

# LA AUTOMATIZACIÓN DEL GONIOFOTOMETRO DEL IIE: UN DISEÑO INDUSTRIAL DE BAJO COSTO.

Claudio Misail, Ing.  
Jorge Suárez, Ing.  
André Fonseca

FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD MAYOR DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY

E-mail : andre315@iie.edu.uy

## RESUMEN

Este trabajo describe la automatización del goniómetro existente en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de la República Oriental del Uruguay, realizado como trabajo de graduación.

Se detallará los cambios estructurales realizados y el soporte electrónico utilizado, con la correspondiente descripción de su hardware y de su software, especialmente diseñados para tener como controlador central una computadora IBM XT compatible, con una tarjeta de expansión de puertos y una tarjeta de conversión analógico-digital.

## ABSTRACT

This paper describes the automation of a goniophotometer placed at the "Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de la República Oriental del Uruguay". This was a final grade work.

It shows the structural changes and the electronic support used, with the hardware and software description, both designed to have an IBM XT computer as the process controller, with a port expansion and an A/D converter card.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, el Instituto de Ingeniería Eléctrica viene aportando una serie de servicios, entre los cuales se encuentran los ensayos de iluminación. Para la realización de tal tarea, el Instituto cuenta con un laboratorio de fotometría que posee como principales equipos de ensayo una "Esfera Integradora de Ulbricht", para la medición del flujo luminoso total, y un "Goniómetro" con la facilidad de girar la fuente luminosa. Basados en estos equipos se obtienen como resultado de los ensayos el diagrama de intensidad luminosa, el flujo luminoso total y el rendimiento del artefacto.

El goniómetro existente en el Instituto es, por sus características de construcción, del tipo 2 (según la "COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE" [1]). En la figura 1 se ilustra este tipo de montaje.

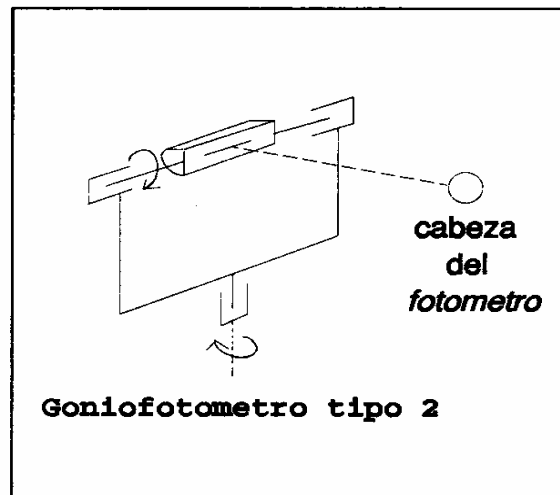


Figura 1 - Goniómetro existente en el I.I.E.

Los ensayos con el goniómetro consisten en posicionar la luminaria a ensayar en soportes con ejes de giro vertical y horizontal, y a una distancia fija de una fotocélula, de tal forma que los rayos a medir incidan perpendicularmente sobre ésta. Cumpliéndose los requerimientos de la distancia mínima entre ellos en relación a las dimensiones del artefacto, la fuente luminosa se considera como puntual. Se toman las mediciones del luxímetro en distintas posiciones de la luminaria, en un entorno de  $-90^\circ$  y  $+90^\circ$ , para ambos ángulos de giro, en pasos de  $10^\circ$ . Los datos relevados son introducidos en una planilla, en forma de matriz, de dimensiones  $19 \times 19$ , y posteriormente son procesados por la fórmula

$$\text{bujías} = [\text{medida en lux}] \times \text{dist}^2$$

donde "dist" representa la distancia entre el punto considerado como fuente luminosa y la cabeza del fotómetro. Con los datos procesados se puede trazar el diagrama de intensidad luminosa, así como otras curvas de utilidad en proyectos luminicos como las curvas isolux.

Hasta el momento del desarrollo de este proyecto, los ensayos con el goniómetro se venían realizando en forma manual. Dadas las condiciones en que se concretaban estos ensayos, aunque realizados con extremo cuidado, introducían sensibles errores en el posicionamiento de la luminaria, así como también en la

lectura de la medida. Además, la duración de un ensayo se prolongaba por más de cuatro ó cinco horas, tarea que hacía imposible la repetición del relevamiento de varias curvas para comparación.

Para superar estas dificultades se propuso la automatización del goniofotómetro. Para esto sería necesario: 1) el posicionamiento automático del goniofotómetro, así como la lectura de las medidas y el control de todo el sistema en base a un sistema programable, y 2) la utilización de una fuente regulada para cumplir las condiciones requeridas de la tensión mientras se efectúa el ensayo.

El objetivo de este proyecto es la implementación de un sistema automático que cumpla el punto 1) de lo mencionado anteriormente. Esto implica la automatización del posicionamiento y la adquisición de los datos.

Para la realización de este proyecto se contó con el trabajo de tres estudiantes de Ingeniería Eléctrica, el apoyo y orientación de un docente, el Prof. Ing. Rafael Canetti, y el aporte de ideas y soluciones de los funcionarios del taller mecánico del Instituto (los señores Carlos Peña, Nelson Ventura, Roberto Rodríguez y Sergio Beheregaray). El proyecto fue totalmente desarrollado en el Instituto de Ingeniería Eléctrica y contó con el apoyo económico del mismo (con un presupuesto asignado de U\$ 1500 americanos) por intermedio de un convenio firmado entre el Instituto y la Intendencia Municipal de Montevideo.

## DESCRIPCIÓN GENERAL

Para la implementación del Goniofotómetro se dividió la automatización en dos partes: por un lado el movimiento de la luminaria, y por otro la adquisición de la medida desde el luxímetro. Los dos procesos automatizados se llevan a cabo en forma coordinada, siendo ambos comandados y controlados desde un mismo computador PC-XT compatible IBM, como se puede apreciar en la **figura 2**.

La automatización del movimiento del artefacto implicó la elaboración de un sistema mecánico de precisión para el soporte de las luminarias, y a su vez la realización del hardware y software para el comando de los motores utilizados y el control del sistema.

Para la adquisición de la medida se utilizó la salida analógica del luxímetro, la cual es amplificada y filtrada para luego ser convertida a una señal digital a los efectos de su almacenamiento y posterior procesado en el PC.

El software de aplicación desarrollado para el computador fue realizado en lenguaje Pascal, integrando en un mismo paquete los programas de control del movimiento de la luminaria y de adquisición de datos del luxímetro, y contiene una interfase con el usuario con menús desplegables para el fácil manejo del equipo. Mientras es requerida la interacción con el usuario, éste es guiado por el programa que le indica a cada momento cual es la acción necesaria.

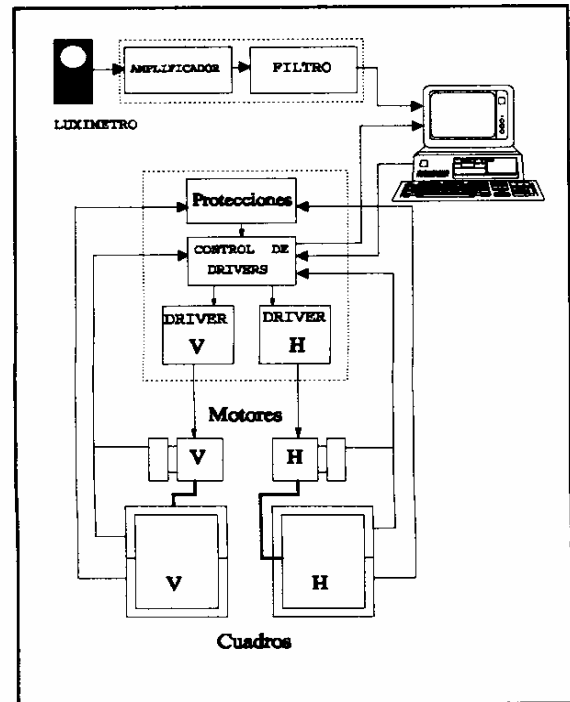


Figura 2 - Diagrama de la automatización

## MOVIMIENTO DE LA LUMINARIA

### Diseño mecánico

En la realización de este proyecto fueron muy importantes las modificaciones que debieron llevarse a cabo en el Goniofotómetro para la automatización del movimiento de una estructura mecánica de grandes dimensiones y con una alta precisión. Se debieron realizar trabajos orientados a mejorar, en diferentes aspectos, los soportes y su instalación, a los efectos de lograr una instalación acorde a las exigencias del proyecto.

El soporte de eje vertical consta de un marco de hierro "U" (normal de 6 cm.), de 210 cm de alto por 99,5 cm de ancho. Tiene en los puntos medios de sus caras superior e inferior dos ejes solidarios a él los cuales guían su movimiento de eje vertical.

El soporte del movimiento de eje horizontal también es un marco de hierro "U" (normal de 6 cm.). Tiene una altura de 182,5 cm y un ancho de 90,5 cm. Se encuentra inscripto dentro del otro marco y se apoya sobre éste para lograr su movimiento de rotación horizontal. Los ejes de giro están ubicados sobre las caras laterales y están montados sobre rulemanes afirmados al marco exterior, que le permiten un movimiento de rotación más libre. Los ejes de rotación no están ubicados a la altura del centro de las caras laterales, sino que se ubican más arriba que éste (a 122 cm de su cara inferior).

Los principales cambios estructurales implementados en la estructura de los soportes fueron:

**Implementación de un punto fijo en el espacio.** Se trasladó el eje de rotación vertical de tal forma que se intersecte con el eje de rotación horizontal. Así, los dos ejes de rotación pertenecen a un mismo plano y su intersección determina un punto fijo en el espacio.

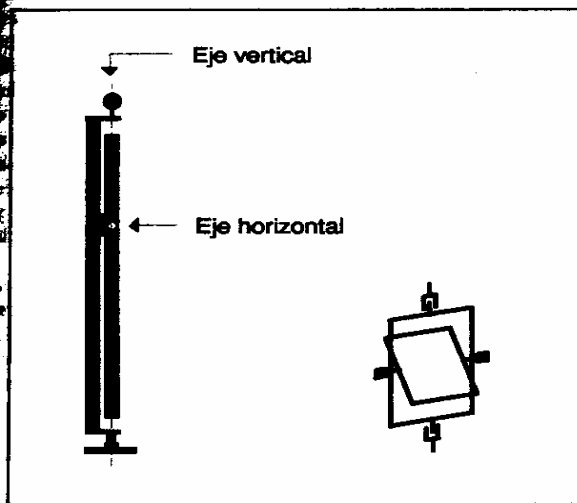


Figura 3 - Vista lateral (simplificada) de la nueva estructura

Se diseñaron dos nuevas piezas, una en la parte superior del soporte exterior y otra en la inferior que desplazan el eje de rotación vertical hacia el plano al que pertenece el otro soporte (soporte de eje horizontal o soporte interior).

**Ampliación del rango de medición.** Debido a la ubicación de los soportes en el interior de la sala de laboratorio no se lograba una resolución completa para el movimiento de vertical. Con la traslación de su eje se solucionó este problema.

**Perfeccionado de la fricción.** A las nuevas piezas construidas para el soporte exterior fueron acoplados rulemanes, posibilitando un giro más libre de los soportes.

**Mejoras al balanceo de la estructura.** A través de dos sistemas de pesas se logra el equilibrio del soporte en sus posiciones horizontal y vertical, garantizando así su equilibrio para cualquier posición de ensayo.

**Mejoras a la rigidez de la estructura.** Se cerró el soporte de eje horizontal por su parte superior a través de una "U" y una plancha de hierro, que a su vez forman parte del sistema de balanceo de la estructura. También se soldaron piezas de hierro en los vértices de cada soporte.

La estructura proyectada para facilitar el control del movimiento de los soportes desde los motores es similar para ambos soportes. Para el soporte de eje vertical (horizontal) se utilizó un reductor del tipo sinfín-corona con una reducción de 1:12 (1:70). En ambas estructuras tenemos dos acoples: entre el soporte y la corona del reductor, y entre el motor y el sinfín del reductor. El primero es una pieza especialmente diseñada y torneada (una para cada soporte), que fija los

ejes del soporte y de la corona a través de prisioneros. En esta misma pieza se instaló un disco de levas (ver "Protecciones") para activar las protecciones al movimiento. El acople entre el motor y el sinfín del reductor es un manchón de goma que elimina posibles desalineamientos entre sus ejes. Este manchón también tiene un prisionero al eje del sinfín, y otro al eje del motor. La fijación de ambos mecanismos fue realizada utilizando planchas de hierro como base.

La estructura final y los detalles de los mecanismos para los movimientos de los ejes pueden ser apreciados en las figuras 4, 5 y 6.

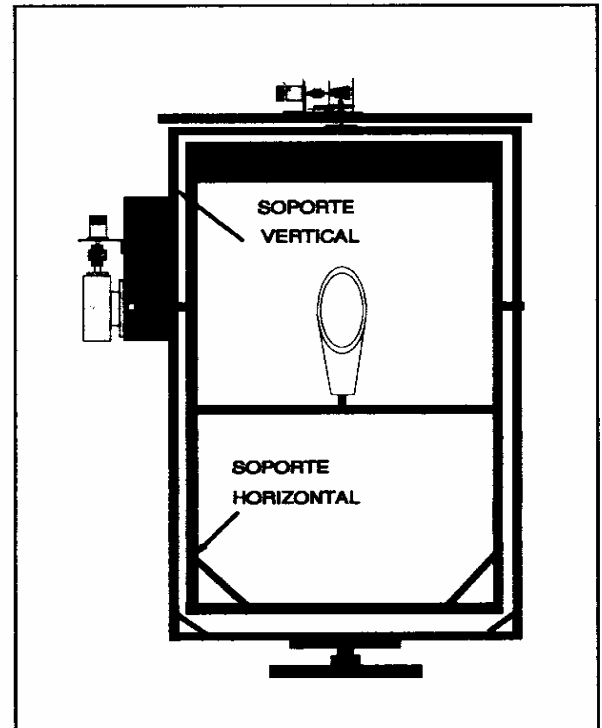


Figura 4 - Vista frontal de la nueva estructura

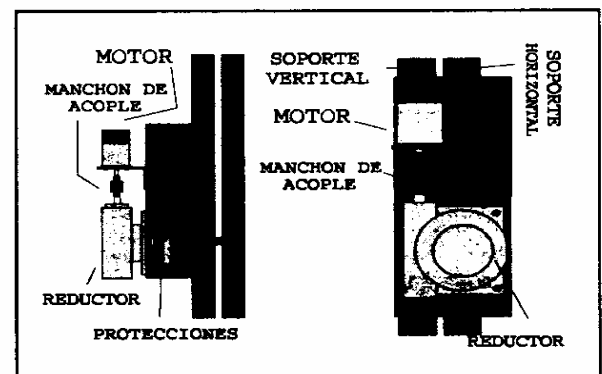


Figura 5 - Detalle del mecanismo del eje horizontal

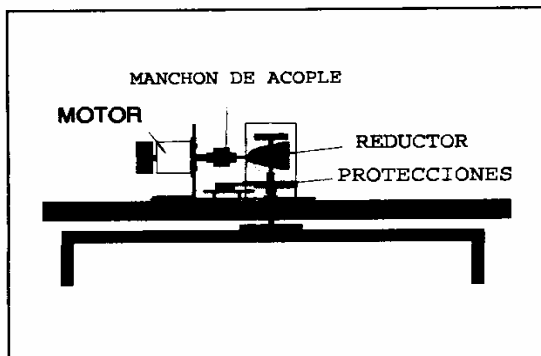


Figura 6 - Detalle del mecanismo del eje vertical

### Protecciones

Debido a las dimensiones de los soportes es necesario protegerlos contra movimientos no permitidos que ocasionen daños a la instalación. En nuestro caso se han dispuesto protecciones a dos niveles, una a nivel de software y otra a nivel de hardware. Se trata de microswitches ubicados de tal forma que son accionados por levas solidarias a los ejes de rotación, cuando éstos alcanzan determinados ángulos extremos de giro. Para ambos soportes se implemento el mismo sistema. En la figura 7 se puede ver la disposición de los microswitches sobre uno de los ejes de rotación.

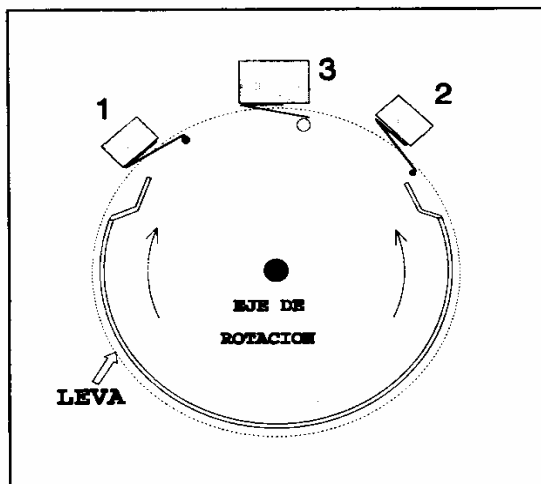


Figura 7 - Diagrama de las protecciones

Como se puede apreciar, son un total de tres interruptores, y una única leva. Esta leva se encontrará primero con el interruptor 1 (ó 2) según el sentido de giro del soporte. El primer microswitch que sea accionado por la leva generará una señal hacia el control (protección de software). Esta señal llega hasta la placa PCD (ver "Driver") por un cable multipar que lleva también las realimentaciones, y luego será leída por la computadora que tomará las medidas correspondientes. En el caso de fallar la protección de software, actuará el segundo microswitch (para ambos sentidos de giro se trata del interruptor número 3), éste cortará la alimentación de corriente a los motores, interrumpiendo

el ensayo (protección de hardware). Esto lo hace a través de un relé instalado en la placa de control de alimentación.

### Motores utilizados

Al tratarse de una automatización que apunta a tener todo controlado a través de un computador resulta ventajoso el uso de motores de paso, ya que se adaptan perfectamente a un control de este tipo. Las principales características de este tipo de motores son: error de posición no acumulativo, responden a señales de entrada digitales, son mecánicamente simples, están libres de contaminantes, pueden ser repetidamente detenidos sin sufrir daño, son generalmente robustos y durables, y además posibilitan una gran variedad de estrategias de control.

Los motores paso a paso que se instalaron en este proyecto son idénticos entre si, siendo ambos del tipo híbrido. Son motores cuyos estatores están cableados con bobinados de cuatro fases unifilares (denominadas A, B, C y D), y tienen dieciocho polos.

Sus principales características son:

**Resolución:** 144 pasos por revolución (2,5 grados por paso).

**Precisión:** Aproximadamente de un 5% (peor caso), que en 2,5° representa 0,125°. El error que introduce es no acumulativo.

Solidario al eje de cada motor existe un disco ranurado con cuatro optoacopladores distribuidos en 3 hileras de ranuras (144 ranuras, 120 ranuras y 12 ranuras). En la figura 8 vemos la disposición del encoder.

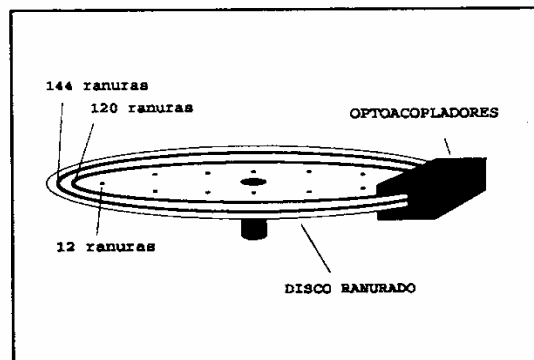


Figura 8 - Codificador angular utilizado

Las señales de los cuatro optos que llegan hasta el control fueron individualizadas según el color de sus cables (marrón, gris, celeste y naranja). En lo que sigue de este artículo se referirá a estas señales (así como a los optos correspondientes) de acuerdo a la convención de nombres mencionada.

Los optos marrón y gris trabajan sobre la hilera de 144 ranuras (una a cada paso del motor) de tal forma que generan señales en cuadratura. El opto celeste actúa sobre la hilera de 120 ranuras y el opto naranja sobre la hilera de 12 ranuras. La ubicación de los optos con respecto al disco ranurado es ajustable a través de un sistema mecánico de precisión. El circuito del encoder

tiene disparadores Schmitt (diseñados con un LM339) como etapa de salida, lo que contribuye para filtrar las señales entregadas por los optoacopladores y posibilita una mayor carga a la salida.

Por último cabe resaltar el hecho de que los motores de paso utilizados en este proyecto fueron adquiridos en plaza a muy bajo costo.

#### Driver

Es la parte del equipo encargado de tomar las señales de control del computador y adaptarlas a los requerimientos de corriente y tensión necesarios para el motor. Éste fue diseñado para ser controlado en forma digital y se tomó como criterio la máxima protección del motor.

El módulo del driver está compuesto por los siguientes elementos:

**Plaquetas Driver:** controlan la alimentación de los bobinados de los motores. Existe una plaqueta para cada motor. Cada fase del motor es excitada por medio de una fuente de corriente, implementada utilizando un amplificador operacional teniendo como entradas una tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) y la caída de tensión ocasionada por la corriente a controlar sobre una resistencia de sensado de 5 watt ( $R_{5w}$ ). Debido a la alta ganancia del operacional el voltaje  $V_r$  sobre la resistencia  $R_{5w}$  ( $0,1\Omega$ ) será igual a  $V_{ref}$  ( $0,47V$ ), ocasionando una corriente constante de 4,7A por el devanado del motor.

El control de la excitación es implementado a través de un transistor (Q1A) que trabaja en corte y saturación dependiendo de la señal de entrada (enviada desde la placa PCD). Al haber un pull-up (conectado a la fuente de alimentación de potencia) a la entrada de la base de Q1A se asegura que si no existe conexión con la plaqueta PCD, Q1A se encontrará saturado, cortando así el Darlington de potencia.

Al circuito se le agrega un polo dominante para evitar oscilaciones. Este polo determina la frecuencia máxima a la que puede trabajar el driver (1KHz). También se agregó un circuito lógico capaz de detectar el buen funcionamiento del transistor de potencia.

Teniendo en cuenta que el motor utilizado posee cuatro fases, A B C D, de las cuales las fases A y C al igual que las fases B y D no estarán simultáneamente excitadas, se aprovecha la misma resistencia de realimentación de corriente ( $R_{5w}$ ) para las fases A y C, y otra para las fases B y D. De esta forma la plaqueta queda dividida en dos partes iguales una correspondiente a las fases A y C, y otra para las fases B y D.

Cada una de estas partes posee un fusible de 6 Amp. Se agrega una resistencia de 2K7 que lleva esta señal del estado del fusible a la plaqueta PCD.

**Plaqueta de Control del Driver (PCD):** contiene la lógica para tratar las señales enviadas del computador en forma adecuada para luego entregarlas a la plaqueta driver. A su vez toma señales de ésta última e informa al computador del buen

funcionamiento del driver en su conjunto. Ingresan a la plaqueta también las señales que provienen de los codificadores angulares de los motores para luego llegar al computador y que este tenga conocimiento de la posición del eje de los motores.

El control desde el computador se realiza por medio de una tarjeta de múltiple entrada-salida (utiliza un integrado de expansión de puertos programable 8255), la cual es programada para tener un byte de salida y dos bytes de entrada. Es a través del byte de salida que el computador informa al módulo del driver que fase y que motor excitar. La parte baja de este byte es reservado para el control del motor horizontal, y la parte alta para el motor vertical. A su vez, en el conjunto de cuatro bits de cada motor el bit más significativo es utilizado para el control global del motor, es decir si este bit está bajo, ninguna de las fases del motor podrá ser excitada. Los restantes tres bits informan al módulo del driver qué fase, o fases en caso de ser dos, excitar. La codificación utilizada se detalla a continuación:

0 X X X	Ninguna fase excitada
1 0 0 0	Fase A
1 0 0 1	Fases A y B
1 0 1 0	Fase B
1 0 1 1	Fases B y C
1 1 0 0	Fase C
1 1 0 1	Fase C y D
1 1 1 0	Fase D
1 1 1 1	Fases D y A

Este byte recibido por la plaqueta de control del driver es pasado por un buffer con histéresis para brindar una mejor inmunidad al ruido del equipo y luego, tanto la parte alta como la parte baja ingresan a la lógica necesaria para la decodificación. Esta forma de control evita que las fases A y C (ó las fases B y D) sean excitadas simultáneamente.

La plaqueta contiene un regulador de gran estabilidad, MC1403, de 2.5 voltios que alimenta el divisor resistivo que proporciona el voltaje de referencia  $V_{ref}$ .

Existe también en la plaqueta un buffer de ocho bits al cual ingresan las realimentaciones de los motores, es decir los datos obtenidos del codificador angular de cada uno de los motores y luego se envían al computador para ser procesados.

La plaqueta PCD es capaz de analizar el estado del driver y anunciar su comportamiento al computador. Esto lo hace a través de tres circuitos: un circuito de detección de fusible roto que testea el estado de cada uno de los cuatro fusibles, un circuito de control de la fuente de alimentación que informa al control central (PC) si la fuente de potencia se encuentra en el rango de trabajo, y un circuito de detección de falla de transistor que informa sobre fallas en los transistores de potencia.

Existen otras señales que ingresan a la plaqueta y también son "buffereadas" antes de ingresar al computador. Estas señales son las protecciones de software, Prot H IN y Prot V IN, que indican al programa central del computador que alguno de los

soportes están alcanzando posiciones límites para que el programa tome las precauciones necesarias en el movimiento del mismo.

Otra señal que es enviada al computador es la denominada **Válido IN** que indica si la tensión de alimentación de la luminaria cumple con los requerimientos que exigen las normas. Se ha reservado una línea de entrada al computador, **libre**, para ser utilizada posteriormente.

A continuación se detallan los bytes que contienen todas las señales descritas anteriormente y las direcciones en las cuales pueden ser leídas en el computador.

Byte de Realimentación de los Motores:

- B7** - Opto Naranja Motor Vertical
- B6** - Opto Celeste Motor Vertical
- B5** - Opto Gris Motor Vertical
- B4** - Opto Marrón Motor Vertical
- B3** - Opto Naranja Motor Horizontal
- B2** - Opto Celeste Motor Horizontal
- B1** - Opto Gris Motor Horizontal
- B0** - Opto Marrón Motor Horizontal

Byte de Status del Driver:

- B7** - Protección de Software eje Horizontal
- B6** - Protección de Software eje Vertical
- B5** - Bit libre
- B4** - Ensayo Válido
- B3** - Problema en Driver Vertical
- B2** - Problema en Driver Horizontal
- B1** - Problema en 5 voltios de Potencia
- B0** - Fusible Roto

**Plaqueta de Control de Alimentación de Potencia:** en esta placa es controlado el suministro de energía a las plaquetas driver para evitar que los cuadros lleguen a posiciones no permitidas.

Los 5 voltios de potencia pasan por el contacto normalmente abierto de un relé y luego llegan, a través de los conectores y del panel trasero de la caja del driver, a las plaquetas **Driver**. La corriente por la bobina del relé circula a través de los interruptores de fin de carrera (interruptores 3, ver "Protecciones") de modo que si alguno de ellos es abierto por algún cuadro, el relé cortará el suministro de energía a las plaquetas driver (protección de hardware).

El módulo del driver presenta una llave en su frente que también interrumpe la corriente por la bobina del relé permitiendo de esta forma cortar la energía a las plaquetas drivers sin necesidad de apagar el equipo.

**Fuente de Alimentación:** suministra los 5 Voltios / 20 Amp. y 12 Voltios / 1 Amp requeridos para la alimentación del driver. Es una fuente conmutada adquirida en plaza con las salidas necesarias para el funcionamiento del módulo driver que además posee otras salidas que pueden ser útiles en un futuro.

## Control del posicionamiento

El programa cuenta con tres bibliotecas para el control del posicionamiento en tres niveles bien diferenciados:

**MultiIO.Pas:** contiene los procedimientos que permiten el manejo de la tarjeta de entrada-salida. Corresponde a las rutinas de nivel más bajo.

**Motores.Pas:** es el nivel intermedio. Se encarga del correcto movimiento de los motores en la búsqueda de los ángulos solicitados por el nivel superior. Para esto utiliza la biblioteca MultiIO.Pas.

El control del movimiento de los soportes es basado en el control del movimiento de los motores, debido a la realización mecánica del aparato. Esta biblioteca puede dividirse en dos partes básicas: control del ángulo de los soportes y control del movimiento específico de los motores paso por paso.

En caso de un posible error en posicionamiento debido a una pérdida de paso en los motores (ocasionado por distintos motivos), es implementada en este nivel una rutina de corrección. En caso de repetición de la falla devuelve el control al nivel superior enviando a este un código de error.

También en este nivel se guarda la información del status de los motores (posición actual, tipo de excitación, fase excitada, etc...). Los microswitches utilizados para la protección por software (ver "Protecciones") son empleados como referencias espaciales absolutas, posibilitando al operador indicar una posición espacial de los soportes como un origen relativo (ambos ángulos de giro considerados como cero). Los ángulos de giro de los soportes serán relativos a esta posición.

Cabe resaltar que las rutinas de posicionamiento implementadas en esta biblioteca fueron implementadas de tal forma a posicionar los soportes utilizando siempre el mismo sentido de giro (antihorario) con el fin de reducir los errores debidos al juego existentes en los reductores.

**Ensayo.Pas:** es el nivel más alto. Se encarga de la realización de los ensayos, informando al nivel inmediato inferior la posición deseada.

Existen tres rutinas principales implementadas en este nivel: ensayo normal, ensayo manual, y calibración del Goniófotómetro.

En un ensayo normal el operador informa los ángulos límites de medición y el intervalo angular para la ubicación de cada soporte. Con estos datos el equipo empieza recorrer la matriz de posiciones espaciales requerida realizando una medición para cada punto.

En un ensayo manual el programa pide al operador una posición espacial para realizar la medición. Después de informado ubica los soportes en los ángulos correspondientes y realiza la medida. Este proceso es repetido hasta que el operador envíe una orden de salir.

También existe implementada una rutina de calibración del goniófotómetro. Esto facilita la operación de puesta a punto del equipo en caso de ser necesario trabajar en la parte mecánica del mismo.

### Errores en el posicionamiento

Los errores que se presentan en los movimientos de los soportes provienen de tres factores principalmente:

- a. resolución del motor en el eje final del movimiento.
- b. errores introducidos por el manchón de acople entre el eje del motor y el reductor de velocidad.
- c. error debido al juego entre el sinfín y la corona del reductor.
- d. errores de construcción en las piezas que constituyen el reductor.

El error introducido por **a**, **b** y **d**, disminuyen a medida que aumenta la relación de reducción del sistema utilizado. No pasa lo mismo con **c**., ya que se trata de una característica propia del reductor. A través del mecanismo de control descrito se posiciona el soporte moviendo el motor siempre en determinado sentido, disminuyendo así los error debidos a **b** y **c**.

En la práctica se ha observado:

error vertical máximo =  $\pm 0,3^\circ$   
 error horizontal máximo =  $\pm 0,15^\circ$ .

### ADQUISICIÓN DE LA MEDIDA

#### Luxímetro

Como instrumento de medida lumínica fue utilizado en este proyecto un luxímetro modelo **HIOKI 3422**. Las principales características técnicas del mismo son:

- . Posee tres rangos de operación (20, 200 y 2000 luxes) permitiendo la medida de niveles lumínicos desde muy baja resolución, hasta muy altos niveles.
- . Medida corregida para una eficiente evaluación espectral. Los factores de corrección no necesitan ser introducidos para fuentes luminosas no patrones.
- . Salida analógica en el rango de 0 a 200 mV.
- . Posibilidad de ajuste de cero (debe ser efectuado en cada cambio de escala con la fotocélula tapada).
- . Precisión :  $\pm 0.5\%$  a fondo de escala
- . Característica térmica  $\pm 0.1\%/^\circ\text{C}$
- . Fotosensor con célula de selenio
- . Tensión de alimentación 6 volt D.C.
- . Consumo 40 mA.

#### Amplificador y filtro

El propósito de esta etapa es el de elevar el nivel de continua de la señal analógica (entre 0 y 200 mV) del luxímetro, que contiene armónicos de 50 Hz que deben ser filtrados, para su entrada en la tarjeta conversora analógico/digital con un rango de entrada entre 0 y 6,5 V.

En la **figuras 9 y 10** se puede apreciar los circuitos del amplificador y del filtro.

Se implementó el amplificador con el operacional OP-07 de ultra bajo offset para minimizar errores. Se trata de un amplificador no inversor para

lograr una alta impedancia de entrada y ganancia ajustable a través del preset P1. Aunque el offset de este operacional es muy bajo (hasta 75  $\mu\text{V}$ ) se dispone de un preset P2 para el ajuste a cero del mismo. El filtro es del tipo Butterworth de 2º orden que se realizó utilizando también en esta etapa un operacional OP-07 (Ref. [10]). Para eliminar los armónicos de 50 Hz diseñamos el filtro de forma de tener un polo doble a 1 Hz. De esta forma la componente de 50 Hz sufrirá una atenuación con respecto a la componente de continua de  $4 \times 10^{-4}$ , y la componente de 100 Hz de  $1 \times 10^{-4}$ . Al cabo de 2 segundos el error porcentual del filtro es de  $4,73 \times 10^{-3}$ .

A la salida se coloca un diodo zener de 7,5 V a los efectos de proteger la tarjeta conversora contra voltajes elevados a la entrada.

Se implementaron dos fuentes independientes una para el amplificador y filtro, y otra para alimentar el luxímetro.

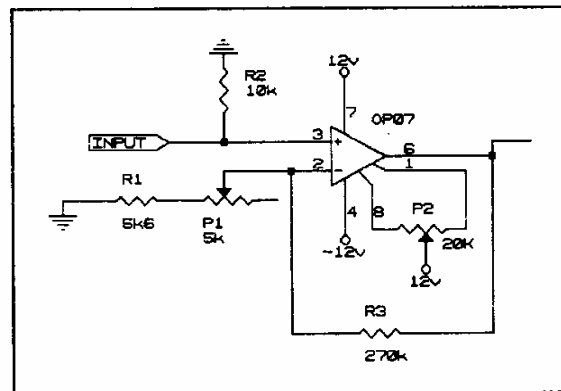


Figura 9 - Circuito del amplificador

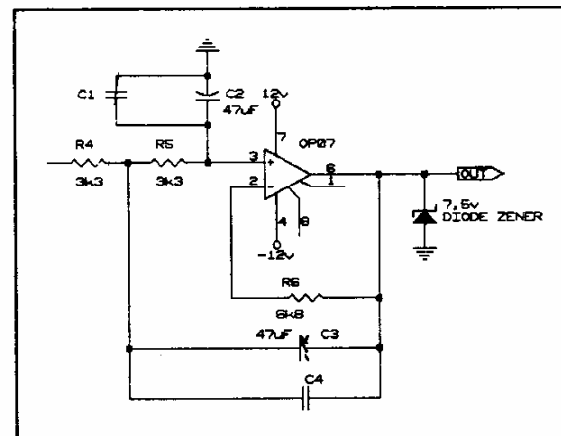


Figura 10 - Circuito del filtro

#### Conversión A/D

Para el propósito de la conversión de la señal a la salida del filtro se utiliza una tarjeta conversora A/D-D/A (12 bits) de uso comercial. El método de conversión analógico-digital utilizado es por aproximaciones sucesivas.

En el ajuste del rango de utilización de la tarjeta se implementó la posibilidad de corregir el offset proveniente del luxímetro y un margen para la detección de medidas que hayan salido de la escala de utilización.

#### Control de la adquisición

El control de la adquisición es ejecutado a tres niveles implementados en los módulos **Ensayo.Pas**, **Adq.Pas** y **ADDA.Pas**.

**Ensayo.Pas**: se encarga de definir el momento en que se realiza la conversión. Así mismo este módulo decide la validez de la medida teniendo en cuenta la alimentación de la luminaria en el momento de la conversión, y el correcto posicionamiento de los soportes. Este es el nivel más alto en el control de la adquisición.

**ADDA.Pas**: es el nivel más bajo de la adquisición. Es el encargado del manejo de la tarjeta conversora.

**Adq.Pas**: contiene el control principal de la conversión. Debido al proceso de filtrado que se realiza a la señal proveniente del luxímetro es necesaria una espera (programable) antes de realizar la conversión. Además, para minimizar los errores debidos al ruido ambiental y a la conversión, son realizadas un número mínimo de lecturas espaciadas un intervalo de tiempo determinado (ambos pueden ser programados).

#### Errores en la adquisición

De acuerdo a las normas internacionales (Ref. [3]) el error máximo admisible en la medida de la luz emitida por el artefacto es de  $\pm 2\%$ .

El error total máximo en la adquisición es del orden de  $\pm 0.56\%$  a fondo de escala (escala de trabajo del luxímetro), y su magnitud elevada para bajos niveles de iluminación proviene del luxímetro. El incremento en la magnitud del error en comparación al error propio del luxímetro, es debido al proceso de adquisición y conversión.

#### GASTOS

A continuación se detallarán los gastos por rubro de este proyecto:

- .Componentes eléctrico-electrónicos U\$ 570
- .Componentes mecánicos U\$ 500
- .Otros U\$ 230

Total : U\$ 1300

Cabe resaltar que en este cálculo no están incluidos el valor de la computadora, así como la mano de obra de los trabajos mecánicos realizados en el taller del Instituto.

#### CARACTERÍSTICAS DEL GONIOFOTÓMETRO IMPLEMENTADO.

Las principales características del equipo implementado son:

- . es un equipo del tipo con facilidad de rotar la fuente luminosa con eje vertical fijo y eje horizontal móvil.
- . dimensiones : altura 210 cm, ancho 99.5 cm
- . dimensiones máximas permitidas de la fuente luminosa: altura 120 cm, ancho 85 cm.
- . intervalos angulares de medida: rotación del eje horizontal  $\pm 100^\circ$ , rotación del eje vertical  $\pm 100^\circ$ .
- . distancia entre la fuente luminosa y la cabeza fotométrica: 664 cm.
- . precisión angular para el movimiento horizontal:  $\pm 0.15^\circ$ .
- . precisión angular para el movimiento vertical:  $\pm 0.3^\circ$ .
- . precisión en la medida fotométrica:  $\pm 0.56\%$  a fondo de escala.

#### CONCLUSIONES

Se verificó que era posible desarrollar un dispositivo de tipo industrial como proyecto de graduación, cumpliendo con las especificaciones técnicas y con los márgenes de tiempo y presupuesto especificados.

Al tratarse de un proyecto de aplicación industrial, el mismo implicaba, además de los trabajos eléctricos, trabajos mecánicos de precisión. Se debía utilizar la estructura con que se venían realizando los ensayos hasta el momento, ya que de otro modo el presupuesto disponible no hubiera sido suficiente para el resto de los trabajos que debían realizarse. Aunque se contó con la colaboración del personal del taller del Instituto, los trabajos de diseño, construcción y ajuste de las distintas piezas de la estructura, requirieron una importante dedicación por parte del grupo de trabajo. Como criterio de diseño se hizo una implementación modular del sistema, lo que permitió un desarrollo en forma paralela del equipo, del sistema de control y de la interfase con el usuario (el programa contiene casi 8000 líneas de programación y un ejecutable de 100Kb).

Para el movimiento de eje vertical se instaló un reductor de velocidad de propiedades limitadas, debido al costo que involucraba la adquisición de otro de mejores características. El sistema mecánico diseñado se puede adaptar fácilmente a la instalación de un nuevo reductor que mejore las características del Goniofotómetro en este sentido. Además, el hardware implementado se presenta muy flexible al software de control que sea utilizado. De la misma manera, y como resultado de uno de los principales objetivos planteados, el driver puede ser comandado por un sistema de control en tiempo real, mejorando así la performance del equipo.

Por último, cabe resaltar que en base a las principales características enumeradas a lo largo del documento, se trata de un Goniofotómetro de los más utilizados para el ensayo de luminarias en el contexto mundial, de acuerdo al **PROGRESS REPORT 1979-1983** del **TECHNICAL COMMITTEE TC-2.4 "LUMINAIRES"** de la C.I.E. (Ref. [5]).



## Referencias

- [1] J. Krochmann, TC-2.2 "CIE TECHNICAL REPORT ON THE MEASUREMENT OF LUMINOUS INTENSITY DISTRIBUTIONS OF LAMPS AND LUMINAIRES", 1984.
- [2] C.I.E. Technical Committee N° TC - 2.4, Publication N°27 "Photometry of luminaires for street lighting", 1973
- [3] UTE - NORME FRANCAISE ENREGISTREE, Appareils d'Eclairage Electrique - "METHODES RECOMMANDEES POUR LA PHOTOMETRIE DES LAMPES ET DES APPAREILS D'ECLAIRAGE (NF C 71-120)", 1970
- [4] UTE - NORME FRANCAISE ENREGISTREE, Appareils d'Eclairage Electrique - "METHODES RECOMMANDEES POUR LA PHOTOMETRIE DES LAMPES ET DES APPAREILS D'ECLAIRAGE / Additif a la norme francaise enregistrée NF C 71-120 - Janvier 1970 (NF C 71-120 ADD 1)", 1981
- [5] C.I.E. Technical Committee N° TC - 2.4, "Progress report 1979 - 1983", 1983
- [6] C. R. G. Cazabat y E. D. Yasan, "Sistema automático de mediciones fotométricas del Laboratorio de Luminotecnia del INTI", Reporte técnico del Laboratorio de Luminotecnia - División Optica - Departamento de Física Aplicada y Metrologia.
- [7] E. D. Yasan y D. A. Gazpio, "Sistemas automáticos requeridos por la industria para la evaluación fotométrica y eléctrica", Reporte técnico del CILAP (Centro de Investigación en Luminotecnia Aplicada) y CITEI (Sector Instrumentación y Control Electrónico del INTI).
- [8] J. A. Taboada, "Manual de Luminotecnia", Editorial Dossat, 1979.
- [9] B. C. Kuo, "Step Motors and Control Systems", SRL Publishing Company, Illinois 1979.
- [10] J. Millman y C. C. Halkias, "Electrónica Integrada", HispanoEuropea, Barcelona 1976.
- [11] B. C. Kuo, "Sistemas Automáticos de Control", Compania Editorial Continental, 3ª Edición, México 1987.
- [12] K. Gieck, "Manual de Fórmulas Técnicas", Editorial AlfaOmega.
- [13] "Interfacing to the IBM PC"
- [14] "Como se refrigeran los transistores", Revista Nueva Electrónica.
- [15] "Turbo Pascal User's Guide", Borland International, 1990
- [16] "Turbo Pascal Programmer's Guide", Borland International, 1990
- [17] "Turbo Pascal Library Reference", Borland International, 1990
- [18] "Turbo Pascal Turbo Vision Guide", Borland International, 1990
- [19] O'Brien, "Advancing Programming in Turbo Pascal", Borland-McGraw Hill.
- [20] B. Ezzel, "Graphics Programming in Turbo Pascal 6.0", 1991.
- [21] P. Norton, "Guia do Programador PC", Editora Campus LTDA, 1983.
- [22] F. Caraballo, J. P. Oliver y L. Ferrari, "Adquisidor de Datos de Velocidad y Dirección del Viento", Facultad de Ingenieria - Universidad Mayor de La República del Uruguay, 1989.
- [23] Schlebach y Rider, "Printed and Integrated Circuits", Mc. Graw Hill, 1963.

## Biografía técnica

**Claudio Misail** es Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Mayor de la República en 1992. Desde 1989 trabaja en la empresa telefónica estatal ANTEL. Sus áreas de interés actual incluyen desarrollo de software para bases de datos y control industrial.

**Jorge Suárez** es Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Mayor de la República en 1992. Desde 1988 trabaja en la empresa telefónica estatal ANTEL.

**André Fonseca** está actualmente culminando los estudios de grado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Mayor de la República. Se desempeña además como docente grado 1 (ayudante) en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. Sus áreas de interés actual incluyen control difuso, redes neuronales y control industrial.