiciones de lazo abierto se implementa un controlador proporcional integrador.
- Para la implementación del controlador del sistema se lo realizó en una tarjeta Arduino cuya programación dependió de las ecuaciones de estado obtenidas en el desarrollo de la investigación, el análisis partió con la implementación de un controlador proporcional el mismo que tuvo un error de posicionamiento grande, y del cual se obtuvo una lectura del

tiempo de muestreo, necesario para corregir el controlador proporcional con un controlado integral el mismo que realiza una acción rápida y posterior una acción lenta antes de llegar a su set point.

- Después de un estudio de prueba y error, se encontraron las constantes necesarias para realizar un control de posicionamiento del servo mecanismo de la cámara web, los valores para un controlador rápido son $K_p = 1$ (ganancia proporcional) , $K_i = 0$ (ganancia integral) , $N = 1000000000$ (cantidad de muestras discretas ponderadas). Para un controlador lento $K_p = 0.1$ (ganancia proporcional) , $K_i = 0.3$ (ganancia integral) , $N = 1.25$ (cantidad de muestras discretas ponderadas)
- En el desarrollo de la fase de visión artificial, la incorporación de un filtro de media aritmética en dos instancias del algoritmo ayudo a corregir ciertas lecturas pobres que generó la cámara web con la que se trabajó, ayudando a que el procesamiento de imagen y posterior a la identificación de vehículos sea correcta.
- El método que ayudó a la selección del filtro de visión artificial fue la de prueba de captura de imágenes en estado natural, el cual arrojó diferentes valores en tres periodos diferentes tanto en el día, tarde y noche, razón por la cual se implementó el filtro que ayude en estos tres periodos a tener una mejor lectura de imágenes, tomando en consideración el nivel de luxes al que está expuesta la cámara web.
- Al obtener los resultados de la prueba realizada con un controlador rápido para el posicionamiento del servo mecanismo de la cámara web se observó que únicamente en la noche el sistema presenta lecturas inconsistentes en un promedio de 1% del número de lecturas que como muestra se obtuvo un total de 392, es decir apenas de las 392 veces tuvo una inconsistencia de lectura 2 veces. El comportamiento del controlador está ligado al proceso de visión artificial, razón por la cual se debe esta inconsistencia de lectura del accionamiento del controlador.
- Al obtener los resultados de la prueba realizada con un controlador lento para el posicionamiento del servo mecanismo de la cámara web se observó que únicamente en la noche el sistema presenta lecturas inconsistentes en un promedio de 1% del número de lecturas que como muestra se obtuvo un total de 392, es decir apenas de las 392 veces tuvo una inconsistencia de lectura 3 veces. El comportamiento del controlador está ligado al proceso de visión artificial, razón por la cual se debe esta inconsistencia de lectura del accionamiento del controlador.

- Los resultados obtenidos al realizar pruebas de identificación de vehículos mediante el posicionamiento del servo mecanismo de la cámara web con un controlador rápido, muestran que solo durante el periodo de la noche el sistema de identificación de vehículos presenta algunas incoherencias debido a un accionamiento del servo mecanismo cuando el semáforo está en tomate, esta anomalía se observó que de un total de 31 muestras 3 de ellas fueron incorrectas es decir el 10% fueron incorrectas.
- Los resultados obtenidos al realizar pruebas de identificación de vehículos mediante el posicionamiento del servo mecanismo de la cámara web con un controlador lento, muestran que solo durante el periodo de la noche el sistema de identificación de vehículos presenta algunas incoherencias debido a un accionamiento del servo mecanismo cuando el semáforo está en tomate, esta anomalía se observó que de un total de 31 muestras 2 de ellas fueron incorrectas es decir el 6% fueron incorrectas.
- Mediante los experimentos y resultados que se obtuvo durante la investigación podemos concluir que si se puede utilizar la visión artificial para el proceso de posicionamiento de un servo mecanismo de una cámara web capaz de reaccionar a la activación de la luz roja del semáforo para identificar un vehículo infractor con la utilización de una sola cámara de visión y procesamiento de imágenes por computadora

RECOMENDACIONES

- Para obtener el tiempo de muestreo que la tarjeta del controlador proporciona es recomendable leer el mismo utilizando un osciloscopio, y en el programa a ejecutarse eliminar todos los retardos posibles de tiempo, tampoco es recomendable al mismo tiempo abrir una comunicación serial en la tarjeta del controlador a utilizar.
- Al seleccionar una cámara para el procesamiento de imágenes con Matlab utilizar de preferencia una cámara web de alta definición que cuente con auto enfoque de visión.
- Cuando se requiera trabajar en una comunicación con dos tarjetas Arduino es recomendable y necesario unir las tierras de ambas tarjetas.
- Para una mejor lectura y proceso de datos utilizar una función de conversión de bits a grados o de grados a bits, para de esta manera trabajar en una sola medida.
- Para la elección de un filtro en el procesamiento de imágenes en un ambiente exterior es recomendable hacer pruebas de funcionamiento en el lugar donde se va a implementar el sistema de visión artificial mas no en el laboratorio.
- Es recomendable para la obtención de resultados de lecturas de posicionamiento de un servo motor utilizar una tarjeta de adquisición de datos independiente y autónoma la misma que pueda ser leída de forma rápida y sin congestión de datos de bits.

BIBLIOGRAFIA

- BELLON HERNANDEZ, O.** (2015). Diseño y simulación de un controlador en tiempo discreto para regulación de temperatura en un invernadero a escala. Prospectiva. [PAPER] Tunja – Colombia. [28, agosto 2015] <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v14n1/v14n1a10.pdf>
- CORKE, P.** (2017). Robotics, Vision and Control, 2^a. ed, India, Springer Science & Business Media. pp. 285 – 317. [20 enero del 2017]
- DE LA ESCALERA, A., & ARMINGOL, J. M.** (2001). Visión por computador Fundamentos y métodos, 1^a. ed, Madrid – España, Pearson Educación. pp. 514 - 556
- DORF, R., BISHOP, R., & DORMIDO BENCOMO, S.** (2008). Sistemas de control moderno, 1^a. ed, Madrid-España, Pearson Educación. pp. 38 - 43
- ELIZONDO, J. E., & MAESTRE, L. P.** (2002). Fundamentos de procesamiento de imágenes. Documentación Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana. [PDF EN LINEA] [20 noviembre del 2016] http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/39190415/FundamentosDeProcesamientoDeImagenes.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1496167760&Signature=4Lw3Gezfkua5xb0WgcTFn7FHqZY%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DFundamentos_de_procesamiento_de_imagenes.pdf
- ISERMANN, R.** (1989). Digital Control Systems, 1^a. ed, Berlin, Springer Berlin. pp. 50 - 134
- KUNUSCH, C.** (2003). IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS. [PDF EN LINEA] <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/cys/pdf/identificacion.pdf>
- KUO, B.** (2007). Digital control systems, 1^a. ed, New York: Oxford University Press. pp. 32 - 172

- MARTINSANZ, G. P., & DE LA CRUZ GARCÍA, J. M.** (2016). Visión por computador. Imágenes Digitales y Aplicaciones, 2ª. ed, Madrid – España, RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones. pp. 70-153
[2 diciembre del 2016]
- OGATA, K.** (1996). Sistemas de control en tiempo discreto, 1ª. ed, México, Prentice Hall Hispanoamericana. pp. 35 - 153
- OPPENHEIM, A. V., WILLSKY, A. S., & NAWAB, S. H.** (1998). Señales y sistemas, 2ª. ed, Madrid – España, Pearson Educación. pp. 741- 856
- PUIG, V., QUEVEDO, J., ESCOBET, T., MORCEGO, B., & OCAMPO, C.** (2004). Control tolerante a fallos (parte i): Fundamentos y diagnóstico de fallos. Revista Iberoamericana de automática e informática industrial, pp. 15-31.
[PAPER]
[15, octubre 2016]
https://www.researchgate.net/profile/Joseba_Quevedo/publication/28141715_Control_Tolerante_a_Fallos_Parte_I_Fundamentos_y_Diagnostico_de_Fallos/links/00b49524700da358650000.pdf
- RENGIFO, C. F.** (2004). Una Herramienta para Identificación Recursiva de Sistemas Dinámicos.
[PDF EN LINEA]
https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Rengifo/publication/242765184_UNA_HERRAMIENTA_PARA_IDENTIFICACION_RECURSIVA_DE_SISTEMAS_DINAMICOS/links/5650a55e08ae4988a7ab952d.pdf
- SANTANA, J. E. G., TRESPALACIOS, J. M. P., URIBE, J. D. J. R., & BRAVO, E. F. C.** (2017) Sistema Neuronal de Bajo Costo para la Identificación de Colores.
[PAPER] Cali – Colombia.
[10, marzo 2015]
<http://www.profesaulosuna.com/data/files/ROBOTICA/ROBOT%20VISION/SistemaNeuronaldeBajoCostoparalaidentificaciondecolores.pdf>
- VAN DEN HOF, P., BOMBOIS, X., & COURSE, L. N. D.** (2004). System identification for control. Delft Center for Systems and Control, TU-Delft. Lecture notes, Dutch Institute for Systems and Control (DISC).

[PDF EN LINEA]

<ftp://190.90.112.131/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Identificacion/Parte%20III/clase20%20ident/docs/DISC2004.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de conexión entre Arduinos.

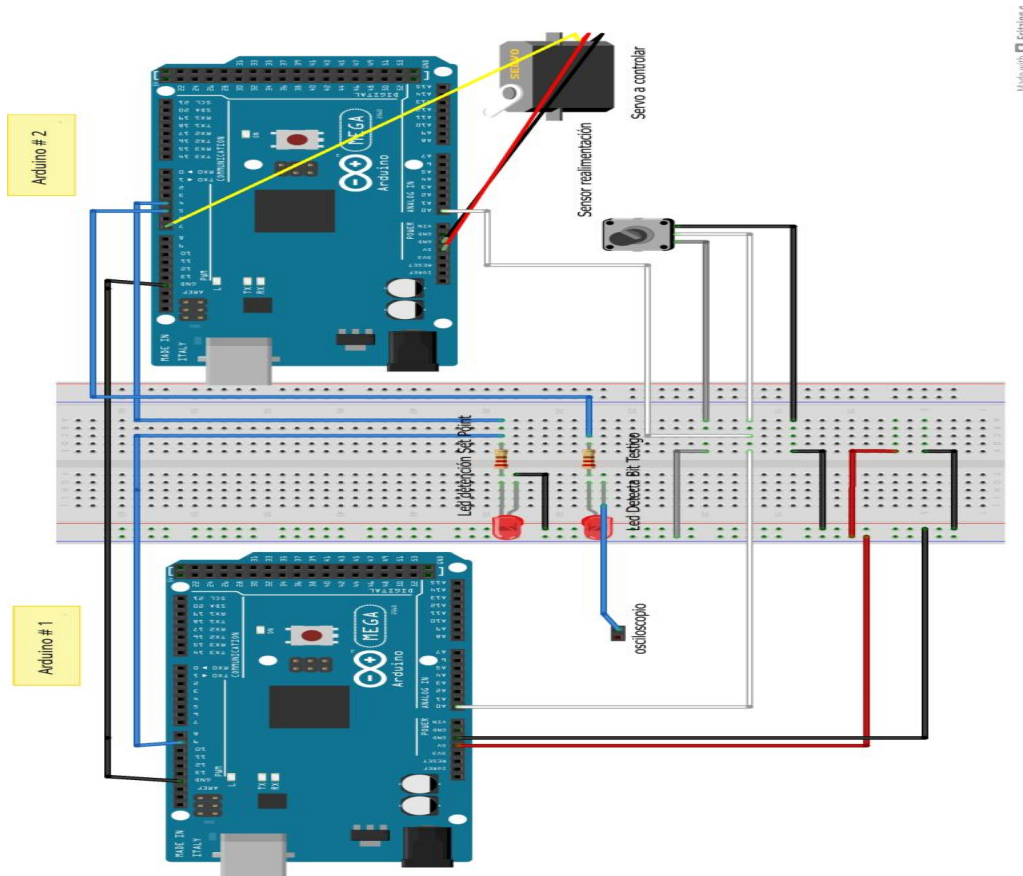
Bill of Materials: Esquma de conexion2.fzz

C:/Users/Christiam/Documents/ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO/Maestria Control/MAESTRIA SISTEMAS DE CONTROL- FINAL/TESIS/Esquma de conexion2.fzz
viernes, julio 7 2017, 15:34:51

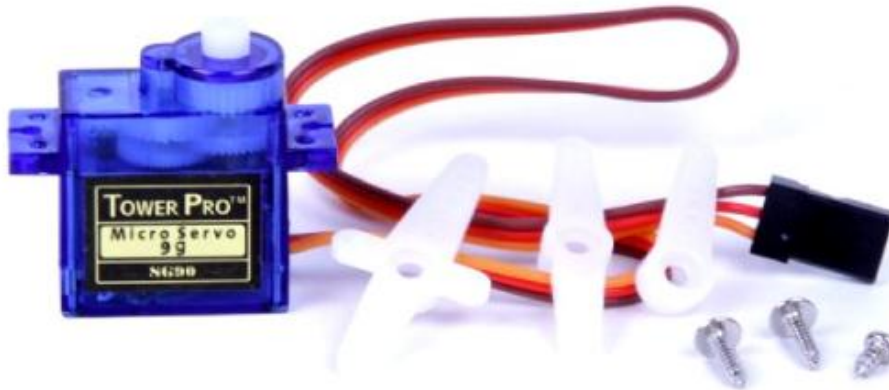
Assembly List

| Label | Part Type | Properties |
|-------------------------|--------------------------------|--|
| Led Detecta Bit Testigo | Red LED - 5mm | paquete 5 mm [THT]; leg yes; Color Red (633nm) |
| Led detención Set Point | Red LED - 5mm | paquete 5 mm [THT]; leg yes; Color Red (633nm) |
| osciloscopio | Generic female header - 2 pins | paquete THT; Tamaño del hoyo 1.0mm,0.508mm; row single; forma ♀ (female); pins 2; espacio entre pines 0.1in (2.54mm) |
| Parte1 | Arduino Mega 2560 (Rev3) | Tipo Arduino MEGA 2560 (Rev3) |
| Parte2 | Arduino Mega 2560 (Rev3) | Tipo Arduino MEGA 2560 (Rev3) |
| R1 | 220 Ω Resistor | paquete THT; tolerance ±5%; bands 4; Resistencia 220Ω; espacio entre pines 400 mil |
| R2 | 220 Ω Resistor | paquete THT; tolerance ±5%; bands 4; Resistencia 220Ω; espacio entre pines 400 mil |
| Sensor realimentación | Rotary Encoder | paquete THT; Tipo ALPS STEC12E07 |
| Servo a controlar | Basic Servo | |

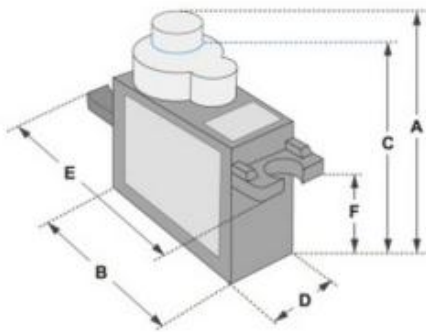
Shopping List



Anexo 2: Estructura de servo motor SG90:



Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but smaller. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.



| Dimensions & Specifications | |
|-----------------------------|---------|
| A (mm) : | 32 |
| B (mm) : | 23 |
| C (mm) : | 28.5 |
| D (mm) : | 12 |
| E (mm) : | 32 |
| F (mm) : | 19.5 |
| Speed (sec) : | 0.1 |
| Torque (kg-cm) : | 2.5 |
| Weight (g) : | 14.7 |
| Voltage : | 4.8 - 6 |

Position "0°" (1.5 ms pulse) is middle, "90°" (~2ms pulse) is middle, is all the way to the right, "-90°" (~1ms pulse) is all the way to the left.

