

# Repotenciación de una mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico



Trabajo de grado para optar al título de ingeniero en electrónica y telecomunicaciones

Rubén Dario Noguera Redín

Carlos Felipe Rengifo  
(Ph.D.)

*Universidad del Cauca*

Facultad de Ingeniería en electrónica y telecomunicaciones  
Departamento de electrónica Instrumentación y Control

Popayán  
2014

## Tabla de contenido

Lista de figuras.....	v
Lista de tablas .....	x
Introducción .....	xi
Objetivos.....	xv
Objetivo general.....	xv
Objetivos específicos .....	xv
Glosario.....	xvi
Capítulo 1: Medidores de consumo eléctrico.....	1
1.1 Medidores electromecánicos de consumo eléctrico .....	2
1.2 Medidores electrónicos de consumo eléctrico.....	5
1.3 El medidor patrón .....	6
Capítulo 2: Cálculo del error por el método de comparación de pulsos.....	10
2.1 Equivalencias entre revoluciones o pulsos del medidor patrón y el medidor en ensayo. 10	
2.2 Error del medidor en ensayo con respecto al medidor patrón ( $E_{ex}$ ) .....	12
2.3 Incertidumbre en la medición .....	13
2.3.1 Calculo de la incertidumbre en la medición.....	14
2.3.2 Incertidumbre estándar ( $u$ ).....	15
Capítulo 3: Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica.....	19
3.1 Verificación visual.....	20
3.2 Condiciones de referencia .....	20

3.3 Procedimientos de ensayo .....	22
3.3.1 Ensayo de funcionamiento sin carga.....	22
3.3.2 Ensayo de arranque .....	23
3.3.3 Ensayo de exactitud.....	24
3.3.4 Ensayo de verificación de la constante utilizando el método de dosificación de energía.....	27
Capítulo 4: Condición inicial de la mesa calibradora y análisis de requerimientos .....	29
4.1 Sistema de alimentación .....	29
4.2 Controles analógicos.....	32
4.3 Indicadores analógicos de parámetros eléctricos.....	34
4.4 Soporte mecánico .....	35
4.5 Análisis de requerimientos .....	36
Capítulo 5. Solución electrónica.....	40
5.1 Descripción general de la solución electrónica .....	40
5.2 Elección de la solución electrónica definitiva .....	44
5.3 Diseño de la solución electrónica definitiva.....	55
5.3.1 Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica .....	56
5.3.2 Módulo de control para cada medidor en ensayo.....	59
5.3.3 Señal de salida del medidor patrón .....	63
5.3.4 Módulo de control principal.....	64
5.3.5 Módulo de interconexión serial.....	68
Capítulo 6. Solución mecánica .....	72
6.1 Soporte mecánico .....	73

6.2 Los cajones para el medidor patrón, el indicador digital de parámetros eléctricos y el módulo de control principal.....	77
6.3 Modelado 2D completamente acotado y vistas 3D a blanco y negro.....	78
6.4 Propuesta de costos y materiales para la solución mecánica.....	86
Conclusiones.....	87
Recomendaciones .....	89
Trabajos futuros .....	91
Referencias.....	92
Anexo A. Dispositivos y equipos eléctricos y electrónicos.....	94
A.1 Medidores patrón .....	94
A.2 Dispositivos centrales de procesamiento .....	99
A.3 Sensores fotoeléctricos .....	103
A.4 Visualizadores e interfaz de entrada.....	106
A.5 Fuentes de alimentación DC.....	107
A.6 Indicadores digitales de parámetros eléctricos .....	109
Anexo B. Manual de conexión general para la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.....	117
Anexo C. Códigos piloto.....	122
C.1 Código piloto para el módulo de control para cada medidor en ensayo.....	122
C.2 Código piloto para el módulo de control principal .....	129

## Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Perfil del consumo de potencia y energía en una red eléctrica.....	1
<i>Figura 2.</i> Diagrama de conexión de un medidor electromecánico de consumo eléctrico monofásico.....	3
<i>Figura 3.</i> Diagrama de bloques general de un medidor electrónico de consumo eléctrico trifásico tetrafilar.....	6
<i>Figura 4.</i> Muestra de un medidor patrón trifásico portable.....	8
<i>Figura 5.</i> Nivel de confianza en el cálculo de la incertidumbre estándar para $k=1$ , $k=2$ y $k=3$ respectivamente.....	18
<i>Figura 6.</i> Mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico que se desea repotenciar .....	29
<i>Figura 7.</i> Fuentes de tensión AC de la mesa calibradora .....	30
<i>Figura 8.</i> Fuentes de corriente AC de la mesa calibradora.....	30
<i>Figura 9.</i> Placa de alimentación de la mesa calibradora .....	31
<i>Figura 10.</i> Sistema de protección contra sobrecargas de la mesa calibradora .....	31
<i>Figura 11.</i> Vista frontal del tablero de control general de la mesa calibradora.....	32
<i>Figura 12.</i> Perillas de tensión de la mesa calibradora .....	33
<i>Figura 13.</i> Selector y perillas de corriente de la mesa calibradora.....	33
<i>Figura 14.</i> Perilla de energía reactiva de la mesa calibradora.....	34
<i>Figura 15.</i> Indicadores analógicos de tensión, corriente y potencia de la mesa calibradora.....	35
<i>Figura 16.</i> Indicador del ángulo de desfasaje entre la potencia activa y reactiva .....	35
<i>Figura 17.</i> Soporte mecánico de la mesa calibradora .....	36

<i>Figura 18.</i> Diagrama de bloques de la solución electrónica.....	40
<i>Figura 19.</i> Espacio morfológico que denota la mejor solución electrónica para la repotenciación de la mesa calibradora.....	54
<i>Figura 20.</i> Diagrama de conexión general de la solución electrónica definitiva .....	56
<i>Figura 21.</i> Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica con un estado lógico bajo en su salida.....	58
<i>Figura 22.</i> Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica con un estado lógico alto en su salida.....	58
<i>Figura 23.</i> Diagrama de conexión del módulo de control para cada medidor en ensayo.....	59
<i>Figura 24.</i> Interfaz de bienvenida del sistema.....	60
<i>Figura 25.</i> Interfaz de menú del sistema .....	60
<i>Figura 26.</i> Interfaz para el cambio de parámetros de ensayo: Constante del medidor y tiempo de duración.....	61
<i>Figura 27.</i> Interfaz que muestra el conteo de pulsos .....	62
<i>Figura 28.</i> Interfaz que muestra el conteo de pulsos para el ensayo de exactitud.....	62
<i>Figura 29.</i> Interfaz que muestra los resultados de la prueba de exactitud.....	63
<i>Figura 30.</i> Diagrama de conexión del módulo de control principal .....	65
<i>Figura 31.</i> Interfaz de bienvenida del sistema.....	65
<i>Figura 32.</i> Interfaz de menú del sistema .....	66
<i>Figura 33.</i> Interfaz para el cambio de parámetros de ensayo: Constante del medidor y tiempo de duración.....	66
<i>Figura 34.</i> Interfaz que muestra el conteo de pulsos para el ensayo de exactitud.....	67
<i>Figura 35.</i> Interfaz que muestra el inicio de los ensayos vía módulo de control principal .....	68

<i>Figura 36.</i> Diagrama de conexión serial entre la placa Arduino del módulo de control principal y del primer módulo para cada medidor en ensayo .....	70
<i>Figura 37.</i> Diagrama de conexión serial entre dos placas Arduino intermedias del módulo para cada medidor en ensayo .....	70
<i>Figura 38.</i> Diagrama de conexión serial entre la última y penúltima placa Arduino del módulo para cada medidor en ensayo .....	71
<i>Figura 39.</i> Vista 3D general del diseño mecánico .....	72
<i>Figura 40.</i> Soporte mecánico fijo para los medidores bajo ensayo .....	73
<i>Figura 41.</i> Soportes laterales .....	74
<i>Figura 42.</i> Cajones para la circuitería de los módulos de control para cada medidor en ensayo.	75
<i>Figura 43.</i> Soporte para las borneras de conexión de tensión .....	75
<i>Figura 44.</i> Dispositivos rápidos de conexión de corriente .....	76
<i>Figura 45.</i> Soportes para los medidores de medidores de consumo eléctrico.....	76
<i>Figura 46.</i> Soporte para los sensores fotoeléctricos .....	77
<i>Figura 47.</i> Vista frontal 3D de la base de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.....	78
<i>Figura 48.</i> Vista frontal de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico .....	79
<i>Figura 49.</i> Vista trasera de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico .....	80
<i>Figura 50.</i> Vista superior de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.....	81
<i>Figura 51.</i> Vista lateral izquierda de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico...	82
<i>Figura 52.</i> Vista lateral derecha de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico .....	83
<i>Figura 53.</i> Primera vista 3D a blanco y negro de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.....	84

<i>Figura 54.</i> Segunda vista 3D a blanco y negro de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.....	85
<i>Figura 55.</i> Metodología en cascada realimentada .....	89
<i>Figura 56.</i> Sistema de ensayo de contadores de electricidad y transformadores CALPORT 300 marca MTE .....	94
<i>Figura 57.</i> Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 marca MTE .....	96
<i>Figura 58.</i> Patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 marca MTE .....	97
<i>Figura 59.</i> Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP .....	99
<i>Figura 60.</i> Arduino Mega 2560 .....	100
<i>Figura 61.</i> Raspberry PI .....	101
<i>Figura 62.</i> Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE .....	103
<i>Figura 63.</i> Sonda KMK113 marca REDZ.....	105
<i>Figura 64.</i> Pantalla LCD 20x4 alfanumérica de 16 pines .....	106
<i>Figura 65.</i> Visualizador 7 segmentos serial de 12 pines .....	106
<i>Figura 66.</i> Teclado matricial 4x3 de 14 pines .....	106
<i>Figura 67.</i> Aspecto de las fuentes de alimentación reguladas conmutadas ABL8MEM05040 y ABL8MEM12020 marca Schneider Electric.....	107
<i>Figura 68.</i> Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata .....	109
<i>Figura 69.</i> Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric... ..	110
<i>Figura 70.</i> Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric.....	112
<i>Figura 71.</i> Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric .....	114
<i>Figura 72.</i> Diagrama de conexión general de la solución electrónica definitiva .....	117
<i>Figura 73.</i> Diagrama de conexión interno de las fuentes de alimentación reguladas	

conmutadas... ..	118
<i>Figura 74.</i> Diagrama de conexión del transformador de corriente 16454.....	118
<i>Figura 75.</i> Diagrama de conexión del Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710...	119
<i>Figura 76.</i> Conector para la cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE.....	120
<i>Figura 77.</i> Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica .....	121
<i>Figura 78.</i> Diagrama de conexión de la placa Arduino Mega 2560, el visualizador LCD y el Teclado matricial 4x3 .....	121

## Lista de tablas

Tabla 1. <i>Equivalencias entre el número de pulsos del medidor patrón y el medidor bajo ensayo</i> .....	12
Tabla 2. <i>Condiciones ambientales de referencia</i> .....	20
Tabla 3. <i>Condiciones eléctricas de referencia</i> .....	21
Tabla 4. <i>Corriente de referencia para los ensayos de arranque</i> .....	24
Tabla 5. <i>Criterios de evaluación del resultado del ensayo de exactitud</i> .....	25
Tabla 6. <i>Puntos de ensayo y límites de error para los ensayos de calibración</i> .....	26
Tabla 7. <i>Criterios de evaluación del resultado del ensayo de verificación de la constante</i> .....	28
Tabla 8. <i>Características relevantes de las fuentes de alimentación reguladas conmutadas</i> .....	47
Tabla 9. <i>Características relevantes de los visualizadores</i> .....	47
Tabla 10. <i>Características relevantes de los sensores fotoeléctricos</i> .....	47
Tabla 11. <i>Características relevantes de los dispositivos de procesamiento central</i> .....	48
Tabla 12. <i>Características relevantes de los medidores patrón</i> .....	49
Tabla 13. <i>Características relevantes de los medidores multifuncionales</i> .....	49
Tabla 14. <i>Propuesta de costos y materiales para la solución electrónica</i> .....	55
Tabla 15. <i>Valor de los multiplicadores de tensión y corriente de acuerdo a los rangos internos de selección del medidor patrón CALPORT 300</i> .....	64
Tabla 16. <i>Propuesta de costos y materiales para la solución mecánica</i> .....	86

## **Introducción**

Uno de los temas que más le interesa a las empresas prestadoras de servicios eléctricos y a los usuarios de dichas empresas, directa e indirectamente, es la precisión en la medida de la cantidad de energía consumida por los usuarios. A los primeros les interesa porque de ella se desprende la gestión de la eficiencia de los medidores de consumo eléctrico (también conocidos como medidores de energía eléctrica, contadores eléctricos o vatíhorímetros) y a los segundos les interesa porque de ello depende la justa tasación de su consumo eléctrico. Esta filosofía es acogida por LA COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE S.A.S. E.S.P., a la que de ahora en adelante se le llamará LA COMPAÑÍA, y se demuestra en su continuo interés por conseguir una correcta gestión de eficiencia y una justa tasación a través de procedimientos de verificación inicial y posterior de medidores de consumo eléctrico que se realizan constantemente en su laboratorio de calibración.

Los procedimientos de verificación inicial y posterior de medidores de consumo eléctrico se llevan a cabo de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 4856 y consisten en la realización de una serie de ensayos bajo ciertos lineamientos que permiten determinar si un medidor está apto o no para su instalación en campo, lo cual en pocas palabras se traduce a que el medidor mida el consumo eléctrico con un error que se encuentre dentro de los rangos de error establecidos por la Comisión Regulatoria de Energía y Gas (CREG) en concordancia con la norma técnica colombiana NTC-ISO/IEC 17025 [1]. Dichos procedimientos se llevan a cabo en una mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.

Las mesas calibradoras que se consiguen actualmente en el mercado cuentan con la ventaja de que son semiautomáticas o completamente automáticas, flexibles y fáciles de manejar; pero con la desventaja de que son costosas (la última compra de LA COMPAÑÍA que incluyó seis bastidores, una mesa de transformadores y una mesa de calibración para 40 medidores de consumo eléctrico tuvo un costo de alrededor de 1.100 millones de pesos) y difíciles de conseguir en el mercado (no hay fabricantes en nuestro país); estas desventajas hacen que la iniciativa de repotenciar una mesa calibradora “antigua” para agregarle a las características de larga durabilidad, accesibilidad inmediata (la mesa ya se encuentra en el laboratorio) y estabilidad en la generación y aplicación de tensión y corriente con las que ya cuenta, las características de fácil manejo y demás necesarias para realizar los procedimientos de verificación inicial y posterior de medidores de consumo eléctrico sea ventajosa, especialmente en costo, para LA COMPAÑÍA.

La solución que permitirá la repotenciación de la mesa calibradora consta de dos desarrollos que se desprenden del análisis de requerimientos: el desarrollo de un diseño electrónico y el desarrollo de un diseño mecánico.

Para realizar un análisis de requerimientos completo el primer paso es definir las teorías referentes a los tipos de medidores de consumo eléctrico existentes, los cálculos y ecuaciones estadísticos y probabilísticos necesarios para analizar los resultados de procesos de calibración de medidores de consumo eléctrico y los procedimientos de verificación inicial y posterior que se llevarán a cabo en los medidores de consumo eléctrico de acuerdo a la NTC 4856. El segundo paso es definir la condición inicial de la mesa calibradora de tal forma que queden establecidas las características técnicas y físicas que permitan delimitar el alcance del proyecto. A partir de estos dos pasos se pueden analizar los requerimientos que garanticen una solución factible y de

calidad.

El desarrollo del diseño electrónico gira entorno a los cuatro procedimientos de ensayo más importantes de la NTC 4856, el ensayo de exactitud, el ensayo de funcionamiento sin carga, el ensayo de arranque y el ensayo de verificación de la constante; los cuales para poderse llevar a cabo necesitan de sensores fotoeléctricos capaces de convertir las señales ópticas de salida de los medidores de consumo eléctrico en pulsos eléctricos, un medidor patrón de referencia de alta precisión cuya señal de salida también son pulsos eléctricos, dispositivos de procesamiento capaces de procesar dichos pulsos e interfaces de interacción entre el sistema y los operarios del mismo que permitan ingresar los parámetros básicos de configuración necesarios para realizar los ensayos y la posterior visualización de los resultados. El diseño electrónico se completa con un indicador digital que permite seleccionar todos los parámetros eléctricos (tensión, corriente, potencia, energía, factor de potencia, entre otros) necesarios para los ensayos.

El desarrollo del diseño mecánico se realiza de tal forma que se puedan realizar procedimientos de ensayo a 5 medidores de consumo eléctrico a la vez, se puedan instalar todos los dispositivos de la solución electrónica elegida; se puedan ubicar el dispositivo visualizador, el dispositivo para ingreso de datos y el indicador digital de parámetros eléctricos en un lugar de fácil acceso para los operarios y; se garanticen que todas las bondades de la mesa calibradora se mantengan, en especial las de generación y aplicación de tensión y corriente.

Durante el desarrollo de este documento se detallan los diseños electrónicos y mecánicos. En el diseño electrónico se presentan varias opciones que dan solución a los requerimientos del proyecto, cada una con la discriminación de los datos técnicos y los costos de los dispositivos que la conformarán, la solución definitiva se escoge de acuerdo a una serie de criterios basados en las características de calidad y factibilidad que requiere la repotenciación de la mesa

calibradora; dicha solución se plasma en un diagrama de conexión general que posteriormente se individualiza y especifican sus partes, al mismo tiempo que se explica su validación, la cual es realizada por medio de simulación. En el diseño mecánico se presenta un diseño asistido por computadora CAD (siglas en inglés de Computer-Aided Design) en 3D donde se observa con detalle la ubicación de los dispositivos esenciales de la solución mecánica y la distribución que tendrán los medidores dentro del soporte mecánico que los albergará durante los ensayos; además el diseño CAD presenta todas las vistas 2D acotadas de la mesa calibradora; por último en el diseño mecánico se especifica la construcción e instalación del soporte mecánico a todo costo.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar una propuesta técnica y financiera para la repotenciación de una mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico de LA COMPAÑÍA.

### **Objetivos específicos**

Diseñar un circuito electrónico que permita determinar la diferencia entre la cantidad de pulsos emitidos por el medidor en ensayo y por el medidor patrón.

Realizar el diseño mecánico de la interfaz de conexión entre el medidor en ensayo, el medidor patrón, los elementos del circuito electrónico y la mesa calibradora.

Elaborar la propuesta de costos y materiales necesarios para el desarrollo de los componentes electrónico y mecánico del proyecto.

## Glosario

**Norma Técnica Colombiana NTC 4856:** Norma técnica colombiana que describe los procedimientos que se deben llevar a cabo para la verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica.

**Resolución de un medidor:** Número decimal que expresa la cantidad de decimales con que el medidor es capaz de mostrar en su visualizador la energía eléctrica consumida. Por ejemplo, para medidores con 1, 2 y 3 decimales se tienen las resoluciones 0,1, 0,01 y 0,001 respectivamente.

**Corriente base ( $I_b$ ):** Valor de la corriente de referencia para medidores de conexión directa a la red. [2]

**Corriente nominal ( $I_n$ ):** Valor de la corriente de referencia para medidores de conexión a través de transformadores a la red. [2]

**Corriente máxima ( $I_{m\acute{a}x}$ ):** Mayor valor de la corriente para el cual se garantiza que se cumplen las características de exactitud establecidas por el fabricante. [2]

**Condiciones de referencia:** Conjunto de parámetros y de condiciones de funcionamiento, con valores de referencia, tolerancias y rangos de referencias con respecto a los cuales se especifica el error. [2]

**Circuito de corriente:** Conexiones internas del medidor a través de las cuales circula la corriente de la red eléctrica externa a la que el medidor se encuentra conectado. [2]

***Circuito de tensión:*** Conexiones internas del medidor alimentadas por la red eléctrica externa a la que el medidor se encuentra conectado. [2]

***Tipo de medidor:*** Hace referencia a la clasificación de los medidores de consumo eléctrico de acuerdo a sus tipos de construcción y principios de funcionamiento, electromecánicos o electrónicos, aunque se pueden encontrar otro tipo de clasificaciones de acuerdo con la cantidad de energía que miden, su exactitud, su tipo de conexión interna o su tipo de conexión a la red eléctrica externa.

***Clasificación de un medidor de acuerdo a su tipo de conexión a la red eléctrica externa:*** Los medidores destinados a ser usados con conexión directa a la red eléctrica externa se denominan medidores de conexión directa.; Los medidores destinados ser usados alimentados por uno o más transformadores de medida se denominan medidores de conexión indirecta. [2]

***Clasificación de un medidor de acuerdo a su número de hilos:*** Los medidores de consumo eléctrico se pueden clasificar de acuerdo al número de hilos (fases y neutro) que deben ser conectados en sus circuitos de tensión y corriente:

- Monofásicos bifilares: Una fase y neutro.
- Bifásicos bifilares: Dos fases.
- Bifásicos trifilares: Dos fases y neutro.
- Trifásicos trifilares: Tres fases.
- Trifásicos tetrafilares: Tres fases y neutro.

***Clasificación de un medidor de acuerdo a su clase de exactitud:*** La clase de un medidor es un valor que expresa los límites de error en porcentaje, para todos los valores de corriente entre  $0,1I_b$  e  $I_{m\acute{a}x}$ , o entre  $0,05I_n$  e  $I_{m\acute{a}x}$ , para un factor de potencia igual a la unidad (y en el caso de los medidores trifásicos con cargas equilibradas), cuando el medidor se ensaya en condiciones

de referencia. [2]. De esta forma se tiene, por ejemplo, que si un medidor es de clase 1 este medirá la energía con un error igual o menor al 1%. Las clases de exactitud consignadas en la NTC 4856, ordenadas de mayor a menor exactitud, son:

- 0,2S, 0,5S, 0,5, 1 y 2 para medidores de energía activa.
- 2 y 3 para medidores de energía reactiva.

Esta clasificación está directamente relacionada con la cantidad de energía consumida por la red eléctrica externa que se desea tarificar, a mayor energía, mayores alteraciones en la tarificación ocasionadas por el error en la medición, por eso debe ser mayor la clase de exactitud del medidor. Para las aplicaciones de muy alta tensión relacionadas con las redes de generación, transporte y subestaciones de energía eléctrica e industria pesada se utilizan, generalmente, los medidores de clase 0,2S y 0,5S (medidores de mayor exactitud); para las aplicaciones de baja y media tensión relacionadas con las redes de distribución de industrias, viviendas de alto consumo (como edificios) y negocios comerciales (como centros comerciales y grandes y medianos comercios) se utilizan, generalmente, los medidores de clase 0,5S, 0,5 y 1 (medidores de exactitud intermedia); para las aplicaciones de baja tensión relacionadas con las redes de distribución de instalaciones domésticas o de pequeños comercios se utilizan, generalmente, los medidores de clase 1 y 2 (medidores de menor exactitud). Para todo este tipo de aplicaciones, en caso de ser necesario, se utilizan medidores de energía reactiva de clase 2 o 3, siendo los de clase 2 más exactos que los de clase 3.

***Rangos de funcionamiento del medidor:*** Rangos de corriente, tensión o algún otro parámetro para los que el medidor funciona óptimamente, es decir, bajo las condiciones de funcionamiento nominales (incluyendo exactitud) establecidas por el fabricante. [2]

***No conformidad:*** No cumplimiento de alguna condición técnica exigida por la NTC

4856. [3]

***Medidor conforme (C)***: Medidor que cumple con todas las condiciones técnicas exigidas por la NTC 4856. [3]

***Medidor no conforme (NC)***: Medidor que no cumple con alguna de las condiciones técnicas exigidas por la NTC 4856. [3]

***Medidor ambiguo***: Término utilizado para expresar que un laboratorio después de un ensayo no puede determinar si el medidor está conforme o está no conforme. [3]

***Error “importado”***: Dado que es imposible construir aparatos perfectos, todos los instrumentos de medición (incluido los medidores patrón) tienen algún porcentaje de error en la medición denominado error por el instrumento o equipo de medición, en los procedimientos de calibración este error se incorpora al error en la medición de los medidores en ensayo.

## Capítulo 1: Medidores de consumo eléctrico

Los medidores de consumo eléctrico trabajan bajo el concepto llamado suma constante de energía (E), lo que implica que la energía consumida en un instante de tiempo se suma a la inmediatamente anterior y así sucesivamente, dicha energía consumida estará dada por la multiplicación del consumo de potencia durante un intervalo de tiempo en el que se quiera realizar una medición, tal y como lo expresa la Ecuación 1:

$$E = \sum P \cdot \Delta t_i = \int P dt \quad \text{Ecu. 1}$$

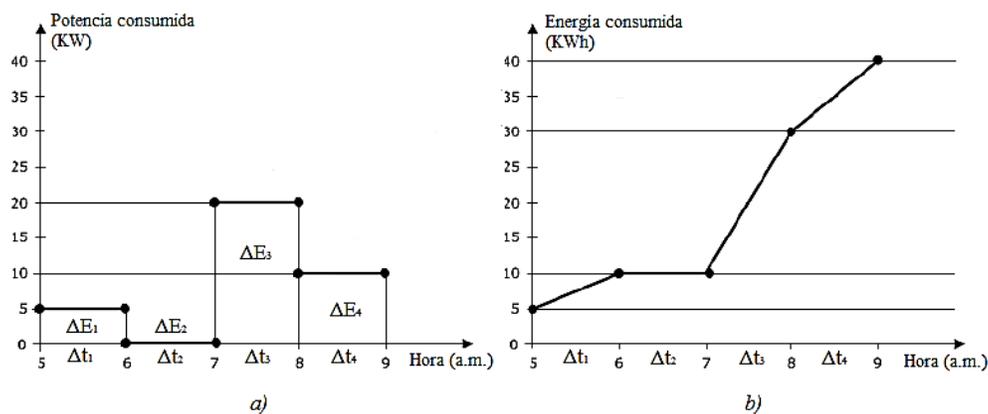


Figura 1. Perfil del consumo de potencia y energía en una red eléctrica.

Fuente: Secretaría de Educación Pública, México. (2013). *Secretaría de Educación Pública*. Recuperado el 6 de septiembre de 2014, de evaluación nacional del logro académico en centros escolares: <http://201.175.44.203/ENLACE/Resultados2013/MediaSuperior2013Exámenes/r13ExamenMediaSuperiorPreguntas.asp#ParteSuperior>

En la Figura 1 se observa el perfil del consumo de potencia en una red eléctrica externa cualquiera para un intervalo de cuatro horas dividido en cuatro intervalos de una hora cada uno y en donde para cada intervalo se tiene un consumo de potencia constante y una cantidad de energía consumida equivalente al área bajo la curva (ver Figura 1.a); por otro lado, se observa el perfil de consumo de energía, el cual varía a razón de la potencia

consumida en cada intervalo y en donde la nueva energía consumida se suma constantemente a la anterior (ver Figura 1.b). El consumo de energía o consumo eléctrico de una red eléctrica externa durante el periodo de tarificación se obtiene comparando la cantidad de energía inicial del medidor al comenzar el periodo (generalmente un mes) y la cantidad de energía consumida una vez terminado dicho periodo. Cada medidor tiene un visualizador mecánico o digital en donde se observa la suma constante de energía de acuerdo al consumo eléctrico de la red eléctrica externa.

En el laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA se calibran medidores electromecánicos y electrónicos monofásicos, bifásicos y trifásicos, bifilares, trifilares y tetrafilares; se encuentran abundantes marcas y las especificaciones en cuanto a corriente nominal, tensión nominal, frecuencia, resolución y conexiones varían entre sí, es por eso que como primera medida se analizará el funcionamiento y características esenciales de los medidores electromecánicos y electrónicos de consumo eléctrico, y del medidor patrón, necesarias para entender y realizar los procedimientos de calibración según la NTC 4856.

## **1.1 Medidores electromecánicos de consumo eléctrico**

Los elementos que permiten que un medidor electromecánico pueda medir el consumo eléctrico de una red eléctrica externa son: una bobina de corriente, una bobina de tensión, un electroimán, un disco mecánico y una placa de conexiones (ver Figura 2). En la placa de conexiones se conectan las líneas fase y el neutro de tal forma que la corriente demandada por la red eléctrica externa circule a través de la(s) bobina(s) de corriente y que exista una diferencia de potencial equivalente a la tensión de referencia de la red eléctrica externa entre las borneras conectadas a la entrada de la(s) bobina(s) de tensión.

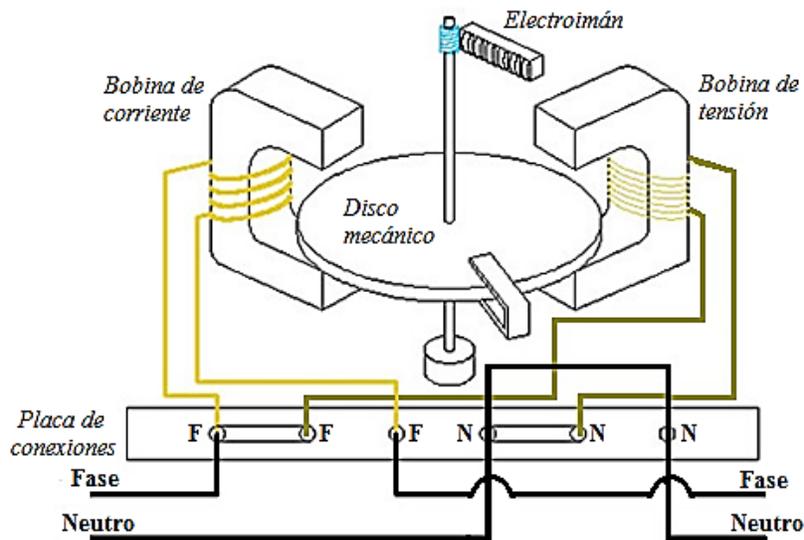


Figura 2. Diagrama de conexión de un medidor electromecánico de consumo eléctrico monofásico  
 Fuente: Gobierno de Aragón, España. (s.f.). *Plataforma e-ducativa aragonesa*. Recuperado el 6 de septiembre de 2014, de demo e-ducativa catedu: [http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//3000/3089/html/341\\_contador\\_monofisico\\_de\\_energia\\_activa.html](http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//3000/3089/html/341_contador_monofisico_de_energia_activa.html)

Con el paso de la corriente, la bobina de corriente genera un flujo magnético ( $\Phi_I$ ) proporcional a la corriente eficaz consumida por la red eléctrica externa, y con la aplicación de la tensión la bobina de tensión genera un flujo magnético ( $\Phi_U$ ) proporcional a la tensión eficaz suministrada a la red eléctrica externa, ambos flujos actúan sobre el disco mecánico produciendo su giro de acuerdo a un momento impulsor ( $M_D$ ) descrito por la Ecuación 2:

$$M_D = C_m \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \cos \varphi \quad \text{Ecu. 2}$$

Dónde  $C_m$  es una constante de proporcionalidad y  $\varphi$  es el ángulo de desfase entre las ondas sinusoidales de tensión y corriente, por lo que la potencia activa ( $P$ ) consumida por la red eléctrica externa es:

$$P = \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \cos \varphi \quad \text{Ecu. 3}$$

Entonces, se tiene que el momento impulsor es proporcional a la potencia activa ( $P$ ) consumida por la red eléctrica externa:

$$M_D = C_1 \cdot P \quad \text{Ecu. 4}$$

Por otro lado se tiene que el electroimán en reacción a los flujos magnéticos ocasionados por las bobinas ( $\Phi_I$ ,  $\Phi_U$ ), genera un flujo de frenado ( $\Phi_B$ ) que atraviesa al disco mecánico y ocasiona un momento de frenado ( $M_B$ ) contrario al momento impulsor y proporcional a la velocidad angular del disco:

$$M_B = C_2 \cdot \omega \quad \text{Ecu. 5}$$

En condiciones ideales, es decir, sin rozamiento sobre el disco mecánico, el momento impulsor tiene el mismo valor que el momento de frenado, por lo que la potencia consumida es proporcional a la velocidad angular del disco:

$$M_D = M_B \quad \text{Ecu. 6}$$

$$C_1 \times P = C_2 \times \omega \quad \text{Ecu. 7}$$

$$\omega = \frac{C_1}{C_2} \times P = C \times P \quad \text{Ecu. 8}$$

Donde C,  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de proporcionalidad.

### ***Constante del medidor de consumo eléctrico.***

La constante del medidor de consumo eléctrico, es un dato que proporciona el fabricante y expresa la relación entre la potencia consumida y la velocidad angular del disco mecánico, existen dos tipos de constantes cuya diferencia radica en sus unidades de medida:

- Constante europea (C), cuyas unidades están dadas en *rev/KWh*.
- Constante americana y francesa (K), cuyas unidades están dadas en *Wh/rev*.

Entonces, la relación entre la potencia consumida y la velocidad angular del disco mecánico ( $\omega$ ), para cada caso, es:

$$\omega = C \cdot P[KW] \quad \text{Ecu. 9}$$

$$\omega = \frac{1}{K} \cdot P[W] \quad \text{Ecu. 10}$$

Además la constante del medidor permite relacionar la cantidad de revoluciones que da el disco mecánico ( $n$ ) para una determinada energía consumida ( $E$ ) a través de la siguiente expresión:

$$n = C \cdot E[KWh] \quad \text{Ecu. 11}$$

$$n = \frac{1}{K} \cdot E[Wh] \quad \text{Ecu. 12}$$

## 1.2 Medidores electrónicos de consumo eléctrico

Los medidores electrónicos de consumo eléctrico también conocidos como medidores estáticos, son medidores en los cuales la corriente y la tensión actúan sobre dispositivos electrónicos produciendo una cantidad de pulsos ( $n$ ) proporcionales a la energía eléctrica consumida ( $E$ ). A diferencia del medidor electromecánico, los pulsos (comúnmente llamados impulsos) en el medidor electrónico son emitidos por un diodo LED o por un diodo LED infrarrojo. Los pulsos se emiten a una determinada frecuencia de salida que depende de la constante del medidor de consumo eléctrico, que para este tipo de medidores se expresa en impulsos por KWh si la constante es europea ( $C$ ) o, Wh por impulso si la constante es americana ( $K$ ). Dadas estas características, se concluye que las Ecuaciones 11 y 12 aplican para los medidores electrónicos de consumo eléctrico.

Los medidores electrónicos de consumo eléctrico tienen algún circuito integrado programable controlado por software, lo que hace necesaria la adquisición del software si se desea realizar alguna modificación o reparación al medidor. Generalmente son de mayor precisión que los medidores electromecánicos, cuentan con protección contra campos magnéticos externos, perforaciones externas y son más costosos. (Ver Figura 3)

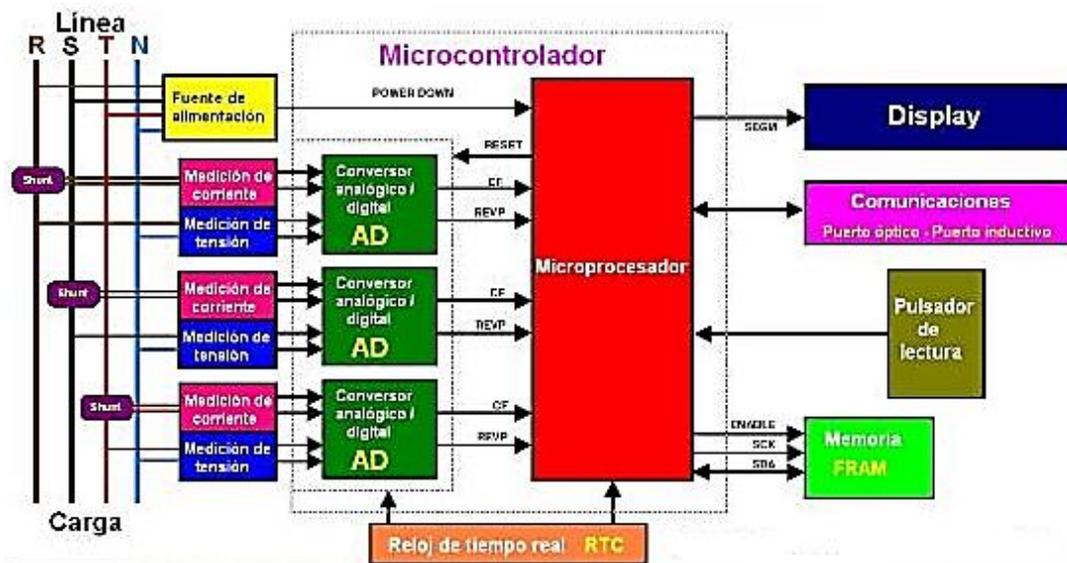


Figura 3. Diagrama de bloques general de un medidor electrónico de consumo eléctrico trifásico tetrafilar Fuente: Afinidad eléctrica. (s.f.). Recuperado el 6 de septiembre de 2014, de Afinidad eléctrica: <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=188>

### 1.3 El medidor patrón

Antes de presentar la definición de medidor patrón, se presentan algunas definiciones tomadas del Vocabulario Internacional de Metrología y de la página oficial del Centro Español de Metrología:

*Procedimiento de medida de referencia:* Procedimiento de medida aceptado para producir resultados de medida apropiados para su uso previsto, para evaluar la veracidad de los valores medidos obtenidos a partir de otros procedimientos de

medida, para magnitudes de la misma naturaleza, en una calibración o en la caracterización de materiales de referencia [4].

*Calibración:* Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones. Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces, certificado de calibración o informe de calibración [5].

*Patrón de referencia:* “Patrón designado para la calibración de otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza en una organización o lugar dado” [4].

*Patrón de trabajo:* “Patrón utilizado habitualmente para calibrar o verificar instrumentos o sistemas de medida. Un patrón de trabajo se calibra habitualmente con relación a un patrón de referencia” [4].

A partir de estas definiciones se puede decir que el medidor patrón no es más que un patrón de trabajo, de muy buena calidad metrológica, que se utilizará habitualmente para la calibración y verificación de los instrumentos de medida del laboratorio de LA COMPAÑÍA (medidores electromecánicos y electrónicos de consumo eléctrico) y cuya calibración se realiza con relación a un patrón de referencia.

El medidor patrón, como todos los medidores de consumo eléctrico, tiene una constante (C o K) que permite relacionar el número de pulsos (N) que emite para una

determinada energía eléctrica consumida ( $E$ ), por lo que para el medidor patrón también aplican las Ecuaciones 11 y 12. La constante de un medidor patrón (del orden de los  $10^4$ ,  $10^5$ , y  $10^6$  impulsos por KWh) es mucho mayor que las constantes de los demás medidores (del orden de las centenas o miles de impulsos por KWh) lo que ayuda a que la medición del medidor patrón sea más exacta. En la Figura 4 se observa una muestra de los tantos medidores patrón que se encuentran en el mercado.



Figura 4. Muestra de un medidor patrón trifásico portable

Fuente: Editores S.R.L. (s.f.). *Editores S.R.L.* Recuperado el 6 de septiembre de 2014, de editores online: [http://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/22a\\_p106\\_1.jpg](http://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/22a_p106_1.jpg)

Las características principales, de las cuales se deriva la correcta elección de un medidor patrón para un determinado proceso de medida de referencia son [6]:

- La clase de exactitud.
- El lugar de realización de los procedimientos:
  - Estacionarios: Uso en laboratorio.
  - Portables: Uso en sitio.
- El tipo de mesas en las que se realizarán los ensayos:
  - Mesas móviles.
  - Mesas fijas.
- El número de medidores en ensayo, número de horas de trabajo continuo por día y número de empleados que lo operan.

- El tipo de medidores que serán ensayados con el medidor patrón, incluye la clase de los medidores, su tipo de conexión, sus valores de corriente y voltajes nominales y demás pertinentes.
- Los tipos de ensayos que se van a realizar de acuerdo a la NTC 4856.

## Capítulo 2: Cálculo del error por el método de comparación de pulsos

El método de comparación de pulsos relaciona los pulsos que emite el medidor patrón con los pulsos que emite el medidor en ensayo de tal forma que se puede obtener el error en la medición del medidor en ensayo con respecto a la medición del medidor patrón. Este método consta de los siguientes pasos [7]:

- Hallar la equivalencia de pulsos que debería dar el medidor patrón para un número determinado de pulsos que emite el medidor en ensayo (esto se hace cuando las constantes del medidor patrón y del medidor en ensayo son de diferente tipo y/o tienen diferentes valores).
- Hallar el error del medidor en ensayo con respecto al medidor patrón ( $E_{ex}$ ).
- Hallar la incertidumbre estándar ( $u$ ).

### 2.1 Equivalencias entre revoluciones o pulsos del medidor patrón y el medidor en ensayo

Debido a que la constante del medidor patrón es mucho mayor que la constante de los medidores en ensayo (ver sección 1.3) y a que existen dos tipos de constante (C y K), generalmente se da que para una misma cantidad de energía aplicada a un medidor en ensayo y a un medidor patrón, el número de pulsos emitidos por cada uno es muy dispar, no por culpa del error en la medición, sino por culpa de las diferencias entre las constantes de los medidores. Es por eso que se hace necesario hacer un ajuste entre el número de pulsos del medidor en ensayo con respecto al número de pulsos del medidor patrón. Todas las combinaciones de tipos de constante que pueden tener los medidores patrón y los medidores en ensayo son:

- Medidor patrón con constante europea (C).
- Medidor patrón con constante americana (K).
- Medidor en ensayo con constante europea (c).
- Medidor en ensayo con constante americana (k).

Además,  $n$  y  $N$  representan el número de pulsos de los medidores en ensayo y de los medidores patrón respectivamente (debido a la diferencia entre los valores de las constantes del medidor patrón y el medidor en ensayo, para una misma cantidad de energía aplicada,  $N$  siempre será mucho mayor que  $n$ ).

Si se aplica la misma cantidad de energía a los medidores patrón y a los medidores en ensayo se tiene que (ver Ecuaciones 11 y 12):

Energía del medidor en ensayo de constante europea.

$$E[Kwh] = \frac{n}{c} \quad \text{Ecu. 13}$$

Energía del medidor patrón de constante europea.

$$E[Kwh] = \frac{N}{c} \quad \text{Ecu. 14}$$

Energía del medidor en ensayo de constante americana.

$$E[Kwh] = \frac{k}{1000} \times n \quad \text{Ecu. 15}$$

Energía del medidor patrón de constante americana.

$$E[Kwh] = \frac{K}{1000} \times N \quad \text{Ecu. 16}$$

El número de pulsos que debería dar el medidor patrón ( $N_{eq}$ ) equivalentes a un número  $n$  de pulsos que da el medidor en ensayo, teniendo en cuenta todas las posibles combinaciones de constantes, se encuentra en la Tabla 1:

Tabla 1. *Equivalencias entre el número de pulsos del medidor patrón y el medidor bajo ensayo*

Tipo de constante		Energía suministrada	Pulsos equivalentes
Medidor patrón	Medidor en ensayo	$E[Kwh]$	$N_{eq}$
Europea	Europea	$\frac{N_{eq}}{C} = \frac{n}{c}$	$\frac{C}{c} \times n$
Europea	Americana	$\frac{N_{eq}}{C} = \frac{k}{1000} \times n$	$\frac{C \times k}{1000} \times n$
Americana	Europea	$\frac{K}{1000} \times N_{eq} = \frac{n}{c}$	$\frac{1000}{c \times K} \times n$
Americana	Americana	$\frac{K}{1000} \times N_{eq} = \frac{k}{1000} \times n$	$\frac{k}{K} \times n$

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Error del medidor en ensayo con respecto al medidor patrón ( $E_{ex}$ )

Tal y como lo indica el procedimiento EL-005 para calibración de medidores de energía eléctrica [8] y como se deduce de la definición ofrecida por el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [4], el error en la medición del medidor en ensayo con respecto al medidor patrón ( $E_1$ ) está dado por la fórmula:

$$E_1 = \frac{\text{Pulsos patrón} - \text{Pulsos medidor en ensayo}}{\text{Pulsos medidor en ensayo}} \times 100\% \quad \text{Ecu. 17}$$

Ajustando los pulsos que da el medidor en ensayo ( $n$ ) a su equivalente en pulsos que daría el medidor patrón ( $N_{eq}$ ), se tiene que:

$$E_1 = \frac{N - N_{eq}}{N_{eq}} \times 100\% \quad \text{Ecu. 18}$$

A este error hay que agregarle el error “importado” del medidor patrón ( $E_{pat}$ ) con el cual se obtiene la fórmula final que permite calcular el error en la medición de un medidor en ensayo con respecto a un medidor patrón ( $E_{ex}$ ) cualesquiera que sean sus constantes:

$$E_{ex} = E_1 \pm E_{pat} \quad \text{Ecu. 19}$$

$$E_{ex} = \frac{N - N_{eq}}{N_{eq}} \times 100\% \pm E_{pat} \quad \text{Ecu. 20}$$

### 2.3 Incertidumbre en la medición

Los cálculos y teorías referentes a la incertidumbre en la medición que aparecen durante los procedimientos de calibración que se realizan en LA COMPAÑÍA y que se tratarán en esta sección, se basan en las guías técnicas colombianas:

*GTC 115: Guía sobre la incertidumbre en la medición para principiante.* [9].

*GTC 51: Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones* [10].

La incertidumbre en la medición expresa la duda que existe sobre el resultado de cualquier medición, esta duda aparece debido a la presencia de:

*Efectos aleatorios:* Se dan cuando cada observación dentro de una medición presenta un resultado aleatoriamente diferente respecto a las demás, en estos casos lo ideal es realizar la mayor cantidad de observaciones posibles y hallar su media aritmética.

*Efectos sistemáticos:* Cuando la misma influencia afecta a cada una de las observaciones de la misma forma, en este caso la incertidumbre se halla a partir de cálculos basados en juicios y criterios científicos.

Además, para cuantificar la incertidumbre se necesitan de dos valores:

*El intervalo:* Intervalo dentro del cual se espera que las observaciones se encuentren.

*El nivel de confianza:* Porcentaje que representa el nivel de seguridad que se tiene de que las observaciones van a estar dentro del intervalo.

Tener en cuenta la incertidumbre permite realizar mediciones de calidad y entender los resultados, además, en las mediciones que se realizan como parte de procedimientos de calibración es necesario calcular la incertidumbre para registrarla en el certificado de calibración y, en las mediciones que se realizan como parte de procedimientos de ensayo es necesario

calcular la incertidumbre para poder dar como aprobado o no aprobado al medidor.

Los errores y la incertidumbre pueden aparecer por:

*El instrumento de medición:* Los instrumentos pueden sufrir por errores como cambios por el paso del tiempo, desgaste u otros tipos de desviaciones como pobre lectura, ruido (para instrumentos eléctricos) y muchos otros problemas.

*El elemento que se está midiendo:* El elemento puede no estar estable de acuerdo a los requerimientos de la medición, por ejemplo, cuando se trata de medir el tamaño de un cubo de hielo en un recinto cálido.

*El proceso de medición:* La medición puede ser difícil de ejecutar y depender de muchos factores.

*Las incertidumbres “importadas”:* La calibración o falta de la misma del instrumento de medición tiene una incertidumbre que luego se incorpora a la incertidumbre de la medición que se realiza.

*La destreza del operador:* Algunas mediciones dependen de la destreza y del juicio del operador. Una persona puede ser mejor que otra en la delicada labor de ajustar una medición o en la lectura de detalles finos a simple vista. Los errores grandes son un asunto diferente y no cuentan como incertidumbres.

*Los problemas de muestreo:* La medición que se realiza debe ser apropiadamente representativa del proceso que se intenta evaluar, por ejemplo, si se desea saber la temperatura de un lugar cerrado esta no se puede medir con un termómetro colocado en la pared cercana a la salida del aire acondicionado.

*Las condiciones ambientales:* La temperatura, la presión del aire, la humedad y muchas otras condiciones pueden afectar al instrumento de medición o al objeto que se está midiendo.

### **2.3.1 Cálculo de la incertidumbre en la medición**

Para calcular la incertidumbre en una medición se deben hallar primero las fuentes de incertidumbre para dicha medición, luego hallar el valor de incertidumbre que introduce cada fuente y por último, combinar las incertidumbres individuales para obtener el valor de la

incertidumbre total, todo esto bajo una serie de condiciones específicas que permiten la realización de operaciones entre las diferentes incertidumbres. Independientemente de la fuente de incertidumbre, existen dos tipos de evaluaciones para estimarlas:

*Evaluaciones de tipo A:* Estimados de la incertidumbre a partir de la estadística, en las cuales el resultado depende de la media aritmética de varias observaciones que se realizan para una medición. Usualmente se consideran los resultados de esta evaluación como incertidumbres por efectos aleatorios.

*Evaluaciones de tipo B:* Estimados de la incertidumbre a partir de información tal como experiencias de mediciones anteriores, certificados de calibración, especificaciones del fabricante, cálculos, publicaciones y hasta el sentido común. Usualmente se consideran los resultados de esta evaluación como incertidumbres por efectos sistemáticos.

### 2.3.2 Incertidumbre estándar ( $u$ )

Es la incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar.

#### *Incetidumbre estándar para la evaluación tipo A ( $u_A$ ).*

El primer paso para hallar la incertidumbre estándar para la evaluación tipo A de una medición en la que se han obtenido  $n$  observaciones independientes  $x_i$ , bajo las mismas condiciones de medición, es hallar la media aritmética ( $\bar{x}$ ) de dichas observaciones:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecu. 21}$$

Con el segundo paso se busca saber que tan dispersas están las observaciones que se han hecho a través de la desviación estándar ( $s$ ), la cual nos indica que tan diferentes son las  $n$  observaciones con respecto a la media aritmética del conjunto:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ecu. 22}$$

Por último se tiene que la incertidumbre estándar para la evaluación tipo A es:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecu. 23}$$

***Incertidumbre estándar para la evaluación tipo B ( $u_B$ ).***

La incertidumbre estándar para una medición es evaluada mediante juicios y criterios científicos basados en toda la información disponible sobre la variabilidad de la medida, tales como:

- Datos de mediciones anteriores.
- Experiencia en el conocimiento de las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos de los certificados de calibración y de otro tipo de certificados.
- Demás ítems pertinentes para los procedimientos de ensayo en particular.

En el laboratorio de LA COMPAÑÍA el valor de la incertidumbre estándar tipo B, expresado como un número real C, es calculado de forma rigurosa por sus técnicos como mínimo anualmente o antes si el laboratorio lo considera necesario a través de una serie de cálculos expresados en la *Circular única de la Superintendencia de Industria y Comercio, Título sexto - Metrología* [11]. De esta forma se tiene que:

$$u_B = C \quad \text{Ecu. 24}$$

***Incertidumbre estándar combinada ( $u_C$ ).***

La incertidumbre estándar combinada es el resultado de la adición de las incertidumbres

estándar tipo A y tipo B, las cuales se pueden combinar de forma válida a través de una suma cuadrática debido a que los elementos que entran en juego son no correlacionados. La incertidumbre estándar combinada está dada entonces por:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad \text{Ecu. 25}$$

***Incertidumbre estándar expandida (U).***

La incertidumbre estándar combinada ( $u_C$ ) expresa la incertidumbre en la medición con un determinado nivel de confianza, pero en muchas aplicaciones comerciales, industriales o regulatorias es necesario que el nivel de confianza sea mayor, es decir, que el intervalo alrededor del valor esperado incluya una fracción grande de la distribución de valores medidos. La incertidumbre que cumple con el requisito de incrementar el nivel de confianza se denomina incertidumbre estándar expandida (U).

La incertidumbre estándar expandida (U) es el resultado de multiplicar la incertidumbre estándar combinada ( $u_C$ ) por un número natural diferente de cero denominado factor de cobertura ( $k$ ), ver Ecuación 26. Cuando el factor de cobertura ( $k$ ) es igual a uno, la incertidumbre estándar expandida es equivalente a la incertidumbre estándar combinada y cuando el factor de cobertura ( $k$ ) es mayor que uno, la incertidumbre estándar expandida es mayor que la incertidumbre estándar combinada (entre mayor sea el factor de cobertura ( $k$ ) mayor será la incertidumbre estándar combinada) por lo que el intervalo alrededor del valor esperado incrementa lo que a su vez ocasiona que el nivel de confianza aumente.

$$U = k \cdot u_C \quad \text{Ecu. 26}$$

Los valores aleatorios que resultan de una medición y que se caracterizan con la incertidumbre estándar tienen una distribución de probabilidad gaussiana (aunque en algunos

casos muy peculiares se pueden encontrar otro tipo de distribuciones de probabilidad) cuyo nivel de confianza es equivalente al porcentaje del área de la campana de Gauss que se encuentra en el intervalo alrededor del valor esperado, es decir, entre el error (E) menos la incertidumbre estándar expandida (U) y el error (E) más la incertidumbre estándar expandida (U):

$$[E - U, E + U] = [E - k \cdot u_C, E + k \cdot u_C] \quad \text{Intervalo de interés}$$

$$\text{Nivel de confianza} = \frac{\text{Área entre el intervalo}}{\text{Área total de la campana}} \times 100\% \quad \text{Ecu. 27}$$

En la Figura 5 se observa la variación del intervalo alrededor del error esperado (E) en una medición y del nivel de confianza de dicha medición (porcentaje del área entre el intervalo alrededor del valor esperado) para los factores de cobertura comúnmente utilizados en procesos de calibración de medidores de consumo eléctrico ( $k=1$ ,  $k=2$  y  $k=3$ ). En el laboratorio de LA COMPAÑÍA se trabaja generalmente con un nivel de confianza de 95,46%.

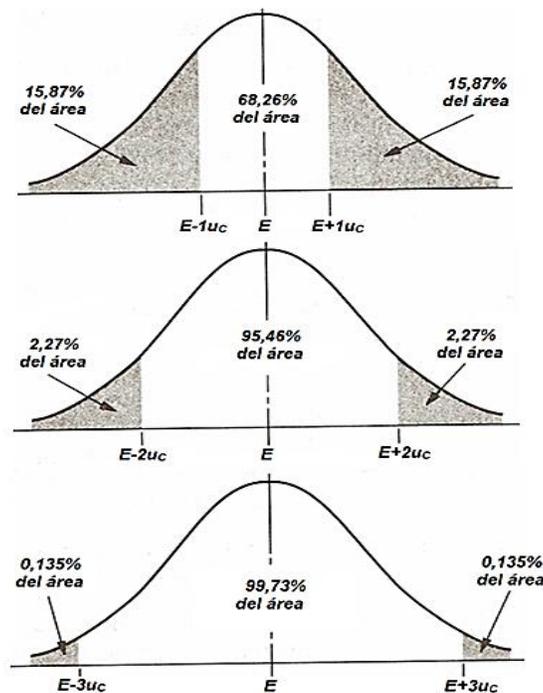


Figura 5. Nivel de confianza en el cálculo de la incertidumbre estándar para  $k=1$ ,  $k=2$  y  $k=3$  respectivamente  
 Fuente: Metodos Cuantitativos. (s.f.). *Introducción a la programación lineal*. Recuperado el 6 de septiembre de 2014, de galeon.com: <http://metodoscuantitativo2.galeon.com/enlaces2218784.html>

## Capítulo 3: Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica

Todos los procedimientos de calibración que se desarrollan en el laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA y que se tratarán durante esta sección se basan en la norma técnica colombiana:

*NTC 4856: Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica [3].*

En esta norma se presentan los ensayos de rutina para propósitos de verificación inicial y posterior que se deben realizar a los medidores de consumo eléctrico fabricados según las normas:

*NTC 2288.* Equipos de medición de energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Medidores electromecánicos de energía activa (Clase 0,5, 1 y 2) (IEC 62053-11).

*NTC 2147.* Equipos de medición de energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (Clase 0,2S y 0,5S) (IEC 62053-22).

*NTC 4052.* Equipos de medición de energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (Clase 1 y 2) (IEC 62053-21).

*NTC 2148.* Electrotecnia. Medidores de energía reactiva (IEC 60145).

*NTC 4569.* Equipos de medición de energía eléctrica (c.a.). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía reactiva (Clase 2 y 3) (IEC 62053-23).

*NTC-ISO-IEC 17025.* Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración.

Los primeros procedimientos que se realizan sobre los medidores de consumo eléctrico son los de verificación visual y corroboración de las condiciones de referencia (condiciones ambientales, eléctricas, técnicas y de precalentamiento). Una vez realizados estos procedimientos

se puede proceder a realizar los procedimientos de ensayo (funcionamiento sin carga, arranque, exactitud y verificación de la constante).

### 3.1 Verificación visual

Hace referencia a la revisión visual interna y externa de los medidores de consumo eléctrico con el fin de encontrar anomalías que impidan realizar los procedimientos de ensayo.

### 3.2 Condiciones de referencia

Las condiciones de referencia son aquellas condiciones ambientales, eléctricas, técnicas y de precalentamiento que deben darse para que los procedimientos de ensayo se lleven a cabo exitosamente.

#### *Condiciones ambientales.*

Las condiciones ambientales de referencia se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Condiciones ambientales de referencia*

Temperatura ambiente:	15 °C a 25 °C
Humedad relativa:	45% a 75%
Presión atmosférica:	86 kPa a 106 kPa (860 mbar a 1060 mbar)

Nota: En caso de que la presión atmosférica no sea la especificada se deben efectuar los Factores de corrección apropiados (véase la NTC 4591 (IEC 60060-1)).

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

El laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA tiene un sistema de control ambiental que mantiene la temperatura a  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , la humedad entre un 45 % y 75 % y además periódicamente se constata que la presión atmosférica este dentro de los rangos permitidos teniendo en cuenta datos recibidos del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Popayán.

**Condiciones eléctricas.**

Las condiciones eléctricas de referencia se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. *Condiciones eléctricas de referencia*

Factor de influencia	Valor de referencia	Tolerancia para medidores de energía						
		Activa clase					Reactiva clase	
		0,2S	0,5S	0,5	1,0	2,0	2,0	3,0
Temperatura ambiente	Temperatura de referencia o, en su ausencia, 23 °C (véase la Nota)	± 2,0 °C	± 2,0 °C	± 1,0 °C	± 2,0 °C	± 2,0 °C	± 2,0 °C	± 2,0 °C
Tensión	Tensión de referencia	± 1,0 °C	± 1,0 °C	± 0,5 °C	± 1,0 °C	± 1,0 °C	± 1,0 °C	± 1,0 °C
Frecuencia	Frecuencia de referencia	± 0,3 °C	± 0,3 °C	± 0,2 °C	± 0,3 °C	± 0,5 °C	± 0,5 °C	± 0,5 °C

Nota: Si los ensayos son hechos a una temperatura distinta a la temperatura de referencia, incluyendo tolerancias permisibles, los resultados deben ser corregidos mediante la aplicación del coeficiente apropiado de temperatura del medidor.

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

**Condiciones técnicas.**

Para todos los tipos de medidores se requiere que:

- Los ensayos se realicen con un medidor patrón.
- Los ensayos se realicen con la tapa principal del medidor cerrado a menos que se pruebe que realizarlas con la tapa abierta no representa una influencia significativa en los resultados.

Para los medidores con disco mecánico se debe verificar que:

- La base del medidor esté asegurada en un soporte aproximadamente vertical.
- Una marca de referencia del medidor sea aproximadamente horizontal.

**Condiciones de precalentamiento.**

Antes de realizar cualquier procedimiento de ensayo se debe conectar el medidor de

consumo eléctrico a la tensión de referencia por lo menos:

- ½ hora, para los medidores de clase 2 y 3.
- 1 hora para los medidores de clase 1, 0,5, 0,5S y 0,2S.

Si los circuitos de tensión de los medidores son desconectados durante algún ensayo por más de 15 minutos, se debe volver a garantizar la condición de precalentamiento.

### **3.3 Procedimientos de ensayo**

Los procedimientos de ensayos se realizan para establecer si los medidores de consumo eléctrico cumplen o no con todas las condiciones técnicas eléctricas necesarias para su correcto funcionamiento en campo.

#### **3.3.1 Ensayo de funcionamiento sin carga**

El ensayo de funcionamiento sin carga se realiza para verificar que los medidores de consumo eléctrico no arrancan si no se aplica una corriente sobre sus circuitos de corriente cuando estos están conectados de acuerdo a la tensión y frecuencia nominales.

Para los medidores electromecánicos, sin corriente en sus circuitos de corriente y aplicando una tensión de entre 80% y 110% del valor nominal, el disco mecánico no debe dar una revolución completa.

Para los medidores electrónicos, sin corriente en sus circuitos de corriente y aplicando un valor de 115% de su tensión nominal, la salida óptica no debe emitir más de un pulso.

El mínimo periodo de ensayo  $\Delta t$  debe ser:

Para medidores clase 0,2S:

$$\Delta t[seg] \geq \frac{54.000 \times 10^6}{c \times m \times V_n \times I_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecu. 28}$$

Para medidores clase 0,5S y 1.

$$\Delta t[seg] \geq \frac{36.000 \times 10^6}{c \times m \times V_n \times I_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecu. 29}$$

Para medidores clase 2.

$$\Delta t[seg] \geq \frac{28.800 \times 10^6}{c \times m \times V_n \times I_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecu. 30}$$

Para medidores clase 3.

$$\Delta t[seg] \geq \frac{18.000 \times 10^6}{c \times m \times V_n \times I_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecu. 31}$$

Dónde:

$c$ : Constante del medidor en ensayo en *imp/KWh* o *imp/Kvarh*.

$m$ : Número de elementos de medida.

$V_n$ : Tensión nominal en *voltios*.

$I_{m\acute{a}x}$ : Corriente máxima en *amperios*.

Así, por ejemplo, para un medidor electrónico monofásico residencial clase 1, con una constante de 3.200 *imp/KWh*, con 1 elemento de medida, una tensión nominal de 120 V y una corriente máxima de 60 A, el tiempo mínimo de ensayo es:

$$\Delta t = \frac{36.000 \times 10^6}{3.200 \times 1 \times 120 \times 60} = 1562,5 \text{ seg} \approx 26,1 \text{ min}$$

### 3.3.2 Ensayo de arranque

Con el ensayo de arranque se busca verificar que el medidor arranca y continúa registrando cuando se conecta, de acuerdo a su diagrama de conexión, a la tensión y frecuencia

nominales para los valores de corriente y factor de potencia indicados en la Tabla 4. La corriente a utilizar se calcula de acuerdo a la corriente base o a la corriente nominal del medidor.

Tabla 4. *Corriente de referencia para los ensayos de arranque*

Cosφ	Senφ	Medidor de energía						
		Activa clase					Reactiva clase	
		0,2S	0,5S	0,5	1,0	2,0	2,0	3,0
1,0		0,001I <sub>n</sub>	0,001I <sub>n</sub>	0,004I <sub>n</sub>	0,004I <sub>b</sub> <sup>3)</sup>	0,005I <sub>b</sub> <sup>3)</sup>		
				0,002I <sub>n</sub> <sup>4)</sup>	0,003I <sub>n</sub> <sup>4)</sup>			
	1,0						0,005I <sub>b</sub> <sup>2)</sup>	0,010I <sub>b</sub> <sup>3)</sup>
							0,003I <sub>n</sub> <sup>1)</sup>	0,005I <sub>n</sub> <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Para medidores estáticos de energía reactiva conectados a través de transformadores de corriente.

<sup>2)</sup> Para medidores estáticos de energía reactiva de conexión directa.

<sup>3)</sup> Para medidores estáticos y medidores electromecánicos de conexión directa.

<sup>4)</sup> Para medidores estáticos y medidores electromecánicos conectados a través de transformadores de corriente.

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

El tiempo de duración del ensayo se calcula así:

$$t[seg] = \frac{3600 \times n}{P \times c} \quad \text{Ecu. 32}$$

Dónde:

n: Numero de pulsos o revoluciones del disco mecánico del medidor en ensayo.

P: Potencia activa en *Kwh* o potencia reactiva en *Kvarh*.

c: Constante del medidor en ensayo en *imp/KWh* o *imp/Kvarh*.

Durante el tiempo de ensayo se debe verificar que el disco mecánico complete por lo menos una revolución para medidores electromecánicos y que se emitan por lo menos dos pulsos en medidores electrónicos.

### 3.3.3 Ensayo de exactitud

El ensayo de exactitud consiste en realizar la calibración del medidor en ensayo para determinados puntos de ensayo que varían de acuerdo a la corriente, tensión y factor de potencia

aplicados al mismo, dichos puntos de ensayo están consignados en la Tabla 6. Los resultados de la calibración son el error relativo resultante de la comparación del medidor en ensayo con el medidor patrón y las incertidumbres que se derivan de dichas mediciones.

La evaluación de los resultados de cada punto de ensayo se realiza con base en los criterios de evaluación consignados en la Tabla 5.

Tabla 5. *Criterios de evaluación del resultado del ensayo de exactitud*

Condición	Resultado
$ \mu  > 0,5 Lep $	El medidor NO CUMPLE (está NO CONFORME), en el respectivo punto de ensayo, con el requerimiento del ensayo de exactitud. Si esta condición se presenta no se evalúan las demás condiciones.
$ Eex  \leq  Lep  -  \mu $	El medidor CUMPLE (está CONFORME), en el respectivo punto de ensayo, con el requerimiento del ensayo de exactitud.
$ Eex  >  Lep  +  \mu $	El medidor NO CUMPLE (está NO CONFORME), en el respectivo punto de ensayo, con el requerimiento del ensayo de exactitud.
$ Lep  -  \mu  <  Eex  \leq  Lep  +  \mu $	Debido al valor de la incertidumbre en la medida, el laboratorio donde se realizan los ensayos no puede definir si el medidor CUMPLE (está CONFORME) o NO CUMPLE (está NO CONFORME), en el respectivo punto de ensayo, con el requerimiento del ensayo de exactitud. En este caso se considera que el resultado es AMBIGUO.

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

Dónde:

$E_{ex}$ : Error porcentual relativo resultante de la comparación del medidor en ensayo con el medidor patrón.

$L_{ep}$ : Límite de error en porcentaje establecido para cada clase de medidor en ensayo en cada punto de prueba.

$\mu$ : Incertidumbre en la medida para el medidor en ensayo.

Tabla 6. Puntos de ensayo y límites de error para los ensayos de calibración

Punto N°	Corriente	Aplicable a medidores	Tipo de carga (Fases)	Cosφ	Senφ	Límites de error en porcentaje ( $L_{ep}$ ) en porcentajes						
						Activa clase				Reactiva clase		
						0,2S <sup>5)</sup>	0,5S <sup>5)</sup>	0,5	1,0	2,0	2,0	3,0
1	0,05I <sup>1)4)</sup>	Monofásicos y Polifásicos	Balanceada R-S-T	1,0		±0,3	±0,7	±1,3	$\frac{\pm 2,0^{2)} \pm 3,5^{2)}}{\pm 1,5^{3)} \pm 3,0^{3)}$			
												±3,5 <sup>2)</sup> ±5,0 <sup>2)</sup> ±3,0 <sup>3)</sup> ±4,0 <sup>3)</sup>
2	I <sup>4)</sup>	Monofásicos y Polifásicos	Balanceada R-S-T	1,0		±0,25	±0,6	0,65	±1,25	±2,5		
					1,0						±2,5 ±3,5	
3	I <sup>4)</sup>	Polifásicos	Monofásica (R)	1,0		±0,35	±0,7	±1,65	±2,25	±3,5		
					1,0						±3,5 ±4,5	
4	I <sup>4)</sup>	Polifásicos	Monofásica (S)	1,0		±0,35	±0,7	±1,65	±2,25	±3,5		
					1,0						±3,5 ±4,5	
5	I <sup>4)</sup>	Polifásicos	Monofásica (T)	1,0		±0,35	±0,7	±1,65	±2,25	±3,5		
					1,0						±3,5 ±4,5	
6	I <sup>4)</sup>	Monofásicos y Polifásicos	Balanceada R-S-T	0,5ind		±0,4	±0,8	±1,1	±1,5	±3,0		
					0,5ind						±3,0 ±4,0	
7	I <sup>4)</sup>	Monofásicos y Polifásicos	Balanceada R-S-T	0,8cap		±0,4	±0,8					
					0,8cap							
8	I <sub>máx</sub>	Monofásicos y Polifásicos	Balanceada R-S-T	1,0		±0,25	±0,6	±0,65	±1,25	±2,5		
					1,0						±2,5 ±3,5	

<sup>1)</sup> Para medidores electromecánicos de energía reactiva el ensayo se realiza con 0,1I<sub>b</sub>.

<sup>2)</sup> Estos errores aplican cuando los ensayos se realizan usando la corriente básica.

<sup>3)</sup> Estos errores aplican cuando los ensayos se realizan usando la corriente básica.

<sup>4)</sup> En medidores para conexión directa se utiliza la corriente básica (I<sub>b</sub>) y en medidores operados con transformador se utiliza la corriente nominal (I<sub>n</sub>).

<sup>5)</sup> Los límites de error para medidores de clase 0,2S y 0,5S aplican únicamente para medidores operados mediante transformadores de medida y por lo tanto se utiliza la corriente nominal (I<sub>n</sub>).

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

Si en todos los puntos de ensayo el medidor cumple con los requisitos, el medidor está CONFORME. Si en alguno de los puntos de prueba el medidor no cumple con los requisitos, el medidor está NO CONFORME. Si en alguno de los puntos el resultado es ambiguo y en los restantes el medidor cumple, se considera que el resultado es AMBIGUO.

### 3.3.4 Ensayo de verificación de la constante utilizando el método de dosificación de energía

En el ensayo de verificación de la constante se verifica que la relación entre las revoluciones del disco mecánico y la energía medida para los medidores electromecánicos y, la relación entre los pulsos emitidos y la energía medida para los medidores electrónicos cumplan con lo especificado en la placa de características o con el valor de constante seleccionado por programación.

Existen varios métodos para realizar esta prueba pero el que se utiliza en el laboratorio de LA COMPAÑÍA es el método de dosificación de energía, el cual aplica la siguiente formula:

$$E_p = \frac{\text{Energía registrada por el medidor} - \text{Energía aplicada}}{\text{Energía aplicada}} \times 100\% \quad \text{Ecu. 33}$$

Donde  $E_p$  representa el error porcentual entre la energía registrada por el medidor, a través de la diferencia entre las lecturas final e inicial, y la cantidad de energía aplicada al mismo.

La mínima energía a aplicar para realizar el ensayo es:

$$E[\text{Kwh ó Kvarh}] = \frac{\text{RES} \times 100}{\text{CL}} \quad \text{Ecu. 34}$$

Dónde:

RES: Resolución del medidor de consumo eléctrico.

CL: Clase del medidor de consumo eléctrico.

El ensayo se realiza utilizando la tensión, corriente y factor de potencia de alguno de los puntos de prueba de la Tabla 6. Los resultados que se pueden obtener se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Criterios de evaluación del resultado del ensayo de verificación de la constante*

<b>Condición</b>	<b>Resultado</b>
$ E_p - E_{ex}  \leq CL -  \mu $	El medidor CUMPLE (está CONFORME) con los requerimientos del ensayo de verificación de la constante.
$ E_p - E_{ex}  > CL +  \mu $	El medidor NO CUMPLE (está NO CONFORME) con los requerimientos del ensayo de verificación de la constante.
$CL -  \mu  <  E_p - E_{ex}  \leq CL +  \mu $	Debido al valor de la incertidumbre en la medida, el laboratorio donde se realizan los ensayos no puede definir si el medidor CUMPLE (está CONFORME) o NO CUMPLE (está NO CONFORME) con el requerimiento de ensayo de verificación de la constante. En este caso se considera que el resultado es AMBIGUO y por lo tanto se recomienda repetir el ensayo utilizando el método de conteo de pulsos.

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). *Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica*. Bogotá: ICONTEC, 2013. NTC 4856.

## Capítulo 4: Condición inicial de la mesa calibradora y análisis de requerimientos

La mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico, ubicada en el laboratorio de calibración de la compañía, que se desea repotenciar se observa en la Figura 6.



*Figura 6.* Mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico que se desea repotenciar  
Fuente: Toma propia

### 4.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación cuenta con tres fuentes de tensión AC, tres fuentes de corriente AC, un generador de energía reactiva, un sistema de protección contra sobrecargas y una placa de alimentación. Las fuentes y el generador son de alta precisión y se manejan a través

de controles analógicos que permiten seleccionar los valores de tensión, corriente y energía activa o reactiva adecuados para los ensayos de acuerdo a la NTC 4856.

### ***Fuentes de tensión AC.***

Cada fuente de tensión AC (ver Figura 7) proporciona una fase R, S o T, además se tiene una línea a neutro, por lo que se pueden obtener las configuraciones para los medidores de consumo eléctrico monofásicos (110 V), bifásicos (220 V) y trifásicos (330 V), bifilares, trifilares y tetrafilares.



Figura 7. Fuentes de tensión AC de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### ***Fuentes de corriente AC.***

Las fuentes de corriente AC (ver Figura 8) constan de bobinas ajustables que proporcionan valores de corriente desde 0,25 hasta 100 A (Aunque en términos prácticos la corriente puede llegar a superar los 100 A), las líneas obtenidas de cada bobina se denotan como I1, I2 e I3.



Figura 8. Fuentes de corriente AC de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### ***Generador de energía reactiva.***

El generador de energía reactiva introduce una componente reactiva de índole capacitivo o inductivo puro que permite obtener un factor de potencia con un valor de entre 0 y 1.

### ***Placa de alimentación.***

La mesa se alimenta de la red eléctrica externa a través de una toma corriente trifásico trifilar que se conecta como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Placa de alimentación de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### ***Sistema de protección contra sobrecargas.***

El sistema de protección contra sobrecargas (ver Figura 10) está conformado por seis breakers que proporcionan protección escalonada a toda la mesa, un breaker se encarga de proporcionar protección a la mesa de la alimentación de la red externa, tres se encargan de proporcionar protección a la mesa de las fuentes de tensión y los últimos tres se encargan de proveer protección contra los medidores de energía que se conecten a la mesa.



Figura 10. Sistema de protección contra sobrecargas de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

## 4.2 Controles analógicos

La mesa calibradora cuenta con una serie de controles que permiten activar y ajustar los valores de tensión, corriente y factor de potencia suministrados a los medidores de consumo eléctrico durante los ensayos.

### *Tablero de control general.*

El tablero de control general se observa en la Figura 11, donde:

1. Interruptor general: Controla la alimentación suministrada a la mesa proveniente de la red externa.
2. Interruptor de tensión: Activa o desactiva las tres fuentes de tensión a la vez.
3. Interruptores de las líneas R-S-T: Cada interruptor activa o desactiva una línea.
4. Interruptor de corriente: Activa o desactiva las tres fuentes de corriente a la vez.
5. Interruptores de las líneas I1-I2-I3: Cada interruptor activa o desactiva una línea.
6. Interruptor para control de iluminación: Enciende o apaga las luces de los indicadores de potencia.
7. Selector de conexión delta ( $\Delta$ ) o estrella (Y): Permite seleccionar la configuración de la que provienen las líneas R-S-T.



Figura 11. Vista frontal del tablero de control general de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### ***Perillas de tensión.***

Las tensiones de cada línea R, S y T se seleccionan a través de cada una de las perillas que se observan en la Figura 12 y se pueden seleccionar valores de hasta 190 V entre cada fase y neutro:



*Figura 12.* Perillas de tensión de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### ***Selector y perillas de corriente.***

El selector y perillas de corriente se observan en la Figura 13, donde:

1. Selector de corriente: Permite seleccionar el rango de corriente en el que se trabajará (0,25 – 0,5 – 1 – 2,5 – 5 – 10 – 25 – 50 – 100 A).
2. Perilla de ajuste grueso: Aplica un divisor de 20 al valor ajustado en el selector de corriente.
3. Perilla de ajuste medio: Aplica un divisor de 20 a los valores obtenidos en la perilla de ajuste grueso.
4. Perilla de ajuste fino: Aplica un divisor de 20 a los valores obtenidos en la perilla de ajuste medio.



*Figura 13.* Selector y perillas de corriente de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

***Perilla de energía reactiva.***

Por ultimo se tiene la perilla de energía reactiva (ver Figura 14) con la que se ajusta el factor de potencia a través del ángulo  $\phi$  formado entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$\cos\phi = \frac{P}{|S|} \quad \text{Ecu. 35}$$

Dónde:

P: Potencia activa.

S: Potencia reactiva.

$\cos\phi$ : Factor de potencia.



*Figura 14.* Perilla de energía reactiva de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

### **4.3 Indicadores analógicos de parámetros eléctricos**

Los indicadores analógicos de tensión (voltímetros), corriente (amperímetros) y potencia (vatímetros) con los que cuenta la mesa calibradora de medidores se observan en la Figura 15, donde:

1. Indicador analógico de tensión de la línea R.
2. Indicador analógico de tensión de la línea S.
3. Indicador analógico de tensión de la línea T.
4. Indicador analógico de corriente de la línea I1.
5. Indicador analógico de corriente de la línea I2: No funciona.
6. Indicador analógico de corriente de la línea I3.

7. Indicador analógico de potencia de las líneas R-I1.
8. Indicador analógico de potencia de las líneas S-I2.
9. Indicador analógico de potencia de las líneas T-I3.

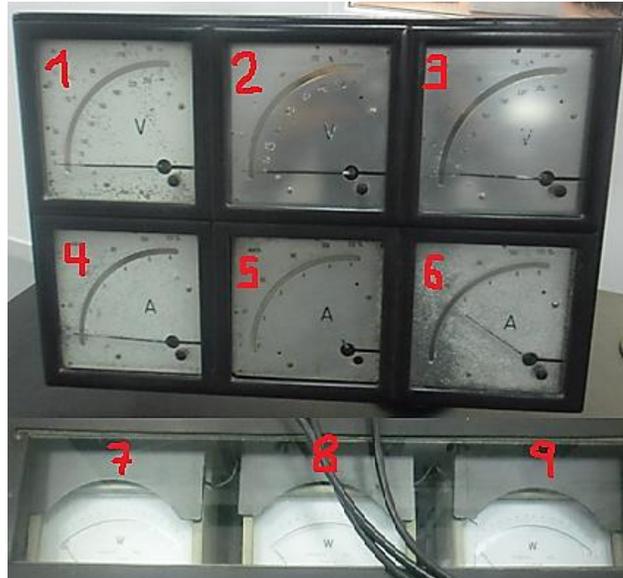


Figura 15. Indicadores analógicos de tensión, corriente y potencia de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

Además se tiene el indicador del ángulo  $\phi$  con el que se halla el factor de potencia, cuyo resultado no es confiable debido a que está descalibrado.



Figura 16. Indicador del ángulo de desfasaje entre la potencia activa y reactiva  
Fuente: Toma propia

#### 4.4 Soporte mecánico

El soporte mecánico actual cuenta con espacio y líneas de alimentación de tensión para 5 medidores de consumo eléctrico monofásicos bifilares (cada uno con una bornera para la fase y una para el neutro) y 5 bifásicos o trifásicos, bifilares, trifilares o tetrafilares (cada uno con tres

borneras para las fases y una para el neutro). Las líneas de alimentación de corriente se dividen en dos I1, dos I2 y dos I3 para un total de seis (ver Figura 17).

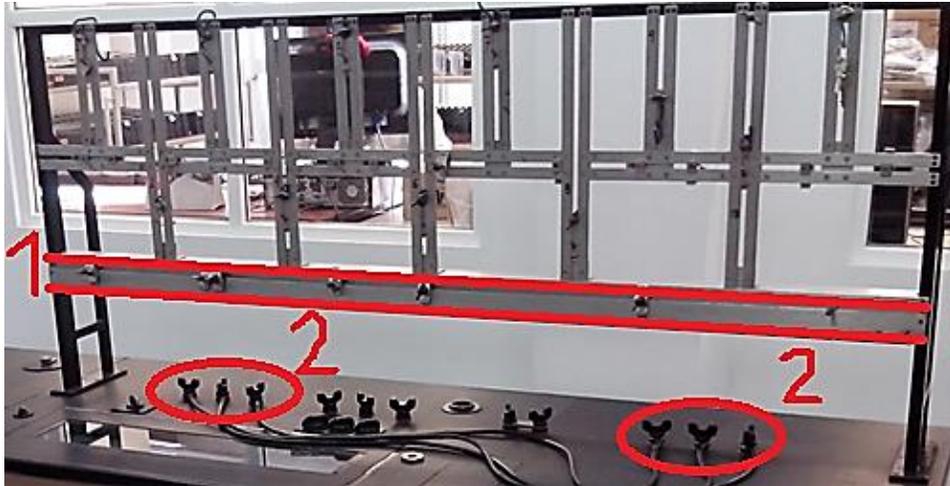


Figura 17. Soporte mecánico de la mesa calibradora  
Fuente: Toma propia

Donde:

1. Líneas de alimentación de tensión.
2. Líneas de alimentación de corriente.

## 4.5 Análisis de requerimientos

Los requerimientos se dividen en cinco grupos: los requerimientos generales, los requerimientos de la solución electrónica, los requerimientos para el medidor patrón, los requerimientos para los indicadores de parámetros eléctricos y los requerimientos de la solución mecánica; todos estos requerimientos expresan las características que tendrá la mesa de calibración repotenciada.

### *Requerimientos generales:*

La mesa debe soportar hasta cinco (5) medidores trifásicos tetrafilares en procedimientos de ensayo al mismo tiempo.

En la mesa se debe poder ensayar medidores electromecánicos y electrónicos de clase 0,5, 1 y 2 para medidores de energía activa y, 2 y 3 para medidores de energía reactiva.

La solución electrónica debe garantizar que se puedan realizar todos los procedimientos de ensayo establecidos en la NTC 4856, es decir, los ensayos de funcionamiento sin carga, arranque, exactitud y verificación de la constante usando el método de dosificación de energía.

Se deben cambiar los tres (3) indicadores de tensión, tres (3) de corriente y tres (3) de potencia analógicos con los que actualmente cuenta la mesa por uno o varios indicadores digitales.

Los dispositivos que se elijan para la repotenciación de la mesa deben tener puertos de comunicación que permitan una futura implementación de un sistema software para controlar los procedimientos de ensayo vía PC.

#### ***Requerimientos de la solución electrónica:***

La interfaz de usuario debe tener un menú con opciones que permitan: primero, ingresar los parámetros básicos de configuración para la realización de los ensayos, segundo, seleccionar el tipo de ensayo que se desea realizar e iniciar el mismo, y por último, visualizar los resultados de los ensayos.

Los resultados de los ensayos se deben poder observar en visualizadores LCD o 7 segmentos.

El procesador debe ser capaz de captar todas las señales emitidas por los sensores fotoeléctricos y por el medidor patrón, especialmente estas últimas porque el medidor patrón emite pulsos con una frecuencia puede alcanzar los 60 KHz.

Para el ensayo de exactitud el error en la medición se calcula a partir del promedio de tres observaciones, es decir, se comparan tres veces los pulsos del medidor patrón con respecto a los pulsos del medidor en ensayo, se le calcula el error a cada comparación usando la Ecuación 20 y el error total es el promedio entre estos tres errores, de tal forma que:

$$e_{ex1} = \frac{N_1 - N_{eq1}}{N_{eq1}} \pm e_{pat} \quad \text{Observación 1}$$

$$e_{ex2} = \frac{N_2 - N_{eq2}}{N_{eq2}} \pm e_{pat} \quad \text{Observación 2}$$

$$e_{ex3} = \frac{N_3 - N_{eq3}}{N_{eq3}} \pm e_{pat} \quad \text{Observación 3}$$

$$e_{exTOTAL} = \frac{e_{ex1} + e_{ex2} + e_{ex3}}{3} \quad \text{Ecu. 36}$$

El sensor fotoeléctrico debe ser capaz de captar los pulsos emitidos por los medidores electrónicos y el cambio de color en el disco mecánico que se da por cada revolución en los medidores electromecánicos.

La solución electrónica debe ser alimentada por fuentes de alimentación DC conmutadas para que el suministro de corriente provenga de la red eléctrica externa. Además, las fuentes deben ser capaces de suministrar la corriente necesaria para el correcto funcionamiento de todos los dispositivos.

***Requerimiento para el medidor patrón:***

El medidor patrón debe tener una clase de exactitud de mínimo 0,02 debido a que los medidores con una clase menor son mucho más caros y además están diseñados para medidores en ensayo de clases 0,5S y/o 0,2S.

***Requerimiento para los indicadores de parámetros eléctricos:***

Los indicadores digitales deben ser multifuncionales y como mínimo permitir las medidas de tensión, corriente, potencia y factor de potencia entre cada una de las fases R-S-T y neutro. La precisión para los valores de tensión y frecuencia (si el indicador entrega este valor) no deben exceder los establecidos en las condiciones eléctricas de referencia de la Tabla 3.

***Requerimientos de la solución mecánica:***

El soporte mecánico para los medidores en ensayo debe estar nivelado horizontal y verticalmente tal y como lo señalan las condiciones técnicas de referencia de la NTC 4856 (ver sección 3.2).

El soporte mecánico para los medidores en ensayo será un soporte fijo.

Se debe incluir en el diseño los soportes o cajones para el medidor patrón, los indicadores digitales, las fuentes de alimentación DC y la solución electrónica en general.

Los ensayos se deberán realizar con los medidores en ensayo con puente abierto, pero se dejará en el diseño mecánico un espacio para la futura implementación de los transformadores necesarios para poder realizar los ensayos con puente cerrado.

## Capítulo 5. Solución electrónica

### 5.1 Descripción general de la solución electrónica

La solución electrónica definitiva se estructura con base en cuatro planos, tal como se observa en la Figura 18, cada uno de estos planos interactúa de forma activa y pasiva con otros u otros planos permitiendo así la articulación total del sistema.

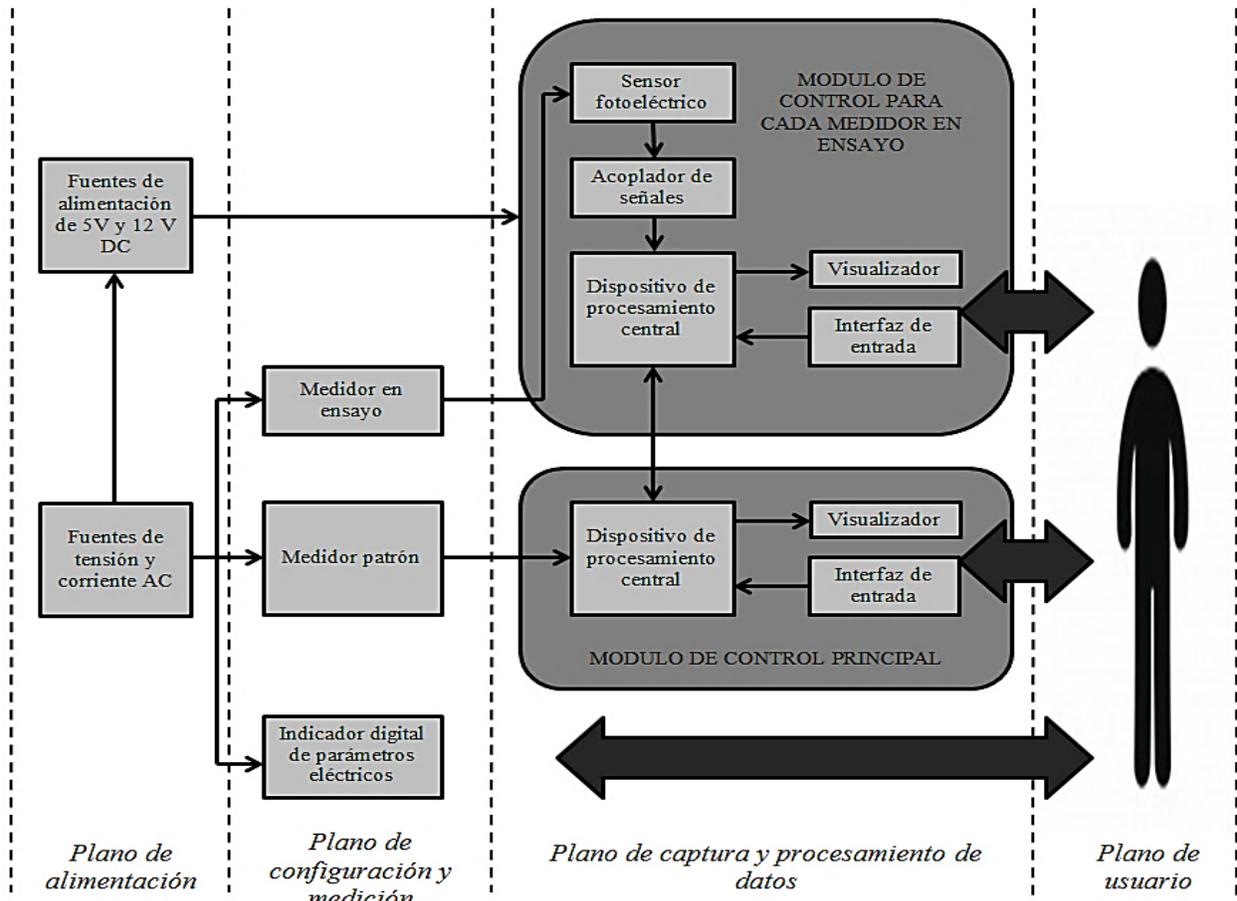


Figura 18. Diagrama de bloques de la solución electrónica  
Fuente: Elaboración propia

El plano de usuario, cuyo rol es desarrollado por operarios, es el plano exterior a la mesa

calibradora desde el cual se da inicio, seguimiento y análisis a los ensayos; los dos planos siguientes, el plano de captura y procesamiento de datos y el plano de configuración y medición, se encuentran embebidos en la mesa calibradora, y contienen las interfaces necesarias para la configuración de los parámetros de ensayo y los dispositivos necesarios para la medición de energía y el procesamiento de las señales; el plano de alimentación, que se extrae directamente de los sistemas que aun funcionan correctamente en la mesa calibradora (sistemas de alimentación y controles analógicos), se encarga de suministrar la energía eléctrica necesaria para la realización de los ensayos y para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos que formarán parte de la solución electrónica definitiva. Dentro del plano de captura y procesamiento de datos se agrupan los bloques en dos módulos, el módulo de control para cada medidor en ensayo y el módulo de control principal; el módulo de control para cada medidor en ensayo contiene los bloques necesarios para la programación, ejecución y visualización de los ensayos de un medidor de consumo eléctrico en específico conectado a la mesa calibradora, en la Figura 18 no se observa pero este módulo se implementa 5 veces debido a que la mesa soportará 5 medidores en ensayo a la vez, además, estos módulos se comunican serialmente entre sí; el módulo de control principal contiene los bloques para la programación y ejecución de los ensayo para varios medidores a la vez.

A continuación se detallarán las funciones y características de cada uno de los planos, de los bloques que los conforman y de los posibles dispositivos que pueden satisfacer las necesidades de cada bloque:

***Plano de usuario:***

*Usuario:* El rol de usuario es desarrollado por los operarios del laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA, ellos interactúan mecánicamente con la mesa

calibradora con el fin de realizar la configuración de los ensayos e interpretar los resultados de los mismos. La interacción con la mesa incluye las siguientes actividades: la conexión de las líneas de alimentación de tensión y corriente de las fuentes de alimentación AC a los circuitos de tensión y corriente de los medidores en ensayo, la elección y configuración de los parámetros eléctricos de cada ensayo utilizando el indicador digital de parámetros eléctricos y los controles de la mesa, la configuración del tipo de ensayo con puntos de prueba, tiempo de duración, constante del medidor o medidores y demás concordantes de acuerdo con la NTC 4856, y la interpretación de los resultados de los ensayos.

***Plano de captura y procesamiento de datos:***

*Sensor fotoeléctrico:* El sensor fotoeléctrico es un transductor de señales ópticas a eléctricas con una entrada capaz de detectar las revoluciones del disco mecánico, de los medidores electromecánicos, y los pulsos de un LED de salida, de los medidores electrónicos, y una salida con estados lógicos digitales. Los dispositivos tenidos en cuenta para este proyecto, que pueden realizar estas funciones son:

- Sonda KMK113 marca REDZ.
- Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE.

*Acoplador de señales:* El acoplador de señales está conformado por un circuito electrónico que recibe la señal de salida del sensor fotoeléctrico y la convierte en una señal TTL (siglas en inglés de Transistor-Transistor Logic) que pueda ser interpretada por el dispositivo de procesamiento central.

*Interfaz de entrada:* La interfaz de entrada es una pasarela que permite convertir las instrucciones mecánicas de los operarios con las cuales dan inicio, seguimiento y análisis a los ensayos de calibración en señales eléctricas que puedan ser detectadas e identificadas por el dispositivo de procesamiento central. El dispositivo que lleva a cabo esta función es un Teclado matricial 4x3.

*Visualizador:* El visualizador es la interfaz de salida del sistema la cual recibe las señales eléctricas de salida del dispositivo de procesamiento central y las convierte en señales ópticas de tal forma que los operarios puedan interpretarlas. Los dispositivos

tenidos en cuenta para este proyecto, que pueden realizar estas funciones son:

- Visualizador 7 segmentos serial.
- Pantalla LCD 20x4.

*Dispositivo de procesamiento central:* El dispositivo de procesamiento central recibe las señales del circuito acoplador de señales, la interfaz de entrada y el medidor patrón; las procesa, es decir, realiza todos los cálculos necesarios para el desarrollo de cada uno de los procedimientos de ensayo de la NTC 4856; y por último, envía las señales al visualizador. Los dispositivos tenidos en cuenta para este proyecto, que pueden realizar estas funciones son:

- Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP.
- Placa Arduino Mega 2560.
- Raspberry PI.

#### ***Plano de configuración y medición:***

*Indicador digital de parámetros eléctricos:* Las entradas del indicador digital de parámetros eléctricos son unas borneras que se conectan a las salidas de las fuentes de tensión y corriente AC, y su salida es un visualizador en el que se pueden observar los parámetros eléctricos que el dispositivo es capaz de medir. Los dispositivos, tenidos en cuenta para este proyecto, con estas características son:

- Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata.
- Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric.
- Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric.
- Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric.

*Medidor patrón:* Las entradas del medidor patrón se conectan a las fuentes de tensión y corriente AC y su salida es un tren de pulsos TTL con una frecuencia de hasta 60 KHz la cual, en comparación con los pulsos de salida del circuito acoplador de señales que se conecta al dispositivo de procesamiento central, es bastante alta. Los dispositivos, tenidos en cuenta para este proyecto, con estas características son:

- Sistema de Ensayo de Contadores de Electricidad y Transformadores CALPORT 300 marca MTE.
- Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 marca MTE.
- Patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 marca MTE.

*Medidor en ensayo:* Las entradas del medidor en ensayo son unas borneras que se conectan a las fuentes de tensión y corriente AC y su salida son revoluciones, en medidores electromecánicos, o pulsos de un LED, en medidores electrónicos, proporcionales a la potencia consumida por la red eléctrica externa.

### ***Plano de alimentación:***

*Fuentes de tensión y corriente AC:* Las fuentes de tensión AC se encuentran en la sección 4.2 de este documento, sus entradas se conectan a la red eléctrica externa a través de la placa de alimentación de la mesa calibradora y su salida son las líneas de tensión (R, S, T y neutro) y corriente (I1, I2 e I3).

*Fuentes de alimentación de 5 V y 12 V DC:* Las entradas de las fuentes de alimentación de 5 V y 12 V DC se conectan a las fuentes de tensión y corriente AC y su salida es una señal DC regulada. La fuente de 5 V DC se usa para todos los dispositivos que trabajan con voltajes TTL y la fuente de 12 V DC se usa para todos los dispositivos que requieren un voltaje mayor al máximo TTL para su funcionamiento. Los dispositivos, tenidos en cuenta para este proyecto, con estas características son:

- Fuente de alimentación regulada conmutada ABL8MEM05040 marca Schneider Electric.
- Fuente de alimentación regulada conmutada ABL8MEM12020 marca Schneider Electric.

## **5.2 Elección de la solución electrónica definitiva**

Existen varias opciones para llegar a una solución electrónica que cumpla con los objetivos del proyecto, dichas opciones varían de acuerdo a los dispositivos que se usan para

desarrollarla, por lo que para encontrar la solución más factible y de mayor calidad se analizaron todas las posibles combinaciones de dispositivos y sus interacciones, por medio de la técnica de análisis morfológico enfocada hacia un sistema tecnológico [12].

La morfología como disciplina (del griego morfos, forma y logos, estudio) se ocupa de la generación y las propiedades de la forma o estructura de un sistema. El análisis morfológico, por su parte, es una técnica mixta creada con el objetivo de generar un instrumento que permita ampliar la conciencia de la complejidad de un problema a través de la descomposición de sus elementos o estructuras esenciales. En su primera fase, el espacio morfológico permite la descomposición del sistema en múltiples variables o componentes, dando como resultado un despliegue de posibilidades de múltiples combinaciones o escenarios llamados criterios de inclusión, los cuales son una estrategia de suma de posibilidades. En una segunda fase, la reducción del espacio morfológico busca identificar las combinaciones que son irrealizables (por ejemplo, por incompatibilidad), en esta fase se reduce el espacio morfológico, a través de la técnica de consideración de criterios de exclusión como pueden ser los económicos y técnicos [12].

Como primera medida se establece el objetivo que se desea alcanzar con el análisis morfológico, el cual se deriva de los requerimientos generales y los requerimientos para la solución electrónica observados en la sección 4.5:

*Desarrollar un sistema electrónico que permita realizar todos los procedimientos de ensayo establecidos en la NTC 4856, donde se puedan ingresar los parámetros básicos de configuración de los ensayos, que tenga un procesador capaz de captar y procesar todas las señales que a él llegan, que permita ensayar medidores electrónicos y electromecánicos, y que sea alimentado por fuentes de alimentación DC reguladas conmutadas.*

En segundo lugar se realiza un listado de los criterios de inclusión, es decir, las partes que conforman el sistema electrónico, las cuales se evidencian como los bloques del diagrama de bloques de la solución electrónica que permiten cumplir con el objetivo del análisis morfológico (ver Figura 18), junto con los posibles dispositivos que cumplen con las características especificadas en cada bloque, desarrolladas durante la sección 5.1:

*Fuentes de alimentación de 5 V y 12 V DC.*

- Fuente de alimentación regulada conmutada ABL8MEM05040 marca Schneider Electric.
- Fuente de alimentación regulada conmutada ABL8MEM12020 marca Schneider Electric.

*Interfaz de entrada.*

- Teclado matricial 4x3.

*Visualizador.*

- Visualizador 7 segmentos serial.
- Pantalla LCD 20x4.

*Sensor fotoeléctrico.*

- Sonda KMK113 marca REDZ.
- Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE.

*Dispositivo de procesamiento central.*

- Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP.
- Placa Arduino Mega 2560.
- Raspberry PI.

*Medidor patrón.*

- Sistema de Ensayo de Contadores de Electricidad y Transformadores CALPORT 300 marca MTE.
- Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 marca MTE.
- Patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 marca MTE.

*Indicador digital de parámetros eléctricos.*

- Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata.
- Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric.
- Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric.
- Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric.

Las características más relevantes de dichos dispositivos se encuentran en las Tablas 8, 9, 10, 11, 12 y 13.

Tabla 8. *Características relevantes de las fuentes de alimentación reguladas conmutadas*

Características	Fuente de alimentación regulada conmutada	
	ABL8MEM05040	ABL8MEM12020
Costo (pesos)	326.550	326.550
Tensión de entrada	100 – 240 V AC	100 – 240 V AC
Tensión de salida	4,75 – 5,25 V DC	11,4 – 15 V DC
Corriente de salida	4 A DC	2,1 A DC

Tabla 9. *Características relevantes de los visualizadores*

Características	Visualizador	
	7 segmentos serial	Pantalla LCD 20x4
Costo (pesos)	3.000	30.000

Tabla 10. *Características relevantes de los sensores fotoeléctricos*

Características	Sensor fotoeléctrico	
	Sonda KMK113	Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003
Costo (pesos)	167.550	3.592.800
Tipos de medidores	Electrónicos	Electrónicos y electromecánicos
Interfaz eléctrica de salida	RS 232 – DB9 Macho	Pin de salida de pulsos

Tabla 11. Características relevantes de los dispositivos de procesamiento central

Características	Dispositivo de procesamiento central		
	Microcontrolador PIC16F877A	Placa Arduino Mega 2560	Raspberry PI
<b>Costo (pesos)</b>	15.000	57.000	120.000
<b>Pines de entrada y salida digitales</b>	33	39	8
<b>Tipos de comunicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puerto serial síncrono (SSP) con bus SPI (modo maestro) y bus I<sup>2</sup>C (maestro/esclavo).</li> <li>- USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) con dirección de detección de 9 bits.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- UART.</li> <li>- SPI.</li> <li>- TWI.</li> <li>- USB (puerto COM virtual con reconocimiento automático en Linux).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SPI.</li> <li>- I<sup>2</sup>C.</li> <li>- UART.</li> </ul>
<b>Puertos integrados para conexión con periféricos</b>	-	Puerto USB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ethernet: Puerto RJ-45 10/100 BASE T.</li> <li>- Salidas de video: mini HDMI y RCA.</li> <li>- Salida de audio.</li> <li>- Conector dual USB 2.0 tipo A.</li> </ul>
<b>Procesador</b>	PIC16F877A	Atmega2560	ARM 11 (32 bits – 700 Mhz)
<b>Almacenamiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memoria de programa: FLASH, 8 K de instrucciones de 14 bits C/U.</li> <li>- Memoria de datos: 368 bytes RAM, 256 bytes EEPROM.</li> <li>- Pila (Stack): 8 niveles (14 bits).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Memoria flash de 256 KB de los cuales 8 KB son usados por el bootloader (Gestor de arranque).</li> <li>- SRAM: 8 KB.</li> <li>- EEPROM: 4 KB.</li> </ul>	SDRAM: 512 MiB

Tabla 12. Características relevantes de los medidores patrón

Características	Medidor patrón		
	CALPORT 300	SRS 121.3	SRS 400.3
<b>Costo (pesos)</b>	90.026.600	Alrededor de 180.000.000	Alrededor de 180.000.000
<b>Precisión</b>	0,05	0,05	0,02
<b>Rango de tensión</b>	40 mV – 480 V	30 – 480 V AC	5 – 520 V AC
<b>Rango de corriente</b>	1 mA – 120 A	1 mA – 120 A	1 mA – 120 A
<b>Comunicación</b>	Puerto RS-232 C	Puerto RS-232 C	Puerto RS-232 C

Tabla 13. Características relevantes de los medidores multifuncionales

Características	Medidor multifuncional		
	<i>acm20-4-ac1-r-c</i>	PM1200	PM710
<b>Costo (pesos)</b>	363.000	1.050.000	1.575.000
<b>Datos técnicos</b>			
Parámetros básicos	Tensión, corriente, potencia y factor de potencia.	Tensión, corriente, potencia, energía, factor de potencia y frecuencia.	Tensión, corriente, potencia, energía, factor de potencia y frecuencia.
Rango de corriente	0 – 100 A AC ±1 %	0 – 125 A AC ±1 %	0 – 125 A AC ±0,5 %
Rango de tensión	85 – 264 V AC ±1 %	80 – 480 V AC ±1 %	10 – 480 V AC ±0,5 %
Pantalla	LED	LED	LCD
Transformadores de corriente	Integrados	Requiere de tres transformadores de corriente externos para poder trabajar en los rangos de corriente que ofrece el sistema de alimentación de la mesa calibradora.	Requiere de tres transformadores de corriente externos para poder trabajar en los rangos de corriente que ofrece el sistema de alimentación de la mesa calibradora.
<b>Costo adicional debido a los transformadores de corriente</b>	-	259.500 pesos	259.500 pesos
<b>Instalación</b>	En superficie con terminales de tornillo.	En superficie con terminales de tornillo.	En superficie con terminales de tornillo.
<b>Comunicación</b>	-	Puerto RS-232	Puerto RS-232

En tercer lugar se definen los criterios de exclusión que se tendrán en cuenta para elegir entre los dispositivos que pertenecen a un mismo bloque y que garantizan la factibilidad y calidad de la solución electrónica:

1. *Dificultad de implementación.*
2. *Dificultad y/o inflexibilidad en el desarrollo del código.*
3. *Carencia de adaptabilidad del código.*
4. *Incompleta visualización de los resultados.*
5. *Carencia de escalabilidad.*
6. *Carencia de un módulo de comunicación integrado.*
7. *Limitación en cuanto a la cantidad de pines del dispositivo.*
8. *Fragilidad o tendencia a fallar.*
9. *Dificultad para operar.*
10. *Incompatibilidad con otros dispositivos.*
11. *Incompatibilidad con diferentes tipos de medidores en ensayo.*
12. *Rangos de tensión y/o corriente inferiores a los ofrecidos por el sistema de alimentación AC de la mesa calibradora.*
13. *Sobredimensionamiento.*
14. *Alto costo.*

En cuarto lugar se realiza un análisis que permite descartar uno o varios dispositivos de un bloque en específico con base en uno o varios criterios de exclusión:

*Fuentes de alimentación de 5 V y 12 V DC.*

Las fuentes de alimentación reguladas conmutadas ABL8MEM05040 y ABL8MEM12020 marca Schneider Electric son las únicas opciones para este bloque.

*Interfaz de entrada.*

El teclado matricial 4x3 es la única opción para este bloque.

*Visualizador:*

- Visualizador 7 segmentos serial: El primer criterio (dificultad de implementación) y el cuarto criterio (incompleta visualización de los

resultados), son criterios de exclusión para este dispositivo, porque el visualizador 7 segmentos serial requiere de numeroso cableado que debe seguir secuencias lógicas específicas para poder mostrar los resultados, además, dichos resultados podrían ser observados un parámetro a la vez y, para el ensayo de exactitud se necesita visualizar, para realizar un buen análisis, como mínimo 6 parámetros a la vez (el error total, la desviación estándar, la incertidumbre estándar expandida y las incertidumbres estándar tipo A, B y combinada).

*Sensor fotoeléctrico.*

- Sonda KMK113 marca REDZ.

El noveno criterio (dificultad para operar) y el décimo primer criterio (incompatibilidad con diferentes tipos de medidores en ensayo), son criterios de exclusión para este dispositivo, porque la sonda KMK 113 se pega a través de un material adhesivo a los medidores que se desean ensayar, por lo que su utilización implicaría dificultad en el montaje y desmontaje entre ensayos, lo que aumentaría el tiempo de instalación de los ensayos y por ende disminuiría la productividad del laboratorio. Por otro lado, la sonda KMK 113 está diseñada solo para detectar los pulsos ópticos LED o LED infrarrojos de los medidores electrónicos, por lo que los medidores electromecánicos no se podrían ensayar en una solución electrónica que utilice este dispositivo.

*Dispositivo de procesamiento central.*

- Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP.

El primer criterio (dificultad de implementación), el segundo criterio (dificultad y/o inflexibilidad en el desarrollo del código), el tercer criterio (carencia de adaptabilidad del código) y el quinto criterio (carencia de escalabilidad), son criterios de exclusión para este dispositivo, porque la implementación del PIC16F877A se realiza a través de circuitos impresos los cuales son tendientes a fallar y requieren cuidadosa manipulación. El desarrollo del código se realizaría con lenguaje ensamblador, lo cual requiere de mayor experticia del desarrollador que la que se requeriría para programar en lenguajes con características de C++, por lo que el tiempo de desarrollo

podría aumentar. Además, una vez implementado el sistema sería imposible realizar modificaciones al código y/o a los circuitos impresos, lo que sumado a que el dispositivo soporta únicamente comunicación serial RS 232, limita ampliamente la posibilidad de escalar el sistema.

- Raspberry PI.

El séptimo criterio (limitación en cuanto a la cantidad de pines del dispositivo) y el décimo criterio (incompatibilidad con otros dispositivos), son los criterios de exclusión para este dispositivo, porque la Raspberry PI solo tiene 8 pines de entrada y salida digitales lo que imposibilita que se integren la pantalla LCD 20x4, el teclado matricial 4x3, el pin de salida del circuito acoplador de señales y el pin de salida de pulsos del medidor patrón a la vez, esto conllevaría a utilizar los puertos integrados para conexión con periféricos para adaptar un nuevo visualizador e interfaz de entrada diferente a un teclado matricial y captar las señales del medidor patrón por medio de su interfaz serial de salida; esto por otro lado llevaría a la incompatibilidad entre el medidor patrón y la Raspberry PI, debido a que el medidor patrón cuando se conecta con su interfaz serial trabaja con un paquete software diseñado para Windows que no es compatible con el sistema operativo de la Raspberry PI.

*Medidor patrón.*

- Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 y patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 ambos de marca MTE.

Estos dos patrones se descartan bajo los mismos criterios. El décimo tercer criterio (sobredimensionamiento) y el décimo cuarto criterio (alto costo), son criterios de exclusión para estos dispositivos, porque ambos cuestan aproximadamente el doble del medidor patrón CALPORT 300 y están diseñados para sistemas de calibración capaces de ensayar entre 20 y 40 medidores a la vez, este proyecto solo contempla el ensayo de cinco medidores a la vez.

*Indicador digital de parámetros eléctricos.*

- Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata.

El sexto criterio (carencia de un módulo de comunicación integrado), el

octavo criterio (fragilidad o tendencia a fallar) y el décimo segundo criterio (rangos de tensión y/o corriente inferiores a los ofrecidos por el sistema de alimentación AC de la mesa calibradora), son criterios de exclusión para este dispositivo, porque el indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata no tiene un puerto de comunicación que permita conectarlo a un PC lo que imposibilitaría una ampliación del sistema. El indicador funciona a través de botones con resortes lo cuales debido a la gran cantidad de ensayos que se realizan en el laboratorio se pueden desgastar en un corto plazo. Además, el rango de tensión comienza en 85 V AC por lo que se quedan por fuera las tensiones inferiores que ofrece el sistema de alimentación de la mesa calibradora.

- Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric.

El décimo segundo criterio (rangos de tensión y/o corriente inferiores a los ofrecidos por el sistema de alimentación AC de la mesa calibradora) es el criterio de exclusión para este dispositivo, porque el rango de tensión comienza en 80 V AC por lo que se quedan por fuera las tensiones inferiores que ofrece el sistema de alimentación de la mesa calibradora.

- Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric.

El Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric es la única opción para acompañar al indicador digital PM1200 o PM710.

Por último, una vez descartados los dispositivos que no formaran parte de la solución definitiva, con base en los criterios que garantizan calidad y factibilidad en la elección del sistema electrónico, se obtiene un espacio morfológico (ver Figura 19) en el que se aprecian todos los dispositivos que formarán parte de la solución electrónica definitiva (dispositivos encerrados en cajones color verde) y todos los dispositivos que se descartaron junto con los criterios que se usarán para hacerlo (dispositivos encerrados en cajones color rojo).

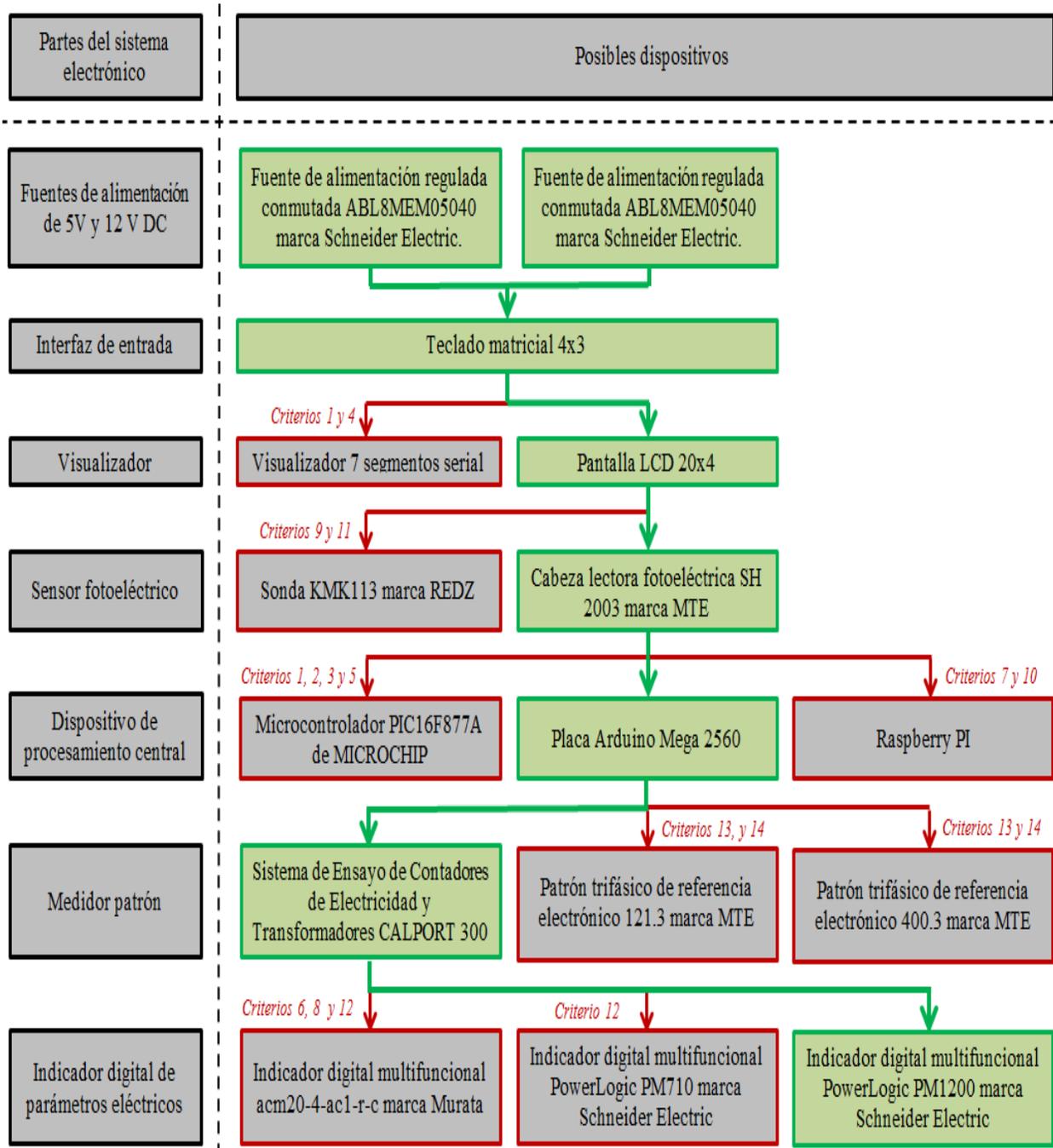


Figura 19. Espacio morfológico que denota la mejor solución electrónica para la repotenciación de la mesa calibradora

Con base en la selección electrónica resultante del análisis morfológico desarrollado, se realiza ahora, la propuesta de costos y materiales para la solución electrónica observada en la Tabla 14.

Tabla 14. *Propuesta de costos y materiales para la solución electrónica*

Dispositivos	Cantidad	Precio unitario (pesos)	Precio total (pesos)
<b>Medidor patrón CALPORT 300 marca MTE</b>	1	90.026.600	90.026.600
<b>Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710</b>	1	1.575.000	1.575.000
<b>Transformador de corriente 16454</b>	3	86.500	259.500
<b>Arduino Mega 2560</b>	6	57.000	342.000
<b>Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003</b>	5	3.592.800	17.964.000
<b>Visualizador LCD 20x4</b>	6	30.000	180.000
<b>Teclado matricial 3x4</b>	6	18.000	108.000
<b>Fuente de alimentación DC ABL8MEM05040</b>	1	326.550	326.550
<b>Fuente de alimentación DC ABL8MEM12020</b>	1	326.550	326.550
<b>TOTAL</b>			<b>111.108.200</b>

NOTA: La descripción de las características técnicas (mecánicas y eléctricas) de todos los dispositivos que hacen parte del análisis morfológico estudiadas en esta sección se detallan en los Anexos A y B.

### 5.3 Diseño de la solución electrónica definitiva

El esquema general de la solución electrónica definitiva (ver Figura 20) incluye las cabezas lectoras fotoeléctricas, los circuitos acopladores de la señal de salida de las cabezas lectoras fotoeléctricas, los módulos de control para cada medidor en ensayo (conformados por una placa Arduino, un teclado matricial 4x3 y una pantalla LCD 20x4), los circuitos acopladores de la señal de salida del medidor patrón, el módulo de control principal (conformado por una placa Arduino, un teclado matricial 4x3 y una pantalla LCD 20x4), el módulo de interconexión

serial, el medidor patrón, el indicador digital de parámetros eléctricos, las borneras de alimentación de los medidores en ensayo, las líneas de alimentación de 5 y 12 V DC para los dispositivos electrónicos y las líneas de alimentación AC. La correcta conexión e interconexión de estos dispositivos y circuitos garantiza el cumplimiento de los requerimientos del proyecto y representan en gran medida la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.

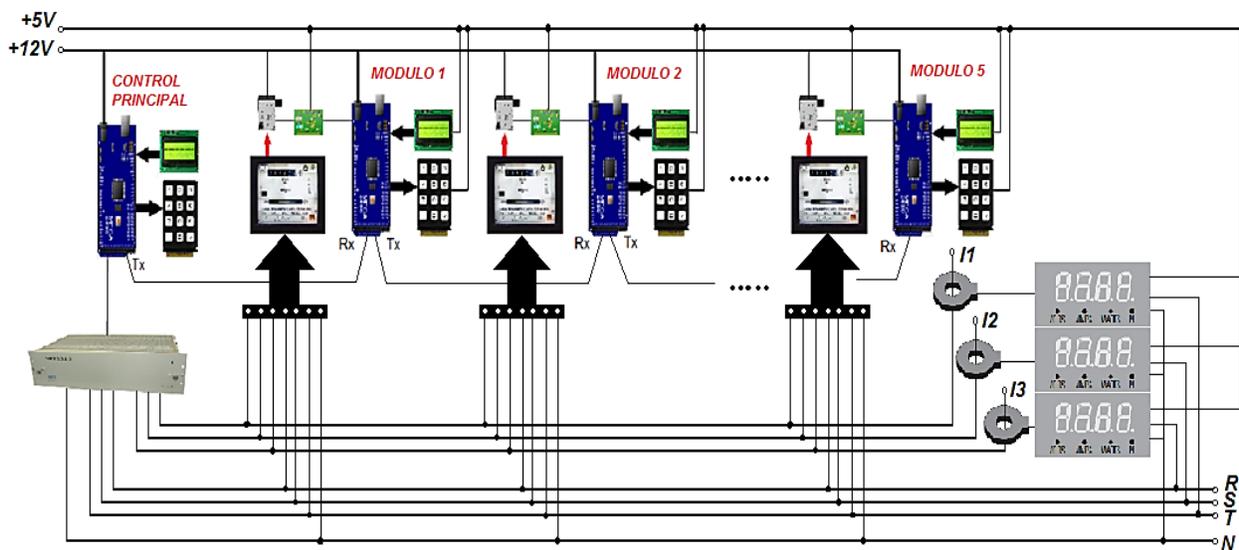


Figura 20. Diagrama de conexión general de la solución electrónica definitiva  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3.1 Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica

La cabeza lectora fotoeléctrica [13] genera impulsos eléctricos positivos (estado alto) de salida cuando su sensor atraviesa por la marca de los discos mecánicos en los medidores electromecánicos o cuando su sensor recibe una señal de luz o infrarroja del LED de los medidores electrónicos; en ausencia de estas dos condiciones la salida será la conexión a tierra (estado bajo) que tenga la cabeza lectora.

La duración de los impulsos positivos en el caso de los medidores electromecánicos es igual al tiempo durante el cual la marca del disco mecánico pasa por el sensor de la cabeza

lectora; en el caso de los medidores electrónicos la duración de los impulsos es de aproximadamente 1 ms y su detección se logra si el LED está encendido por más de 60  $\mu$ s. En términos prácticos, la duración de los impulsos tanto para los medidores electromecánicos como para los medidores electrónicos no será menor de 1 ms ya que el disco mecánico no alcanza una velocidad angular que haga que su marca atraviese el sensor en un tiempo menor a este. Considerando que la señal de salida se encuentra como mínimo 1 ms en estado alto y otro 1 ms en estado bajo, la frecuencia máxima de salida de la cabeza lectora es:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2 \text{ ms}} = 500 \text{ Hz} \quad \text{Frecuencia m\acute{a}xima}$$

Como se observa en la Figura 20, la cabeza lectora estar\u00e1 alimentada por una fuente de 12 V DC y, seg\u00fan su hoja de datos [13], para una entrada de este valor se obtendr\u00e1 una salida de 10,5 V DC en estado alto; en estado bajo la salida ser\u00e1 la de la conexi\u00f3n a tierra, es decir, 0 V. En cuanto a la corriente, la hoja de datos [13] especifica que var\u00eda entre 5 mA y 30 mA independientemente del tipo de medidor. La salida de la cabeza lectora debe ir conectada a la placa Arduino Mega 2560 la cual trabaja con voltajes TTL (de 0 a 0,7 V DC en estado l\u00f3gico bajo y de 3,2 a 5 V DC en estado l\u00f3gico alto), es por eso que se implementa el circuito acoplador de la se\u00f1al de salida de la cabeza lectora fotoel\u00e9ctrica que consta de las siguientes partes:

- Un divisor de tensi\u00f3n conformado por las resistencias R1 y R2 (ver Figuras 21 y 22) que se encarga de reducir el voltaje que llega desde la cabeza lectora.
- Un diodo Z\u00e9ner 1N4732, que seg\u00fan su hoja de datos [14] trabaja en la regi\u00f3n Z\u00e9ner con un voltaje constante de 4,7 V DC y una corriente m\u00e1xima de 53 mA, acompa\u00f1ado de una resistencia limitadora RZ (ver Figuras 21 y 22).
- Una resistencia limitadora R3 que se usa t\u00edpicamente para la conexi\u00f3n de circuitos externos a las placas Arduino (ver Figuras 21 y 22).

Las Figuras 21 y 22 muestran la simulación del circuito acoplador en donde la salida de la cabeza lectora es una señal de pulsos con estado bajo de 0 V DC, estado alto de 10,5 V DC, flancos de subida y bajada de 1  $\mu$ s, frecuencia de 1 Hz y ancho de pulso de 50%; la señal de Pulsos del Medidor en Ensayo (PME) varía de acuerdo a la señal de salida de la cabeza lectora y los resultados de la variación se observan en un voltímetro DC.

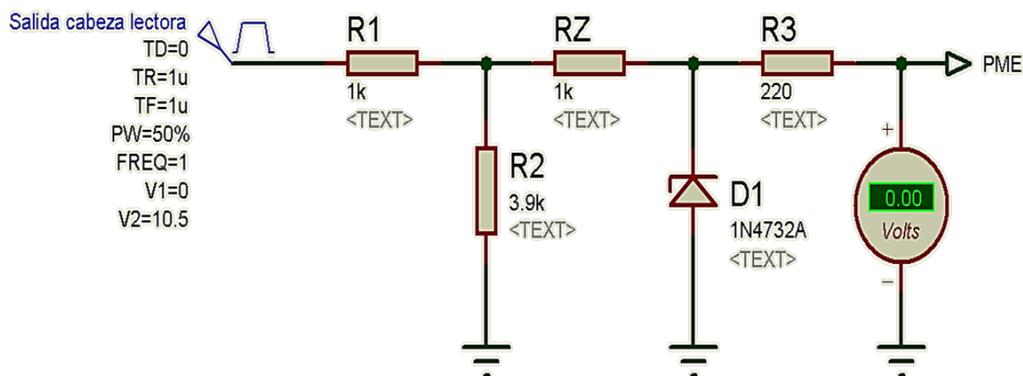


Figura 21. Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica con un estado lógico bajo en su salida

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21, la salida de la cabeza lectora es de 0 V DC por esta razón la salida PME es también 0 V DC, es decir, un estado lógico bajo.

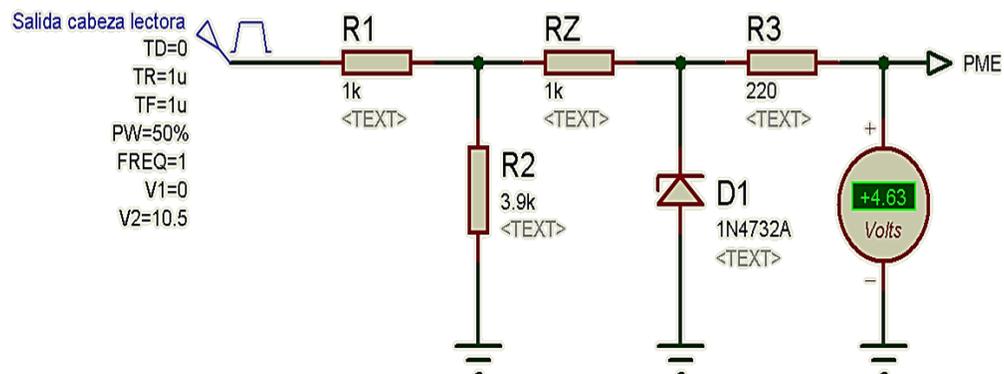


Figura 22. Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica con un estado lógico alto en su salida

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22, la salida de la cabeza lectora es de 10,5 V DC y la salida PME es de 4,63 V DC, es decir, un estado lógico alto.

### 5.3.2 Módulo de control para cada medidor en ensayo

El módulo de control para cada medidor en ensayo se observa en la Figura 23 y se encarga de realizar las operaciones de captura de los parámetros necesarios para realizar algún ensayo (a través del teclado); de la lectura de los pulsos provenientes de los circuitos acopladores de las señales de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica; del procesamiento de los datos el cual incluye el conteo de los pulsos y los cálculos necesarios para obtener los resultados de la prueba de exactitud (a través de la placa Arduino); y de la visualización de los procesos que se llevan a cabo así como de los resultados de los ensayos (a través de la pantalla LCD); cada módulo tiene un botón de reinicio que permite interrumpir cualquier proceso en cualquier momento.

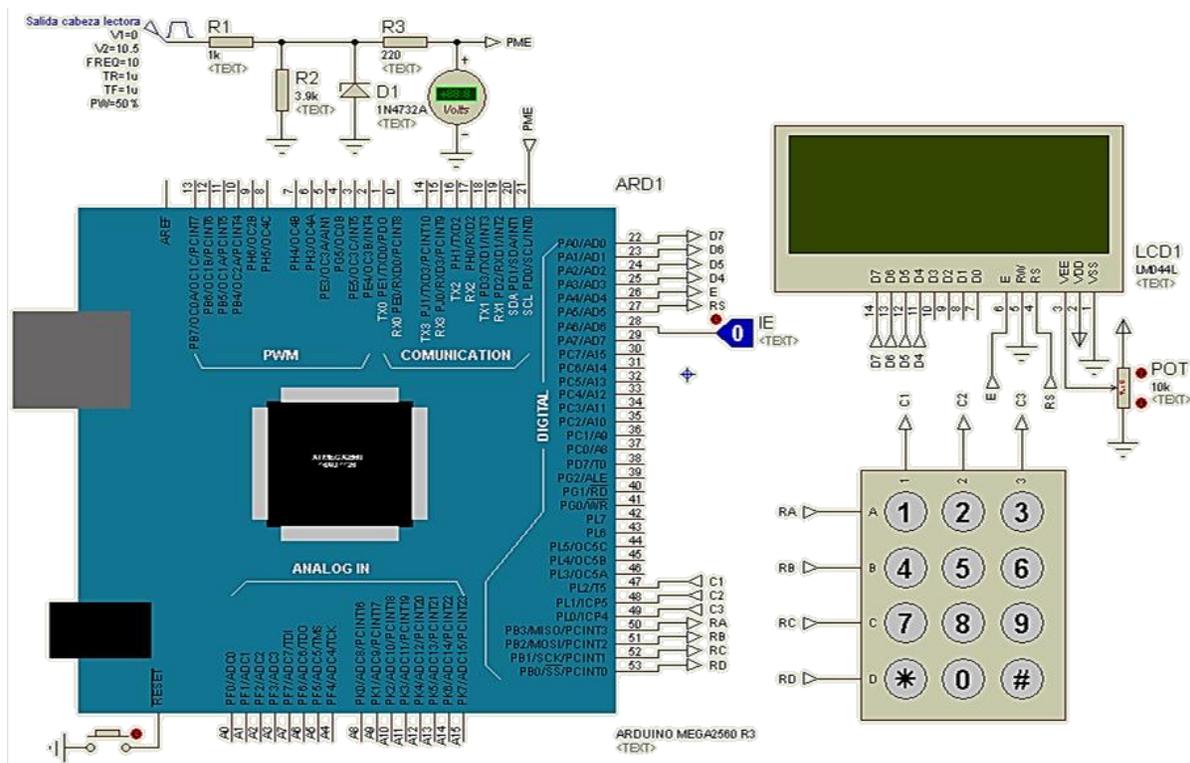


Figura 23. Diagrama de conexión del módulo de control para cada medidor en ensayo  
Fuente: Elaboración propia

Al encender o reiniciar la placa Arduino aparece un mensaje de bienvenida en la pantalla LCD, tal y como se observa en la Figura 24.

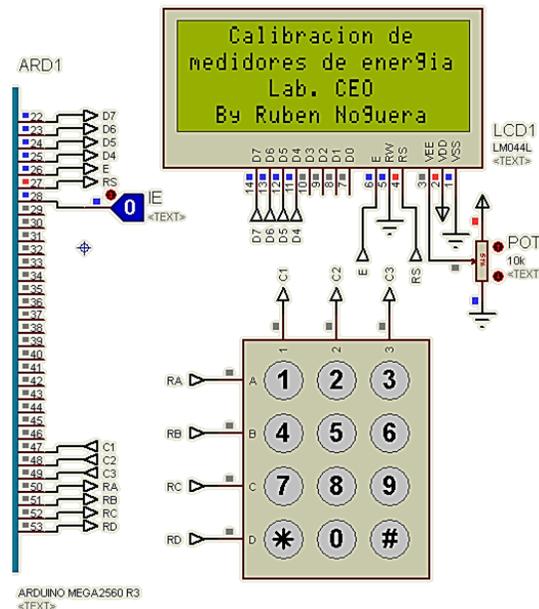


Figura 24. Interfaz de bienvenida del sistema  
Fuente: Elaboración propia

Automáticamente después del mensaje de bienvenida la pantalla LCD muestra un menú, tal y como se observa en la Figura 25.

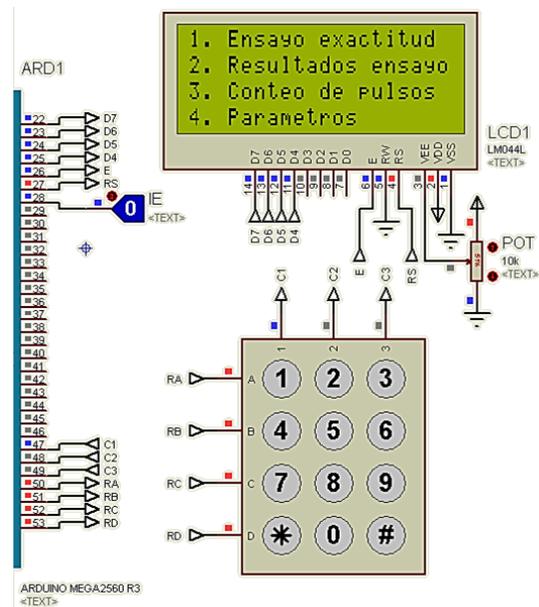


Figura 25. Interfaz de menú del sistema  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 4, el sistema permite cambiar los parámetros correspondientes a la constante del medidor en ensayo (en impulsos o revoluciones por KWh) y

el tiempo de duración del ensayo (en segundos) de acuerdo a los requerimientos del ensayo en particular que se desee realizar (ver Figura 26). Con la tecla \* se puede poner el punto decimal y con la tecla # se registran los valores digitados y se retorna al menú.

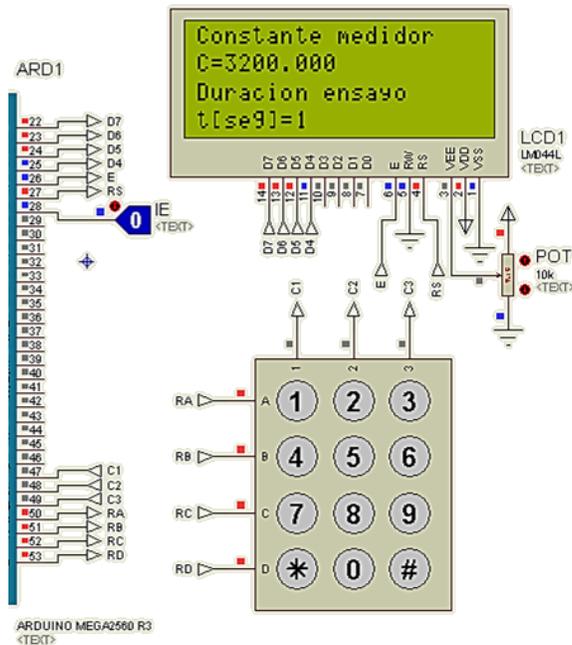


Figura 26. Interfaz para el cambio de parámetros de ensayo: Constante del medidor y tiempo de duración  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 3 y el estado lógico de la bandera de Inicio Ensayo (IE) pasa de bajo a alto, la placa Arduino comienza el conteo de los pulsos provenientes del circuito acoplador de la cabeza lectora fotoeléctrica durante el tiempo de prueba estipulado en el paso anterior (ver Figura 27). Con este conteo de pulsos se abarcan los procedimientos de ensayo de la NTC 4856 de: funcionamiento sin carga, arranque y verificación de la constante usando el método de dosificación de energía. Una vez terminado el ensayo se puede volver al menú principal presionando la tecla #.

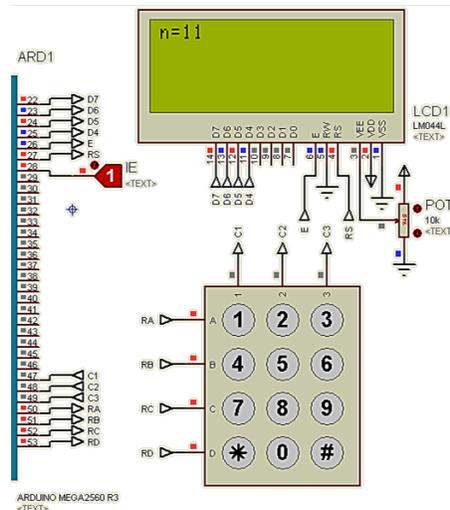


Figura 27. Interfaz que muestra el conteo de pulsos  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 1 y el estado lógico de la bandera de Inicio Ensayo (IE) pasa de bajo a alto, la placa Arduino comienza la prueba de exactitud a través del conteo de los pulsos provenientes del circuito acoplador de la cabeza lectora fotoeléctrica durante el tiempo de prueba estipulado en la opción “Parámetros” y reitera el conteo dos veces más para el mismo tiempo, lo que garantiza el mínimo de 3 observaciones que se deben realizar en la prueba de exactitud de acuerdo con los requerimientos (ver Figura 28). Una vez terminadas las reiteraciones se puede volver al menú presionando la tecla #.

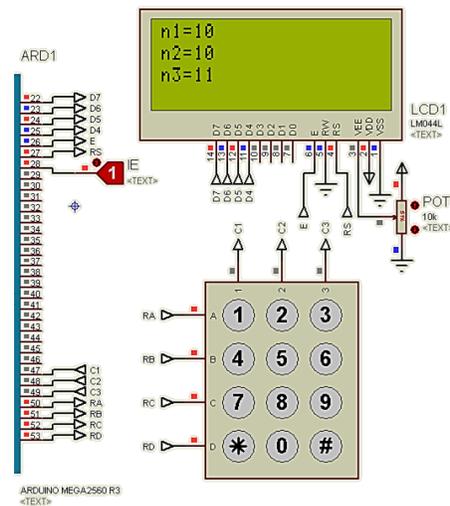


Figura 28. Interfaz que muestra el conteo de pulsos para el ensayo de exactitud  
Fuente: Elaboración propia

Siempre y cuando previamente se haya pasado por la opción 1, cuando se selecciona la opción número 2 (ver Figura 29) en la pantalla LCD se desplegarán los parámetros necesarios para aprobar o desaprobar un medidor en ensayo según la prueba de exactitud, los errores correspondientes a cada una de la mediciones realizadas en el paso anterior (E1, E2 y E3), el error promedio de dichas mediciones (E), la desviación estándar (s), y las incertidumbres estándar tipo A (uA), tipo b (uB) y combinada (uC). Para volver al menú se presiona la tecla #.

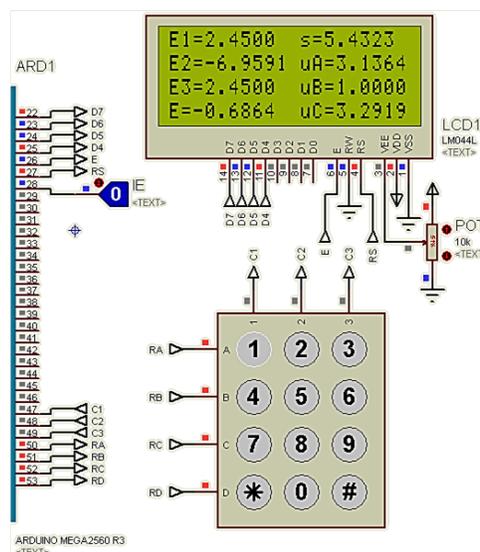


Figura 29. Interfaz que muestra los resultados de la prueba de exactitud  
Fuente: Elaboración propia

NOTA: La incertidumbre estándar tipo B es un valor que se cambia generalmente cada año, por lo que dejar una opción para cambiar este parámetro dentro del menú es poco práctico, la modificación de este parámetro se realizará directamente desde el código debido a la facilidad para cargar un nuevo código que ofrece la placa Arduino Mega 2560 que requiere simplemente de un puerto USB y software libre.

### 5.3.3 Señal de salida del medidor patrón

La señal de salida del medidor patrón es un tren de pulsos con estados altos y bajos de voltaje TTL y una corriente de hasta 60 mA. La frecuencia de salida ( $f_o$ ) depende de los rangos

de tensión y corriente internos de trabajo del medidor patrón (consignados en la Tabla 15) y tendrá un valor máximo de 60 KHz.

$$f_o = \frac{\Sigma P \times C \times \alpha \times \beta}{3600} \quad \text{Ecu. 37}$$

Dónde:

$\beta$ : Multiplicador debido al rango de tensión.

$\alpha$ : Multiplicador debido al rango de corriente.

C: Constante del medidor patrón en cualquiera de sus dos unidades.

$\Sigma P$ : Potencia calculada con los valores máximos de tensión y corriente de los rangos utilizados.

Tabla 15. Valor de los multiplicadores de tensión y corriente de acuerdo a los rangos internos de selección del medidor patrón CALPORT 300

Rangos de Tensión		Rangos de corriente		$\beta$	$\alpha$
Vmín	Vmáx	Imín	Imáx		
4 mV AC	40 mV AC	1 mA AC	40 mA AC	1.200	3.000
40 mV AC	5 V AC	40 mA AC	120 mA AC	96	1.000
5 V AC	60 V AC	120 mA AC	400 mA AC	8	300
60 V AC	120 V AC	400 mA AC	1,2 A AC	4	100
120 V AC	240 V AC	1,2 A AC	4 A AC	2	30
240 V AC	480 V AC	4 A AC	12 A AC	1	10
		12 A AC	40 A AC		3
		40 A AC	120 A AC		1

### 5.3.4 Módulo de control principal

El módulo de control principal se observa en la Figura 30 y se encarga de realizar las operaciones directamente relacionadas con el medidor patrón y de iniciar los ensayos enviando la bandera de Inicio de Ensayo (IE) a los medidores en ensayo; este módulo tiene un botón de reinicio que permite interrumpir cualquier proceso en cualquier momento.

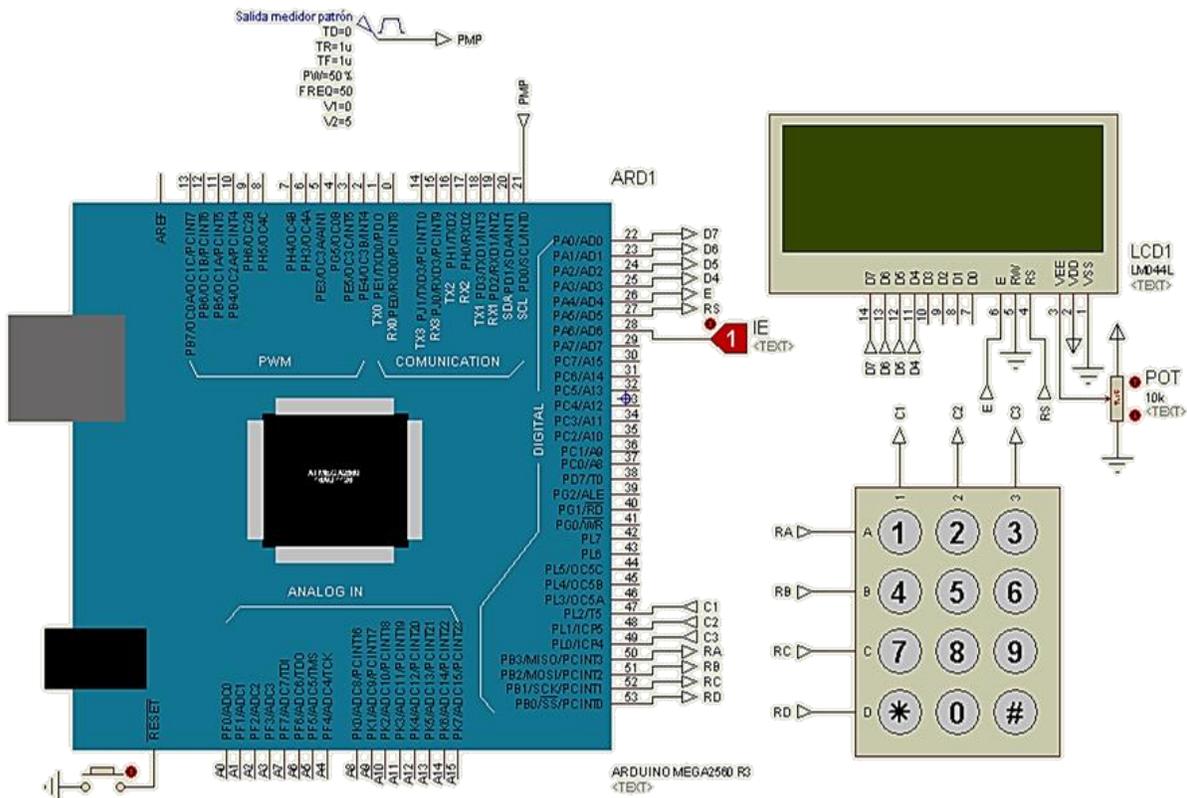


Figura 30. Diagrama de conexión del módulo de control principal  
Fuente: Elaboración propia

Al encender o reiniciar la placa Arduino aparece un mensaje de bienvenida en la pantalla LCD, tal y como se observa en la Figura 31.

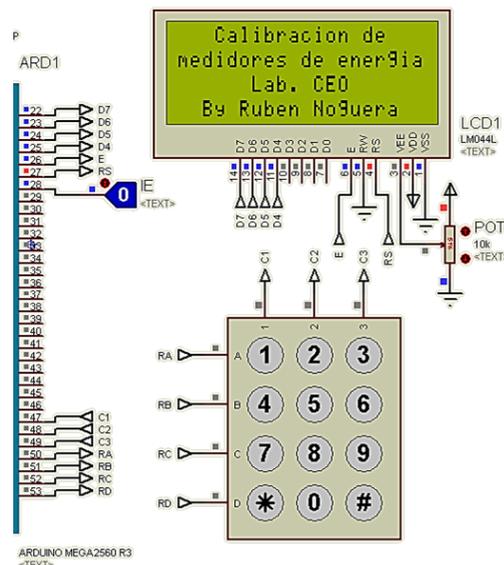


Figura 31. Interfaz de bienvenida del sistema  
Fuente: Elaboración propia

Automáticamente después del mensaje de bienvenida la pantalla LCD muestra un menú, tal y como se observa en la Figura 32.

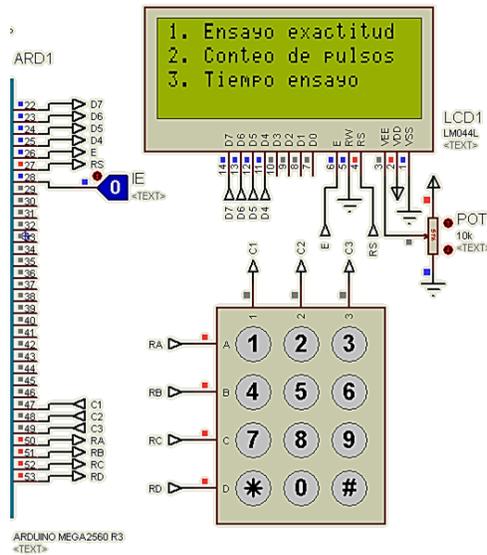


Figura 32. Interfaz de menú del sistema  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 3, el sistema permite cambiar el tiempo de duración (en segundos) del ensayo de exactitud (ver Figura 33). Con la tecla \* se puede poner el punto decimal y con la tecla # se registra el valor digitado y se retorna al menú.

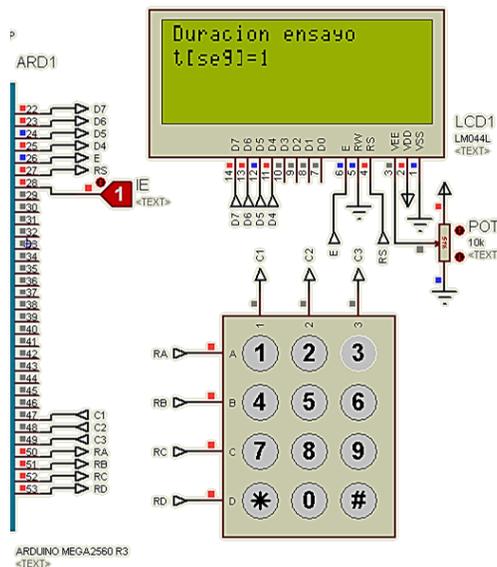


Figura 33. Interfaz para el cambio de parámetros de ensayo: Constante del medidor y tiempo de duración  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 1 se comienza el conteo de los pulsos provenientes del medidor patrón durante el tiempo de prueba estipulado durante el paso anterior y se reitera el conteo dos veces para el mismo tiempo con el fin de minimizar su error. Además se cambia el estado lógico de la bandera de Inicio Ensayo (IE) de bajo a alto para posteriormente enviar ese valor a los módulos de control para cada medidor en ensayo y así poder comenzar la prueba de exactitud en todos los medidores conectados a la mesa desde el modulo principal (ver Figura 34). Una vez terminadas las reiteraciones se puede volver al menú presionando la tecla #.

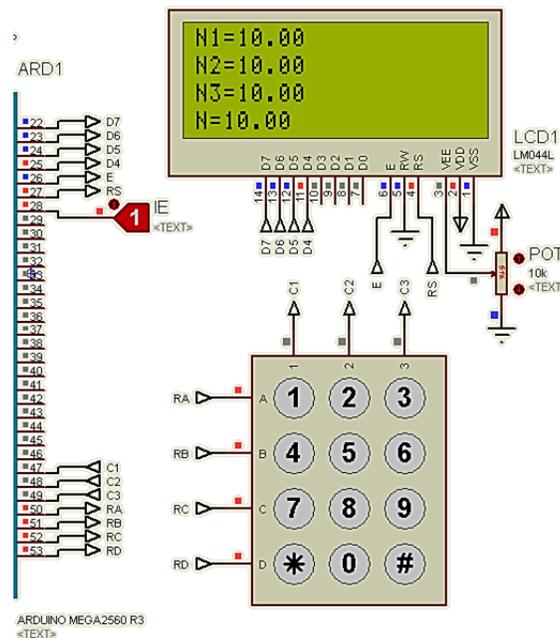


Figura 34. Interfaz que muestra el conteo de pulsos para el ensayo de exactitud  
Fuente: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción número 2 se cambia el estado lógico de la bandera de Inicio Ensayo (IE) de bajo a alto para posteriormente enviarlo a los módulos de control para cada medidor en ensayo y poder comenzar los ensayos de funcionamiento sin carga, arranque y verificación de la constante usando el método de dosificación de energía, en todos los medidores conectados a la mesa desde el módulo de control principal (ver Figura 35). Una vez terminado el ensayo se puede volver al menú principal presionando la tecla #.

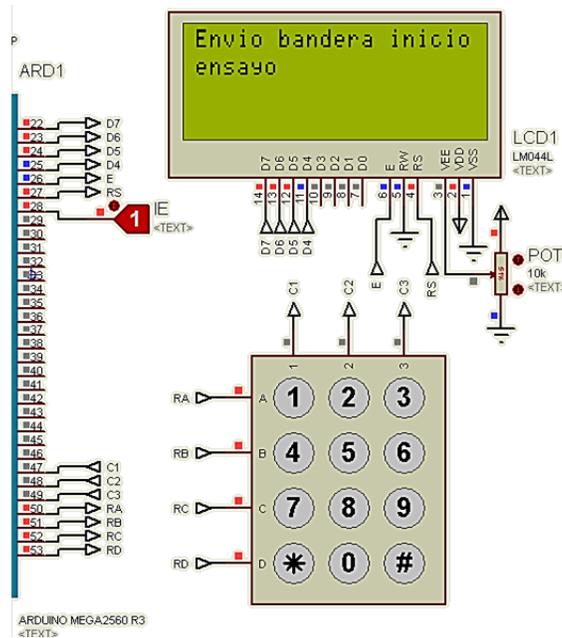


Figura 35. Interfaz que muestra el inicio de los ensayos vía módulo de control principal  
 Fuente: Elaboración propia

### 5.3.5 Módulo de interconexión serial

El módulo de interconexión serial es el encargado de que todas las placas Aduino se puedan comunicar, permitiendo que el módulo de control principal pueda enviar todos los datos necesarios para iniciar los ensayos, a los medidores en ensayo. Los datos que se enviarán son: La bandera de Inicio de Ensayo (IE), el tiempo de duración del ensayo para todos los ensayos y el número de impulsos promedio (N) del medidor patrón para los ensayos de exactitud. La secuencia de realización de los ensayos depende directamente de este módulo y su funcionamiento se describe a continuación:

Existen dos opciones para realizar un ensayo, la primera es programar y realizar el ensayo desde cada módulo individual para los medidores en ensayo, esta primera opción es válida para los ensayos de funcionamiento sin carga, arranque y verificación de la constante usando el método de dosificación de energía en las que no se necesita del medidor patrón y por ende no se necesitaría del módulo principal. La segunda opción es programar los ensayos desde el módulo

de control principal, la cual se divide en dos de acuerdo a los tipos de ensayo; primero, para los ensayos de funcionamiento sin carga, arranque y verificación de la constante usando el método de dosificación de energía primero se ingresa el tiempo de duración del ensayo en el módulo de control principal y luego se inicia el ensayo digitando la opción “Conteo de pulsos”, en ese momento el módulo de control principal envía la bandera Inicio de Ensayo (IE) a todos los medidores en ensayo conectados a la mesa por lo que los ensayos comenzarán para cada medidor y finalizarán arrojando los resultados en la pantalla LCD 20x4 asociada a cada medidor; segundo, para el ensayo de exactitud primero se ingresa el tiempo de duración del ensayo en el módulo de control principal y luego se inicia el ensayo digitando la opción “Ensayo exactitud”, en ese momento el módulo de control principal envía la bandera Inicio de Ensayo (IE) a todos los medidores en ensayo conectados a la mesa e inmediatamente después comienza el conteo de pulsos del medidor patrón mientras en los medidores bajo ensayo también se realiza el conteo, una vez terminado el conteo de pulsos del medidor patrón, se envía su resultado a cada medidor en ensayo para que pueda realizar los cálculos pertinentes y mostrar los resultados en la pantalla LCD 20x4.

En el módulo de interconexión todas las placas Arduino se comunican de forma serial como se observa en las Figuras 20, 36, 37 y 38. La Figura 36 muestra la conexión entre la placa Arduino del módulo principal (ARD PRINCIPAL) y la primera placa Arduino asociada a un medidor en ensayo (ARD 1) de la mesa a través de los puertos de comunicación TX0 y RX0.



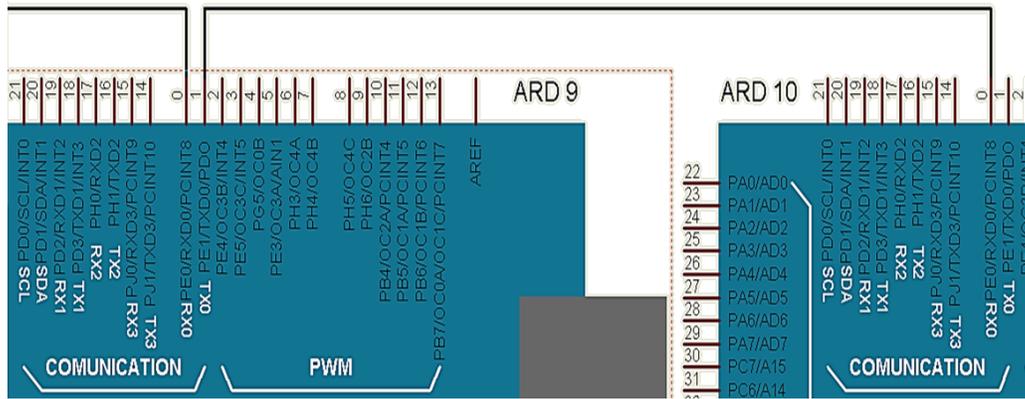


Figura 38. Diagrama de conexión serial entre la última y penúltima placa Arduino del módulo para cada medidor en ensayo  
Fuente: Elaboración propia

NOTA: Los diagramas circuitales que se muestran en esta sección y que permiten la explicación del funcionamiento de las partes que conforman la solución electrónica definitiva, se realizaron con la herramienta de simulación ISIS Proteus 7 Professional. Con ellos se validan los códigos piloto desarrollados para el módulo de control para cada medidor en ensayo y para el módulo de control principal que se encuentran registrados en el Anexo C y con los cuales se verifica, como se explica durante esta sección, que el diseño general de la solución cumple con los requerimientos del proyecto referentes a la NTC 4856.

## Capítulo 6. Solución mecánica

La herramienta elegida para modelar la solución mecánica es AutoCAD 2014, con esta herramienta se realizó un modelado 3D a partir del cual se obtuvo un modelado 2D completamente acotado y unas vistas 3D a blanco y negro. La solución se divide en dos partes, por un lado el soporte mecánico y por otro lado los cajones y cajas para la instalación del indicador digital, el módulo de control principal y el medidor patrón. El diseño 3D resultante se observa en la Figura 39.

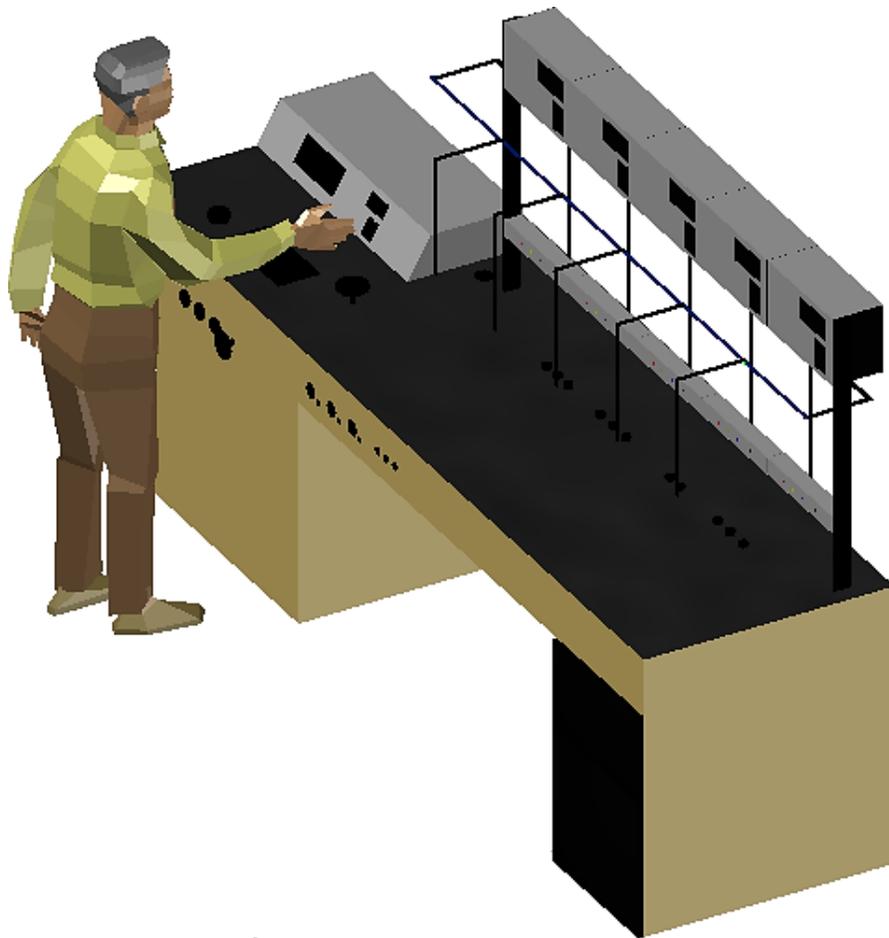


Figura 39. Vista 3D general del diseño mecánico  
Fuente: Elaboración propia

## 6.1 Soporte mecánico

La solución mecánica cuenta con un soporte mecánico fijo para el ensayo de cinco medidores de consumo eléctrico a la vez, este soporte se encuentra nivelado horizontal y verticalmente tal y como lo señalan las condiciones técnicas de referencia de la NTC 4856 (ver sección 3.2). El soporte mecánico (observado en la parte izquierda de la Figura 40) estaría separado del área de controles (observada en la parte derecha de la Figura 40), de esta forma se evita cualquier tipo de daño que podría ser ocasionado a los controles de la mesa por la manipulación (montaje y conexión) de los medidores de consumo eléctrico encima o cerca de estos.

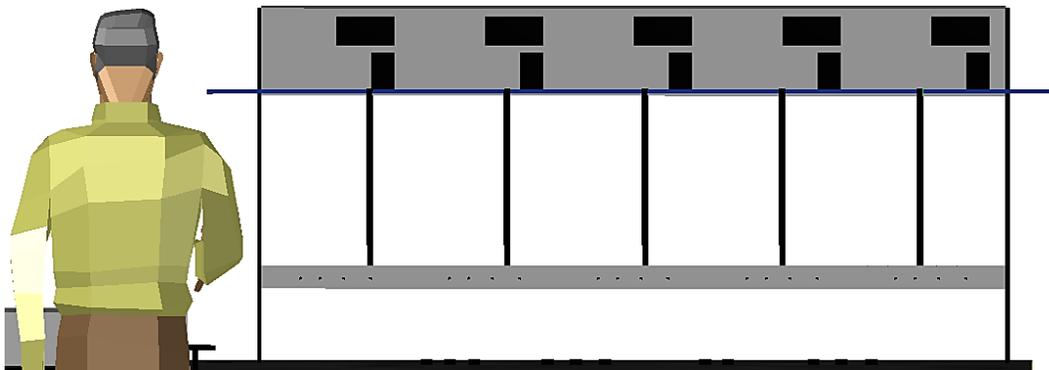


Figura 40. Soporte mecánico fijo para los medidores bajo ensayo  
Fuente: Elaboración propia

El soporte mecánico se divide en seis partes:

### *Soportes laterales.*

Los soportes laterales (ver Figura 41) llevarán el peso de los demás componentes del soporte mecánico y de los medidores bajo ensayo, por esta razón ellos deben tener un peso mínimo ( $F_{sop}$ ) que debe ser capaz de soportar, dicha fuerza se obtiene aplicando la segunda ley de Newton:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{sop} - F_{comp} - 5 \cdot F_{m\acute{a}x\_med} = 0$$

$$F_{sop} = F_{comp} + 5 \cdot F_{m\acute{a}x\_med}$$

$$F_{sop} = m_{comp} \cdot g + 5 \cdot m_{m\acute{a}x\_med} \cdot g \quad \text{Ecu. 38}$$

Dónde:

$F_{comp}$ : Peso total de los demás componentes que conforman el soporte mecánico, equivalente a la masa de los componentes ( $m_{comp}$ ) multiplicada por la aceleración gravitacional de la tierra.

$F_{m\acute{a}x\_med}$ : Máximo peso que puede llegar a tener un medidor bajo ensayo, equivalente a la masa del medidor bajo ensayo ( $m_{comp}$ ) multiplicada por la aceleración gravitacional de la tierra.

Considerando que el peso máximo de los medidores de consumo eléctrico que se encuentran en el laboratorio de calibración es 2,5 Kgf, se tiene que:

$$F_{sop} = m_{comp} \cdot g + 12,5 \text{ Kgf} \quad \text{Peso mínimo que debe soportar el soporte mecánico}$$

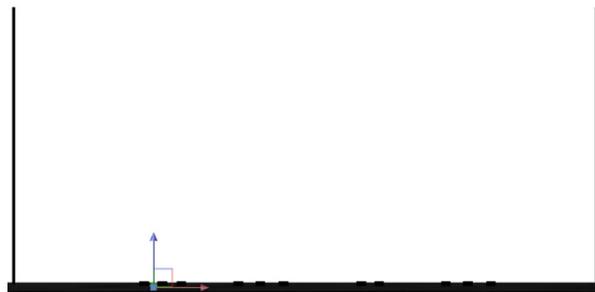


Figura 41. Soportes laterales  
Fuente: Elaboración propia

***Cajones para la circuitería de los módulos de control para cada medidor en ensayo.***

Los cajones para la circuitería de los módulos de control para cada medidor en ensayo se observan en la Figura 42, cada uno de estos cajones tendrá empotradas la pantalla LCD 20x4 en

el hueco superior de cada cajón (ver Figura 42) y el teclado matricial 4x3 el hueco inferior de cada cajón (ver Figura 42), ambos servirán de interfaz entre los operarios y el sistema; además cada cajón albergará internamente la placa Arduino, el circuito acoplador de señales y todo el cableado de funcionamiento e interconexión serial.



Figura 42. Cajones para la circuitería de los módulos de control para cada medidor en ensayo  
Fuente: Elaboración propia

### ***Soporte para las borneras de conexión de tensión.***

Las borneras de conexión de tensión (ver Figura 43) provienen de las fuentes de alimentación AC con las que cuenta la mesa, el espacio para cada medidor tendrá 3 borneras para las fases R, S y T (colores rojo, amarillo y azul) y una bornera para neutro (color negro). Cada bornera se conecta en paralelo en relación a las demás borneras del mismo color y con referencia al neutro. El cableado se realizará internamente por lo que el soporte para las borneras será hueco.



Figura 43. Soporte para las borneras de conexión de tensión  
Fuente: Elaboración propia

### ***Dispositivos rápidos de conexión de corriente.***

Los dispositivos rápidos de conexión de corriente (ver Figura 44) no se aprecian en el diseño CAD pero hacen parte del soporte mecánico, de ellos obtienen las líneas de alimentación de corriente para los medidores en ensayo, en la Figura 44 los cables con terminaciones rojas hacen referencia a la línea de alimentación I1, los cables con terminación amarilla hacen referencia a la línea de alimentación I2 y los cables con terminación azul hacen referencia a la

línea de alimentación I3, cada línea está conectada en serie con respecto a las demás líneas del mismo color de tal forma que se puede asegurar que todos los medidores bajo ensayo recibirán la misma corriente.



Figura 44. Dispositivos rápidos de conexión de corriente  
Fuente: Digitron Ltda.

### ***Soportes para los medidores de consumo eléctrico.***

Los soportes para los medidores de consumo eléctrico se observan en la Figura 45, cada soporte para un medidor de consumo eléctrico se podrá ajustar al tamaño del medidor que se desee ensayar, siempre y cuando sus dimensiones sean menores a 60 cm de alto, 32 cm de largo y 20 cm de ancho, esto garantiza que todos los medidores del laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA puedan ser ensayados en la mesa calibradora (los medidores de mayor tamaño no superan los 29 cm de alto, 22 de largo y 17 cm de ancho).

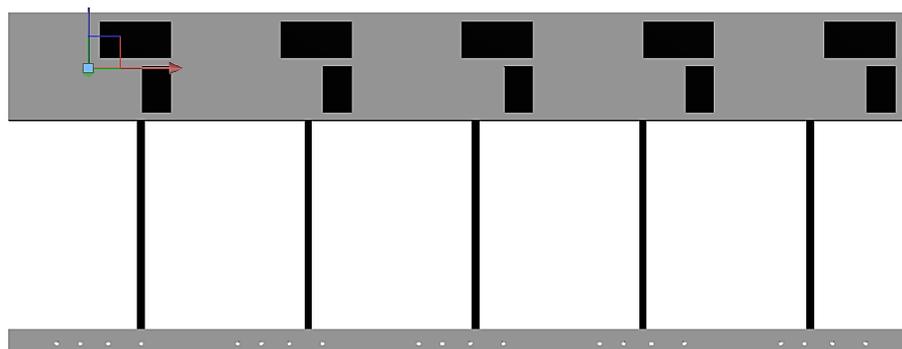


Figura 45. Soportes para los medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

### ***Soporte para los sensores fotoeléctricos.***

Los soportes para los sensores fotoeléctricos están conformados por una serie de rieles y palancas que permiten mover el sensor en cualquier dirección sobre los ejes coordenados  $x$ ,  $y$  y  $z$  (colores verde, rojo y azul observados en la esquina superior izquierda de la Figura 46), esto garantiza que el lector fotosensible del sensor pueda ubicarse de frente a la salida de impulsos o revoluciones de los medidores de consumo eléctrico.

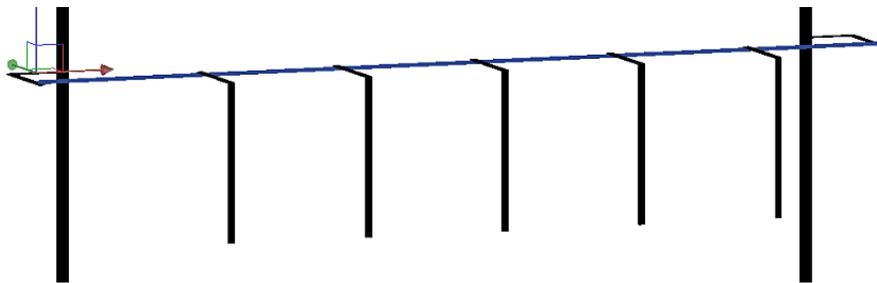


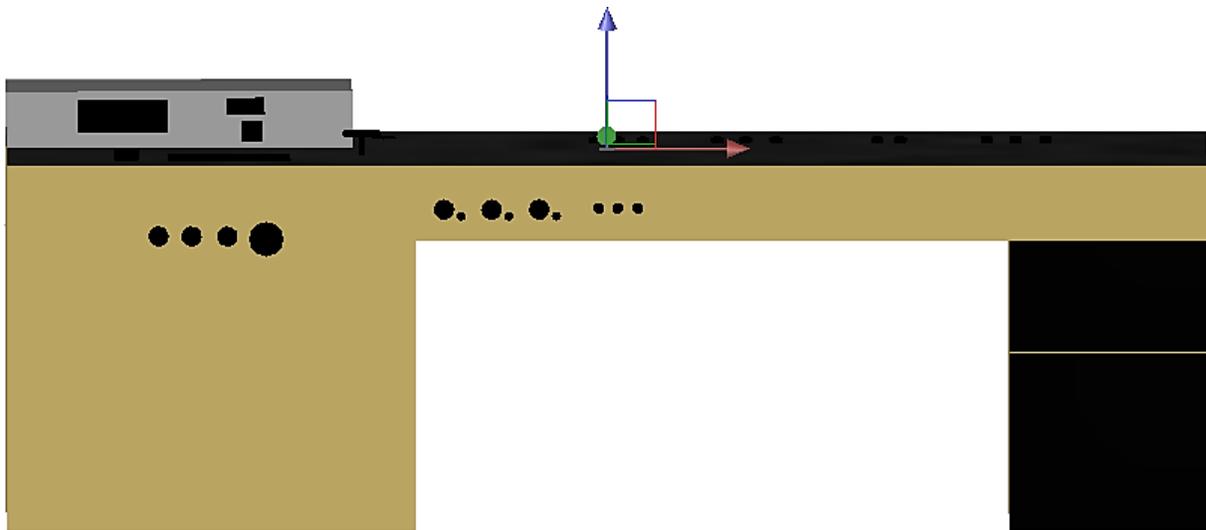
Figura 46. Soporte para los sensores fotoeléctricos  
Fuente: Elaboración propia

## **6.2 Los cajones para el medidor patrón, el indicador digital de parámetros eléctricos y el módulo de control principal**

El cajón para el módulo de control principal y el indicador digital de parámetros eléctricos se encontrará al fondo de la esquina superior izquierda de la mesa calibradora (ver Figura 47) y estará dividido en dos. Por un lado, a su derecha, se tendrá los huecos para la instalación de la pantalla LCD 20x4 y el teclado matricial 4x3 del módulo de control principal; por otro lado, a su izquierda, tendrá el hueco para empotrar el indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 de acuerdo a sus medidas y forma de instalación (ver sección A.6 de los Anexos). Internamente este cajón llevará los dispositivos necesarios para que el módulo de control principal funcione, es decir, la placa Arduino y todo el cableado de funcionamiento e interconexión serial, este cajón lleva además, los transformadores de corriente 16454 y el cableado de funcionamiento para el indicador digital de parámetros eléctricos. Las fuentes de

alimentación DC de 5 V ABL8MEM05040 y 12 V ABL8MEM12020 estarán ubicadas en este cajón y desde ahí se distribuirán hacia los cajones de los módulos de control para cada medidor en ensayo de tal forma que todos los dispositivos que las necesiten se pueden conectar a ellas.

La sección ubicada en la parte media e inferior izquierda de la mesa calibradora (ver Figura 47) estará dividida en dos cajones aislados, el cajón superior albergará al medidor patrón y el cajón inferior estará reservado para la futura implementación de los transformadores necesarios para poder realizar los ensayos con puente cerrado. La instalación del medidor patrón en un cajón aislado obedece al criterio de minimización de los errores e incertidumbres en la medición ocasionados por interferencias externas.

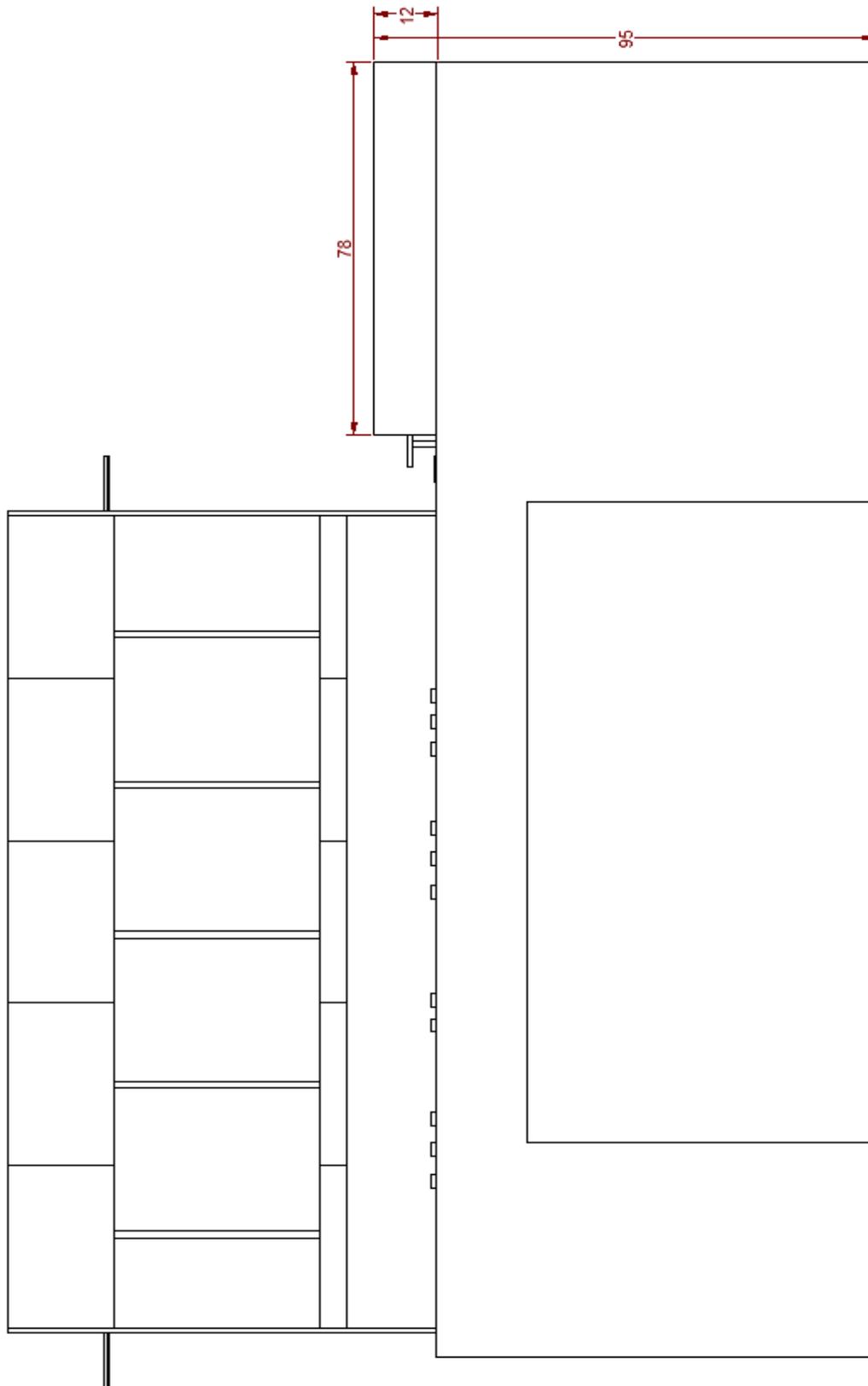


*Figura 47.* Vista frontal 3D de la base de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

### 6.3 Modelado 2D completamente acotado y vistas 3D a blanco y negro

El modelado 2D completamente acotado (ver Figuras 48 a 52) y las vistas 3D a blanco y negro (ver Figuras 53 y 54) que se presentarán a continuación constituyen la principal guía para la construcción e instalación de la solución mecánica.





*Figura 49.* Vista trasera de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

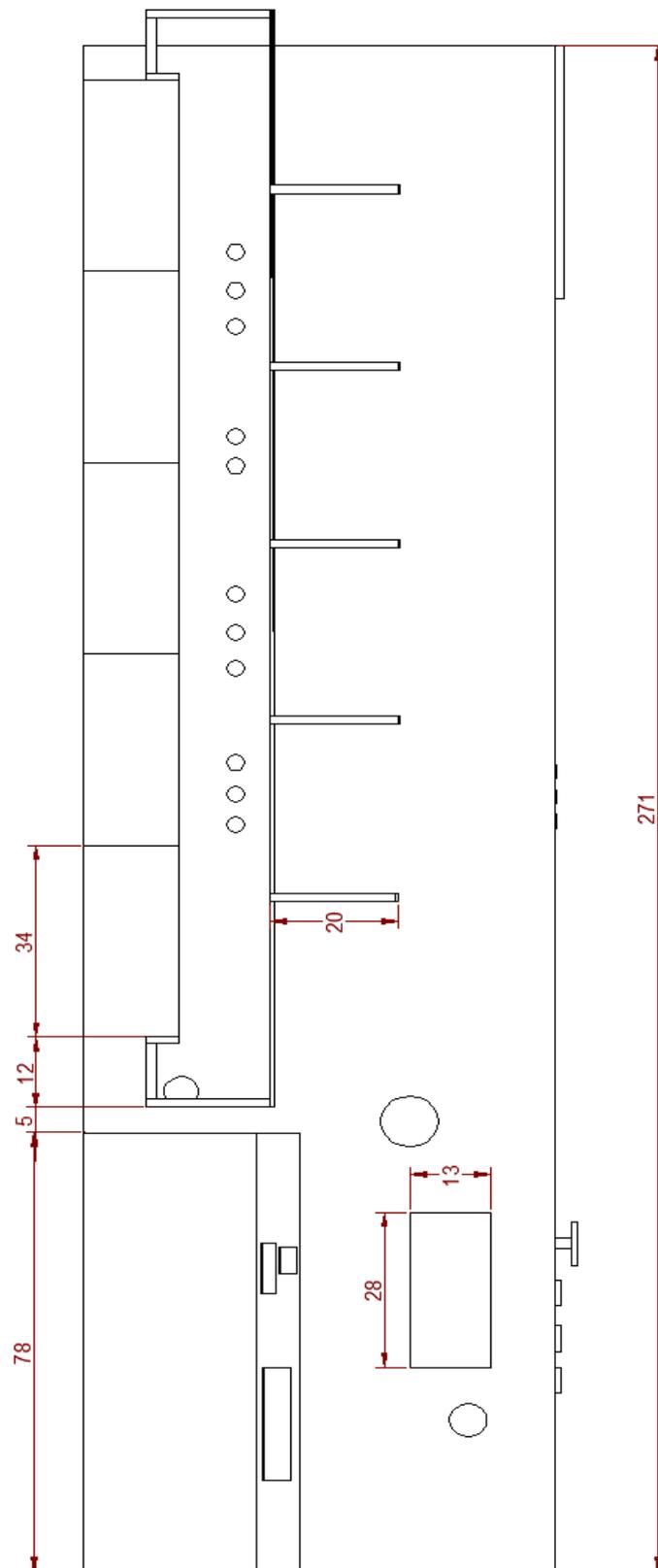


Figura 50. Vista superior de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
 Fuente: Elaboración propia

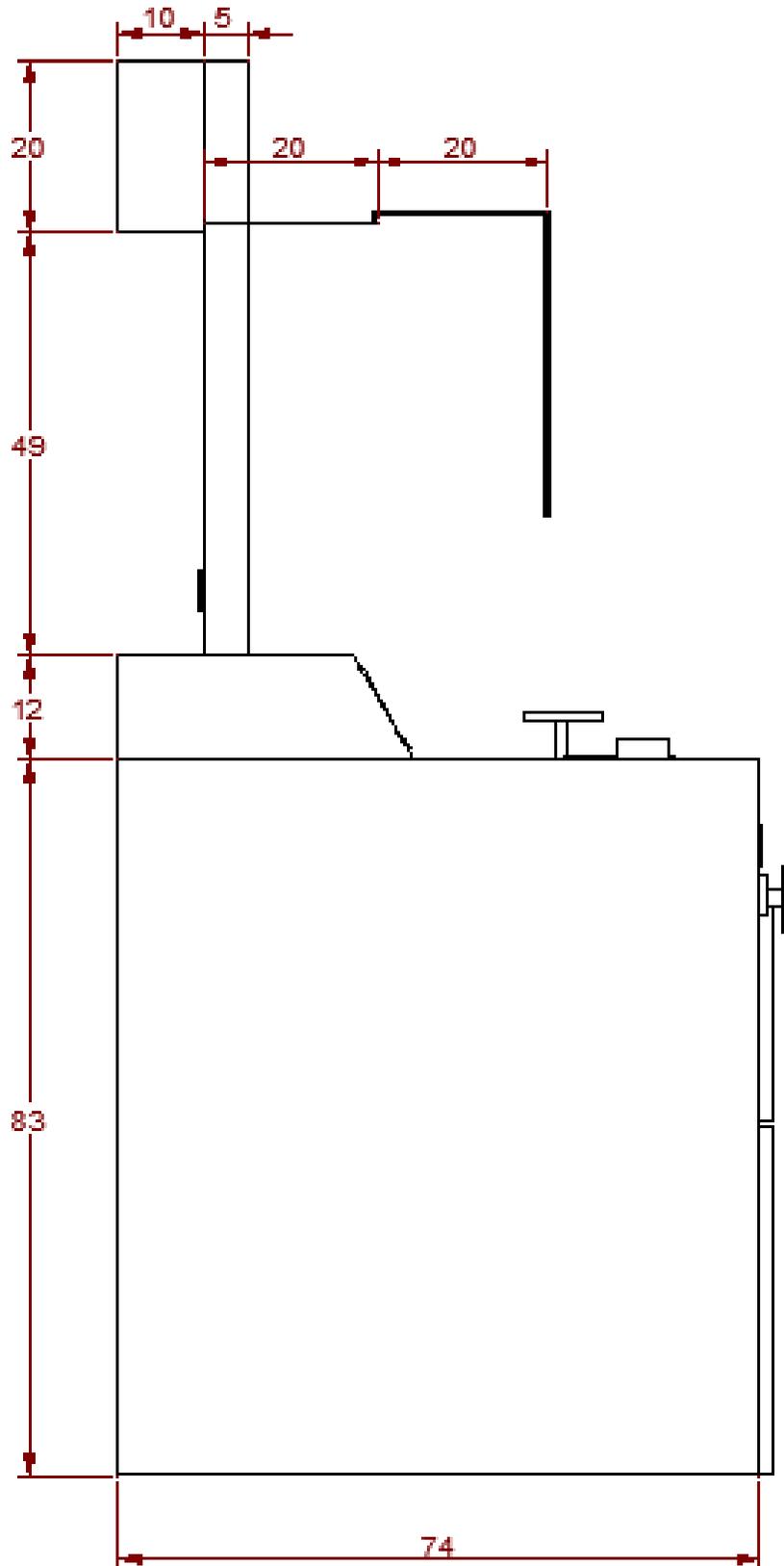


Figura 51. Vista lateral izquierda de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
 Fuente: Elaboración propia

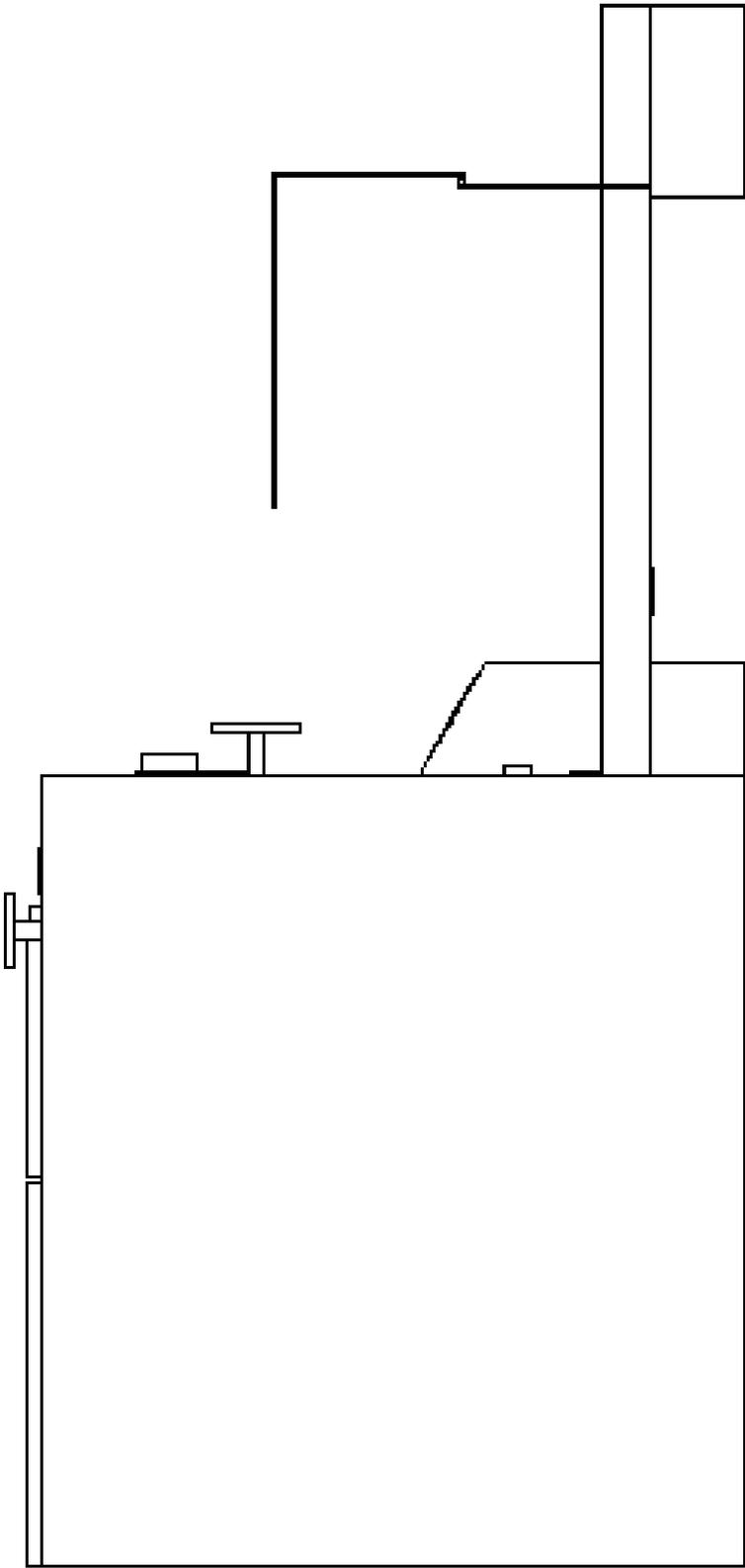


Figura 52. Vista lateral derecha de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

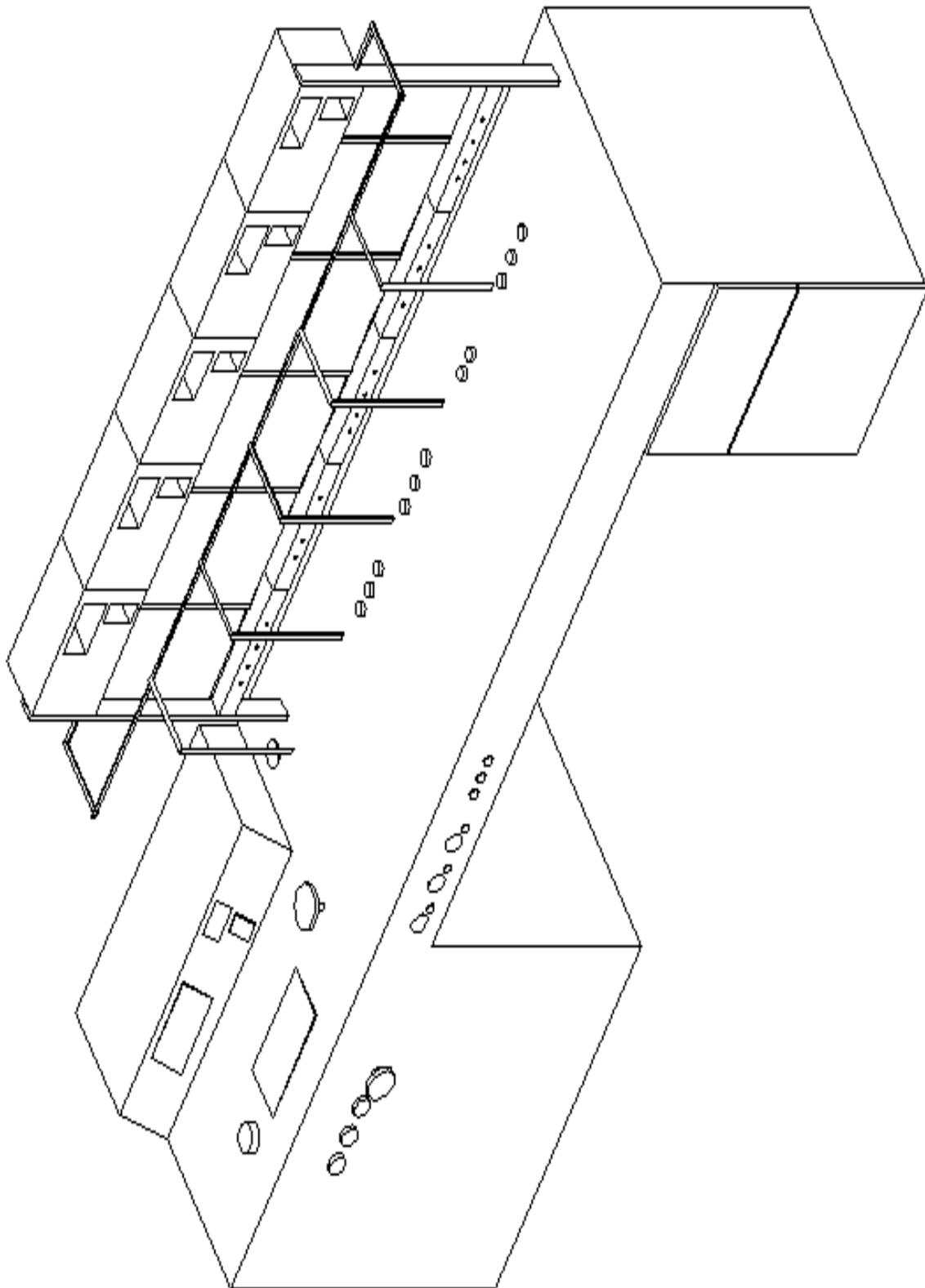


Figura 53. Primera vista 3D a blanco y negro de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

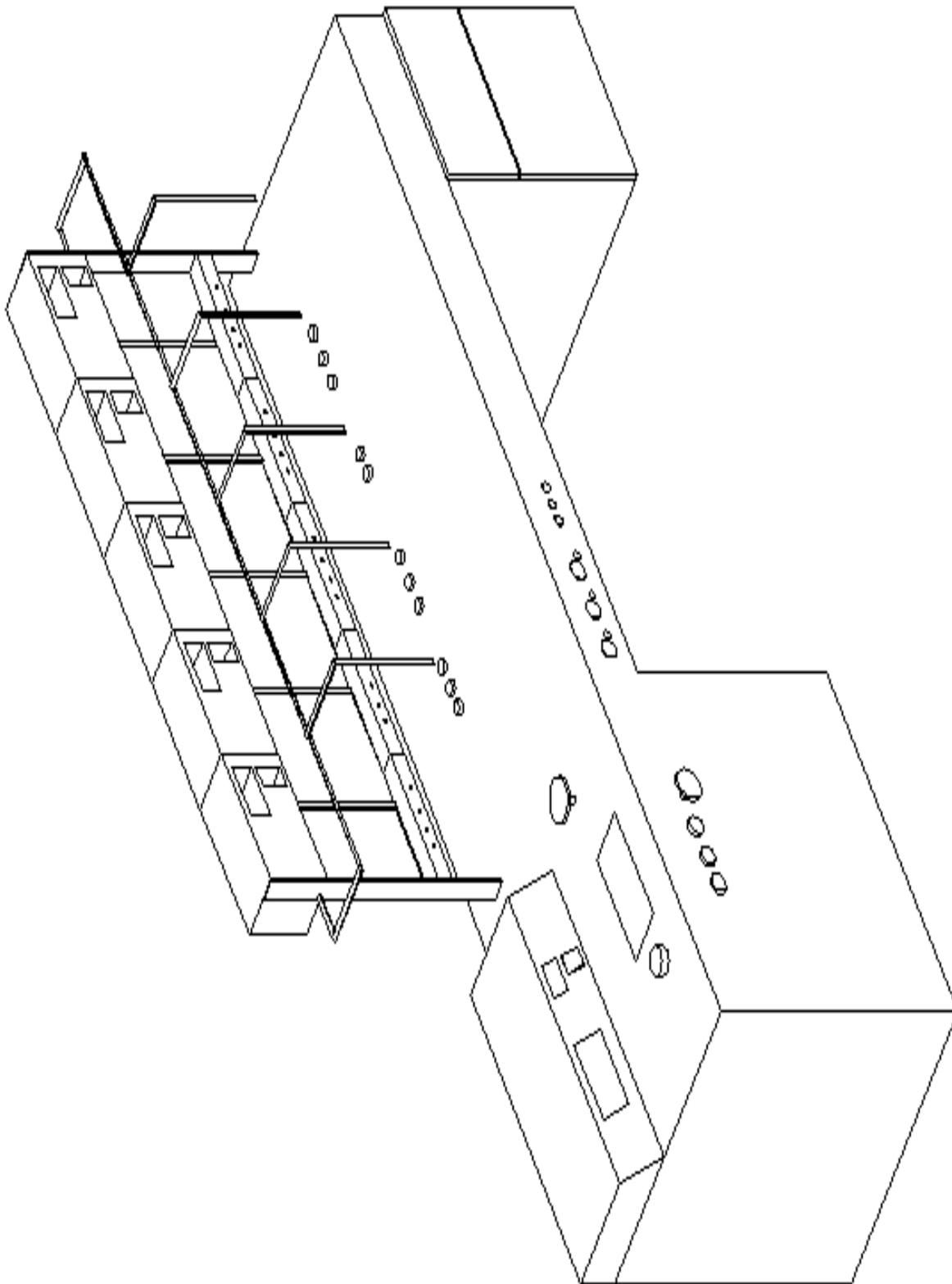


Figura 54. Segunda vista 3D a blanco y negro de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico  
Fuente: Elaboración propia

#### 6.4 Propuesta de costos y materiales para la solución mecánica

La propuesta de costos y materiales para la solución mecánica incluye los precios de la construcción del soporte mecánico en acero inoxidable, con excepción de los dispositivos de conexión rápida que se compran terminados, además, la propuesta incluye el precio de construcción de los cajones para el medidor patrón, el indicador digital de parámetros eléctricos y el módulo de control principal también en acero inoxidable, y por último, la instalación de todos los componentes que conforman la solución mecánica (ver Tabla 16).

Tabla 16. *Propuesta de costos y materiales para la solución mecánica*

Ítem	Cantidad	Precio unitario (pesos)	Precio total (pesos)
<b>Construcción del soporte mecánico</b>	-	-	4.750.000
<b>Dispositivo rápido de conexión de corriente</b>	5	275.300	1.376.500
<b>Construcción de los cajones para el medidor patrón, el indicador digital de parámetros eléctricos y el módulo de control principal</b>	-	-	1.125.000
<b>Instalación de todos los componentes</b>	-	-	1.900.000
<b>TOTAL</b>			<b>9.151.500</b>

## Conclusiones

A partir de los cálculos probabilísticos del error y la incertidumbre basados en las normas técnicas colombianas NTC 4856, GTC 51, GTC 115 se concluyó que el proceso de mayor influencia en el cálculo del error en los medidores bajo ensayo y una parte de las incertidumbres estándares combinada ( $u_C$ ) y expandida ( $U$ ), a través de la incertidumbre estándar tipo A ( $u_A$ ), es el conteo de pulsos del medidor patrón y de los medidores en ensayo. Por eso, aunque técnicamente es un procedimiento simple, es con base al objetivo de que dicho conteo sea lo más perfecto posible que se desarrollan los diseños electrónico y mecánico del presente proyecto.

En un principio se consideró que la solución electrónica para la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico abarcaría solo un diseño electrónico que permitiría calcular la diferencia de pulsos entre un medidor patrón y uno o varios medidores en ensayo, pero a partir del análisis de la Norma Técnica Colombiana NTC 4856 se concluyó que el diseño de la solución electrónica debía incluir como mínimo los cuatro procedimientos de ensayo que en ella se describen, el ensayo de funcionamiento sin carga, el ensayo de arranque, el ensayo de exactitud y el ensayo de verificación de la constante usando el método de dosificación de energía, además, los procedimientos que permiten que los medidores que se desean ensayar alcancen las condiciones de precalentamiento.

La condición inicial de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico, desarrollada durante el capítulo 4, revela que la mesa calibradora tiene todos los componentes de alimentación necesarios para hacer posible su repotenciación, y teniendo en cuenta que este es un

bien inmueble que se deprecia con el tiempo y del cual no se podrá obtener algún otro beneficio diferente al de poder realizar los procedimientos que permiten que los medidores que se desean ensayar alcancen las condiciones de precalentamiento, se justifica porqué el trabajo de grado se desarrolló en torno a una de las materias de mayor estudio e interés en el área de la ingeniería como lo es la reutilización y optimización de recursos.

El desarrollo de las soluciones electrónica y mecánica observados en este trabajo de grado permiten concluir que la propuesta técnica y financiera para la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico del laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA es completamente factible y de calidad, y que la gran ventaja de estas soluciones es el costo, esto debido a que la implementación del proyecto tendría un valor de aproximadamente 120 millones de pesos lo que representa un 10,9% del valor del ultimo sistema moderno de calibración adquirido por LA COMPAÑÍA el cual fue de aproximadamente 1.100 millones de pesos.

## Recomendaciones

Al comienzo del presente trabajo de grado no se planteó dentro del cronograma el desarrollo de códigos piloto para analizar la factibilidad y calidad de la solución electrónica que se plantearía, pero con el desarrollo del proyecto se hizo imposible continuar garantizando completa factibilidad y calidad sin el desarrollo de estos y sus respectivas validaciones a través de simulación, por lo que se recomienda la realización de códigos pilotos para el análisis de factibilidad y calidad en posibles ampliaciones del proyecto.

Existen características y requerimientos de la solución electrónica y la solución mecánica para la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico del laboratorio de calibración de LA COMPAÑÍA que están relacionadas entre sí, por lo que se recomienda desarrollar las soluciones electrónica y mecánica en paralelo.

Dado el caso en que se quiera implementar los diseños electrónicos y mecánicos desarrollados en este trabajo de grado, se recomienda utilizar una metodología en cascada realimentada tal y como se observa en la Figura 54, en donde las dos primera etapas ya fueron desarrolladas a lo largo de este trabajo pero quedan sujetas a modificaciones, si en las etapas posteriores se ve necesario realizarlas.

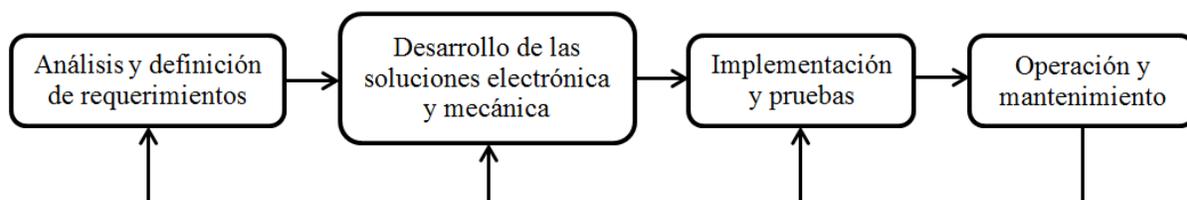


Figura 55. Metodología en cascada realimentada

Fuente: Elaboración propia

En el caso de llegar a una etapa de implementación y pruebas, los ensayos deberían realizarse con las placas de alimentación de los medidores con puente(s) cerrado(s) debido a que si se realizan con puente abierto el consumo de energía del laboratorio se incrementaría considerablemente y se correría el riesgo de dañar los dispositivos de la mesa por sobrecargas.

## Trabajos futuros

El primer trabajo futuro que se da como empalme lógico de este trabajo de grado, es la implementación del proyecto la cual incluiría, primero, una mejora a los códigos pilotos desarrollados para las placas Arduino de tal forma que se incluyan los puntos de ensayo del ensayo de exactitud (ver Tabla 6) y en la cual se guarden los resultados de los ensayos en alguna de las memorias de la placa; segundo, la compra e instalación de todos los dispositivos que conforman la solución electrónica definitiva y, por último, la adecuación mecánica de la mesa calibradora de acuerdo a la solución mecánica planteada.

El desarrollo de un módulo de control general, conformado por un computador conectado al módulo de control general o que directamente reemplace a ese modulo, y desde el cual se pueda configurar, iniciar, dar seguimiento y visualizar los resultados de los ensayos, se plantea también como un posible trabajo futuro que permitiría mejorar el diseño electrónico desarrollado en este trabajo de grado.

Por otro lado, si se desea profundizar en el campo del Software, el desarrollo de una aplicación de escritorio y opcionalmente una aplicación móvil y/o web que formarían parte del módulo de control general y en las que se haría énfasis en el desarrollo de una base de datos en la que se puedan registrar los resultados de los ensayos de acuerdo al número de identificación de los medidores ensayados que permita tener un registro computarizado al que se pueda acceder en cualquier momento para efectos de auditorías internas o externas.

## Referencias

- [1] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración," Bogotá, 2005.
- [2] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina. INTI. [En línea]. [http://www.inti.gov.ar/metrologia/pdf/energia\\_activa.pdf](http://www.inti.gov.ar/metrologia/pdf/energia_activa.pdf)
- [3] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Verificación inicial y posterior de medidores de energía eléctrica," ICONTEC, Bogotá, NTC 4856, 2013.
- [4] Centro Español de Metrología, "Vocabulario Internacional de Metrología (VIM). Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados," Madrid, 2012.
- [5] Centro Español de Metrología (CEM). Ministerio de industria, energía y turismo español. [En línea]. [http://www.cem.es/cem/metrologia/glosario\\_de\\_terminos?term\\_node\\_tid\\_depth\\_1=22](http://www.cem.es/cem/metrologia/glosario_de_terminos?term_node_tid_depth_1=22)
- [6] Meter Test Equipment (MTE). (2011, Abril) MTE - Meter Test Equipment. [En línea]. <http://www.mte.ch/data/files/Guideline%20Portables.pdf>
- [7] Juan Antonio Mendoza Rodríguez, *Modernización de mesa para calibración de medidores de energía electromecánicos y electrónicos*, Primera ed., Rafael Rivero N., Ed. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2004.
- [8] Centro Español de Metrología (CEM), "Procedimiento EL-005 para la calibración de medidores de energía eléctrica," Madrid, España,.
- [9] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "Guía sobre la incertidumbre en la medición para principiantes," Bogotá, 2004.
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones," Bogotá, 1997.
- [11] Superintendencia de Industria y Comercio. (2013, Oct.) Gobierno en línea. [En línea]. <http://www.sic.gov.co/drupal/sites/default/files/normatividad/Titulo%2520VI%2520Metrologia%2520.pdf>

- [12] C. Hurtado, C. Millán G. Ramírez, "Modelo de Negocios Para la Gestión del Sector del Turismo a Nivel de una Ciudad: Análisis Morfológico de Un Sistema Tecnológico de Trazabilidad Turística.," *Revista de ciencias economicas - Universidad Militar Nueva Granada*, 2013.
- [13] Meter Test Equipment (MTE). (2014, July) MTE - Meter Test Equipment. [En línea]. <http://www.mte.ch/data/files/SH%202003%20spanish.pdf>
- [14] Futurlec. Futurlec. [En línea]. <https://www.futurlec.com/Datasheet/Diodes/1N4728-4764.pdf>
- [15] Afinidad eléctrica. Afinidad eléctrica. [En línea]. <http://www.afinidadelectronica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=188>
- [16] Editores S.R.L. editores online. [En línea]. [http://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/22a\\_p106\\_1.jpg](http://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/22a_p106_1.jpg)
- [17] Metodos Cuantitativos. galeon.com. [En línea]. <http://metodoscuantitativo2.galeon.com/enlaces2218784.html>
- [18] Gobierno de Aragon, España. demo e-ducative catedu. [En línea]. [http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//3000/3089/html/341\\_contador\\_mofisico\\_de\\_energa\\_activa.html](http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//3000/3089/html/341_contador_mofisico_de_energa_activa.html)
- [19] Secretaría de Educación Pública, México. (2013) evaluacion nacional del logro academico en centros escolares. [En línea]. <http://201.175.44.203/ENLACE/Resultados2013/MediaSuperior2013Examenes/r13ExamenMediaSuperiorPreguntas.asp#ParteSuperior>
- [20] Meter Test Equipment (MTE). (2010, Feb.) MTE - Meter Test Equipment. [En línea]. [http://www.mte.ch/data/files/CALPORT\\_300\\_spanish.pdf](http://www.mte.ch/data/files/CALPORT_300_spanish.pdf)
- [21] Meter Test Equipment (MTE). (2010, Feb.) MTE - Meter Test Equipment. [En línea]. <http://www.mte.ch/data/files/SRS%20121.3%20spanish.pdf>
- [22] Meter Test Equipment (MTE). (2014, Feb.) MTE - Meter Test Equipment. [En línea]. <http://www.mte.ch/data/files/SRS%20400.3%20spanish.pdf>
- [23] SIGMA electrónica Ltda. SIGMA electrónica Ltda. [En línea].

- [http://www.sigmaelectronica.net/microchip-c-23\\_41.html?language=ES](http://www.sigmaelectronica.net/microchip-c-23_41.html?language=ES)
- [24] Arduino. Ardino Mega 2560. [En línea].  
[http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560\\_R3\\_Fronte.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560_R3_Fronte.jpg)
- [25] Dexter industries. Dexter industries. [En línea].  
[http://www.dexterindustries.com/site/?product=raspberry-pi-model-b-512mb-ram#prettyPhoto\[product-gallery\]/0/](http://www.dexterindustries.com/site/?product=raspberry-pi-model-b-512mb-ram#prettyPhoto[product-gallery]/0/)
- [26] Meter Test Equipment (MTE). (2014, July) MTE - Meter Test Equipment. [En línea].  
<http://www.mte.ch/data/files/SH%202003%20spanish.pdf>
- [27] REDZ smart communication. probefometers. [En línea].  
[http://probefometers.com/brochure/brochure\\_kmk113\\_en.pdf](http://probefometers.com/brochure/brochure_kmk113_en.pdf)
- [28] MyTrendyPhones.es. MyTrendyPhones.es. [En línea].  
<http://www.mytrendyphone.es/shop/cable-adaptador-usb-45675p.html>
- [29] Mercado libre. Mercado libre. [En línea]. [http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-412512771-display-lcd-de-20x4-caracteres-alfanumerica-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-412512771-display-lcd-de-20x4-caracteres-alfanumerica-_JM)
- [30] Mercado libre. Mercado libre. [En línea]. [http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-411962613-display-de-7-segmentos-036-pulgadas-4d-arduinios-pic-micro-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-411962613-display-de-7-segmentos-036-pulgadas-4d-arduinios-pic-micro-_JM)
- [31] Arduino. Arduino Forum. [En línea]. <http://forum.arduino.cc/index.php/topic,31613.0.html>
- [32] Murata Power Solutions. muRata Ps. [En línea]. <http://www.murata-ps.com/data/meters/acm20.pdf>
- [33] Futurlec. Futurlec. [En línea]. <https://www.futurlec.com/Datasheet/Diodes/1N4728-4764.pdf>
- [34] Schneider Electric. Schneider Electric. [En línea]. <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

## Anexo A. Dispositivos y equipos eléctricos y electrónicos

### A.1 Medidores patrón

*Sistema de ensayo de contadores de electricidad y transformadores CALPORT 300 marca MTE.*

El CALPORT 300 es un sistema de ensayo universal para todos los componentes de un sistema en instalaciones modernas de medidores de consumo eléctrico; el amplio rango de medida, la alta precisión y la baja sensibilidad a interferencias externas son algunas de sus características más notables.



Figura 56. Sistema de ensayo de contadores de electricidad y transformadores CALPORT 300 marca MTE  
Fuente: Meter Test Equipment (MTE). (02 de 2010). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de MTE - Meter Test Equipment: [http://www.mte.ch/data/files/CALPORT\\_300\\_spanish.pdf](http://www.mte.ch/data/files/CALPORT_300_spanish.pdf)

Características:

- Clase: 0,05.
- Patrón de referencia trifásico.

- Instrumento preciso de medida para valores AC, en el rango de frecuencia de 45 Hz a 66 Hz.
- Instrumento preciso de medida para valores AC y todos los tipos de conexión.
- Interfaz RS-232 C integrado para control externo vía PC.
- Medida de potencia activa, reactiva y aparente así como de sus respectivas energías.
- Rangos de tensión: 40 mV a 480 V.
- Rangos de intensidad de corriente: 1 mA a 120 A.
- Consumo de potencia: máx. 40 VA.
- Error en la medición de la potencia activa, reactiva y aparente:  $\leq \pm 0,05$  % del valor de medida para el rango de 40 mA a 120 A y para el valor final del rango de medida para el rango de 1 mA a 40 mA.
- Rango del visualizador: 6 dígitos por cada punto de medida.
- Rango de las constantes: 1 a 1.000.000 imp/KWh o imp/W.
- Salida de pulsos con niveles de voltaje TTL resistente a cortocircuito.
- Frecuencia de salida: Máximo 60 KHz
- Elaborado en caja de plástico duro.
- Dimensiones: 450 x 180 x 300 mm.
- Peso: aprox. 7 Kg.

Precio: 45.200 USD (90.026.600 pesos).

***Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 marca MTE.***

El SRS 121.3 es un patrón de referencia trifásico electrónico desarrollado para equipos de verificación estacionarios; el amplio rango de medida, la alta precisión y la baja sensibilidad a interferencias externas son algunas de sus características más notables.



Figura 57. Patrón trifásico de referencia electrónico 121.3 marca MTE

Fuente: Meter Test Equipment (MTE). (02 de 2010). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de MTE - Meter Test Equipment: <http://www.mte.ch/data/files/SRS%20121.3%20spanish.pdf>

#### Características:

- Clase: 0,05.
- Patrón de referencia trifásico.
- Instrumento preciso de medida para valores AC, en el rango de frecuencia de 45 Hz a 65 Hz.
- Disponibilidad de tensión, corriente y potencia de todas las 3 fases a través de la interfaz RS-232 C.
- Ensayo de contadores de 2, 3 y 4 hilos.
- Selector de modo de conexión integrado.
- Gran comodidad gracias a la utilización de la tecnología del microprocesador.
- Control del sistema operacional con alarma de error.
- Interfaz RS-232 C integrado para control externo vía PC.
- Rangos de tensión: 40 mV a 480 V.
- Rangos de intensidad de corriente: 1 mA a 120 A.
- Consumo de potencia: máx. 50 VA.
- Error en la medición de la potencia activa, reactiva y aparente:  $\leq \pm 0,05$  % del valor de medida para el rango de 7,5 mA a 120 A y para el valor final del rango de medida para el rango de 1 mA a 7,5 mA.
- Rango del visualizador: 6 dígitos por cada punto de medida.
- Rango de las constantes: 1 a 1.000.000 imp/KWh o imp/W.

- Salida de pulsos con niveles de voltaje TTL resistente a cortocircuito.
- Frecuencia de salida: Máximo 58,5 KHz
- Montaje en caja de 19", en módulo de 3 unidades de altura.
- Dimensiones: 508 x 178 x 300 mm.
- Peso: aprox. 7 Kg.

Precio: Alrededor de 180.000.000 pesos.

***Patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 marca MTE.***

El SRS 400.3 es un patrón de referencia trifásico electrónico desarrollado para equipos de verificación estacionarios; el amplio rango de medida, la alta precisión y la baja sensibilidad a interferencias externas son algunas de sus características más notables.



*Figura 58. Patrón trifásico de referencia electrónico 400.3 marca MTE*

Fuente: Meter Test Equipment (MTE). (02 de 2014). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de MTE - Meter Test Equipment: <http://www.mte.ch/data/files/SRS%20400.3%20spanish.pdf>

**Características:**

- Clase: 0,02.
- Patrón de referencia trifásico.
- Instrumento preciso de medida para valores AC, en el rango de frecuencia de 45 Hz a 70 Hz.
- Disponibilidad de tensión, corriente y potencia de todas las 3 fases a través de la interfaz RS-232 C.
- Ensayo de contadores de 2, 3 y 4 hilos.
- Selector de modo de conexión integrado.

- Gran comodidad gracias a la utilización de la tecnología del microprocesador.
- Control del sistema operacional con alarma de error.
- Interfaz RS-232 C integrado para control externo vía PC.
- Rangos de tensión: 5 V a 520 V.
- Rangos de intensidad de corriente: 1 mA a 120 A.
- Consumo de potencia: máx. 20 VA.
- Error en la medición de la potencia activa, reactiva y aparente:  $\leq \pm 0,02$  % del valor de medida para el rango de 40 mA a 120 A y para el valor final del rango de medida para el rango de 10 mA a 40 mA.
- Rango del visualizador: 6 dígitos por cada punto de medida.
- Salida de pulsos con niveles de voltaje TTL resistente a cortocircuito.
- Frecuencia de salida: Máximo 58,5 KHz
- Rango de las constantes: 1 a 1.000.000 imp/KWh o imp/W.
- Montaje en caja de 19", en módulo de 3 unidades de altura.
- Dimensiones: 483 x 133 x 342 mm.
- Peso: aprox. 6 Kg.

Precio: Alrededor de 180.000.000 pesos.

NOTA: Todos los medidores patrón estudiados en esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para los medidores patrón, es decir, sus entradas se pueden conectar a las fuentes de alimentación de tensión y corriente AC de la mesa calibradora porque están diseñados para ensayo de medidores de 2, 3 y 4 hilos y, además, sus salidas son un tren de pulsos TTL con una frecuencia máxima de entre 58,5 KHz y 60 KHz.

## A.2 Dispositivos centrales de procesamiento

### *Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP.*



Figura 59. Microcontrolador PIC16F877A de MICROCHIP

Fuente: SIGMA electrónica Ltda. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de SIGMA electrónica Ltda: [http://www.sigmaelectronica.net/microchip-c-23\\_41.html?language=ES](http://www.sigmaelectronica.net/microchip-c-23_41.html?language=ES)

#### Características:

- Memoria de programa: FLASH, 8 K de instrucciones de 14 bits C/U.
- Memoria de datos: 368 bytes RAM, 256 bytes EEPROM.
- Pila (Stack): 8 niveles (14 bits).
- Fuentes de interrupción: 13.
- Instrucciones: 35.
- Encapsulado: DIP de 40 pines.
- Frecuencia oscilador: Max 20 MHz.
- Temporizadores/Contadores: 1 de 8 bits (Timer 0); 1 de 16 bits (Timer 1); 1 de 8 bits (Timer 2) con pre y post escalador. Un perro guardián (WDT).
- Líneas de E/S: 6 del puerto A, 8 del puerto B, 8 del puerto C, 8 del puerto D y 3 del puerto E, además de 8 entradas analógicas.
- Dos módulos de Captura, Comparación y PWM:
  - Captura: 16 bits. Resolución máx. = 12.5 nseg.
  - Comparación: 16 bits. Resolución máx. = 200 nseg.
  - PWM: Resolución máx. = 10 bits.
- Convertidor Análogo/Digital de 10 bits multicanal (8 canales de entrada).
- Puerto serial síncrono (SSP) con bus SPI (modo maestro) y bus I<sup>2</sup>C (maestro/esclavo).
- USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) con

dirección de detección de 9 bits.

- Corriente máxima absorbida/suministrada (sink/source) por línea (pin): 25 mA.
- Oscilador: Soporta 4 configuraciones diferentes: XT, RC, HS, LP.
- Tecnología de Fabricación: CMOS.
- Voltaje de alimentación: 3,0 a 5,5 V DC.
- Puede operar en modo microprocesador.

Precio: 15.000 pesos.

### *Arduino Mega 2560.*

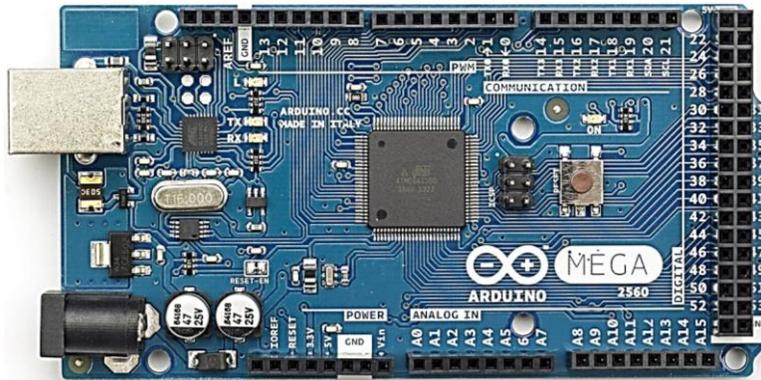


Figura 60. Arduino Mega 2560

Fuente: Arduino. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Arduino Mega 2560: [http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560\\_R3\\_Fronte.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoMega2560_R3_Fronte.jpg)

Características:

- Microcontrolador: Atmega2560.
- Puerto USB tipo B hembra estándar.
- Comunicación: UART, SPI, TWI y USB (Puerto COM virtual con reconocimiento automático en Linux).
- Voltaje de operación: 5V.
- Alimentación: Selección automática para alimentación a través de conexión USB o de una fuente externa usando un conector macho de 2.1 mm con centro positivo.

- Fuente externa: El voltaje de entrada recomendado es de entre 7-12 V aunque el voltaje de entrada límite es de entre 6-20 V (Un voltaje menor de 7 V ocasiona inestabilidad y uno mayor de 12 V ocasiona el sobrecalentamiento de la placa).
- Pines I/O digitales: 54 (15 para salida PWM).
- Pines de entrada analógicos: 16.
- Corriente DC por pin I/O: 40 mA.
- Corriente DC por pin de 3,3 V: 50 mA.
- Memoria flash de 256 KB de los cuales 8 KB son usados por el bootloader (Gestor de arranque).
- SRAM: 8 KB.
- EEPROM: 4 KB.
- Reloj: 16 MHz.

Precio: 57.000 pesos.

### ***Raspberry PI.***



Figura 61. Raspberry PI

Fuente: Dexter industries. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Dexter industries: [http://www.dexterindustries.com/site/?product=raspberry-pi-model-b-512mb-ram#prettyPhoto\[product-gallery\]/0/](http://www.dexterindustries.com/site/?product=raspberry-pi-model-b-512mb-ram#prettyPhoto[product-gallery]/0/)

### Especificaciones:

- Procesador: ARM 11 (32 bits – 700 Mhz).

- SDRAM: 512 MiB.
- GPU: Aceleración grafica 3D.
- Sistemas operativos de Linux:
  - Raspbian (basado en Debian Wheezy).
  - Android.
  - Debian Wheezy.
  - Arch Linux (Basado en Arc Linux AMD).
- Alimentación: 1,2 A – 5 V adaptador microUSB.

Conectores:

- Ethernet: Puerto RJ-45 10/100 BASE T.
- Salidas de video: mini HDMI y RCA.
- Salida de audio.
- Conector dual USB 2.0 tipo A.
- Conector GPIO (General Purpose Input/Output) de 26 pines:
  - 8 pines GPIO.
  - SPI.
  - I<sup>2</sup>C.
  - UART.
  - V<sub>DD</sub> Y GND.
- Conector CSI-2 (Camera Serial Interface v2) de 15 pines.
- JTAG: Puerto de testeo grupal de circuitos integrados (poco usado).
- Conector DSI (Display Serial Interface) de 15 pines: Conector de cable flexible con dos pines para datos y uno para reloj.
- Almacenamiento: Tarjeta SD.

Precio: 120.000 pesos.

NOTA: Todos los dispositivos de procesamiento central estudiados en esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para los

dispositivos de procesamiento central, es decir, tienen pines de IN/OUT digitales y/o conectores que permiten captar las señales de salida del circuito acoplador de señales y el medidor patrón, tienen procesadores capaces de realizar los cálculos de error e incertidumbre y, además, pueden conectarse a los dispositivos visualizadores.

### A.3 Sensores fotoeléctricos

#### *Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE.*

La cabeza lectora fotoeléctrica 2003 puede ser usada tanto con medidores electromecánicos como con medidores electrónicos y sirve tanto para mesas de calibración como para sistemas de calibración portátiles.

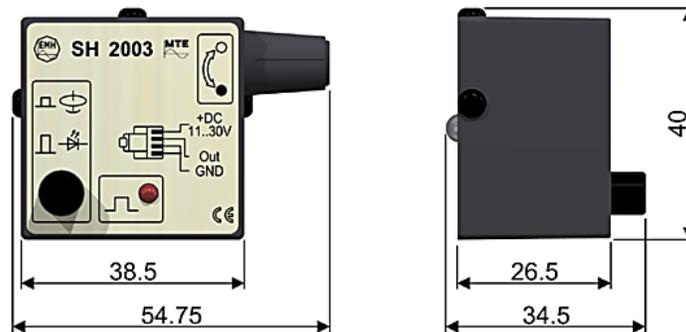


Figura 62. Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE

Fuente: Meter Test Equipment (MTE). (07 de 2014). Recuperado el 07 de septiembre de 2014, de MTE - Meter Test Equipment: <http://www.mte.ch/data/files/SH%202003%20spanish.pdf>

Para los medidores electromecánicos (Disco mecánico):

- Haz luminoso verde.
- Reconocimiento óptimo de los diferentes contrastes de marcas del disco, incluyendo rojo, negro y dentro de estas categorías de colores mate o brillo.
- Salida: Señal positiva alta desde el comienzo hasta el final de la marca del disco mecánico.

Para los medidores electrónicos (pulsos LED):

- Entrada:
  - Longitud de onda: 500 a 900 nm.
  - Longitud del impulso: > 60  $\mu$ s.
  - Con una señal de impulsos por LED con una relación 1:2, la frecuencia tiene que ser menor a 500 Hz.
- Salida: Impulso positivo de aproximadamente 1 ms al recibir un impulso de señal LED.

Generalidades:

- Alimentación: 11 – 30 V.
- Caja: Plástico duro.
- Peso: Aproximadamente 30 g.
- Consumo máx. de intensidad: < 30 mA (sin carga de salida en la lectura de las marcas del disco mecánico).
- Consumo máx. de intensidad: Aproximadamente 5 mA (sin carga de salida en la lectura de LED).
- Impedancia de salida Ra: Aproximadamente 470  $\Omega$  (en nivel alto y bajo).
- Tensión máx. de salida: 9.5 a 28.5 V (dependiendo de la tensión de alimentación).

Precio: 3.592.800

***Sonda KMK113 marca REDZ.***

La sonda óptica REDZ KMK113 está diseñada en concordancia con la norma IEC 62056-21 y es compatible con todas las marcas y tipos de medidores electrónicos basados en normas IEC. La sonda tiene una interfaz DB9 macho para la conexión RS232 y también cable enrollado por lo que se puede utilizar fácilmente con unidades portátiles y/o

dispositivos de colección de datos que tengan la interfaz adecuada.



Figura 63. Sonda KMK113 marca REDZ

Fuente: REDZ smart communication. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de probeformeters: [http://probeformeters.com/brochure/brochure\\_kmk113\\_en.pdf](http://probeformeters.com/brochure/brochure_kmk113_en.pdf)

Características:

- Norma: IEC 62056-21 (ex IEC 1107).
- Longitud del cable: 2 m en espiral.
- Velocidad de comunicación: Max 19200 baudios.
- Tensión de funcionamiento: 3,3 V. Puerto pasivo alimentado por señales Request To Send (RTS) y/o Data Terminal Ready (DTR).
- Interfaz eléctrica: RS232 DB9M.
- Longitud de onda: 900 ~nm.

Precio: 62,68 euros (167.550 pesos) para entre 5 y 19 unidades.

NOTA: Todos los sensores fotoeléctricos estudiados en esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para los sensores fotoeléctricos, es decir, tienen entradas que captan señales ópticas con longitudes de onda de entre 500 y 900 nm y salidas con estados lógicos digitales ya sea a través de un pin o a través de un puerto de comunicación serial.

## A.4 Visualizadores e interfaz de entrada

### *Visualizador LCD.*



*Figura 64.* Pantalla LCD 20x4 alfanumérica de 16 pines

Fuente: Mercado libre. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Mercado libre: <http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-412512771-display-lcd-de-20x4-caracteres-alfanumerica- JM>

Precio: 30.000 pesos.

### *Visualizador 7 segmentos.*



*Figura 65.* Visualizador 7 segmentos serial de 12 pines

Fuente: Mercado libre. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Mercado libre: <http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-411962613-display-de-7-segmentos-036-pulgadas-4d-arduinos-pic-micro- JM>

Precio: 3.000 pesos.

### *Teclado matricial 4x3.*



*Figura 66.* Teclado matricial 4x3 de 14 pines

Fuente: Arduino. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Arduino Forum: <http://forum.arduino.cc/index.php/topic,31613.0.html>

Precio: 18.000 pesos.

NOTA: Todos los visualizadores estudiados en esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para los visualizadores, es decir, son capaces de recibir las señales eléctricas, a través de sus pines de IN/OUT, y mostrar el mensaje que dichas señales llevan en forma de una señal óptica entendible para los usuarios del sistema. Por otro lado, la interfaz de entrada, representada por el teclado matricial, cumple también con las características descritas en la sección 5.1 para ella, es decir, permite convertir instrucciones mecánicas (se dan al presionar sus botones) en señales eléctricas.

## A.5 Fuentes de alimentación DC

*Fuentes de alimentación reguladas conmutadas ABL8MEM05040 y ABL8MEM12020 marca Schneider Electric.*



Figura 67. Aspecto de las fuentes de alimentación reguladas conmutadas ABL8MEM05040 y ABL8MEM12020 marca Schneider Electric

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

Características generales:

- Dimensiones del panel: 59 x 100 x 60 mm.

- Montaje en superficie con terminales de tornillo o carril DIN.
- Temperatura de operación:  $-25^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ .
- Peso: 195 gr.

Características eléctricas:

- Tensión de entrada: 100 – 240 V AC de 47 – 63 Hz fase a neutro o fase a fase.
- Tensión de salida:
  - Para la fuente ABL8MEM05040: 4,75 – 5,25 V DC.
  - Para la fuente ABL8MEM12020: 11,4 – 15 V DC.
- Corriente de salida:
  - Para la fuente ABL8MEM05040: 4 A DC.
  - Para la fuente ABL8MEM12020: 2,1 A DC.
- Potencia nominal:
  - Para la fuente ABL8MEM05040: 20 W.
  - Para la fuente ABL8MEM12020: 25 W.
- Protección con fusible interno y contra corto circuitos externos.

Precio: 326.550 pesos.

NOTA: Las fuentes de alimentación DC de esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para las fuentes de alimentación DC, es decir, su entrada deben ser fuentes de alimentación AC dentro de los rangos que maneja el sistema de alimentación de la mesa calibradora y sus salidas son señales DC reguladas de 5 V y 12 V.

## A.6 Indicadores digitales de parámetros eléctricos

### *Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata.*



Figura 68. Indicador digital multifuncional acm20-4-ac1-r-c marca Murata

Fuente: Murata Power Solutions. (s.f.). Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de muRata Ps: <http://www.murata-ps.com/data/meters/acm20.pdf>

#### Características generales:

- Pantalla LED con 4 caracteres rojos.
- Resolución: 0,01.
- Dimensión de los caracteres: 0.360" (9.14 mm).
- Dimensiones del panel: 36.22 x 22.10 mm.
- Montaje en superficie con terminales de tornillo.
- Transformador de corriente integrado.
- Temperatura de operación: 0°C ~ 60°C.
- Peso: 43,09 gr.

#### Características eléctricas:

- Medición de tensión y corriente:
  - Medición: Valores rms de señales AC.
  - Rango de tensión: 85 – 264 V AC.
  - Rango de corriente: 0 – 100 A AC.
  - Frecuencia: 47 – 63 Hz.
  - Precisión:  $\pm 1$  %.

- Medición de potencia:
  - Rango: 0 – 26,4 KW.
  - Precisión:  $\pm 2$  %.
- Medición del factor de potencia:
  - Precisión:  $\pm 3$  %.

Precio: 65 USD (121.000 pesos).

***Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric.***



*Figura 69.* Indicador digital multifuncional PowerLogic PM1200 marca Schneider Electric  
 Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

Características generales:

- Pantalla LED con 4 caracteres rojos por fila más signo con escalado automático para valores Kilo, Mega y Giga.
- Resolución: 0,001.
- Velocidad de actualización de datos: 1 s.
- Dimensiones: 96 x 96 x 83 mm.
- Montaje en superficie con terminales de tornillo.
- Temperatura de operación:  $-10^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ .
- Altura: 2.000 m.

- Peso: 500 gr.
- Alimentación: 44 – 277 V CA a 50 Hz/60 Hz.

Características eléctricas:

- Medición de tensión y corriente:
  - Medición: Valores rms de señales AC.
  - Rango de tensión: 80 – 480 V AC fase a neutro y fase a fase.
  - Rango de corriente: 50 mA – 6 A AC (el valor de inicio es de 5 mA) fase a neutro.
  - Rango de tensión con transformador primario de tensión: 100 V – 999 kV AC.
  - Rango de corriente con transformador primario de corriente: 1 A – 99 kA AC fase a neutro.
  - Frecuencia: 45 – 65 Hz.
  - Precisión:  $\pm 1$  %.
- Medición de Potencia:
  - Potencia promedio y por fase.
  - Precisión para potencia activa:  $\pm 1$  %.
  - Precisión para potencia reactiva:  $\pm 2$  %.
  - Precisión para potencia aparente:  $\pm 1$  %.
- Medición de Energía:
  - Energía total.
  - Precisión para energía activa: IEC 62053-21 Clase 1.
  - Precisión para energía reactiva: IEC 62053-23 Clase 2.
  - Precisión para energía aparente:  $\pm 1$  %.
- Medición del factor de potencia:
  - Factor de potencia promedio y por fase.
  - Precisión:  $\pm 1$  %.
- Medición de frecuencia:

- Frecuencia promedio y por fase.
- Precisión:  $\pm 0,1$  %.
- Desequilibrio de corriente y tensión.
- Ángulo de fase entre V y I, fase 1, fase 2, fase 3.

Comunicación:

- Puerto RS-485.
- Protocolo Modbus RTU.
- Velocidad de hasta 19200 baudios.

Precio: 1.050.000 pesos.

***Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric.***



*Figura 70.* Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

Características generales:

- Gran pantalla LCD con retroiluminación, hasta 5 valores por fila y escalado automático para valores Kilo y Mega.
- Resolución: 0,001.
- Velocidad de actualización de datos: 1 s.
- Dimensiones: 96 x 96 x 69 mm.

- Dimensiones de la pantalla: 73 x 69 mm.
- Montaje en superficie con terminales de tornillo.
- Temperatura de operación:  $-5^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ .
- Altura: 3.000 m.
- Peso: 370 gr.
- Alimentación: De 100 a  $415 \pm 10\%$  V AC, 5 VA; de 50 a 60 Hz.

#### Características eléctricas:

- Medición de tensión y corriente:
  - Medición: Valores rms de señales AC.
  - Rango de tensión: 10 – 277 V AC fase a neutro y 10 – 480 V AC fase a fase.
  - Rango de corriente: 10 mA – 6 A AC fase a neutro.
  - Rango de tensión con transformador primario de tensión 0 – 1,6 MV AC.
  - Rango de corriente con transformador primario de corriente: 1 – 32.737 A AC fase a neutro.
  - Frecuencia: 45 – 65 Hz.
  - Precisión:  $\pm 0,5\%$ .
- Medición de Potencia:
  - Potencia promedio y por fase.
  - Precisión para potencia activa:  $\pm 1\%$ .
  - Precisión para potencia reactiva:  $\pm 1\%$ .
  - Precisión para potencia aparente:  $\pm 1\%$ .
- Medición de Energía:
  - Energía total.
  - Precisión para energía activa: IEC 62053-21 Clase 1.
  - Precisión para energía reactiva: IEC 62053-23 Clase 2.
- Medición del factor de potencia:
  - Factor de potencia promedio y por fase.

- Precisión:  $\pm 0,0031$  de 1 a 6 A y de -0,5 a +0,5 FP.
- Medición de frecuencia:
  - Frecuencia promedio y por fase.
  - Precisión:  $\pm 0,02$  Hz de 45 a 65 Hz.
- Distorsión armónica total.
- Demanda de intensidad y potencias activa reactiva y aparente.

Comunicación:

- Puerto RS-485
- Protocolo Modbus RTU.
- Velocidad de hasta 19200 baudios.
- Paridad: Par, impar o ninguna.
- 1 bit de parada.

Precio: 1.575.000 pesos.

***Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric.***



*Figura 71.* Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

Los indicadores digitales necesitan de transformadores de corriente para realizar mediciones de corriente superiores a las corrientes nominales de trabajo que generalmente varían de 0 a 5 A AC, algunos indicadores lo tiene integrado pero otros no, por lo que es

necesario adquirir uno y conectarlo de acuerdo al diagrama de conexión. El transformador de corriente 16454 permite entradas de corriente en su devanado primario de 0 a 125 A AC y en el secundario de 0 a 5 A AC proporcional a la corriente medida en el primario garantizando que todos los rangos de corriente a los que se puede acceder a través de la mesa calibradora (0 a 100 A AC nominal y un poco más de 100 A AC en la práctica) se puedan visualizar desde los medidores multifuncionales.

#### Características generales:

- Conexión del primario por tornillo y tuerca de 8,5 mm de referencia 16550.
- Conexión del secundario por bornes.
- Dimensiones: 44 x 65 x 30 mm.
- Diámetro de la abertura: 21 mm, 120 mm<sup>2</sup>.
- Montaje en superficie con terminales de tornillo o en carril DIN.
- Temperatura de operación: -25°C ~ 60°C.
- Cable tropicalizado: humedad >95%.
- Peso: 200 gr.

#### Características eléctricas:

- Corriente del primario:
- Corriente del secundario:
- Razón de transformación de corriente: 125/5.
- Precisión:
  - Clase 0,5 para un consumo del equipo de medida menor a 2,5 VA.
  - Clase 1 para un consumo del equipo de medida menor a 3,5 VA.
  - Clase 3 para un consumo del equipo de medida menor a 4 VA.
- Tensión de empleo máxima ( $U_e$ ): 720 V AC 50/60 Hz.
- Factor de seguridad (fs):

- 40 a 4.000 A:  $f_s \leq 5$ .
- 5.000 a 6.000 A:  $f_s \leq 10$ .

Precio: 86.500 pesos.

NOTA: Todos los indicadores digitales estudiados en esta sección cumplen con las características descritas en la sección 5.1 del documento para los indicadores digitales, es decir, tienen entradas que se conectan a fuentes de alimentación de tensión y corriente AC con rangos que maneja el sistema de alimentación de la mesa calibradora y su salida es un visualizador que muestra los parámetros que el dispositivo es capaz de medir, entre los que se encuentran los establecidos en los requerimientos para los indicadores digitales del proyecto (ver sección 4.5): tensión, corriente y factor de potencia entre cada una de las líneas R-S-T y neutro.

## Anexo B. Manual de conexión general para la repotenciación de la mesa calibradora de medidores de consumo eléctrico.

En el manual de conexión general se detallan las conexiones de todos los dispositivos elegidos para la solución electrónica de acuerdo al diagrama de conexión general de la Figura 18.

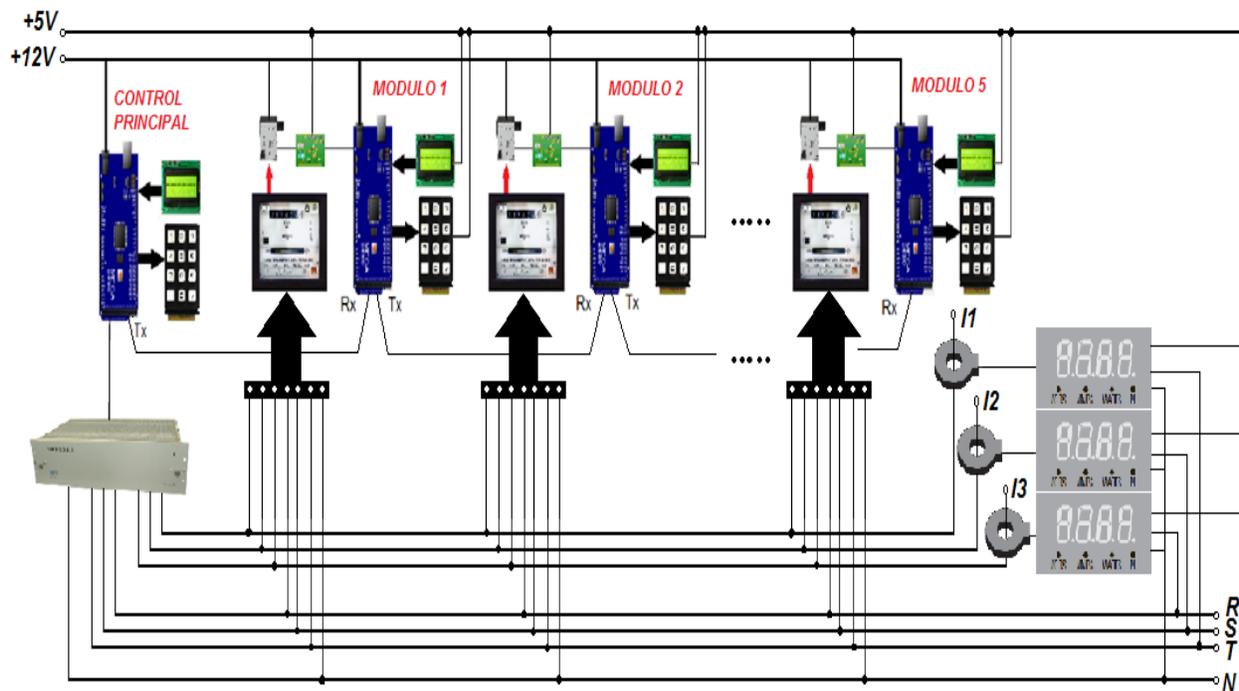


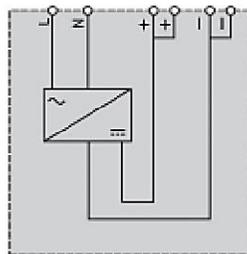
Figura 72. Diagrama de conexión general de la solución electrónica definitiva  
Fuente: Elaboración propia

### ***Fuentes de tensión y corriente AC.***

Las fuentes de tensión y corriente AC proporcionan las líneas R, S, T, N, I1, I2 e I3, de las cuales se puede disponer para todas las conexiones, teniendo en cuenta que las líneas de tensión se deben conectar en paralelo y las líneas de corriente se deben conectar en serie, si se desea que tengan el mismo nivel.

***Fuentes de alimentación reguladas conmutadas ABL8MEM05040 y ABL8MEM12020 marca Schneider Electric.***

Las fuentes de alimentación reguladas conmutadas se conectan de acuerdo al diagrama de conexión observado en la Figura 19, los pines de entrada (L y N) se conectan a una línea fase (L) y a una línea neutro (N) y sus salidas reguladas de 5 V o 12 V DC se toman entre un pin positivo (+) y un pin negativo (-).

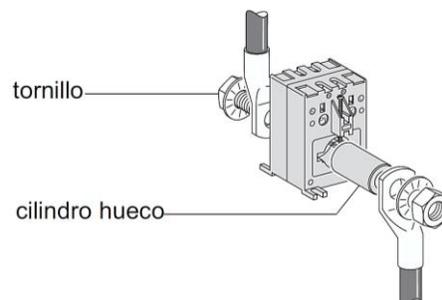


*Figura 73.* Diagrama de conexión interno de las fuentes de alimentación reguladas conmutadas

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

***Transformador de corriente 16454 marca Schneider Electric.***

Al transformador de corriente se le conecta una línea de corriente I1, I2 o I3 interrumpida a los tornillos (ver Figura 20), dicha línea atravesará al transformador por un cilindro hueco, y sus salidas llamadas S1 y S2 se sacan de dos borneras que se pueden identificar fácilmente en el dispositivo.



*Figura 74.* Diagrama de conexión del transformador de corriente 16454

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

**Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710 marca Schneider Electric.**

El indicador digital multifuncional se conecta de acuerdo al diagrama de conexión observado en la Figura 21, las líneas de tensión se conectan a través de un bloque de protección a los bornes V1, V2, V3 y VN; las líneas de corriente se conectan por medio de transformadores de corriente, de acuerdo al esquema de conexión observado en la Figura 20, y las salidas de los transformadores S1 y S2 se conectan al medidor de través de un bloque cortocircuitador a las borneras I1, I2 e I3. La alimentación externa necesaria para el correcto funcionamiento interno del dispositivo se puede realizar conectando una línea fase a la bornera para positivo (+) y una línea neutro a la bornera para negativo (-).

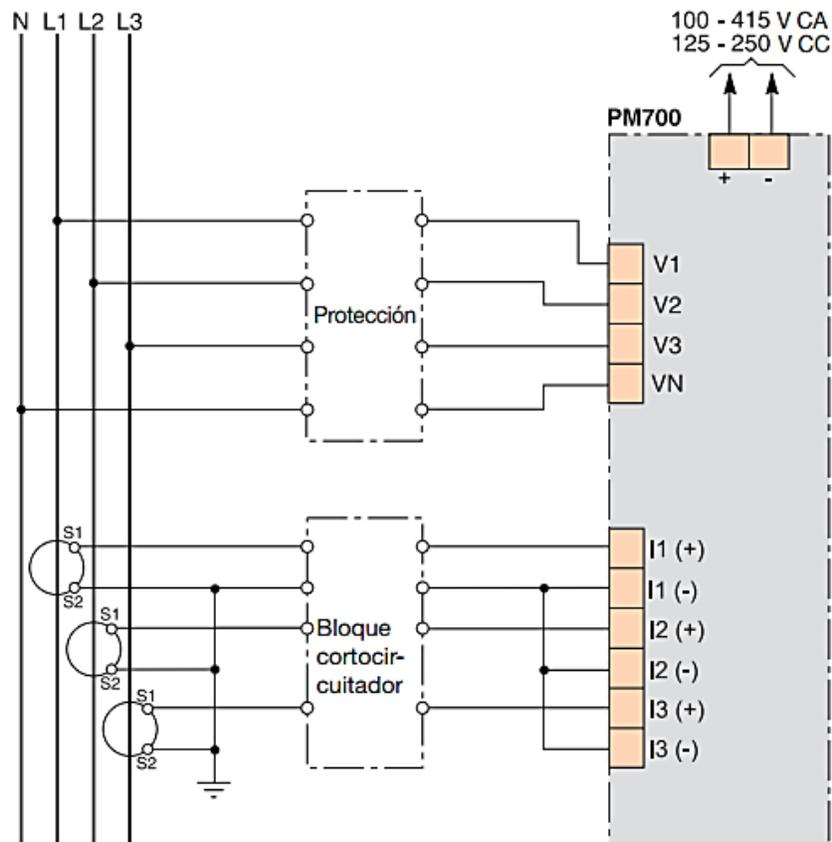


Figura 75. Diagrama de conexión del Indicador digital multifuncional PowerLogic PM710

Fuente: Schneider Electric. (s.f.). Análisis y supervisión de redes eléctricas. Recuperado el 08 de septiembre de 2014, de Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/catalogos/de/cap6.pdf>

***Sistema de ensayo de contadores de electricidad y transformadores CALPORT 300 marca MTE.***

Al medidor patrón CALPORT 300 llegan las líneas R, S, T, N, I1, I2 e I3, las cuales se conectan en borneras ubicadas en la cara frontal del medidor que se pueden identificar fácilmente en el dispositivo.

***Cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE.***

La cabeza lectora fotoeléctrica tiene sus entradas de alimentación a tierra (GND) y a positivo (11-30 V DC), y su salida de pulsos (impulsos) en un conector tal como el que se observa en la Figura 22.

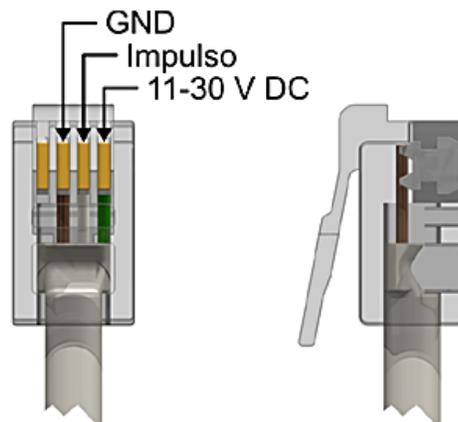


Figura 76. Conector para la cabeza lectora fotoeléctrica SH 2003 marca MTE

Fuente: Meter Test Equipment (MTE). (07 de 2014). Recuperado el 07 de septiembre de 2014, de MTE - Meter Test Equipment: <http://www.mte.ch/data/files/SH%202003%20spanish.pdf>

***Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica***

El circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica se imprime en una tarjeta de acuerdo al diagrama circuital observado en la Figura 23, el circuito impreso resultante debe tener un pin para la entrada de pulsos, un pin para conexión a tierra y un pin para salida de pulsos TTL.

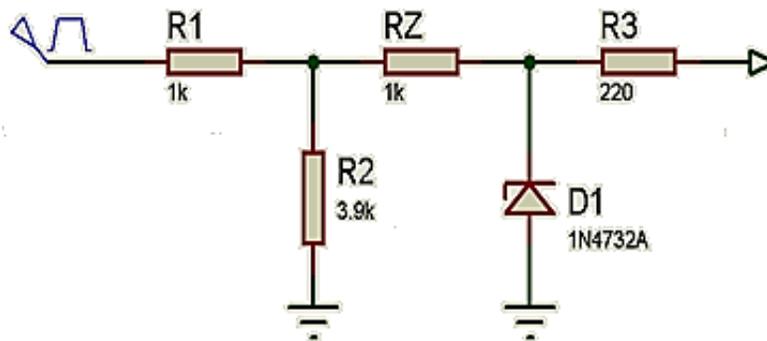
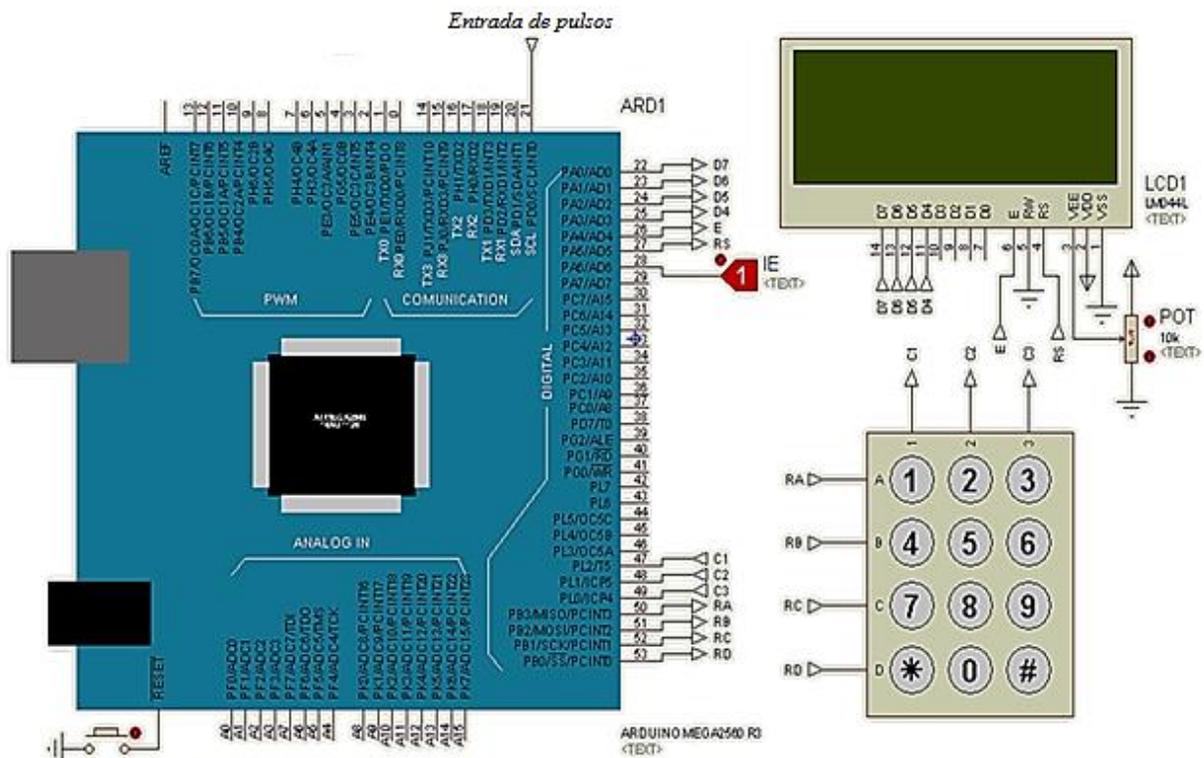


Figura 77. Circuito acoplador de la señal de salida de la cabeza lectora fotoeléctrica  
Fuente: Elaboración propia

### Arduino Mega 2560, Visualizador LCD y Teclado matricial 4x3

La placa Arduino Mega 2560, el visualizador LCD y el teclado matricial 4x3 se conectan de acuerdo al diagrama de conexión de la Figura 24.



Alimentación por el pin Vin a 12 V  
Interconexión serial a través de los pines 0 y 1

Figura 78. Diagrama de conexión de la placa Arduino Mega 2560, el visualizador LCD y el Teclado matricial 4x3  
Fuente: Elaboración propia

## Anexo C. Códigos piloto

### C.1 Código piloto para el módulo de control para cada medidor en ensayo

```
//Variables globales
double epatron = 0.05; //Error que introduce el medidor patrón según su hoja de datos.
double cpatron = 625000; //Constante europea básica del medidor patrón [Imp/kwh]
double cmedidor= 3200; //Constante europea del medidor en ensayo [Imp/kwh]
double N = 2000; //Número de revoluciones del medidor patrón para un ensayo hipotético

double tensayoSegundos = 1; //Tiempo de duración de los ensayos en segundos
double tensayoMSegundos; //Tiempo de duración de los ensayos en milisegundos
double finalEnsayo; //Instante de tiempo en que comienza el ensayo

double n[3]; //Vector para almacenar el conteo de pulsos
double numeroPulsosExactitud; //Variable para el conteo de pulsos para el ensayo de exactitud
double numeroPulsos; //Variable para el conteo de pulsos para los demás ensayos
double Neg; //Número de pulsos equivalentes del medidor en ensayo respecto al medidor patrón
double e1; //Variable comodín
double cex[3]; //Vector para almacenar el error de cada observación
double cexPromedio; //Error en la medición resultante del promedio de tres observaciones

double s; //Desviación estándar
double utipoA; //Incertidumbre estándar tipo A
double utipoB = 1; //Incertidumbre estándar tipo B
double ucombinadaC; //Incertidumbre estándar combinada
double k = 2; //Factor de cobertura
double uexpandida; //Incertidumbre expandida al 95.46%

char cmedidorCaptura[15]; //Variable para la captura de la constante del medidor
char tiempoCaptura[15]; //Variable para la captura del tiempo de ensayo
```

```

int bconteo = 28; //Bandera
int btecla; //Bandera
int estadoPasado; //Bandera
int estadoActual; //Bandera

//-----
//Inclusión de librerías
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Keypad.h>

//Pines de la tarjeta usados para la LCD
LiquidCrystal lcd(27, 26, 25, 24, 23, 22);

//Definición del número de rows y columns del keypad
const byte ROWS = 4; //Cuatro rows
const byte COLS = 3; //Tres columns

//Distribución del teclado
char customkeys[ROWS][COLS] = {
    {'1','2','3'},
    {'4','5','6'},
    {'7','8','9'},
    {'.','0','#'}
};

byte rowPins[ROWS] = {50, 51, 52, 53}; //Pines de la tarjeta usados para las rows del teclado
byte colPins[COLS] = {47, 48, 49}; //Pines de la tarjeta usados para las columns del teclado

Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(customkeys), rowPins, colPins, ROWS, COLS ); //Inicialización del teclado

//-----
void setup() {
    pinMode(bconteo, INPUT);

    lcd.begin(20, 4); //Número de columns y rows de la LCD
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" Calibracion de ");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("medidores de energia");

```

```

lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("  Lab. CEO  ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(" By Ruben Noguera ");

delay(150);
//delay(2000); //Retardo del mensaje de presentación

lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Resultados ensayo");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("4. Parametros  ");
}

//=====
void loop() {

char tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor de una tecla presionada

//-----
//Rutina para realizar el ensayo de exactitud
if (tecla == '1'){
  lcd.clear();
  //Conteo de pulsos del medidor en ensayo con 3 reiteraciones
  numeroPulsosExactitud = 0; //Inicialización del número de pulsos del medidor en ensayo
  btecla = 0; //Garantiza que no se salga del bucle hasta que se realicen 3 observaciones
  while (btecla < 3){
    delay(1);
    estadoPasado = digitalRead(bconteo);
    while(digitalRead(bconteo) == HIGH){ //La bconteo en HIGH inicia el conteo de pulsos y en LOW lo finaliza
      attachInterrupt(2, conteoPulsosExactitud, FALLING); //Llama a la función conteoPulsos con el flanco
      descendente de la señal PME
    }
    n[btecla] = numeroPulsosExactitud-1; //Almacena los pulsos totales de cada observación
    delay(1);
    //Pasa a LOW la badera btecla coando una observación a terminado
    estadoActual = digitalRead(bconteo);
    if (estadoPasado == HIGH && estadoActual == LOW){

```

```

    btecla++;
    numeroPulsosExactitud = 0;
}
detachInterrupt(2); //Detiene la interrupción evitando que el conteo de pulsos continúe
}

// Vuelve al menú principal después de realizado el ensayo
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Resultados ensayo");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("4. Parametros   ");
}

//-----
//Rutina para calcular y observar los resultados del ensayo de exactitud
if (tecla == '2'){
    btecla = 0;
    while (tecla != '#'){ //Permite salir de esta opción presionando la tecla #

        tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor de una tecla presionada

        for (int i=0; i<3; i++){ //Almacenamiento del error de cada obsevación
            eex[i] = CalculoErrorObservacion(epatron, cpatron, cmedidor, N, n[i]); //Llama la función que calcula el error
        }
        eexPromedio = (eex[0] + eex[1] + eex[2]) / 3; //Calculo del error promedio
        s = sqrt((sq(eex[0] - eexPromedio) + sq(eex[1] - eexPromedio) + sq(eex[2] - eexPromedio)) / 2); //Calculo de la
        desviación estándar
        utipoA = s / (sqrt(3)); //Calculo de la incertidumbre estándar tipo A
        ucombinadaC = sqrt(sq(utipoA) + sq(utipoB)); //Calculo de la incertidumbre estándar tipo B
        uexpandida = k * ucombinadaC; //Calculo de la incertidumbre estándar expandida

        //Visualización de los resultados en la pantalla LCD 20x4
        if (btecla == 0){
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("E1="); lcd.print(eex[0], 4);
            lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("E2="); lcd.print(eex[1], 4);

```

```

    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("E3="); lcd.print(eex[2], 4);
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("E="); lcd.print(eexPromedio, 4);
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("s="); lcd.print(s, 4);
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("uA="); lcd.print(utipoA, 4);
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("uB="); lcd.print(utipoB, 4);
    lcd.setCursor(11, 0); lcd.print("uC="); lcd.print(ucombinadaC, 4);
    //lcd.setCursor(11, 1); lcd.print("U="); lcd.print(uexpandida, 4);
    btecla = 1;
}
}

// Vuelve al menú principal después de observados los resultados
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Resultados ensayo");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("4. Parametros    ");
}

//-----
//Rutina para realizar los ensayos de funcionamiento sin carga y de arranque
if (tecla == '3'){
    btecla = 0;
    tensayoMSegundos = tensayoSegundos * 1000;
    while (tecla != '#'){//Permite salir de esta opción presionando la tecla #

        tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor de una tecla presionada

        //Conteo de pulsos del medidor en ensayo
        numeroPulsos = 0; //Inicialización del número de pulsos del medidor en ensayo
        while(btecla == 0){
            lcd.clear();
            if (digitalRead(bconteo) == HIGH){//La bconteo en HIGH inicia el conteo de pulsos y en LOW lo finaliza
                finalEnsayo = millis(); //Captura del tiempo de inicialización del ensayo
                while (millis() < finalEnsayo + tensayoMSegundos){ //Conteo de pulsos durante el tiempo de duración del
                    ensayo especificado
                        attachInterrupt(2, conteoPulsos, FALLING); //Llama a la función conteoPulsos con el flanco descendiente de
                        la señal PME
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    btecla = 1; //Garantiza que se salga del bucle una vez realizado el conteo de pulsos
  }
  detachInterrupt(2); //Detiene la interrupción evitando que el conteo de pulsos continúe
  }
}
}

// Vuelve al menú principal después de realizar el conteo
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Resultados ensayo");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("4. Parametros  ");
}

//-----
//Rutina para capturar la constante del medidor en ensayo y el tiempo de duración del ensayo
if (tecla == '4'){
  lcd.clear();
  //Clareamiento de las variables de captura
  for (int i=0; i < 15; i++){
    cmedidorCaptura[i] = ' ';
    tiempoCaptura[i] = ' ';
  }
  while (tecla != '#'){ //Se digita el valor de la variable hasta que se presione la tecla #
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Constante medidor  ");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("C=");

    tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor presionado de una tecla

    if (tecla != NO_KEY){ //Detecta que se presionó una tecla
      cmedidorCaptura[btecla] = tecla;
      cmedidor = atof(cmedidorCaptura); //Convierte los valores calculados en un número decimal
      lcd.setCursor(2, 1); lcd.println(cmedidor, 3);
      btecla++;
    }
  }
}

```

```

tecla = '';
btecla = 0;
while (tecla != '#'){
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("Duracion ensayo ");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("[seg]=");

    tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor presionado de una tecla

    if (tecla != NO_KEY){ //Detecta que se presionó una tecla
        tiempoCaptura[btecla] = tecla;
        tensayoSegundos = atof(tiempoCaptura); //Combierte los valores calculados en un número decimal
        lcd.setCursor(7, 3); lcd.println(tensayoSegundos, 0);
        btecla++;
    }
}

// Vuelve al menú principal después de capturar los parámetros
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Resultados ensayo");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("4. Parametros ");
}
}

//=====
//Conteo de pulsos para la prueba de exactitud
void conteoPulsosExactitud(){
    int indice = btecla+1;

    lcd.setCursor(0, btecla); lcd.print("n"); lcd.println(indice); lcd.setCursor(2, btecla); lcd.print("=");
    lcd.println(numeroPulsosExactitud, 0);

    numeroPulsosExactitud++;
}

//=====
//Conteo de pulsos para la prueba de funcionamiento sin carga y de arranque
void conteoPulsos(){

```

```

    lcd.clear();
    lcd.print("n="); lcd.println(numeroPulsos, 0);
    numeroPulsos++;
}

//=====
//Calculo del error de cada observación
double CalculoErrorObservacion(double epatronCal,double cpatronCal,double cmedidorCal,double NCal,double
nCal){
    double resultadoError;
    Neq = (cpatronCal / cmedidorCal) * nCal;
    e1 = ((NCal - Neq) / Neq) * 100;
    if (e1 >= 0){
        resultadoError = e1 + epatronCal;
    }
    else{
        resultadoError = e1 - epatronCal;
    }
    return resultadoError;
}

```

## C.2 Código piloto para el módulo de control principal

```

//Variables globales
double N; //Número de revoluciones del medidor patrón para un ensayo hipotético
double n[3]; //Vector para almacenar el conteo de pulsos
double numeroPulsos;//Variable para el conteo de pulsos para los demás ensayos

double tensayoSegundos = 1;//Tiempo de duración de los ensayos en segundos
double tensayoMSegundos; //Tiempo de duración de los ensayos en milisegundos
double finalEnsayo; //Instante de tiempo en que comienza el ensayo

char tiempoCaptura[15]; //Variable para la captura del tiempo de ensayo
int bconteo = 28; //Bandera

int brepeticiones;//Bandera
int btecla; //Bandera

```

```

//-----
//Inclusión de librerías
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Keypad.h>

//Pines de la tarjeta usados para la LCD
LiquidCrystal lcd(27, 26, 25, 24, 23, 22);

//Definición del número de rows y columns del keypad
const byte ROWS = 4; //Cuatro rows
const byte COLS = 3; //Tres columns

//Distribución del teclado
char customkeys[ROWS][COLS] = {
    {'1','2','3'},
    {'4','5','6'},
    {'7','8','9'},
    {'.','0','#'}
};
byte rowPins[ROWS] = {50, 51, 52, 53}; //Pines de la tarjeta usados para las rows del teclado
byte colPins[COLS] = {47, 48, 49}; //Pines de la tarjeta usados para las columns del teclado

Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(customkeys), rowPins, colPins, ROWS, COLS ); //Inicialización del teclado

//=====
void setup() {
    pinMode(bconteo, INPUT);

    lcd.begin(20, 4); //Número de columns y rows de la LCD
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" Calibracion de ");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("medidores de energia");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(" Lab. CEO ");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(" By Ruben Noguera ");

    delay(150);

```

```

//delay(2000); //Retardo del mensaje de presentación
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Tiempo ensayo ");
}

//=====
void loop() {

char tecla = keypad.getKey();

//-----
//Rutina para realizar el ensayo de exactitud
if (tecla == '1'){
  lcd.clear();
  //Conteo de pulsos del medidor en ensayo con 3 reiteraciones
  btecla = 0;
  brepeticiones = 0;
  tensayoMSegundos = tensayoSegundos * 1000;
  numeroPulsos = 0; //Inicialización del número de pulsos del medidor en ensayo

  while (tecla != '#'){

    tecla = keypad.getKey();

    //Conteo de pulsos del medidor en ensayo

    while(btecla == 0){
      lcd.clear();
      if (digitalRead(bconteo) == HIGH){ //La bconteo en HIGH inicia el conteo de pulsos y en LOW lo finaliza
        while (brepeticiones < 3){
          finalEnsayo = millis(); //Captura del tiempo de inicialización del ensayo
          while (millis() < finalEnsayo + tensayoMSegundos){ //Conteo de pulsos durante el tiempo de suración del ensayo especificado
            attachInterrupt(2, conteoPulsos, FALLING); //Llama a la función conteoPulsos con el flanco descendiente de la señal PME
          }
        }
      }
    }
  }
}

```

```

}
detachInterrupt(2); //Detiene la interrupción evitando que el conteo de pulsos continúe
n[brepeticiones] = numeroPulsos -1; //Almacena los pulsos totales de cada observación
brepeticiones++;
btecla = 1; //Garantiza que se salga del bucle una vez realizado el conteo de pulsos
numeroPulsos = 1;
}
}
}

N = (n[0] + n[1] + n[2]) / 3; //Calculo del número de pulsos promedio
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("N1="); lcd.println(n[0]);
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("N2="); lcd.println(n[1]);
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("N3="); lcd.println(n[2]);
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("N="); lcd.println(N);
}
// Vuelve al menú principal después de realizado el ensayo
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Tiempo ensayo ");
}

//-----
//Rutina para realizar los ensayos de funcionamiento sin carga y de arranque
if (tecla == '2'){
  lcd.clear();

  while (tecla != '#'){

    tecla = keypad.getKey();

    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Envio bandera inicio");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("ensayo ");
  }
}

```

```

// Vuelve al menú principal después de realizado el ensayo
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Tiempo ensayo  ");
}

//-----
//Rutina para capturar la constante del medidor en ensayo y el tiempo de duración del ensayo
if (tecla == '3'){
  lcd.clear();
  for (int i=0; i < 15; i++){
    tiempoCaptura[i] = ' ';
  }

  tecla = ' ';
  btecla = 0;
  while (tecla != '#'){ //Se digita el valor de la variable hasta que se presione la tecla #
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Duracion ensayo  ");
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("t[seg]=");

    tecla = keypad.getKey(); //Captura el valor presionado de una tecla

    if (tecla != NO_KEY){ //Detecta que si presionó una tecla
      tiempoCaptura[btecla] = tecla;
      tensayoSegundos = atof(tiempoCaptura); //Convierte los valores calculados en un número decimal
      lcd.setCursor(7, 1); lcd.println(tensayoSegundos, 0);
      btecla++;
    }
  }
}

// Vuelve al menú principal después de capturar los parámetros
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("1. Ensayo exactitud ");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("2. Conteo de pulsos ");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("3. Tiempo ensayo  ");
}
}

```

```
//=====
//Conteo de pulsos para la prueba de exactitud
void conteoPulsos(){
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("N="); lcd.println(numeroPulsos, 0);
  numeroPulsos++;
}
```