



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica
mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora
CNC Universal”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Diego Alejandro Vera Díaz

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Ing. Raúl Llamas Esparza

Pabellón de Arteaga, Ags., Julio del 2020



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO
de Pabellón de Arteaga

ITEC

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE TECNOLOGÍA IoT: CONSUMO
ENERGÉTICO DE UNA FRESADORA CNC UNIVERSAL”**

Presenta:

Diego Alejandro Vera Díaz

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Ing. Raúl Llamas Esparza

Pabellón de Arteaga, Ags., Julio del 2020.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente,

A mi padre, ÁNGEL VERA. Por su inmenso apoyo durante mi preparación universitaria, ya que sin él no hubiera logrado mis metas y objetivos. Por ser mi ejemplo a seguir, por inculcarme y ofrecerme el bonito arte de seguir aprendiendo sin importar la adversidad y circunstancias.

A mi madre, LOURDES DIAZ. Por ser el pilar y la fuerza que necesitaba para alcanzar esta meta. Por brindarme su apoyo incondicional durante toda mi vida estudiantil y haber infundido valores como el respeto y responsabilidad. Por acompañarme siempre en todas las etapas de mi formación académica.

A todos los profesores y tutores que he tenido durante mi vida académica, porque entre todos han formado la base para ser el académico que soy al día de hoy. Entre los profesores, mencionar a mis tutores, DR. PAULINO VACAS JACQUES y DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR, que me ofrecieron la posibilidad de trabajar en este proyecto. En especial para el DR. PAULINO que me oriento de manera clara y concisa sobre las actividades a realizar junto con su excelente equipo de trabajo MoTeBo SAPI.

A el MTRO. VÍCTOR HERRERA, MTRO. JULIO ACEVEDO y MTRO. EDGAR ZACARÍAS, por ser el vínculo y confiar en mis capacidades para lograr este proyecto, por ser excelentes docentes y estar siempre cuando surgían dudas respecto a la realización y alcance del mismo. Por compartir su experiencia con conocimiento y habilidades de trabajo para saber afrontar la carrera universitaria.

A mis compañeros de clase, por ser amigos en todo momento. Por compartir su conocimiento y habilidades de trabajo. Por ser una familia dentro y fuera de la Institución educativa.

Al Instituto Tecnológica de Pabellón de Arteaga. Por sus excelentes docentes y gran compromiso por entregar ingenieros preparados.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Pabellón de Arteaga, Ags., 3/junio/2020

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada "SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE TECNOLOGÍA IOT: CONSUMO ENERGÉTICO DE UNA FRESADORA CNC UNIVERSAL" del estudiante DIEGO ALEJANDRO VERA DÍAZ con numero de control 151050144 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

DR. PAULINO VACAS JACQUES
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

ING. RAÚL LLAMAS ESPARZA
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO®
de Pabellón de Arteaga

ATEC

Pabellón de Arteaga, Ags., 10/junio/2020

DIEGO ALEJANDRO VERA DÍAZ
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 151050144

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: "SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE TECNOLOGÍA IOT: CONSUMO ENERGÉTICO DE UNA FRESADORA CNC UNIVERSAL", hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Tierra Siempre fértil®



M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

RESUMEN

“SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE TECNOLOGÍA IoT: CONSUMO ENERGÉTICO DE UNA FRESADORA CNC UNIVERSAL”

Por: **DIEGO ALEJANDRO VERA DÍAZ**

Las tarifas de energía eléctrica en México sufren ajustes anualmente. Particularmente, para la industria, aplica una tarifa de categoría Gran Demanda Baja Tensión mayor a 25 kW-mes que, para la zona Bajío, sufrió en el año 2019 un incremento considerable del 32.6% en comparación con las tarifas del año 2018.

La empresa MoTeBo SAPI DE CV es una empresa mexicana que ha incursionado dentro del campo del ahorro de consumos energéticos en la industria con el desarrollo de tecnología del internet de las cosas para proponer soluciones comerciales factibles mediante el empleo de dispositivos monitoreo de variables de energía, ya que estos ofrecen una forma rápida de medición de parámetros eléctricos. Sin embargo, estos medidores están sujetos a la manipulación manual para la toma de datos.

En este trabajo, se desarrolló una metodología para implementar un sistema integral de monitoreo de consumo de energía eléctrica de una maquina especializada de manufactura con tecnología IoT y, que, en tiempo real, los datos sean almacenados en la nube por medio de un módulo de comunicación y de un entorno de desarrollo integrado propiedad de la empresa.

En la metodología propuesta se empleó una maquina fresadora CNC universal vertical modelo XK7130A con pos-procesador GSK, un medidor multifunción de parámetros de red eléctrica de la marca SIEMENS modelo SENTRON PAC3100 y un módulo de comunicación propiedad de la empresa que está compuesto por un microcontrolador y un módulo de conectividad celular de IoT con comunicación serial.

La interfaz entre los tres elementos se logró a través del diseño y construcción de una instalación eléctrica trifásica y mediante el desarrollo de una configuración exitosa del protocolo de comunicación serial. Para la instalación eléctrica se desarrolló una instalación propia para el dispositivo SENTRON PAC3100 con un esquema de conexión tipo estrella. Para la comunicación con la nube se estudiaron varias configuraciones empleando los softwares en su versión libre de ModbusMAT 1.1, Arduino y LabVIEW y otros (no presentados en este estudio).

Considerando lo anterior, se logró instalar el dispositivo de manera independiente a la caja de conexiones principales del taller de manufactura y con capacidad de monitorear todas las maquinas existentes en el taller. La comunicación con la nube se logró con el desarrollo del hardware y software vía interfaz serial y empleando el código propio de la empresa.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

La validación del sistema integral de monitoreo se realizó con la lectura, registro, almacenamiento y análisis de los datos experimentales mediante operaciones de careo de (i) una pieza de metal de acero aleado suave con porcentaje de 0.2-0.3% de carbón, (ii) una pieza de madera aserrada de pino y (iii) al vacío (sin carga) en la maquina fresadora. Los datos experimentales fueron colocados en la nube.

Finalmente se obtuvieron datos experimentales donde se seleccionaron los parámetros de tensión, intensidad de corriente, potencia aparente total y factor de potencia como las variables de estudio principales. Todas las variables fueron monitoreadas por intervalos de tiempo de 25.9, 15.3 y 14.6 minutos para la pieza de metal, madera y al vacío respectivamente (tiempo de duración del careo). Para el caso de la pieza de metal, en su mayoría, los valores de tensión obtenidos estuvieron en el intervalo de 214-216 V, los valores de corrientes entre 1.30-2.90 A, los valores de factor de potencia entre 06-0.8 y los valores de potencia aparente entre 600-1000 VA. Similarmente los valores con la pieza de madera fueron de 215-218 V de tensión, 1.2-2.2 A de corriente, 0.5-0.6 de factor de potencia y 680-710 VA de potencia aparente. Para las pruebas de vacío las lecturas fueron de 214-217 V de tensión, 1.2-2.2 A de corriente, 0.51-0.58 de factor de potencia y 660-700 VA de potencia aparente.

Este trabajo es una continuidad más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global de medición de consumos energéticos para demás equipos de manufactura especializada y/o procesos reales. Por lo que esté estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto de la empresa proponente del proyecto. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en equipos de manufactura diferentes. Este estudio presenta los resultados utilizando una maquina fresadora CNC vertical. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Por derechos de propiedad industrial, en el presente trabajo no se describen de manera específica el tipo de microcontrolador empleado, el protocolo de comunicación (configuraciones), el código de programación y software de funcionamiento, el análisis de enmascarado de datos ni el entorno de desarrollo integrado propiedad de la empresa. Estas actividades fueron ejecutadas en este trabajo, pero por secreto industrial propiedad de la empresa proponente está fuera de alcance del proyecto su descripción detallada.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Paulino Vacas Jacques

Ing. Raúl Llamas Esparza

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 DEMANDA ELÉCTRICA EN MÉXICO.....	6
2.2 TARIFAS ELÉCTRICAS EN MÉXICO.....	7
2.3 FACTOR DE POTENCIA (fp).....	9
2.3.1 Potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva.....	10
2.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA.....	10
2.5 INSTALACIONES Y CONEXIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES.....	11
2.6 MEDIDOR MULTIFUNCIÓN SIEMENS SENTRON PAC3100 (SP3100).....	17
2.6.1 Ejemplos de conexión.....	18
2.7 FRESADORA CNC.....	19
2.7.1 Funcionamiento de la fresadora CNC.....	21
2.8 COMUNICACIÓN CON CENTRO DE CONTROL.....	24
2.8.1 Descripción de protocolos seriales.....	24
2.8.2 RS-232, RS-422 y RS-485.....	24
2.8.3 Descripción de la interfaz RS-485.....	27
2.9 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.....	28
2.10 HARDWARE IoT.....	29
2.11 COMUNICACIÓN EN NUBE (CLOUD COMPUTING).....	30
2.12 SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN PARA COMUNICACIÓN SERIAL.....	31
2.12.1 ModbusMAT.....	31
2.12.2 Arduino.....	32
2.12.3 LabVIEW.....	33

	Pág.
III. METODOLOGÍA	34
3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA MAQUINA FRESADORA CNC VERTICAL.....	34
3.2 DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA SENTRON PAC3100 (SP3100).....	35
3.3 MODULO DE COMUNICACIÓN MoTeBO® (ModM).....	35
3.4 COMUNICACIÓN CON LA NUBE.....	38
3.5 SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA IoT.....	40
3.5.1. Instalación de dispositivo SP3100.....	40
3.5.1.1 Diseño y construcción de gabinete de control.....	40
3.5.1.2 Diseño y construcción de soportes de sujeción.....	41
3.5.1.3 Instalación eléctrica: transformadores de corriente, cableado y conexiones...	43
3.5.2 Comunicación con la nube (desarrollo de hardware y software) – interfaz de comunicación.....	44
3.5.2.1 Hardware.....	44
3.5.2.2 Software.....	46
3.5.3 Sensado de datos y comunicación con la plataforma (diseño experimental).....	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1 SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA IoT.....	48
4.1.1 Construcción del gabinete de control.....	48
4.1.2. Sistema de conexión eléctrica para el SENTRON PAC3100.....	51
4.2 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON LA NUBE.....	59
4.2.1 Configuración inicial.....	60
4.2.2 Configuración por Arduino.....	61
4.2.3 Otras configuraciones (no reportadas).....	62
4.3 SENSADO DE DATOS Y COMUNICACIÓN CON PLATAFORMA MOTEBO® (DISEÑO EXPERIMENTAL).....	62
4.3.1 Análisis de datos.....	62
4.3.2 Enmascarado de datos (no presentado).....	70
4.3.3 Lectura de datos en plataforma (comunicación con la nube).....	71
V. CONCLUSIONES	72

	Pág.
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO 1. Planos con medidas y dimensiones de diseño del gabinete eléctrico, soporte de transformadores y soporte del Sentron PAC3100.....	77
ANEXO 2. Graficas de análisis de datos obtenidos del careo de las piezas de metal, madera y al vacío.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Participación de la electricidad en el consumo final de energía por sector.....	6
2 Tarifas categoría GDMTH.....	8
3 Periodos de punta, intermedio y de base (horarios de consumo para fijación de tarifas).....	8
4 Mapa conceptual de eficiencia energética eléctrica.....	11
5 Subestación eléctrica tipo compacta dentro de una industria.....	12
6 Subestación perfectamente instalada con su conexión eléctrica con su correcto enrutamiento...	12
7 Conexión tipo estrella y su forma de conexión a la placa de bornes.....	14
8 Conexión tipo delta (triángulo) y su forma de conexión a la placa de bornes.....	14
9 Sistema de distribución radial (simple).....	15
10 Sistema selectivo primario.....	16
11 Sistema selectivo secundario.....	16
12 Medidor multifunción Siemens SP3100.....	17
13 Tipo de conexión 3P4W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente...	19
14 Tipo de conexión 3P3W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente...	19
15 Fresadora horizontal comercial marca Haas.....	20
16 Fresadora vertical comercial marca JET.....	20
17 Fresadora vertical y sus partes principales.....	21
18 Esquema de una fresadora típica y sus ejes de movimiento.....	22
19 Componentes básicos de una fresadora CNC: partes principales y ejes de movimiento.....	22
20 Diagrama de bloques de una fresadora con la interfaz de un controlador y la máquina.....	23
21 Terminales de conexiones RS-232 con terminación macho-hembra (fuente: www.erard.com)..	25
22 Cable con conexiones RS-422 con terminación macho-macho (fuente: www.videoplusfrance.com).....	26
23 Terminal de conexión RS-485 con terminación macho (fuente: www.mercadolibre.com).....	26
24 Adaptador RS-232 a RS-485.....	26
25 Esquema básico de conexión de la interfaz RS-485.....	27
26 Esquema de conexiones: Topología RS-485 general.....	28
27 Flujo eléctrico en un TC (izq.) y entrada y salida de corriente de un TC (der.).....	29
28 Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega328 (fuente: electrocrea.com).....	30
29 Raspberry Pi: microcontrolador ARM Cortex-A53 (fuente: electrocrea.com).....	30
30 Cloud Computing de Google Drive para un usuario.....	31

Figura	Pág.
31 IDE software ModbulMAT 1.1 exe.....	32
32 IDE software Arduino.....	33
33 IDE software LabVIEW.....	33
34 Fresadora CNC Universal de estudio.....	34
35 SP3100: vista frontal.....	35
36 Taller de manufactura del I. T. Pabellón de Arteaga.....	36
37 Lay-out de instalación del SP3100 en el Taller de Manufactura.....	37
38 Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista de planta).....	37
39 Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista alzada).....	38
40 Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista posterior).....	38
41 Acceso a plataforma MoTeBo®.....	39
42 Vista interna de la plataforma MoTeBo®.....	39
43 Diseño del gabinete de control: soportes y caras de la caja.....	41
44 Diseño de soporte (1) para transformadores de corriente.....	42
45 Diseño para soportes (2) de SP3100.....	42
46 Perforaciones de diseño del SP3100 para puesta de soportes impresos.....	43
47 Ilustración del arreglo sugerido a utilizar (estrella).....	44
48 Tipo de conexión 3P4W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente...	44
49 Conexión del SP3100.....	45
50 Rotulación y posición de los bornes en el SP3100: diagrama del fabricante (der.) y conexión por resistencia (izq.).....	46
51 Interfaz de comunicación del módulo ModM.....	46
52 Ejemplo de comunicación con plataforma.....	47
53 Máquina de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400.....	48
54 Diseño de la base del gabinete de control con orificios de sujeción.....	49
55 Laterales del gabinete de control con entrada o salida de cableado.....	49
56 Tapadera frontal plegable del gabinete de control.....	49
57 Máquina dobladora MACOS 40 ton. Capacidad (izq.) y pieza de gabinete con doblez (der.)....	50
58 Procesos de perforación (izq.), remachado (centro) y soldadura (der.) de gabinete de control....	50
59 Resultado final del gabinete eléctrico con Sentron PAC 3100.....	51
60 Gabinete de control instalado: adaptado a la canaleta (izq.) y empotrado a la pared (der.).....	51
61 SP3100 con sistema de fijación al gabinete eléctrico.....	52
62 Acceso al registro eléctrico principal.....	52

Figura	Pág.
63 Borne estándar de conexiones.....	53
64 Conexión tipo estrella de la instalación: conexión X1 del fabricante.....	54
65 Conexión tipo estrella de la instalación: conexión X2 del fabricante.....	54
66 Conexión estrella en partes X1 y X2 del SP3100.....	54
67 Rotulado de la instalación.....	55
68 Tensión medida en línea 1.....	56
69 Tensión medida en línea 2.....	57
70 Tensión medida en línea 3.....	57
71 Corriente medida en línea 1.....	57
72 Corriente medida en línea 2.....	58
73 Corriente medida en línea 3.....	58
74 Corrientes medidas por SP3100.....	58
75 Instalación de conectividad completa del SP3100.....	59
76 Instalación de cople: vista inferior de gabinete.....	59
77 Continuidad de señal por cople.....	60
78 Resultados de lectura vía conversor serial.....	61
79 Lecturas obtenidas con Arduino en fresadora en off.....	62
80 Proceso de careado en fresadora para recolección de datos de energía: operación en proceso (arriba), acabado final de piezas (abajo).....	64
81 Interfaz creada en LabVIEW.....	65
82 Lectura de datos al desbastar madera en la fresadora y exportados en Excel.....	65
83 Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en el careo de la pieza de metal.....	66
84 Grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal.....	67
85 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.....	68
86 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 750-1000 segundos.....	68
87 Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida del proceso de careo de la pieza de metal.....	69
88 Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de metal.....	69
89 Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de metal, pieza de madera y al vacío: tiempos de maquinado de 100-800 segundos.....	70

Figura	Pág.
90 Transferencia de datos NO exitosa (desconectada) desde la plataforma MoTeBo®.....	71
91 Transferencia de datos SI exitosa (conectada) desde la plataforma MoTeBo®.....	71
92 Medidas de la pieza “base” del gabinete eléctrico.....	77
93 Medidas de la pieza “lateral” del gabinete eléctrico.....	78
94 Medidas de la pieza “tapadera” del gabinete eléctrico.....	79
95 Medidas de la pieza “porta transformador de corriente” del gabinete eléctrico.....	80
96 Medidas de la pieza “soporte Sentron PAC3100” del gabinete eléctrico.....	81
97 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.....	82
98 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.....	82
99 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 1250-1550 segundos.....	83
100 Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en el careo de la pieza de madera.....	83
101 Grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera.....	84
102 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.....	84
103 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.....	85
104 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.....	85
105 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 750-915 segundos.....	86
106 Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida del proceso de careo de la pieza de madera.....	86
107 Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de madera.....	87
108 Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en la operación al vacío.....	87
109 Grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío.....	88
110 Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.....	88

Figura		Pág.
111	Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.....	89
112	Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.....	89
113	Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 750-875 segundos.....	90
114	Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida en la operación al vacío.....	90
115	Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida en la operación al vacío.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Categorías tarifarias eléctricas en la Industria en México.....	7
2	Visualización de magnitudes medidas en función del tipo de conexión.....	18
3	Identificación y acción realizada por los registros.....	27
4	Código de rotulación de instalación eléctrica para el SP3100.....	55
5	Lecturas comparativas de tensión (voltajes).....	56
6	Lecturas comparativas de corriente (amperajes).....	56
7	Promedio de datos de las lecturas obtenidas.....	66

NOMENCLATURA

fp	Factor de potencia.
P	Potencia activa.
S	Potencia aparente.
Q	Potencia reactiva.
SP3100	Medidor multifunción SIEMENS SENTRON PAC3100.
ModM	Módulo de comunicación MoTeBo [®]
Tecnología IoT	Arreglo de hardware y software: Maquina + SP3100 + ModM + comunicación serial + código programación + IDE empresa.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Anualmente, la Comisión Federal de Electricidad realiza una actualización de las tarifas que aplicará para el servicio de distribución de energía eléctrica durante un año calendario. Particularmente, para la industria, aplica una tarifa de categoría Gran Demanda Baja Tensión mayor a 25 kW-mes que, para la zona Bajío, sufrió en el año 2019 un incremento considerable del 32.6% en comparación con las tarifas del año 2018.¹ Esto es, de un costo de \$340.17/kW-mes en el año 2018, se incrementó a un costo de \$451.04/kW-mes en el año 2019.² Y aunque en el año 2020 las tarifas se redujeron un 19.8% (zona Bajío – \$361.72/kW-mes), en comparación con el año 2019, se establecieron precedentes para la ejecución de acciones dentro de las organizaciones y lograr establecer medidas de ahorro de consumo energético sin que afecten sus operaciones ordinarias.³

MoTeBo SAPI DE CV es una empresa mexicana dedicada al desarrollo de la innovación textil mediante la adopción de tecnología del internet de las cosas (IoT) y de la tecnología vestible (*Wearable Technology*) Wt para la fabricación de prendas de vestir inteligentes que a través de sensores recaban datos diversos de utilidad para el usuario industrial o de servicios.⁴ Recientemente ha incursionado dentro del campo del ahorro de consumos energéticos en la industria con el desarrollo de tecnología propia basada en IoT para proponer soluciones comerciales factibles mediante el empleo de dispositivos monitoreo de variables de energía y comunicación con la nube en tiempo real.

Dentro de este contexto, varios trabajos se han reportado donde desarrollan sistemas de monitoreo de energía eléctrica que le permitan al usuario conocer sus propios consumos y tomar decisiones que le permitan reducir sus gastos de facturación eléctrica. Por ejemplo, Duque-Alas (2014) presenta un trabajo donde implementa un sistema de medición de energía eléctrica de una institución educativa.⁵ López *et al.* (2016) desarrollan de un medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial.⁶ Aunado a lo anterior y, durante esta década, se ha estudiado la integración de un sistema de monitoreo eléctrico basado en IoT por las ventajas que ofrece para poder realizar lecturas de datos y automáticamente almacenarlas en la nube en tiempo real. Nakandakari y Rivero (2013) reportan un trabajo donde diseñan un contador electrónico de energía con comunicación Ethernet.⁷ Pocero *et al.* (2017) desarrollaron un sistema de monitoreo de energía para edificaciones de escuelas en donde monitorearon el consumo de energía empleando hardware y software de IoT de acceso abierto.⁸ Hossain-B. *et al.* (2020) realizan un estudio para construir una red de sensores inalámbricos a base de IoT para uso de un proveedor de energía y conocer el consumo de un usuario en tiempo real.⁹

En el mercado existen diversas marcas y modelos de analizadores de red eléctrica de adquisición de datos (dispositivos de monitoreo de variables de energía), entre los que podemos mencionar los dispositivos SATEC PM175, LUMEL ND40, SIEMENS SENTRON PAC3100, CIRCUTOR CVM-C10, SCHNEIDER ELECTRIC PM5300, WEIDMÜLLER 550, entre otros. Todo ellos comparten la característica de monitorear valores

energéticos de tensión, corriente, potencia aparente y factor de potencia entre otros. Así mismo, todos tienen la característica de ser compatibles con el protocolo serial y requieren de una instalación fija para su operación. Sin embargo, se requiere la constante interfaz hombre-máquina para poder registrar los datos de lectura que según el proceso pueden ser generados en gran volumen y por periodos de tiempo largos. Aunado a lo anterior, algunos dispositivos cuentan con capacidad de almacenaje, por lo que requieren de una constante operación de liberación de memoria.

En particular, el medidor multifunción SENTRON PAC3100 (SP3100) de la marca SIEMENS se ha empleado en trabajos de monitoreo de energía debido a que integra en su cuerpo un puerto de comunicación estándar. Por mencionar unos trabajos, Coronel-Basurto (2017) reportan el desarrollo de un sistema de monitoreo de la red eléctrica de un taller de máquinas de una escuela. Emplean el dispositivo SP3100 como medidor.¹⁰ Álvarez-Velasco y Hernández-Montesdeoca (2019) emplean el medidor SP3100 en su trabajo de implementación de una red para monitoreo de variables eléctricas en un banco de variadores de frecuencia dentro de un laboratorio escolar.¹¹

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad a implementar para conseguir la instalación y operación de un sistema de monitoreo de energía basado en la tecnología IoT empleando un medidor de energía:

1.- Diseño y construcción de un sistema integral de medición de energía:

- Cableado y conexión eléctrica de un dispositivo de medición de parámetros eléctricos a una máquina de manufactura especializada.
- Desarrollo del hardware de interfaz para medición y monitoreo de variables de energía: tensión, corriente, potencia aparente total y factor de potencia.
- Empleo del módulo de comunicación MoTeBo® (ModM).

2.- Sistema de monitoreo de consumos energéticos basado en IoT

- Desarrollo del software de interfaz conforme al protocolo de comunicación serial.
- Análisis de la funcionalidad de varias configuraciones de comunicación empleando software de acceso libre.
- Realizar mediciones experimentales para generar base de datos.
- Comunicación con la nube para envío de datos en tiempo real empleando el código y la plataforma de diseño propio de la empresa.

Por consiguiente, se propone una metodología para implementar un sistema integral de monitoreo de consumo de energía eléctrica de una máquina especializada de manufactura con tecnología IoT y, que, en tiempo

real, los datos sean almacenados en la nube por medio de un módulo de comunicación y de un entorno de desarrollo integrado propiedad de la empresa.

En la metodología propuesta se considera el empleo de una máquina fresadora CNC universal vertical modelo XK7130A con pos-procesador GSK, un medidor multifunción de parámetros de red de la marca SIEMENS modelo SENTRON PAC3100 y un módulo de comunicación ModM que está compuesto por un microcontrolador y un módulo de conectividad celular de IoT con comunicación serial.

La interfaz entre los tres elementos se propone lograr a través del diseño y construcción de una instalación eléctrica trifásica y mediante el desarrollo de una configuración exitosa del protocolo de comunicación serial. Para la instalación eléctrica se considera crear una instalación propia para el dispositivo SP3100 con un esquema de conexión tipo estrella. Para la comunicación con la nube se estudiarán varias configuraciones empleando los softwares en su versión libre de ModbusMAT 1.1, Arduino y LabVIEW y otros (no presentados en este trabajo).

Las variables de estudio propuestas son: intensidad de corriente, tensión, potencia aparente total y factor de potencia. El proyecto se realizará dentro de las instalaciones del taller de manufactura del Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga con autorización y aprobación de la Académica de Ingeniería Mecatrónica del plantel, bajo un convenio de colaboración tecnológica y como continuidad extensiva del proyecto de residencia profesional del proponente.

La presente propuesta permitió operar el equipo fresadora CNC con y sin carga de trabajo, poder registrar variables eléctricas y colocarlos en la nube.

Este trabajo es una continuidad más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis y consecuentemente establecer demás trabajo a futuro para lograr publicaciones científicas y/o establecer demás proyectos de investigación dentro del campo de la Mecatrónica.

Este trabajo es parte de un proyecto global de medición de consumos energéticos para demás equipos de manufactura especializada y/o procesos reales. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto de la empresa MoTeBo. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en equipos de manufactura diferentes. Este estudio presenta los resultados utilizando una máquina fresadora CNC vertical. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Por derechos de propiedad industrial, en el presente trabajo no se describen de manera específica el tipo de microcontrolador empleado, el protocolo de comunicación (configuraciones), el código de programación y software de funcionamiento, el análisis de enmascaramiento de datos ni el entorno de desarrollo integrado propiedad de la empresa. Estas actividades fueron ejecutadas en este trabajo, pero por secreto industrial está fuera de alcance del proyecto su descripción detallada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema integral de monitoreo de consumo de energía eléctrica mediante la puesta en prueba de la Tecnología IoT en la operación de una fresadora CNC universal vertical para obtener diferentes parámetros de red con toma de corriente y, en tiempo real, comunicarlos a la nube.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir una instalación eléctrica mediante la conexión de corriente de la maquina fresadora hacia un medidor multifunción SIEMENS SENTRON PAC3100 para la medición y visualización de parámetros eléctricos en una red trifásica.
- Programar y configurar la comunicación del dispositivo SIEMENS SENTRON PAC3100 mediante el protocolo de comunicación serial para obtener, registrar y almacenar datos de lectura de valores energéticos de consumo de una fresadora CNC.
- Estudiar la comunicación del dispositivo SIEMENS SENTRON PAC3100 a una fresadora CNC mediante varias herramientas de software para establecer una configuración adecuada de comunicación con la nube.
- Construir una base de datos experimental de una fresadora CNC mediante la puesta en operación de la Tecnología IoT (sensado de datos) para analizar el comportamiento del sistema de monitoreo desarrollado.
- Enviar los datos de lectura de una fresadora CNC en tiempo real hacia la nube mediante la comunicación lograda con la plataforma de la empresa para validar el sistema de monitoreo desarrollado.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para el año 2017, el consumo de energía eléctrica de la Industria en México fue de más de 1800 petajoules. Donde la tendencia, desde el año 2015, ha sido en constante aumento, es decir, una demanda de mayor corriente, año con año, para satisfacer sus procesos productivos.

Las tarifas eléctricas que fijó la Comisión Federal de Electricidad para el año 2019 – considerando la zona del Bajío para la categoría Gran Demanda Baja Tensión mayor a 25 kW-mes – sufrió un incremento de más del 30% en relación a la tarifa del año 2018. Lo anterior obligó a las industrias a adoptar medidas de ahorro de consumo de energía eléctrica significantes para no ver mermadas sus utilidades o rendimientos por la facturación de energía eléctrica mal aprovechada. Sobre todo, dentro de sus procesos de producción principales.

Dentro de este panorama un sistema integral de medición de energía eléctrica instalado dentro de una organización permitiría detectar donde se tienen consumos excesivos de corriente eléctrica que no corresponden a una operación normal pero que son totalmente facturables por el organismo proveedor de energía eléctrica.

Monitorear los consumos de electricidad en la Industria le permitirá adoptar medidas eficientes y eficaces de ahorro energético directamente en sus principales procesos y por ende disminuir sus costos de facturación eléctrica. Adicionalmente, la tecnología del internet de las cosas facilita la disposición de información en tiempo real para poder implementar acciones correctivas al momento.

En este proyecto se contempla, como una propuesta de solución, el desarrollo de un sistema integral de monitoreo de consumo de energía eléctrica empleando la tecnología IoT para medir el consumo eléctrico que una maquina fresadora y en tiempo real subir los datos de lectura a la nube.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible implementar un sistema de monitoreo de consumo de energía eléctrica que permita registrar diferentes parámetros básicos de energía eléctrica durante la operación de una maquina fresadora y, en tiempo real, lograr comunicarlos a la nube mediante la tecnología del internet de las cosas.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

En el presente trabajo se evaluó el funcionamiento del sistema de monitoreo de consumo de energía eléctrica en la operación de una maquina fresadora empleando un material duro (metal de acero aleado suave con porcentaje de 0.2-0.3% de carbón), un elemento blando (madera aserrada de pino) y al vacío (sin carga).

Se desarrolla una metodología propia de programación para registrar los valores eléctricos pero los datos de lectura obtenidos fueron comunicados a la nube en tiempo real mediante un código de comunicación y un entorno de desarrollo integrado, ambos de diseño propio de la empresa. Por derechos de propiedad intelectual y secreto industrial, el presente trabajo reserva toda la información relativa a estos elementos, así como la descripción detallada de varias actividades ejecutadas para lograr el objeto fin del estudio: tipo de microcontrolador empleado, protocolo de comunicación (configuraciones), código y software funcional y análisis de enmascarado de datos.

Ningún desarrollo experimental robusto fue empleado. El alcance del proyecto contemplo la obtención de datos experimentales preliminares para validar el sistema desarrollado. Las variables de estudio definidas fueron intensidad de corriente, tensión, potencia aparente y factor de potencia.

Los datos fueron obtenidos directamente del dispositivo de medición por lo que ningún modelo matemático o simulación fue contemplado por estar fuera del alcance del proyecto.

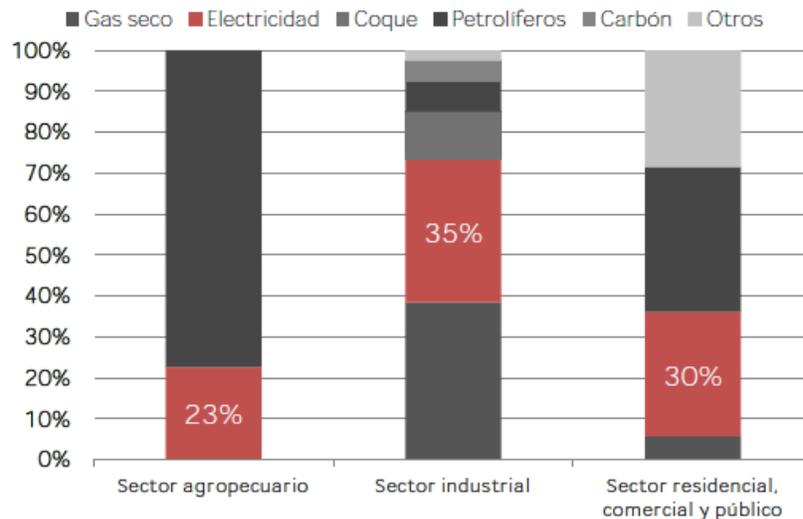
La interfaz de comunicación se instaló de manera externa al gabinete de control del sistema de monitoreo para facilidad de manipulación del hardware y software durante las pruebas preliminares.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 DEMANDA ELÉCTRICA EN MÉXICO

La demanda de electricidad ha crecido aceleradamente a la par del desarrollo tecnológico y los avances informáticos, por ejemplo, los avances de las tecnologías de la información han permitido el desarrollo de sistemas de medición, de transmisión y de distribución de la electricidad o por ejemplo, debido a las malas políticas gubernamentales desde los años 80's, se ha permitido la liberación de los mercados eléctricos en varios países que han permitido explorar y producir electricidad en condiciones mejores y más eficientes para los usuarios. Dentro de este contexto, se ha logrado realizar la medición de datos en tiempo real que permiten optimizar los mecanismos de transporte de energías eléctricas o el desarrollo de infraestructura óptima para el sector eléctrico.¹²

En México, el gas seco, el coque, los hidrocarburos y la electricidad son fuentes de energía demandados por sectores como el agropecuario, el industrial, residencial y de comercio. En particular la electricidad es la segunda fuente de mayor consumo en el país, siendo el consumo de la industria de un 35 %, ver Figura 1.¹³



Fuente: Elaborado por SENER con datos del Sistema de Información Energética (SIE).

Figura 1. Participación de la electricidad en el consumo final de energía por sector.

En particular la industria en México ha estado bajo el monopolio de la Comisión Federal de Electricidad durante décadas y por ello no cuentan con áreas dedicadas específicamente al cuidado de su consumo energético en sus procesos. Sin embargo, la tendencia al alza de las tarifas eléctricas y a las opciones de suministro en el mercado hacen que la industria busque medios para disminuir, transparentar y estabilizar sus consumos de

electricidad. De acuerdo a una encuesta de la empresa encuestadora PwC, en el año 2018, concluyo que el 90% de las compañías han evaluado cambiar su fuente de suministro de electricidad.¹⁴ Esto abre una puerta para también explorar la reducción de sus consumos energéticos dentro de sus procesos.

2.2 TARIFAS ELÉCTRICAS EN MÉXICO

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) es el organismo gubernamental encargada de minimizar los costos de la industria eléctrica en beneficio de la población.¹⁵ La legislación vigente señala que las tarifas eléctricas para el suministro básico de los diferentes segmentos (hogar, negocio e industria) se establecen bajo un complejo esquema de jerarquías gubernamentales. En particular, el esquema tarifario vigente para la industria contempla diversas categorías tarifarias. En la Tabla 1, se presentan las categorías tarifarias vigentes en la Industria en México.¹⁶ En la Figura 2, se muestran tarifas específicas de la zona Bajío de la categoría GDMTH que aplica para la industria.¹⁷

Tabla 1. Categorías tarifarias eléctricas en la Industria en México.

Categoría tarifaria	Descripción	Tarifa anterior
PDBT	Pequeña Demanda (hasta 25 kW-mes) en Baja Tensión	2, 6
GDBT	Gran Demanda (mayor a 25 kW-mes) en Baja Tensión	3, 6
RABT	Riego Agrícola en Baja Tensión	9
APBT	Alumbrado Público en Baja Tensión	5, 5A
APMT	Alumbrado Público en Media Tensión	5, 5A
GDMTH	Gran Demanda en Media Tensión horaria	HM, HMC, 6
GDMTO	Gran Demanda en Media Tensión ordinaria	OM, 6
RAMT	Riego Agrícola en Media Tensión	9M
DIST	Demanda Industrial en Subtransmisión	HS, HSL
DIT	Demanda Industrial en Transmisión	HT, HTL

De forma simple, para determinar la tarifa que aplica a una organización se considera (i) el precio de la luz que se mide en el precio del kilovatio por hora (kWh) que aplique según el día y la hora de consumo y (ii) la potencia de luz contratada según el giro económico. Adicional a lo anterior, y, para determinar el consumo eléctrico específico de una organización, se consideran otros factores como la energía activa (cantidad de energía consumida), energía reactiva (energía que no se emplea formalmente pero que se almacena en equipos y maquinaria por su naturaleza electromagnética de funcionamiento) y el consumo/potencia (consumo total de energía en el periodo de estudio). Además de calcular los kWh se deben agregar los costos de impuestos que apliquen.¹⁸ De una manera más técnica, los cargos de las tarifas finales del suministro básico contratado integran diferentes cargos tarifarios entre los que se incluyen la operación del suministro básico contratado entre los que se pueden mencionar

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

al mínimo mensual de consumo, la demanda contratada, el horario de consumo (periodos de punta, intermedia y de base – cada uno acorde a cada región geográfica para distintas estaciones del año). Adicionalmente, para determinar la demanda máxima de consumo de cada empresa, se deben determinar los criterios para el cobro por capacidad y distribución.¹⁷ En la Figura 3, se presentan los periodos de punta, intermedio y base para la mayor parte de las regiones del país.

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	ENE-20
GDMTH	Gran demanda en media tensión horaria	-	Fijo	\$/mes	464.57
		Base	Variable (Energía)	\$/kWh	0.9394
		Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	1.6606
		Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	1.8905
		-	Distribución	\$/kW	95.87
		-	Capacidad	\$/kW	345.18

Figura 2. Tarifas categoría GDMTH.

Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur			
Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	
Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril			
Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Figura 3. Periodos de punta, intermedio y de base (horarios de consumo para fijación de tarifas).

Por tanto, las tarifas eléctricas en México, se establecen bajo un esquema complejo de variables y ninguna de ellas está enfocada a una reducción de su consumo sino más bien a establecer controles por parte de las empresas a partir de sus recibos de cobro. Lo que se puede entender que no es el alcance de los organismos gubernamentales el buscar mecanismos de ahorros energéticos al interior de las empresas sino más bien a través de la facturación de consumo eléctrico buscan que las industrias reflexionen sobre su consumo eléctrico y establezcan políticas para generar o controlar su consumo de energía reactiva a través de un cargo por demanda.¹⁹ Díaz-Bautista (2005) señala que México requiere fortalecer su sector eléctrico y la regulación del mismo bajo un esquema económico, técnico y político complejo para poder mantener la regulación efectiva del sector y contar con un suministro suficiente de energía eléctrica.²⁰

2.3 FACTOR DE POTENCIA (fp)

El factor de potencia (fp) es un concepto dado a la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), en otras palabras, es una medida de la eficiencia o rendimiento eléctrico de un sistema eléctrico que trabaje en corriente alterna (CA). Donde la P son los kilovatios (kW) de consumo dentro de un circuito y la S son los kilovoltio-amperios (kVA) de las líneas de alimentación. Dentro de las empresas, la presencia de grandes equipos y maquinarias con motores, transformadores, lámparas, entre otros, propicia que las cargas industriales sean de carácter reactivo que con su sola presencia obliga que junto a la P se añada el de una potencia llamada reactiva (Q) que tradicionalmente es suministrada por la CFE. La Q no produce un trabajo físico en los equipos y maquinarias, pero es necesaria para producir el electromagnetismo necesario para que funcionen, por lo que un bajo fp puede generarse, si la cantidad de equipos y maquinarias son significantes que se puede traducir en una mala planificación y operación del sistema eléctrico de la empresa que puede causar diversos inconvenientes a la misma, entre los que podemos mencionar:¹⁹

- Aumento en la intensidad de corriente.
- Incrementos de potencia y reducción de la vida útil de los equipos y maquinarias.
- Aumentos en sus facturas de consumo por electricidad.

Técnicamente, el fp ideal es de un valor de 1.0, lo que significa, que un equipo o maquinaria es altamente eficiente debido a que logra transformar completamente la energía eléctrica ya sea en trabajo, calor o en luz, esto es, que el rendimiento es máximo. Si el valor de $fp = 0$, entonces no se tendría ninguna eficiencia.²¹

$$fp = \frac{P}{S} \quad (1)$$

2.3.1 Potencia aparente, potencia activa y potencia reactiva

La potencia aparente (S), también es llamada Potencia Eléctrica Total (energía absorbida), indica el rendimiento de un equipo o maquinaria y se obtiene de la suma de la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q):²²

- **Potencia Activa.** Es la energía útil que produce trabajo.
- **Potencia Reactiva.** Es una potencia de pérdidas que es utilizada para generar los campos magnéticos requeridos por los aparatos eléctricos.
- **Potencia Aparente.** Es la cantidad total de potencia que consume un equipo eléctrico.

Mediante las siguientes expresiones matemáticas y el triángulo de potencias se relacionan los diferentes tipos de potencia:

$$S = P + Q \quad (2)$$

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

Donde V = voltaje de la corriente, expresado en volt; I = intensidad de la corriente eléctrica, expresado en ampere, φ = ángulo o factor de potencia.

2.4 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA

Comúnmente en la industria se emplean motores, transformadores y otros equipos y maquinarias que trabajan con motores trifásicos que no siempre operan a plena carga y presentan factores de potencia bajos. Por lo que determinar los valores de las cargas en los equipos y maquinarias son la base para establecer programas de ahorro (eficiencia energética) en la industria y servicios en su consumo eléctrico. Principalmente se contemplan acciones de ahorro como la sustitución de los motores sobrecargados por unos de alta eficiencia o la aplicación de técnicas más eficientes. Sin embargo, estas acciones parten de poder determinar las potencias de salida de los procesos.²³

El objetivo de un plan de eficiencia energética es reducir las potencias y energías demandadas por un sistema eléctrico dentro de una organización sin que afecte sus operaciones normales. Dentro de este panorama, los estudios de eficiencia deben considerar:²⁴

- Ayudar a la sostenibilidad del sistema y medio ambiente mediante la reducción de emisiones de CO₂ al reducir la demanda de energía.
- Mejorar la gestión técnica de las instalaciones aumentando su rendimiento y evitando paradas de procesos y averías.
- Reducción, tanto del coste económico de la energía como del de explotación de las instalaciones.

Así mismo y desde un punto de vista técnico, los programas de eficiencia energética buscan lograr implementar una instalación eléctrica eficiente, la cual debe contemplar:

- Gestión y optimización de la contratación.
- Gestión interna de la energía mediante sistemas de medida y supervisión.
- Gestión de la demanda.
- Mejoras de la productividad mediante el control y eliminación de perturbaciones.

En la Figura 4, se presenta un esquema visual de un plan de eficiencia energética desde un punto de vista técnico donde se observan las relaciones de las acciones a seguir para lograr su implementación en una organización.²⁴

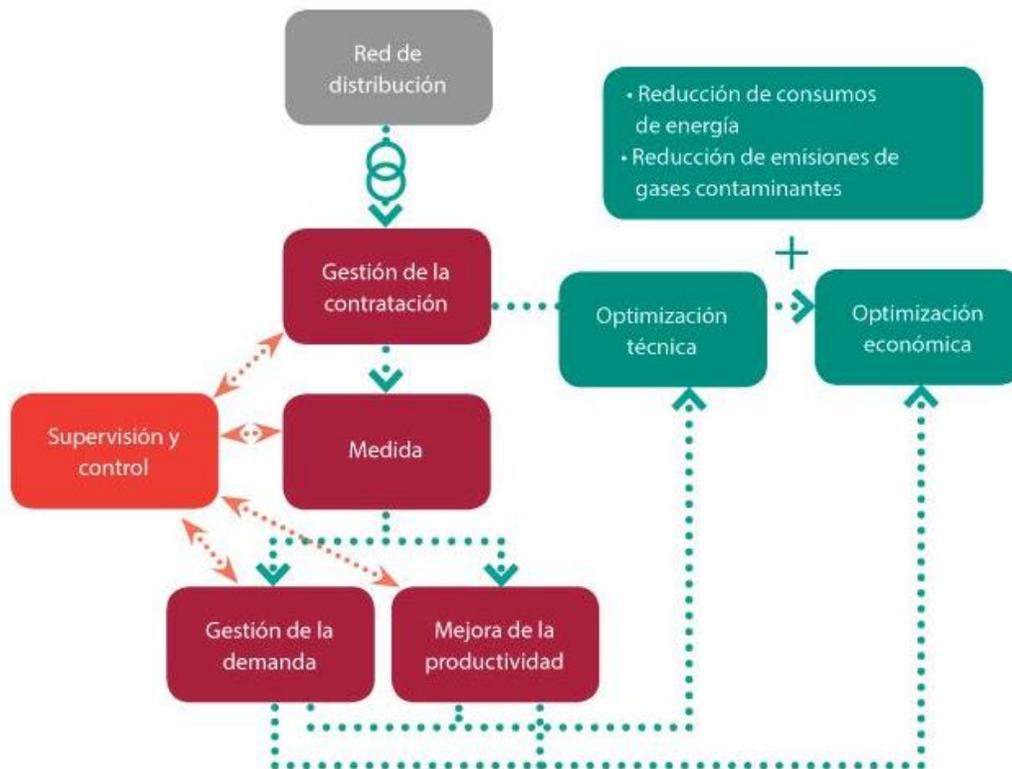


Figura 4. Mapa conceptual de eficiencia energética eléctrica.

2.5 INSTALACIONES Y CONEXIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

La instalación eléctrica de una empresa puede ser de media, alta o baja tensión de manera tal que un diseño inadecuado del sistema puede provocar desde el paro temporal de las operaciones de la empresa hasta accidentes y daños materiales de consideración. En México, las instalaciones eléctricas industriales se encuentran estrictamente

reguladas y las normas que las cubren abarcan toda la gama de opciones de instalaciones eléctricas industriales en media tensión o en baja tensión que pueden operar en el país bajo la NOM-001-SEDE 2012.²⁵

La acometida eléctrica en una industria contempla la instalación de varios elementos como: una subestación eléctrica, interruptores termo magnéticos, interruptores electromagnéticos, fusibles, apartar rayos, entre otros, además de la consideración de la totalidad de los circuitos de fuerza, de iluminación y de sistemas especiales para su operación. Todos estos elementos antes mencionados son parte del estudio de factor de potencia de una industria que permiten establecer planes de eficiencia energética.

En la Figura 5 y 6 se presentan ejemplos de subestaciones eléctricas compactas industriales.²⁵



Figura 5. Subestación eléctrica tipo compacta dentro de una industria.



Figura 6. Subestación perfectamente instalada con su conexión eléctrica con su correcto enrutamiento.

Dentro de este panorama, una instalación eléctrica debe estar protegida de sobrecargas y cortocircuitos que pueden causar daños a los equipos y maquinarias, sobretodo en sus motores integrados o en el cableado. En particular, los motores y maquinaria deben instalarse conforme la legislación vigente para evitar accidentes y asegurar su correcto funcionamiento con un factor de potencia adecuado. Otro factor a considerar son los conductores de conexión eléctrica que deben tener una medida de sección mínima en función de la cantidad de motores instalados, con objeto de evitar calentamientos excesivos. Algunos criterios que se pueden considerar son:²⁶

1. Si hay un solo motor, los conductores se dimensionarán a una intensidad de 125% de la intensidad a carga completa del motor.
2. Si se trata de motores de rotor devanado, en la conexión eléctrica de estos con el interruptor o dispositivo de arranque, los conductores tienen que estar igualmente dimensionados para el 125% de la intensidad a plena carga del rotor.
3. En motores de rotor para servicio intermitente, dependiendo del tiempo continuado de funcionamiento, la conexión eléctrica de estos al dispositivo de arranque podrá disminuirse la sección, pero nunca podrá ser inferior al 85% de la intensidad a plena carga en el rotor.
4. En conexiones eléctricas de conductores que alimentan a varios motores, el criterio será que los conductores estén dimensionados para una intensidad igual a la suma del 125% de la intensidad a plena carga del que tenga más potencia más la intensidad a plena carga del resto de motores.

En particular, en los motores trifásicos se deben montar elementos de protección que eviten caídas de tensión según el arrancador en estrella o triangulo que maneje para evitar cualquier accidente o incluso perjudicar al motor. Comúnmente se instalan protectores de caída de tensión para varios motores bajo lo siguiente:

- Cuando la suma de potencia de todos los motores no sea superior a 10 kilovatios, y todos los motores o máquinas se encuentren en un mismo local.
- Cuando todos los motores instalados en un mismo local, y cada uno de ellos vuelvan al estado inicial de arranque tras la caída de tensión.
- En los casos en que los motores arranquen automáticamente en las condiciones preestablecidas, no se exigirá dispositivo de protección contra la falta de tensión, siempre que quede totalmente excluido un posible accidente por arranque espontáneo.
- Para que los motores que tengan que llevar limitadores de potencia absorbida en el arranque queden incluidos en la excepción anterior, tienen que volver de forma automática a la posición de inicio o arranque si se ha producido una parada del motor por falta de tensión.

En la Figura 7 y 8 se presentan las conexiones tipo estrella y delta (triangulo). Ambas conexiones se emplean para tener mejores rendimientos de los motores debido a que se puede modificar su velocidad. La conexión

estrella se caracteriza porque las fases o bobinas están conectadas de tal manera que cada una se comportará como si fuera monofásica y producirá un voltaje simple. En la conexión delta las fases o bobinas estarán conectadas de tal manera que producen un voltaje más desfasado.²⁷

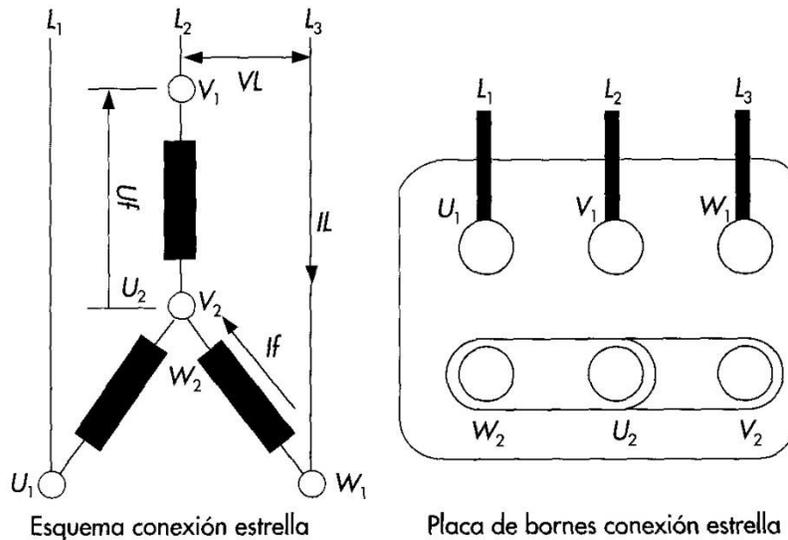


Figura 7. Conexión tipo estrella y su forma de conexión a la placa de bornes.

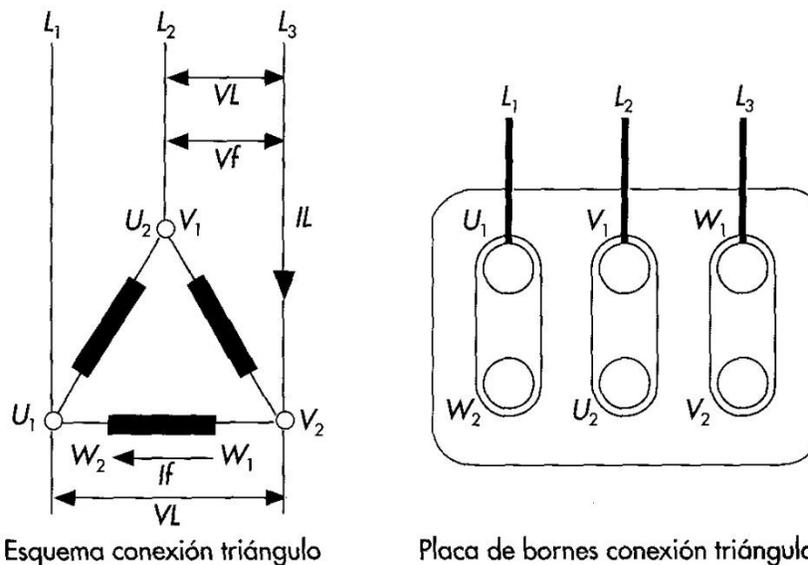


Figura 8. Conexión tipo delta (triángulo) y su forma de conexión a la placa de bornes.

Un aspecto importante de cuidado en las instalaciones eléctricas industriales se refiere a la distribución de potencia donde tres arreglos se pueden emplear.²⁸

- **Sistema radial simple.** Es el arreglo más económico para la distribución directa de la potencia a los centros de carga. Sin embargo, se disminuye la potencia para su utilización y si falla la alimentación no se tendrá energía en el resto de la instalación. En la Figura 9, se muestra el esquema básico de este sistema.

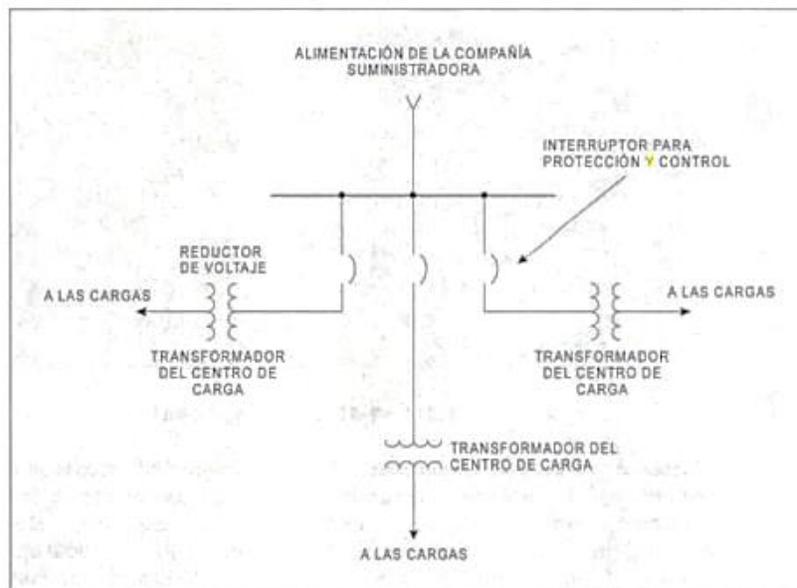


Figura 9. Sistema de distribución radial (simple).

- **Sistema selectivo primario.** Este arreglo tiene un costo superior al sistema radial debido a que proporciona una alimentación alterna a cada centro de carga gracias a que contempla dos líneas que van hacia cada unidad o centro de carga, de tal manera que, si se presenta una falla en las líneas de alimentación, entonces solo algunos centros de carga serán afectados. Lo anterior permite dar un mantenimiento rápido en la línea con falla de tal manera que no se detiene el total de la instalación. En la Figura 10, se muestra este sistema.
- **Sistema selectivo secundario.** Este sistema es básicamente radial primario con enlaces secundarios entre los buses o barras. Este sistema también tiene la desventaja de tener una fuente de alimentación única por lo que si falla se pierde toda la instalación. Sin embargo, tiene la ventaja de que se puede adaptar más de una fuente radial para mantener la corriente en el sistema, ver Figura 11.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

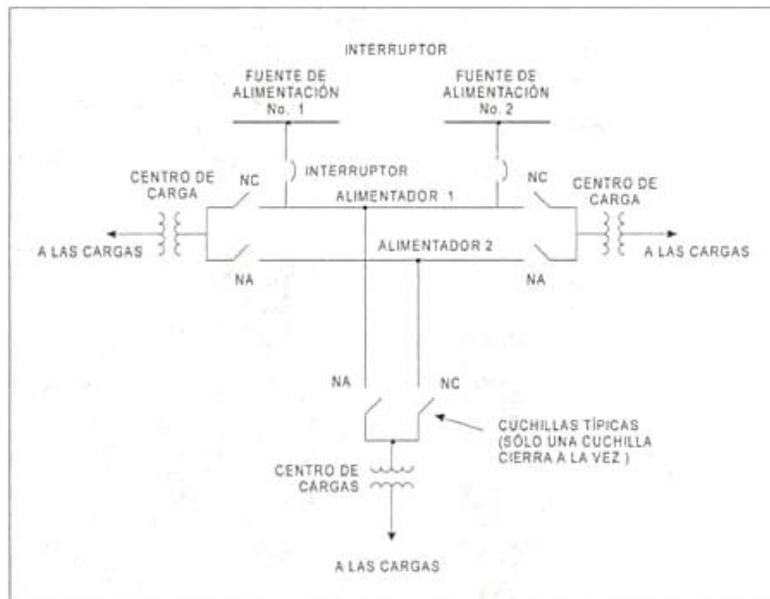


Figura 10. Sistema selectivo primario.

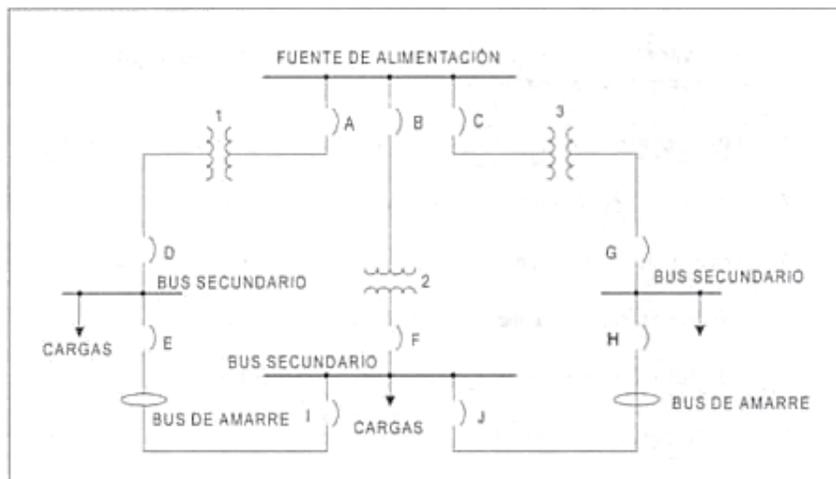


Figura 11. Sistema selectivo secundario.

2.6 MEDIDOR MULTIFUNCIÓN SIEMENS SENTRON PAC3100 (SP3100)

El equipo SENTRON PAC3100 (SP3100) es un dispositivo multifunción compacto (multímetro) de uso industrial que permite el monitoreo de energía de cualquier organización con una simple instalación y puesta en marcha. Tiene la capacidad de realizar la medición y visualización de parámetros de red, ser un contador de energía activa y reactiva, cuenta con una interfaz serial y de comunicaciones en la parte frontal. Entre otras aplicaciones, el SP3100 permite monitorear hasta 25 parámetros de energía y potencia que van desde simples medidores analógicos de voltios y amplificadores hasta instalaciones independientes de subfacturación o asignación costo. Entre las variables de medición que puede monitorear este equipo podemos mencionar: corrientes de tensión, corrientes de voltaje, potencia activa, potencia aparente y potencia reactiva. Adicional a lo anterior, este dispositivo se puede programar en varios idiomas, cuenta con un display gráfico, así como un programa basado en PC, SENTRON PowerConfig, suministrado con el medidor, que se puede utilizar para pre-configurar una o varias unidades. El medidor viene estándar con dos entradas y salidas digitales. Una salida es adecuada para la salida de pulsos para exportar/importar energía real y reactiva. La otra salida se puede controlar desde una externa mediante un registro de comunicación.¹⁸ Una de las aplicaciones relevantes de este medidor es que se puede emplear para poder proporcionar los datos de medición de energía necesarios para los programas de reducción de energía que una organización desee implementar. En la Figura 12, se presenta una imagen del equipo SP3100.²⁹



Figura 12. Medidor multifunción Siemens SP3100.

En la Tabla 2 se muestran las magnitudes que pueden medirse por el equipo SP3100 en función del tipo de conexión: 3P4W (3 fases, 4 conductores) o 3P3W (3 fases, 3 conductores).

Tabla 2. Visualización de magnitudes medidas en función del tipo de conexión.²⁹

Magnitud medida	Tipo de conexión	3P4W	3P3W
Tensión L1-N		✓	
Tensión L2-N		✓	
Tensión L3-N		✓	
Tensión L1-L2		✓	✓
Tensión L2-L3		✓	✓
Tensión L3-L1		✓	✓
Corriente L1		✓	✓
Corriente L2		✓	✓
Corriente L3		✓	✓
Corriente por neutro		✓	
Potencia aparente L1		✓	
Potencia aparente L2		✓	
Potencia aparente L3		✓	
Potencia activa L1		✓	
Potencia activa L2		✓	
Potencia activa L3		✓	
Potencia reactiva L1 (Q1)		✓	
Potencia reactiva L2 (Q1)		✓	
Potencia reactiva L3 (Q1)		✓	
Potencia aparente total de todas las fases		✓	✓
Potencia activa total de todas las fases		✓	✓
Potencia reactiva total Q1 de todas las fases		✓	✓
Factor de potencia total		✓	✓
Frecuencia de red		✓	✓
Energía activa		✓	✓
Energía reactiva		✓	✓
Potencia activa acumulada		✓	✓
Potencia reactiva acumulada		✓	✓

2.6.1 Ejemplos de conexión

- Medición trifásica, cuatro conductores, carga desbalanceada, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente. Tipo de conexión 3P4W, ver Figura 13.

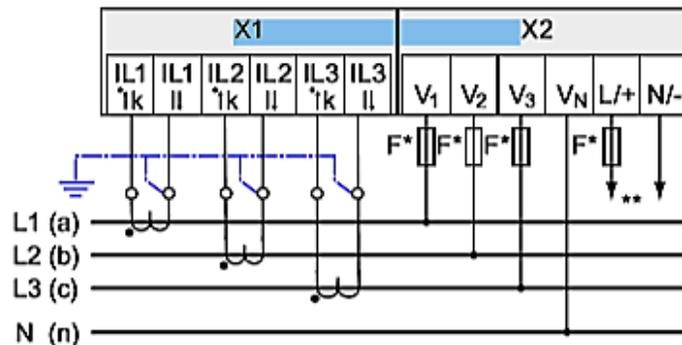


Figura 13. Tipo de conexión 3P4W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente.

- Medición trifásica, tres conductores, carga desbalanceada, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente. Tipo de conexión 3P3W. Ver Figura 14.

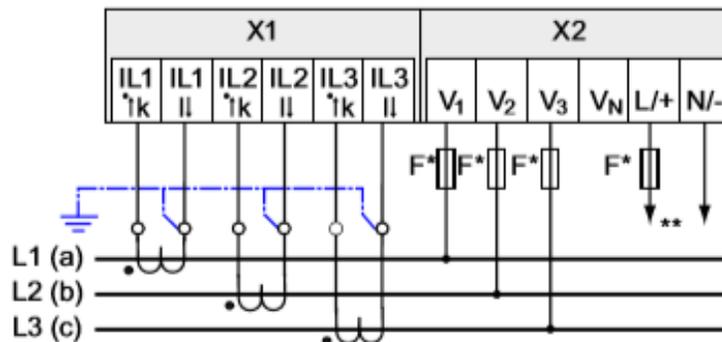


Figura 14. Tipo de conexión 3P3W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente.

2.7 FRESADORA CNC

Las fresadoras son máquinas capaces de realizar una variedad de mecanizados distintos gracias a la incorporación del control numérico (CNC) que se fundamenta en el movimiento de corte llamada “fresa” que se le a una pieza para adquirir una forma específica a través del proceso de arranque de viruta.³⁰ Se cuenta en el mercado de dos tipos de fresadoras:³¹

Fresadora horizontal. Este tipo de maquina permite realizar trabajos de ranurado con diferentes perfiles y utiliza fresas cilíndricas que se montan sobre un eje horizontal accionado por el cabezal de la máquina y apoyado por un extremo sobre dicho cabezal y por el otro sobre un rodamiento situado en el puente deslizante llamado carnero.

Fresadora vertical. En este tipo de máquinas el eje del husillo está orientado verticalmente de manera perpendicular a la mesa de trabajo lo que permite profundizar el corte. Se reconocen dos tipos de fresadoras verticales: las de banco fijo o de bancada y las de torreta o de consola. En una fresadora de torreta, el husillo permanece estacionario durante las operaciones de corte y la mesa se mueve tanto horizontal como verticalmente. En las fresadoras de banco fijo, sin embargo, la mesa se mueve sólo perpendicularmente al husillo, mientras que el husillo en sí se mueve paralelamente a su propio eje.

En la Figura 15 y 16 se presentan el esquema de una fresadora horizontal y vertical, respectivamente.



Figura 15. Fresadora horizontal comercial marca Haas.³²



Figura 16. Fresadora vertical comercial marca JET.

2.7.1 Funcionamiento de la fresadora CNC

El control numérico computarizado (CNC) integrado a maquinas industriales mediante la automatización programable ha permitido realizar trabajos de manufactura complejos como efectuar cortes en círculos, líneas diagonales y otras figuras. Las fresadoras CNC no cuentan con palancas ni manivelas para controlar sus partes móviles como la mesa, el cabezal de corte, el husillo y los carros de desplazamiento lateral y transversal, En la Figura 17, se muestran las partes principales de la fresadora. El movimiento de estas partes se realiza mediante unas secuencias de comandos alimentados a la maquina por medio de una pantalla insertada en un panel de controles y una caja metálica donde se alojan los componentes eléctricos y electrónicos que regulan el funcionamiento de los motores.³³

El CNC es un componente electrónico que básicamente es una computadora que permite controlar los movimientos de la fresadora con el uso de su propio software (según la marca de la maquina será el software que emplee) permitiendo una interfaz entre los componentes electrónicos y los motores o servomotores de accionamiento para lograr realizar todas las operaciones de fresado posibles. En la Figura 18, se muestra un esquema de una fresadora convencional y los movimientos de control que el CNC puede lograr en los 3 ejes de desplazamiento: (i) el eje horizontal (x), es paralelo a la superficie de sujeción y se asocia con el movimiento en el plano horizontal longitudinal de la mesa; (ii) el eje horizontal transversal (y), forma un triedro con los demás ejes y está asociado al movimiento de profundidad de la mesa de fresado; (iii) el eje vertical (z) donde va montada la fresa y donde se tiene la potencia de corte, además está asociado al movimiento vertical (subir y bajar) del cabezal.

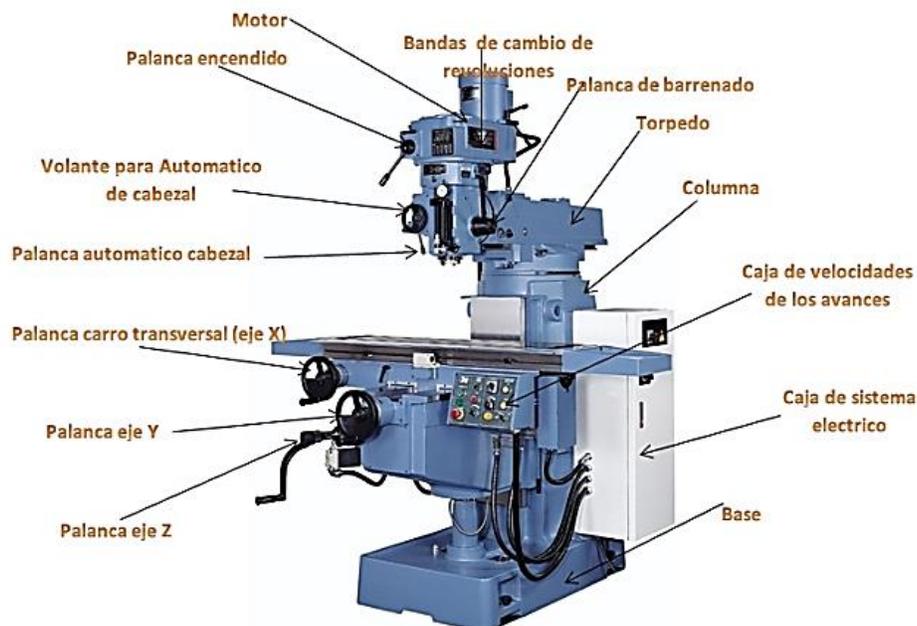


Figura 17. Fresadora vertical y sus partes principales.³⁴

Sin embargo, y por la complejidad del tipo de pieza que se puede maquinarse en una fresadora CNC se han establecido ejes complementarios llamados eje B y eje W, los cuales son controlados de forma independiente por el movimiento de mesas giratorias y/o cabezales orientables para poder abarcar diferentes planos y ángulos de aproximación. En la Figura 19, se observan todos los ejes de trabajo posibles en una fresadora y sus componentes: (1) columna de soporte principal, (2) pieza a fresar, (3) mesa con movimiento en los ejes x e y, (4) fresa, (5) cabezal de corte donde se encuentra el motor del husillo, (6) panel de control CNC, (7) sistema de enfriamiento a base de líquido refrigerante. Adicionalmente en la Figura 19 se representan todos los ejes de trabajo: (a) ejes x, y, z – ejes principales de desplazamiento, (ii) eje B – eje complementario de desplazamiento giratorio del cabezal de corte y (iii) eje W – eje complementario de desplazamiento longitudinal del cabezal de corte.³³

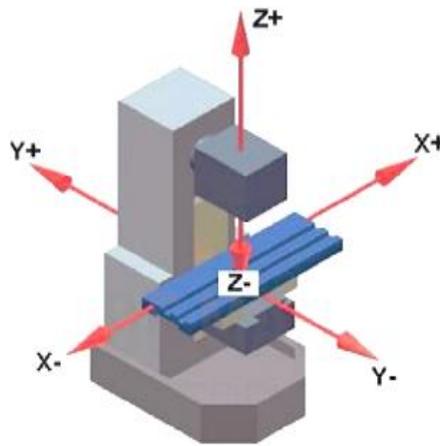


Figura 18. Esquema de una fresadora típica y sus ejes de movimiento.

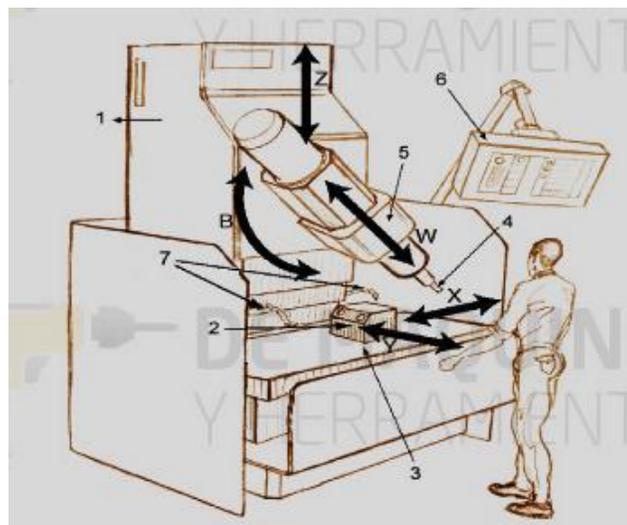


Figura 19. Componentes básicos de una fresadora CNC: partes principales y ejes de movimiento.

Para poder optimizar el uso de una fresadora no solo se debe dominar el funcionamiento mecánico de la fresadora, sino también el funcionamiento eléctrico y electrónico que incluye el dominio de un ordenador con el cual se programan las ecuaciones matemáticas que definen el proceso a maquinar. Lo anterior, se define a través del procesamiento de datos por medio de un controlador y de un sistema computarizado (software de control). Este software de control trabaja como una interfaz entre la máquina y el controlador. En la Figura 20, se muestra un esquema donde se representa la interfaz del controlador con la fresadora.³⁵

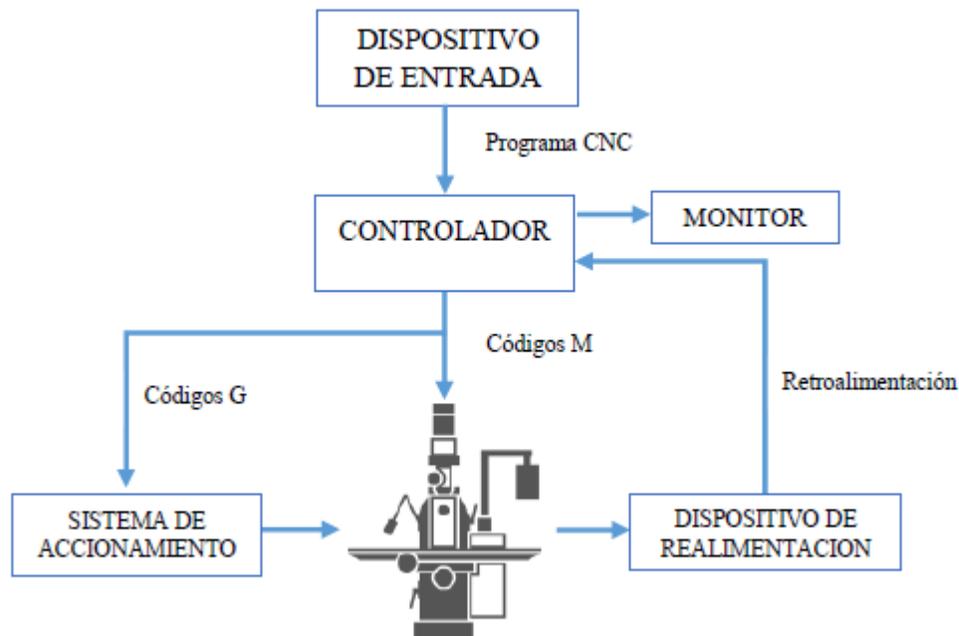


Figura 20. Diagrama de bloques de una fresadora con la interfaz de un controlador y la máquina.

Dentro de este panorama, el software que se utilizan en las fresadoras CNC está basado en programas CAD (diseño asistido por computadora) y CAM (fabricación asistida por computadora). En general el proceso de interfaz considera el uso de:³³

1. Programa CAD: realiza el diseño de la pieza.
2. Programa CAM: calcula los desplazamientos de los ejes para el maquinado de la pieza y agrega las velocidades de avance, velocidades de giros y diferentes herramientas de corte.
3. Software de control (incluido con la máquina): recibe las instrucciones del CAM y ejecuta las órdenes de desplazamiento de las partes móviles de la fresadora de acuerdo con dichas instrucciones.

Dentro de los campos de aplicación de una fresadora CNC se encuentra la industria automotriz (diseño de bloques de motor, moldes y componentes diversos), la aeroespacial (turbinas de aviones), y de la electrónica (elaboración de moldes y prototipos) dedicadas a la fabricación de maquinaria, instrumental y componentes eléctricos. Aunque, dependiendo de la complejidad de la máquina y de la programación efectuada, las fresadoras CNC pueden funcionar de manera automática, normalmente se necesita un operador para cambiar las fresas, así como para montar y desmontar las piezas de trabajo, así como de un mantenimiento adecuado.

En general, el mantenimiento de este tipo de equipo se basa en una media de trabajo de 40 horas semanales con un movimiento diario de limpieza general con aire seco a presión y lubricación del eje z; un mantenimiento semanal con la aspiración de la caja de control y el filtro, revisión de niveles de aceite y engrasado de los patines; un mantenimiento mensual con la limpieza de los ejes x e y.³⁶

2.8 COMUNICACIÓN CON CENTRO DE CONTROL

El protocolo serial es el medio de comunicación con el ModM y la plataforma de la empresa. El protocolo serial es frecuentemente empleado en el campo de la automatización debido a que se encuentra en muchos dispositivos por su gran compatibilidad y su capacidad de poder utilizar una interfaz de hardware, además de que ofrece las ventajas de ser económico y de fácil implementación.

2.8.1 Descripción de protocolos seriales

Son arquitecturas maestro-esclavo que permite ejecutarse simultánea y continuamente a diferentes velocidades donde la transferencia de datos se realiza por medio de interfaces seriales.

2.8.2 RS-232, RS-422 y RS-485

Las comunicaciones industriales con fines de automatización se basan en conexiones locales para equipos terminales – como impresoras, controladores lógicos programables (PLC) o microcontroladores – que permitan la comunicación con computadoras y periféricos como dispositivos de almacenamiento USB. Este tipo de comunicaciones se realiza con cables de comunicación (compuestos por varios cables con objeto fin diferente) que une las terminales de equipos emisores y receptores y viceversa. Las letras RS significa estándar recomendado (*recommended standard*) seguidas de un número de identificación acorde a sus propias características de interfaz para la transmisión de datos digitales. En general, estos estándares de comunicación especifican una serie de conexiones y señalización para comunicar equipos terminales de datos (DTE) o equipos terminales de circuitos de datos (DCE). Se pueden identificar diferencias bajo lo siguiente:^{37, 38, 39,}

- **RS-232.** El estándar RS-232 es mejor conocido como un puerto COM de computadora normal o puerto serie (aunque Ethernet, FireWire y USB también pueden considerarse como un puerto serie). Su naturaleza de comunicación es serial por lo que los datos se transmiten y reciben símbolo a símbolo. Permite

interconectar equipos terminales como impresoras o controladores lógicos programables (PLC) ya que pueden transformar información digital en señales eléctricas formadas por pulsos o viceversa. En la Figura 21 se muestran los tipos de terminales macho-hembra de un cable de conexión RS-232 de 9 agujas para interfaz de impresora con CPU convencional.

- **RS-422.** El estándar RS-422 mantiene compatibilidad con el estándar RS 232 a través de un adaptador mini-DIN-8 o USB. El RS-422 es más resistente a la interferencia electromagnética debido a que la señal no se degrada con la longitud del cable y permite un mayor volumen de transferencia de datos a mayor velocidad de hasta 10 Mb/s a los 12 m de distancia. Su comunicación es asíncrona doble simultánea en banda base digital. En la Figura 22 se observa un cable de conexión RS-422 con terminal macho-macho de 9 agujas.
- **RS-485.** El estándar RS-485 es una evolución del estándar RS-422 pero con aplicaciones ampliadas por su pertinencia en la conexión de dispositivos de alerta y control de video vigilancia. Permite una interfaz balanceada dado que sus componentes están distribuidos entre los dos conductores de una línea de transmisión. Tiene la ventaja de poder operar en tres niveles: dos niveles lógicos y un tercer estado denominado de “alta impedancia”. Este estado adicional le permite al estándar RS-485 estar conectado hasta con 32 dispositivos en una sola línea bajo ciertas limitaciones de operación. En la Figura 23, se presenta un tipo de terminal macho de 9 agujas de estándar RS-485. En la Figura 24, se muestra un adaptador de RS-485 a RS-232.



Figura 21. Terminales de conexiones RS-232 con terminación macho-hembra (fuente: www.erard.com).

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético
de una Fresadora CNC Universal



Figura 22. Cable con conexiones RS-422 con terminación macho-macho (fuente: www.videoplusfrance.com).



Figura 23. Terminal de conexión RS-485 con terminación macho (fuente: www.mercadolibre.com).



Figura 24. Adaptador RS-232 a RS-485.

En la Tabla 3 se identifican algunas características de cada puerto donde básicamente sus diferencias, más que físicas, son de operatividad pues se distinguen de sus capacidades de transmisión de datos, distancias de comunicación y el número de dispositivos de interfaz.³⁸

Tabla 3. Identificación y acción realizada por los registros.

Nombre del puerto	RS-232	RS-422	RS-485
Tipo de transferencia	Duplex completo	Duplex completo	Half duplex (2 cables), full duplex (4 cables)
Distancia máxima	15 metros a 9600 bps	1200 metros a 9600 bps	1200 metros a 9600 bps
Contactos en uso	TxD, RxD, RTS, CTS, DTR, DSR, DCD, GND *	TxA, TxB, RxA, RxB, GND	Datos A, Datos B, GND
Topología	Punto a punto	Punto a punto	Multipunto
Max. Cantidad de dispositivos conectados	1	1 (10 dispositivos en modo de recepción)	32 (con repetidores más grandes, generalmente hasta 256)

2.8.3 Descripción de la interfaz RS-485

Es el estándar de interfaz de mayor aplicación en la industria debido a que utiliza una topología multipunto, que le permite conectar varios receptores y transmisores de hasta 32 dispositivos al mismo tiempo, pero solo un transmisor puede estar activo. El estándar RS-485 tiene la capacidad de conectar hasta 256 dispositivos con el uso de repetidores adicionales y amplificadores de señales. También se le conoce como interfaz EIA-485. Hay dos tipos de estándar RS-485:

- RS-485 con 2 contactos, funciona en modo semi-dúplex con la capacidad de solo transmitir o solo recibir.
- RS-485 con 4 contactos, funciona en modo dúplex completo con la capacidad de recibir y transmitir simultáneamente.

En la Figura 25 se presenta el esquema básico de conexión de la interfaz RS-485 y en la Figura 26 se presenta una topología RS-485.

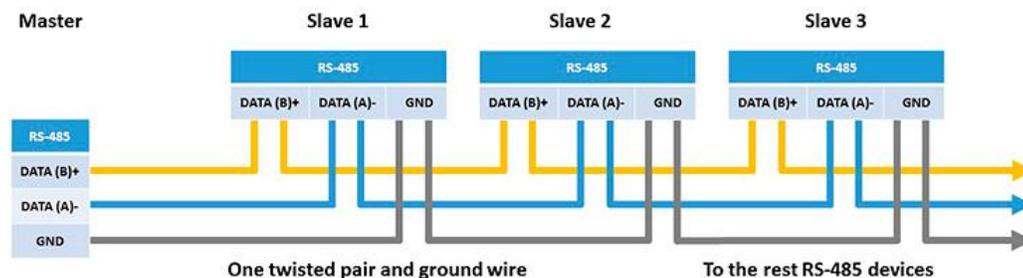


Figura 25. Esquema básico de conexión de la interfaz RS-485.

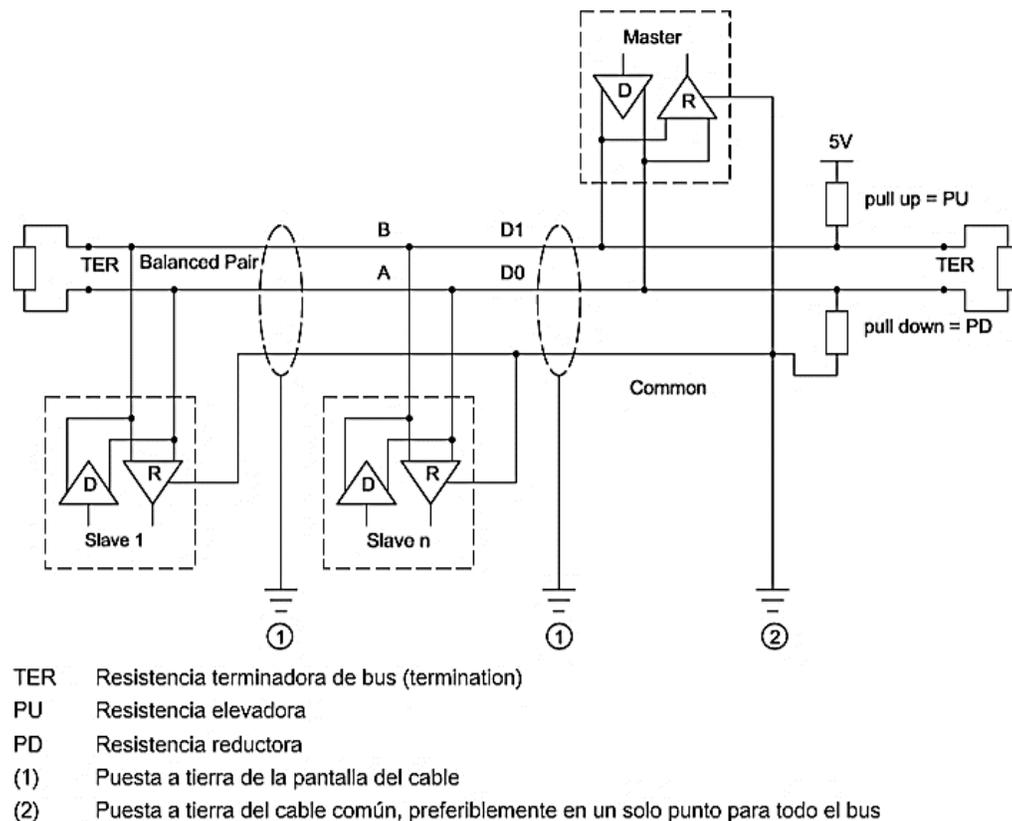


Figura 26. Esquema de conexiones: Topología RS-485 general.

2.9 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

El transformador de corriente (TC) es un dispositivo diseñado para suministrar la corriente adecuada a los aparatos de medición y/o protección cuya principal función es la reducir las corrientes de un sistema eléctrico a valores no peligrosos y manejables con el fin de permitir el empleo de aparatos de medición normalizados. Por ejemplo, el uso de un TC para reducir amperajes de corriente mayores a 10 A hacia amperajes de 5 A y permitir la operación de equipos como el SP3100. Un TC es un aparato estático que genera tensiones e intensidades diferentes entre una corriente de entrada y otra de salida, pero de igual frecuencia. Un TC está basado en los principios de inducción electromagnética y consta dos chapas metálicas (núcleo) que rodean dos devanados, llamadas primario y secundario, que provocan un flujo alterno en el circuito magnético. Al conectar un devanado primario a una corriente alterna (receptor) se logra una disminución de corriente en el devanado secundario. El primario de dicho transformador está conectado en serie con el circuito que se desea controlar, en tanto que el secundario está conectado a los circuitos de corriente de uno o varios aparatos de medición, relevadores o aparatos análogos, conectados en serie. Un TC puede tener uno o varios devanados secundarios embobinados sobre uno o varios circuitos magnéticos separados.⁴⁰⁻⁴³ En la Figura 27, se muestra el principio de funcionamiento y conexión de un

TC, donde se aprecia como la corriente corre en los devanados y como la corriente se suministra al transformador (bobina B1) y como se conecta a un receptor Z (bobina B2).⁴³

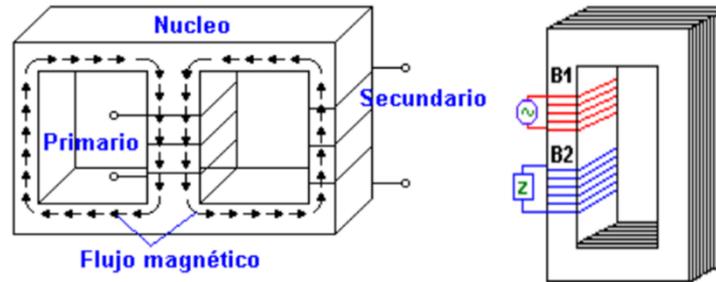


Figura 27. Flujo eléctrico en un TC (izq.) y entrada y salida de corriente de un TC (der.)

2.10 HARDWARE IoT

Los dispositivos hardware controladores para IoT son elementos fabricados con electrónica modular que permiten medir alguna variable y poder interactuar con el exterior, esto es, en un entorno se logran recabar mediciones de un parámetro, comunicarlos a la nube y en otro entorno externo poder apreciar estos valores. Dentro del campo de esta tecnología se pueden reconocer cuatro clases:⁴⁴

- Es una clase de controladores embebidos de tamaño pequeño de 8/16/32 bites La empresa Arduino es especialista en este tipo de dispositivos.
- Los controladores embebidos de esta clase son de tamaño medio de 32/64 bites. Los microcontroladores de Atheros y ARM son ejemplos de estos equipos de control. Se caracterizan por manejar sus propias librerías.
- Esta clase la conforman las plataformas IoT que cuentan con más capacidad que los sistemas completos de 32 y 64 bites. Raspberry Pi o BeagleBone son ejemplos de estos microcontroladores. Tienen la capacidad de conectarse vía Bluetooth o conectarse a internet.
- Otra clase la conforman los controladores lógico programables (PLC) o cualquier otro dispositivo que se pueda conectar a internet. Tienen la característica de ser empleado en operaciones donde se requiera obtener datos como de un medidor de energía o de cualquier máquina con interfaz de red.

En la Figura 28 y 29, se presentan vistas de microcontroladores Arduino y Raspberry Pi para IoT, respectivamente.



Figura 28. Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega328 (fuente: electrocrea.com).



Figura 29. Raspberry Pi: microcontrolador ARM Cortex-A53 (fuente: electrocrea.com).

2.11 COMUNICACIÓN EN NUBE (CLOUD COMPUTING)

Nace del término anglosajón *cloud computing* que hace referencia al sistema de almacenamiento en la nube y consiste en un ambiente de almacenamiento a distancia a través de internet habitualmente compuesto por un grupo de servidores informáticos. En otras palabras, la comunicación se traslada de una organización o de la computadora individual de un particular a una ubicación remota y externa deslocalizado físicamente para el usuario y ajeno a sus entornos cotidianos. Este servicio es capaz de poder transmitir datos en forma de videos, texto, o imágenes, así como también aplicaciones completas o partes de aplicaciones e incluso sistemas operativos completos. Algunos servidores que ofrecen este servicio de manera gratuita son Google Drive, iCloud, DropBox o Amazon Cloud Drive, sin embargo, están limitados en su capacidad y tienen diferencias de almacenamiento entre ellos. Para el caso de empresas, se pueden emplear los servidores antes descritos, pero en modalidad de membresía lo que les permite una mayor capacidad de almacenamiento y ahorrarse la necesidad de instalar servidores propios que requieren de mantenimiento y un área específica de informática dentro de su organización. Una de las grandes

ventajas de este tipo de servicios es que se puede almacenar y acceder a datos informáticos en tiempo real lo que beneficia la productividad de una organización y sobre todo para disponer de información de gran volumen de bites.^{45, 46} En la Figura 30, se presenta el IDE de la nube del servicio de Google Drive para un usuario individual. Este servicio ofrece 17GB de almacenamiento de forma gratuita, pero da la opción de poder adquirir más almacenamiento bajo un plan de pago.



Figura 30. Cloud Computing de Google Drive para un usuario.

2.12 SOFTWARE DE CONFIGURACIÓN PARA COMUNICACIÓN SERIAL

2.12.1 ModbusMAT

Es un programa IDE que permite reconocer la comunicación con el protocolo serial empleando el programa *ModbusMAT 1.1.exe*

Es un software *freeware*. En la Figura 31, se muestra un ejemplo del IDE ModbusMAT.⁴⁷

Ingeniería Mecatrónica
 Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético
 de una Fresadora CNC Universal

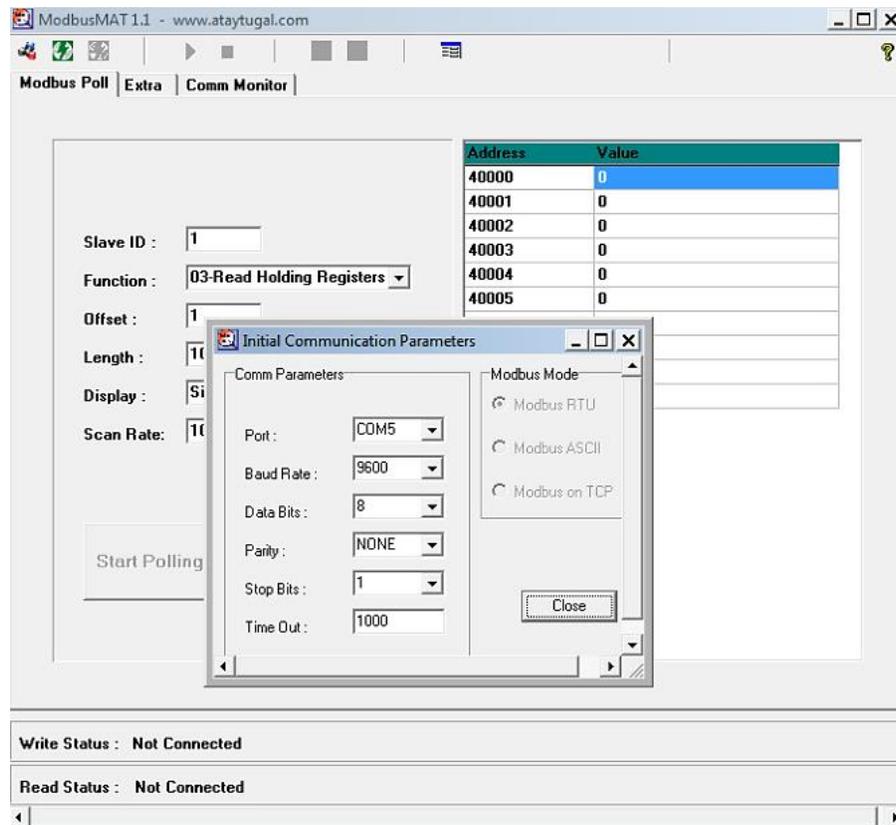


Figura 31. IDE software ModbulMAT 1.1 exe.

2.12.2 Arduino

Arduino es una empresa que su propia plataforma electrónica de código abierto para emplear hardware y software de manera simple. Arduino es capaz de manipular dispositivos mediante instrucciones para microcontroladores. Arduino usa su propio lenguaje de programación basado en lenguaje Wiring.⁴⁸ En la Figura 32, se observa una captura de pantalla propia al abrir el IDE de Arduino.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

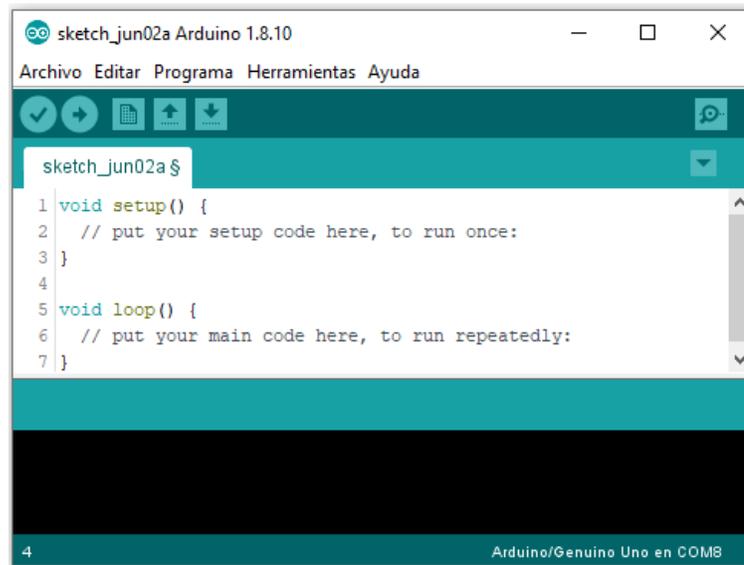


Figura 32. IDE software Arduino

2.12.3 LabVIEW

Es un software de programación grafica que permite visualizar aplicaciones mediante configuración de hardware, datos de medidas y depuración. LabVIEW permite integrar hardware de cualquier proveedor y diseñar interfaces para los usuarios. Es un software que tiene la capacidad de poder crear interfaces para aplicaciones con Arduino.⁴⁹ En la Figura 33, se observa una captura de pantalla propia al abrir el IDE de LabVIEW.

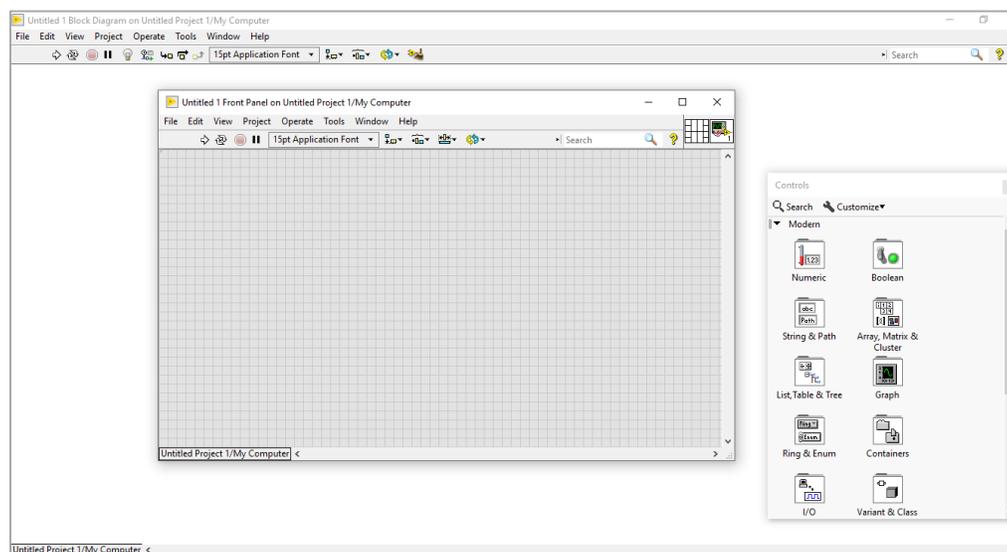


Figura 33. IDE software LabVIEW.

III. METODOLOGÍA

3.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA MAQUINA FRESADORA CNC VERTICAL

Para el desarrollo del proyecto se empleó una fresadora CNC universal vertical modelo XK7130A con procesador GSK. En la Figura 34, se presenta la máquina fresadora empleada en este estudio.

Para validar el monitoreo de consumo de energía eléctrica se operó la máquina fresadora con carga y al vacío (sin carga). Los materiales empleados para las condiciones de carga fue una pieza de metal (de acero aleado suave con porcentaje de 0.2-0.3% de carbón, medidas de 11x7x3 cm) y una pieza de madera (madera aserrada de pino, medidas de 11x8x5 cm). Las condiciones de operación de la fresadora con carga y al vacío fueron:

- Velocidad de giro en el cortador: 1750 rpm.
- Velocidad de avance de la bancada: 25%.
- Tipo de cortador: piña de desbaste de 5 hilos.



Figura 34. Fresadora CNC Universal de estudio.

3.2 DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE ENERGÍA SENTRON PAC3100 (SP3100)

Para el desarrollo del sistema integral de monitoreo de energía eléctrica se empleó un medidor multifunción SIEMENS SENTRON PAC3100 (SP3100) equipado con interfaz para comunicación serial. En la Figura 35, se muestra la vista frontal del dispositivo empleado en este trabajo.

El dispositivo de monitoreo de energía se instaló dentro del taller de manufactura del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga entre el registro eléctrico principal de control del taller y la fresadora. En la Figura 36, se enseña una vista del taller de manufactura. En la Figura 37, se muestra un *lay-out* del lugar de instalación del dispositivo.



Figura 35. SP3100: vista frontal.

3.3 MODULO DE COMUNICACIÓN MoTeBo® (ModM)

El módulo de comunicación MoTeBo® (ModM) consta de un sistema de IoT para conectividad celular acoplado a una estructura de soporte de diseño propio de la empresa para su ajuste a superficies verticales u horizontales. El ModM incluye un microcontrolador Flash de 32 Bits basada en un procesador Arm®, un modem y un módulo de IoT con antena para conectividad con placas de expansión SIM para celular y conectividad a la nube mediante ancho de banda en la web. Es un dispositivo capaz de poder transmitir en tiempo real los datos de un proceso a la nube. Es operable en sistemas operativos Windows comerciales mediante la instalación de complementos para el procesador Arm®, cuenta con una interfaz para micro cable USB y cuenta con un entorno de desarrollo integrado (IDE) y software precargado propios de la empresa. Sin embargo, la comunicación con la nube para fines particulares requiere del desarrollo de la interfaz y código de programación para lograr la operatividad

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

del dispositivo empleado. Los componentes principales son: antena con conector SMA, interfaz para USB, SIM, modem IoT, indicadores de buen funcionamiento y buena conectividad de modem. Todos los componentes anteriores bajo una carcasa de cubierta de soporte. En la Figuras 38 a la 40, se presentan diferentes vistas del ModM empleado en el proyecto.

El ModM se empleó para lograr la transferencia de datos de consumo energético en tiempo real hacia la nube. El acceso a internet fue provisto por la empresa y se realizó mediante una tarjeta inteligente desmontable SIM (dimensiones ajustadas) del proveedor de internet AT&T (condiciones de navegación no presentados en este documento).



Figura 36. Taller de manufactura del I. T. Pabellón de Arteaga.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

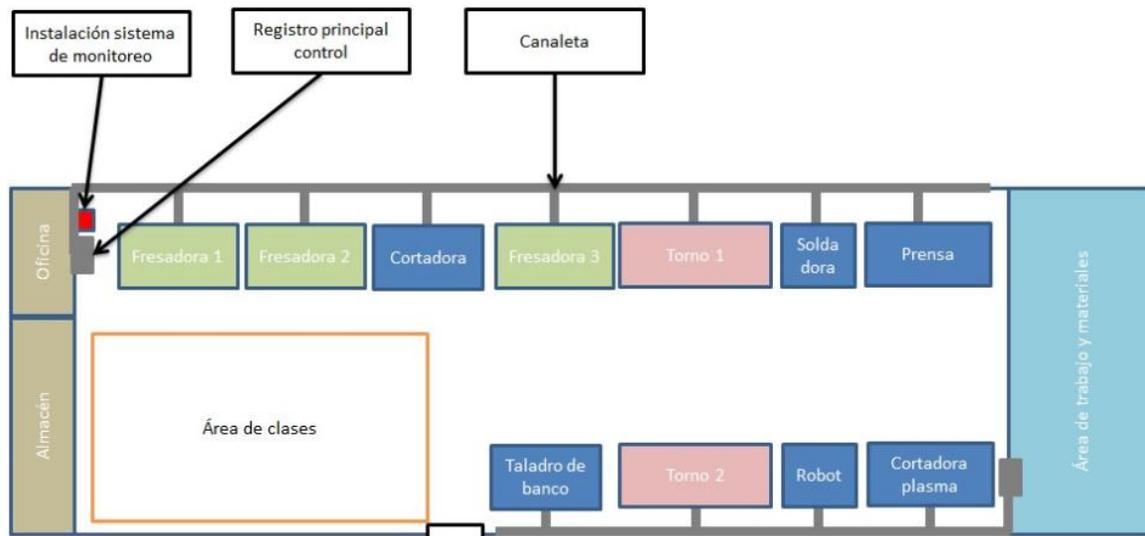


Figura 37. Lay-out de instalación del SP3100 en el Taller de Manufactura.



Figura 38. Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista de planta).



Figura 39. Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista alzada).



Figura 40. Hardware IoT: diseño propio de la empresa (vista posterior).

3.4 COMUNICACIÓN CON LA NUBE

Para lograr la transferencia de datos en tiempo real hacia la nube se empleó el ModM. El almacenamiento de datos se realizó por medio de la plataforma MoTeBo[®] de diseño propio de la empresa. La plataforma es un IDE de autoría propia de la empresa de comunicación con la nube y empleada para recibir toda la información obtenida en tiempo real de procesos de consumo energético. Por derechos de propiedad no se describe las características de almacenamiento y funcionalidad de la plataforma.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

En la Figura 41 y 42 se presentan unas vistas del IDE de la plataforma MoTeBo®.

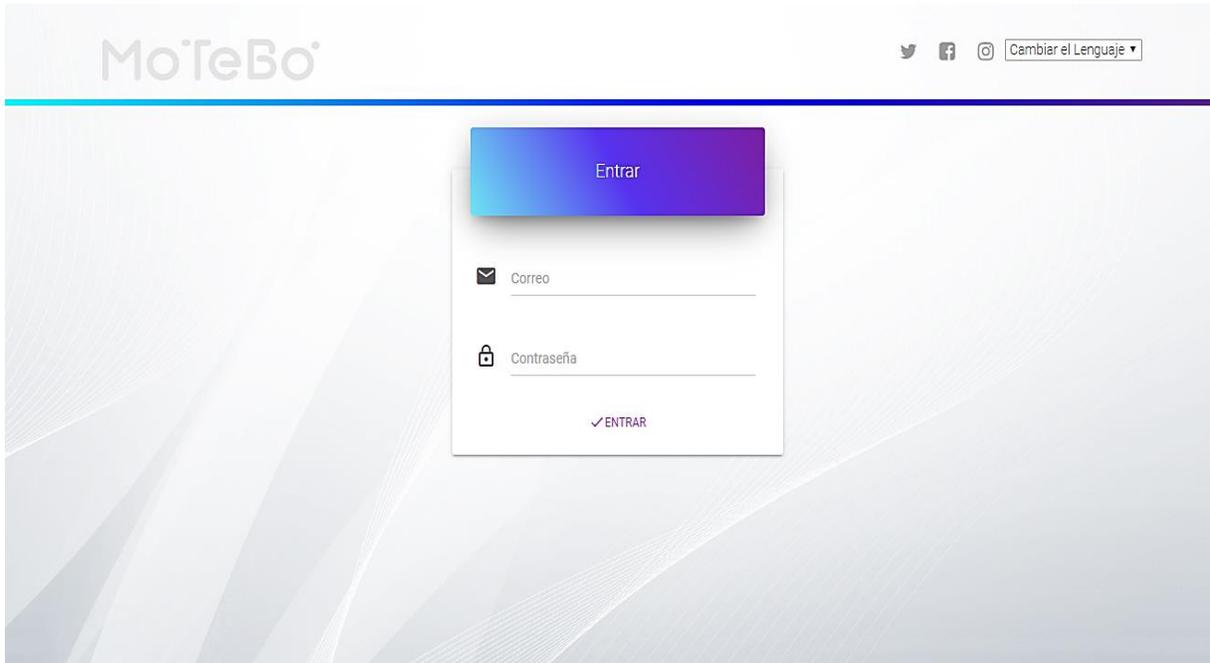


Figura 41. Acceso a plataforma MoTeBo®.

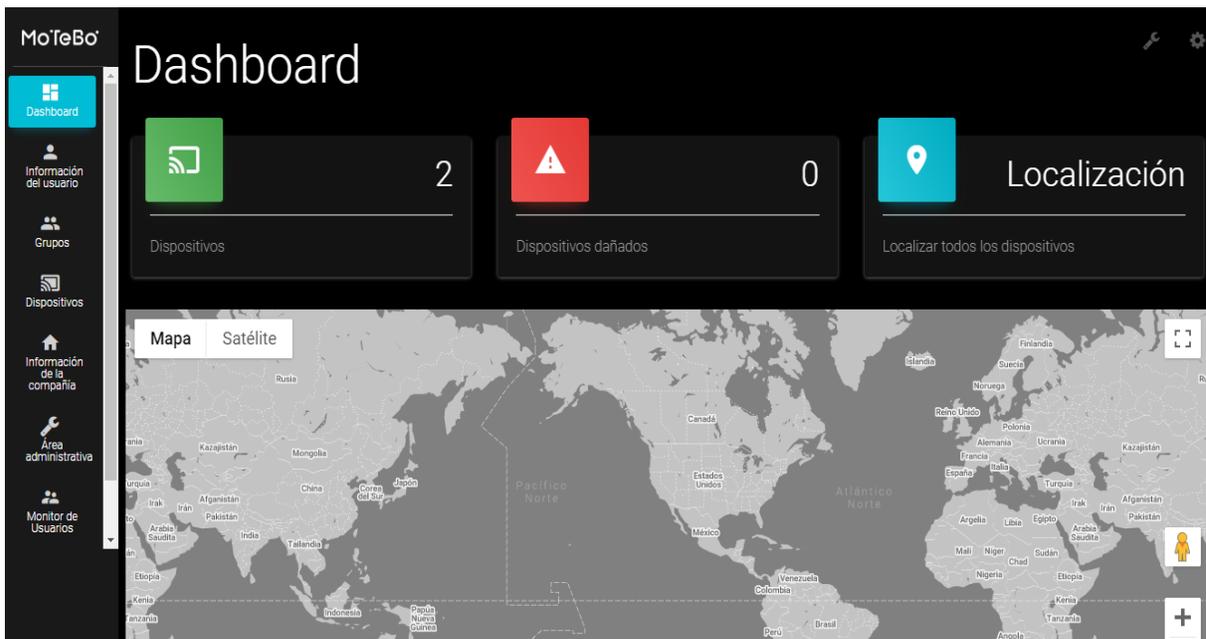


Figura 42. Vista interna de la plataforma MoTeBo®.

3.5 SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA IoT

El objeto fin del proyecto es implementar un sistema integral de monitoreo del consumo de energía eléctrica que cuente con la posibilidad de subir las mediciones en tiempo real a la nube. Los valores de consumo serán almacenados en la nube para generar registros históricos y estadísticos. Con el hardware y en el software – para el sistema integral de monitoreo del consumo de energía eléctrica – los usuarios podrán visualizar en tiempo real los reportes históricos y estadísticos que le permitan tomar decisiones para el ahorro de energía eléctrica. El sistema integral de monitoreo comprende la ejecución de las siguientes etapas de estudio:

- **Instalación de dispositivo SP3100.** El taller de manufactura cuenta con un servicio de alimentación eléctrico trifásico a 4 hilos (3 fases y 1 neutro) de 220 volts debido a que existen en el taller maquinas especializadas de manufactura que cuentan con motores trifásicos como la fresadora. Por lo que el proyecto comprende el diseño y construcción de toda la infraestructura eléctrica necesaria para poder instalar el dispositivo SP3100.
- **Desarrollo de hardware y software para comunicación con la nube.** Comprende el desarrollo de hardware para instalar el protocolo de comunicación serial. Comprende la comunicación con la nube mediante el desarrollo del código de programación del ModM para lograr la interfaz entre el SP3100, el ModM y la plataforma MoTeBo®.
- **Sensado de datos y comunicación con la nube mediante la plataforma (diseño experimental).** Comprende la realización de pruebas preliminares para obtener lecturas de los de parámetros de energía (sensado de datos) y la comunicación con la plataforma de la empresa.

3.5.1. Instalación de dispositivo SP3100

Todos los diseños elaborados para las estructuras de soporte requeridas fueron desarrollados empleando software de diseño CAD 3D SolidWorks versión 2018. En particular se empleó la herramienta *toolbox* de chapa metálica del software.

3.5.1.1 Diseño y construcción de gabinete de control

Se diseñó y construyó un gabinete tipo HIMEL para poder instalar el dispositivo SP3100 y empotrar a la pared en posición vertical. Para la construcción del gabinete se empleó lamina de acero calibre 14, una dobladora MACOS de 40 toneladas para realizar los dobleces y una cortadora de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400 para el corte de las piezas bajo diseño (ambas maquinas localizadas dentro del taller de manufactura). El gabinete está previsto de tapa plegable y chapa cromada de cerradura tipo bancaria. La caja tiene una ventana para mantener la vista frontal del dispositivo y ser operado por el usuario. Además, cuenta con (a) espacio para colocar el ModM, (b) puntos de colocación de los soportes, (c) espacio para los transformadores de corriente y el bloque de bornes,

(d) espacio para todo el sistema de cableado y conexiones requerido y (e) orificios para el paso de cableado eléctrico y de red y respiración del sistema. En la Figura 43, se ilustra el diseño del gabinete de control.

En el Anexo 1, se especifican las dimensiones de la caja.

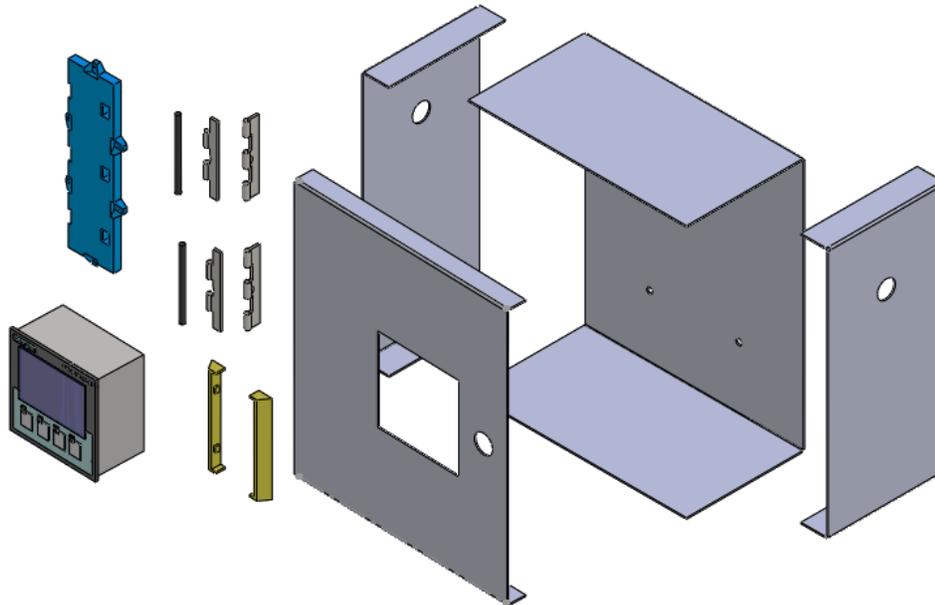


Figura 43. Diseño del gabinete de control: soportes y caras de la caja.

3.5.1.2 Diseño y construcción de soportes de sujeción

Para poder colocar el SP3100 y los transformadores de corriente en el gabinete se diseñaron y construyeron soportes de plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) mediante impresora 3D bajo el principio de sujeción tipo clip. La geometría de las piezas es de diseño propio (en base a las dimensiones de los componentes) y se empleó una impresora 3D *MakerBot Replicator Z18*. Se seleccionó material de ABS por sus características de resistencia térmica. Para los transformadores se fabricó un solo soporte para el total de elementos de corriente. En la Figura 44, se presenta el diseño del soporte de los transformadores de corriente.

Para el SP3100 se fabricaron dos soportes, los cuales se diseñaron teniendo en consideración, y, aprovechando el propio sistema de sujeción (perforaciones) del dispositivo. En la Figura 45, se exhibe el diseño de los soportes del SP3100. En la Figura 46, se muestran los espacios donde se acoplan los soportes del SP3100.

En el Anexo 1, se especifican las dimensiones de las piezas de sujeción.

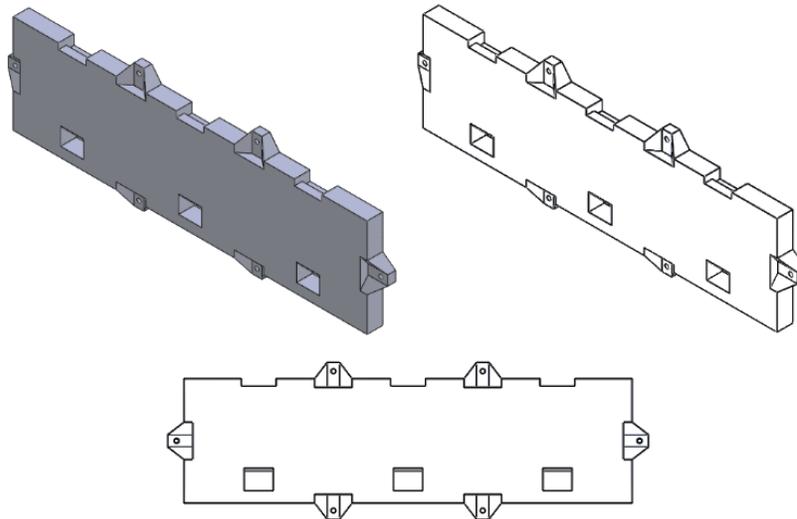


Figura 44. Diseño de soporte (1) para transformadores de corriente.

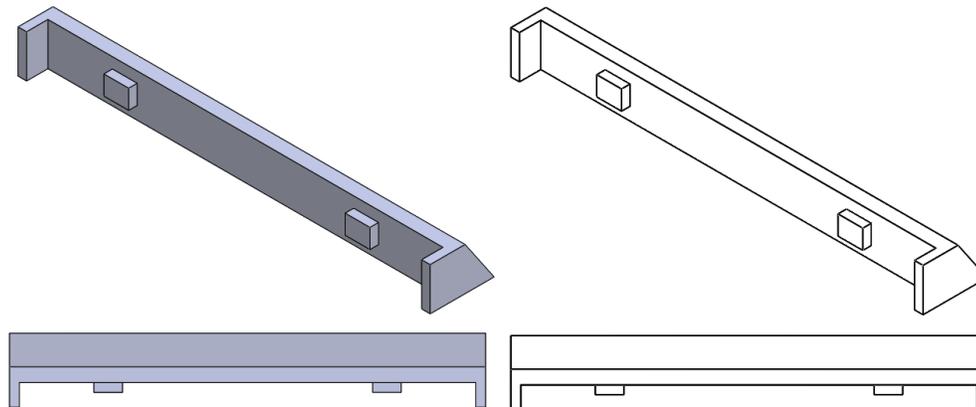


Figura 45. Diseño para soportes (2) de SP3100.

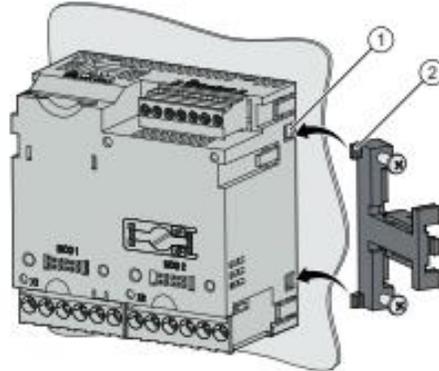


Figura 46. Perforaciones de diseño del SP3100 para puesta de soportes impresos.

3.5.1.3 Instalación eléctrica: transformadores de corriente, cableado y conexiones

Para comunicar el SP3100 con la fresadora se modificó y adaptó la instalación eléctrica del taller de manufactura de forma tal que la corriente de consumo de la máquina pueda ser monitoreada por el dispositivo SP3100. Lo anterior, considerando la normatividad vigente aplicable para instalaciones eléctricas ya que el taller de manufactura opera con un servicio de alimentación eléctrico trifásico a 4 hilos (3 fases y 1 neutro) de 220 volts. El gabinete del SP3100 se instala junto al registro eléctrico principal de control del taller para tener acceso a la canaleta eléctrica por donde se tomaron los cables de fase de la fresadora, ver Figura 37.

El SP3100 por fabricación está diseñado para soportar corrientes máximas de 5A. Debido a que la fresadora cuenta con un motor trifásico de 3HP de potencia/10A de corriente/1720-3440 rpm, fue necesario implementar un sistema de transformadores de corriente para disminuir la corriente alterna de entrada al dispositivo manteniendo la potencia. Para lo anterior, se instalaron 3 transformadores de corriente (uno por fase) de tipo dona.

Para realizar la instalación y conexión de los transformadores de corriente se identificó el tipo de red alimentario con el que cuenta la fresadora con el objetivo de poder identificar qué tipo de arreglo (estrella o delta) se empleara debido a que el SP3100 soporta varias configuraciones de conexión (redes de tres o cuatro conductores, con carga desbalanceada (asimétrica), con/sin transformador de tensión, con transformador de corriente). Así mismo, el manual de fabricante SP3100, proporciona un diagrama en el que se observa que los devanados iniciales están conectados en un punto común puestos a tierra, y las salidas de los devanados están conectados a la carga. Tomando en cuenta lo anterior, se selecciona un arreglo tipo estrella para la instalación del proyecto. Dentro de este contexto, se determina el tipo de conexión a emplear con el SP3100, siendo una conexión 3P4W: medición trifásica, de tres conductores, con carga desbalanceada, sin transformador de tensión y con tres transformadores de corriente. En la Figura 47 y 48, se presentan el arreglo tipo estrella y el tipo de conexión para el dispositivo SP3100 especificado por el fabricante, respectivamente. Ambas especificaciones fueron empleadas en este trabajo.

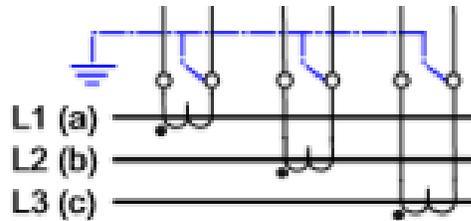


Figura 47. Ilustración del arreglo sugerido a utilizar (estrella).

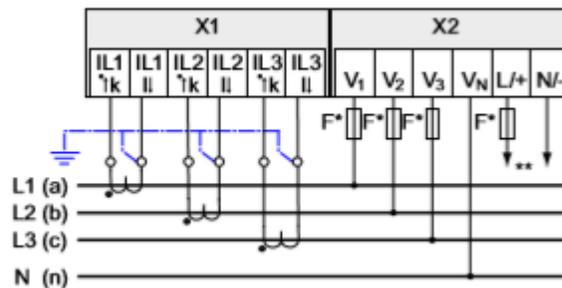


Figura 48. Tipo de conexión 3P4W, sin transformador de tensión, con tres transformadores de corriente.

Para el cableado y conexiones, se empleó cable calibre 14 para realizar el arreglo tipo estrella y cable calibre 12 para conectar las terminales faltantes del sistema y poner en operación el SP3100. Ambos cables son de aplicación industrial para grandes corrientes y amperajes. En la Figura 49, se observa la forma de conexión de cables en los bordes del dispositivo (parte inferior) conforme recomienda el fabricante.

3.5.2 Comunicación con la nube (desarrollo de hardware y software) – interfaz de comunicación

Una vez logrado la correcta conexión eléctrica entre la fresadora y el SP3100 se procede a establecer una metodología para lograr la comunicación entre el dispositivo y la plataforma y consecuentemente conseguir la transmisión de datos en tiempo real.

3.5.2.1 Hardware

Primeramente, se desarrolla la parte de hardware necesaria para lograr la interfaz del protocolo de comunicación serial que el SP3100 ya tiene desde fabricación – hacia el ModM.

Se empleó un cable par trenzado de red Ethernet de 200 cm de longitud segmentados en dos piezas de 30 (corto) y 170 (largo) cm respectivamente. Ambas piezas unidas por medio de un cople, por lo que una punta de

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

cada trozo se crimpó con un plug conector y el otro extremo fue descubierto para manejar únicamente los cables de color verde, café y anaranjado. El crimpado también contemplo únicamente los cables que transmiten la información de la interfaz (verde, café, anaranjado).

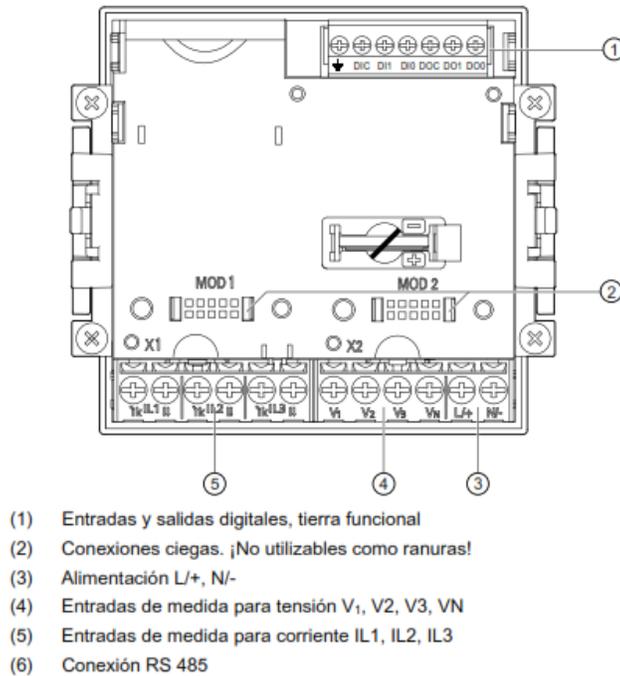


Figura 49. Conexión del SP3100.

Todo el cable se utilizó en forma aérea y fuera de la canaleta de conexiones eléctricas a manera provisional para facilitar las pruebas preliminares de codificación y discernir cualquier interferencia electromagnética.

El cable corto se conecta del borne del dispositivo hacia el cople. Por especificaciones del fabricante en los bornes del dispositivo se empleó una resistencia de terminación de $120\Omega \pm 5\%$, ya que sin ella las reflexiones de los bordes de controladores rápidos pueden causar múltiples aristas de datos y en consecuencia la corrupción de datos. Para este caso la conexión se realiza de la siguiente manera: cable verde corresponde al COM – tierra, el cable café corresponde al borne de fase +/B y el cable naranjado corresponde al borne de fase -/A. En la Figura 50, se muestra la posición y forma de conexión del borne del SP3100.

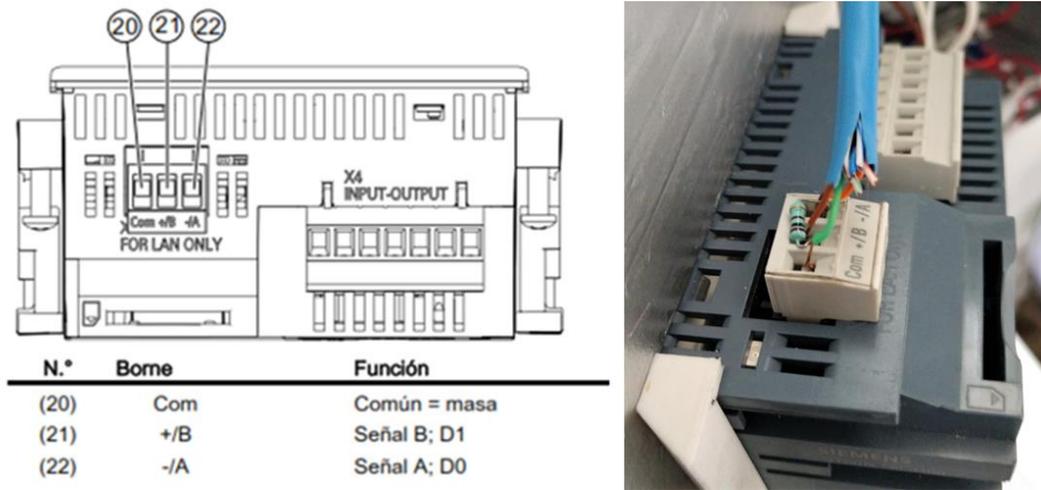


Figura 50. Rotulación y posición de los bornes en el SP3100: diagrama del fabricante (der.) y conexión por resistencia (izq).

El cable largo se conecta del cople al ModM. Se establece una conexión half-duplex de transferencia y recepción de datos entre el SP3100 y el ModM. Por lo anterior, la conexión se realiza de la siguiente manera: cable verde corresponde al COM – tierra, el cable café corresponde al borne de fase +/A y el cable naranjado corresponde al borne de fase -/B. Realizar esta conexión inversa permite una transferencia y recepción de datos con la Shield. En esta Shield no fue necesario colocar la resistencia de terminación, ya que en su composición cuenta con una. En la Figura 51, se presenta un diagrama de la conexión.

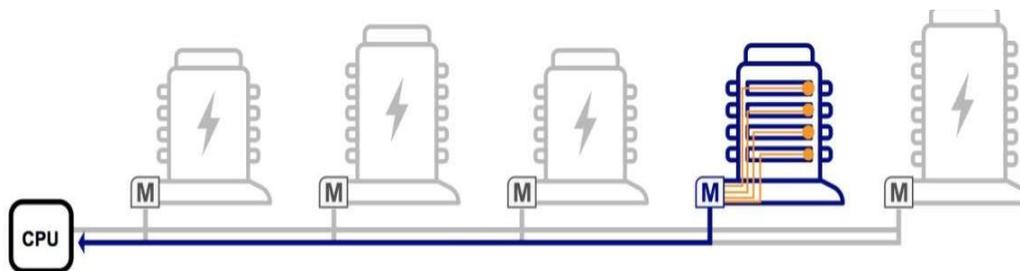


Figura 51. Interfaz de comunicación del módulo ModM.

3.5.2.2 Software

Para el logro de la toma de lecturas de los datos del SP3100 se estudiaron las respuestas de varios softwares (configuraciones de comunicación) para lograr la transferencia de datos en tiempo real hacia la nube desde el ModM:

- ModbusMAT.
- Arduino.
- Otros softwares.

ModbusMAT

Se estudió la comunicación del SP3100 empleando el software de acceso libre ModbusMAT.

Arduino

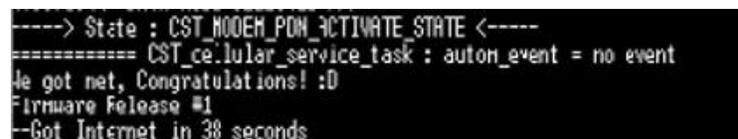
Se estudió la comunicación del SP3100 empleando el software de acceso libre Arduino a través de la librería ModbusMaster y mediante la configuración de la trama (telegrama de función); dirección, código de función, datos, código CRC.

Otros softwares

Por propiedad industrial no se describen en este trabajo otras configuraciones y softwares estudiados.

3.5.3 Sensado de datos y comunicación con la plataforma (diseño experimental)

Una base de datos experimental se obtuvo sin emplear ningún diseño experimental robusto, simplemente se establecieron condiciones de operación de la fresadora, ver apartado 3.1. Para generar la base de datos se emplea el software Arduino (librería ModbusMaster) junto con el ModM y un programa desarrollado en ambiente LabVIEW. El software LabVIEW permite crear una interfaz que genera un archivo de texto (extensión .txt) donde se almacenarán los datos obtenidos del SP3100 al operar la fresadora. Los datos de monitoreo seleccionados son las magnitudes de la potencia aparente y de las corrientes de las líneas L1, L2 y L3. Previo al envío de los datos a la nube – por medio de la plataforma – se realiza un ajuste de datos debido a que las lecturas recibidas por el ModM son del tipo flotante que necesitan hasta 4 bytes de tamaño. Para validar el funcionamiento y comunicación del ModM con la nube se comprueba que el archivo de tipo binario (extensión *.binary*) este actualizado. Para lo anterior, simplemente se verifica que el puerto serial esté abierto y se despliega en pantalla la leyenda *Congratulations!*, esto indica que la comunicación se ha logrado y se puede realizar el envío de datos a la nube. En la Figura 52, se muestra un ejemplo (captura de pantalla) de comunicación.



```
----> State : CST_MODEM_PDN_ACTIVATE STATE <----
==== CST_cellular_service_task : auton_event = no event
We got net, Congratulations! :D
Firmware Release #1
--Got Internet in 38 seconds
```

Figura 52. Ejemplo de comunicación con plataforma.

Un proceso de enmascarado de datos se realiza. Por secreto industrial no se presenta la metodología establecida.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA IoT

4.1.1 Construcción del gabinete de control

Para cortar las piezas del gabinete de control se empleó la máquina cortadora de plasma, ver Figura 53. El interfaz de control de la cortadora de plasma emplea diseños creados en SolidWorks (unidades de pulgadas) con extensión *.dxf* para su operación. La base del gabinete de control contiene dos dobleces y perforaciones de 3/4" para poder empotrar la estructura a la pared, ver Figura 54. Las tapas laterales también cuentan con dobleces y con una perforación para entrada o salida de cableado eléctrico y/o respiración del sistema, ver Figura 55. El frente del gabinete cuenta con una tapa plegable con dobleces y prevista de una ventana para colocar el SP3100, ver Figura 56. Todas las piezas fueron tratadas con un disco de desbaste y una pulidora manual para eliminar excesos de rebaba y el filo de los cortes. Los respectivos pliegues de las piezas permiten lograr el ensamble del gabinete, respetando las normativas de seguridad. En la Figura 57, se muestra la maquina dobladora MACOS empleada y una pieza con doblez terminado.



Figura 53. Máquina de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético
de una Fresadora CNC Universal



Figura 54. Diseño de la base del gabinete de control con orificios de sujeción.

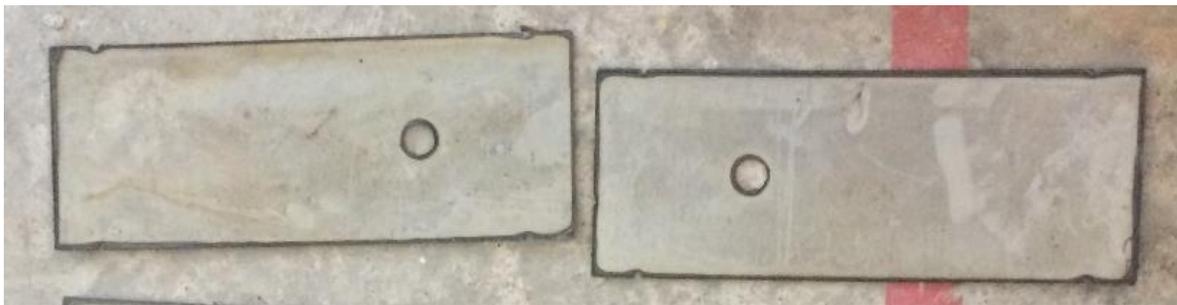


Figura 55. Laterales del gabinete de control con entrada o salida de cableado.



Figura 56. Tapadera frontal plegable del gabinete de control.

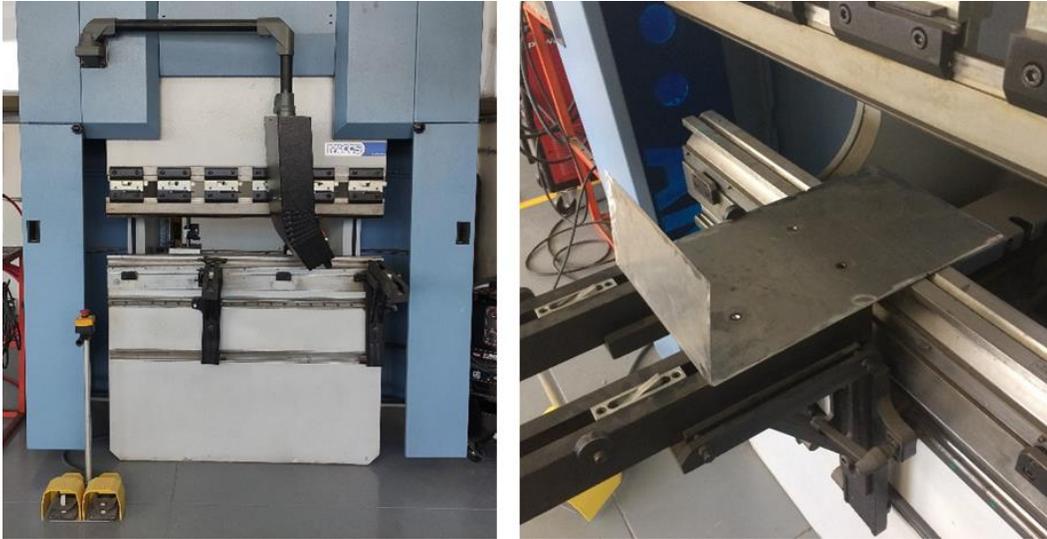


Figura 57. Máquina dobladora MACOS 40 ton. Capacidad (izq.) y pieza de gabinete con doblez (der.).

Para el ensamble de todas las piezas se emplearon técnicas de unión sin soldar a través de remaches para un tamaño de dado (remachadora) de 5mm. Lo anterior empleando una prensa tipo C para sujeción de las piezas y un taladro con broca de 7/32" para las perforaciones de los remaches. Para una mayor estabilidad del gabinete se emplearon técnicas de ensamble soldado aplicando varios puntos de soldadura por medio de una soldadora de micro-alambre marca LINCOLN. En la Figura 58, se evidencia los procesos anteriormente descritos.

La tapa plegable del gabinete se ajustó mediante bisagras metálicas plegables. Para el acabado final se colocó primero una capa aislante de esmalte color negro, el cual funciona como un aislante dieléctrico, y posteriormente una capa de esmalte alquidalico anticorrosivo color gris. En la Figura 59, se presenta un aspecto final del gabinete terminado con el SP3100 integrado.



Figura 58. Procesos de perforación (izq.), remachado (centro) y soldadura (der.) de gabinete de control.



Figura 59. Resultado final del gabinete eléctrico con Sentron PAC 3100.

4.1.2. Sistema de conexión eléctrica para el SENTRON PAC3100

Primeramente, el gabinete de control se empotra a la pared (en su espacio asignado) mediante obra de albañilería empleando taquetes de 1/4" orientados en los orificios de sujeción del gabinete.

Prosiguiendo con la instalación, se instalaron a cada lado del gabinete dos mangueras metálicas de 45 cm de longitud de 3/4" adaptándolas con coplees y codos a la canaleta principal. En la Figura 60, se observa el gabinete empotrado a la pared y comunicado con la canaleta de conexiones principal.



Figura 60. Gabinete de control instalado: adaptado a la canaleta (izq.) y empotrado a la pared (der.)

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

Enseguida, se procede a realizar la instalación eléctrica requerida. Para esto se coloca el SP3100 a la tapa frontal del gabinete para iniciar las conexiones debidas. En la Figura 61, se observa el SP3100 instalado con los soportes de sujeción elaborados para su fijación.



Figura 61. SP3100 con sistema de fijación al gabinete eléctrico.

Las conexiones al SP3100 se realizan con el sistema eléctrico del taller des-energizado (OFF) y retirando el interruptor termo-magnético correspondiente. Cada línea trifásica se hace pasar por cada uno de los TC – previamente fijados dentro del gabinete eléctrico por medio de su soporte instalado – y posteriormente regresadas al registro eléctrico principal y conectarlas al interruptor electromagnético, ver Figura 62.

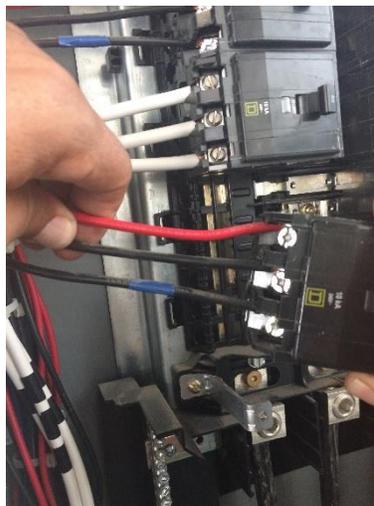


Figura 62. Acceso al registro eléctrico principal.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

Para pasar el cableado por los TC se introduce cada fase por cada uno de ellos y seguidamente se colocan en el soporte. La secuencia de fases es negro y azul (línea 3 – L3), negro (línea 2 – L2), rojo (línea – L1). Dentro de este proceso se empleó un cableado extra donde se agregaron 3 cables más que se conectarán a cada fase de línea y al SP3100. Se colocó un borne estándar con conexión de tornillo para facilitar las uniones y puentes necesarios para la instalación. En este borne se conectaron los cables extras agregados, así como también uno de línea neutra y otro de tierra física. Para colocar los cables se utilizaron zapatas para facilitar la conexión de los mismos al borne. En la Figura 63, se muestra el borne y las conexiones realizadas bajo este orden de izquierda a derecha conforme la imagen: negro 1 – neutro, blanco 1 – tierra física, blanco 2 – línea 2, negro 2 – línea 2 y rojo – línea 1.

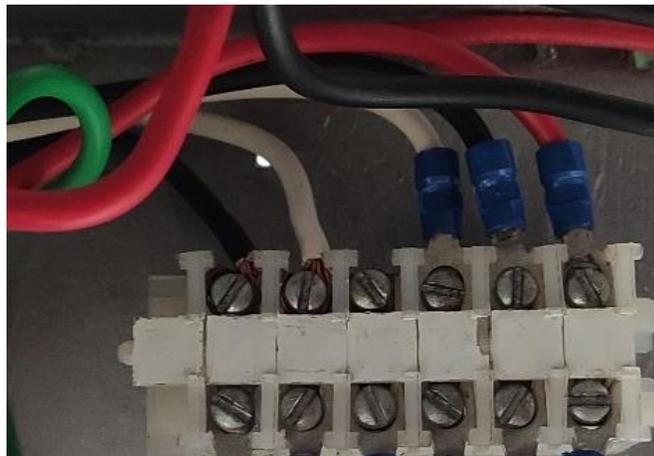


Figura 63. Borne estándar de conexiones.

Para realizar la conexión tipo estrella se toma como referencia la conexión parte X1 sugerida por el fabricante SIEMENS para el SP3100, la cual consta de un tipo de conexión 3P3W, sin transformador de tensión y con tres TC. En la Figura 64, se muestra la conexión estrella elaborada conforme la conexión X1 especificada por el cliente con respecto a los TC.

Para la conexión de la parte X2 y tener completo el cableado del SP3100 se utiliza el bloque de bornes que se instaló. En la Figura 65, se presenta la conexión estrella elaborada conforme la conexión X2 especificada por el cliente con respecto a los porta-fusibles y el bloque de bornes.

En la Figura 66 se exhibe el SP3100 con las conexiones X1 y X2 de tipo estrella integradas al dispositivo (conexiones ubicadas en la parte inferior del dispositivo – cables color blanco y café).

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

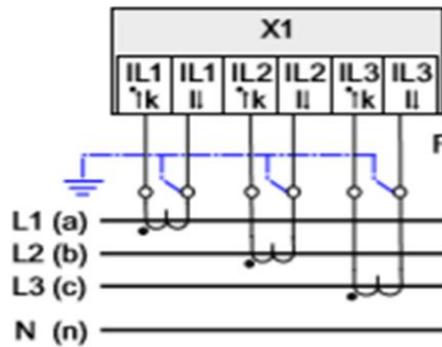


Figura 64. Conexión tipo estrella de la instalación: conexión X1 del fabricante.

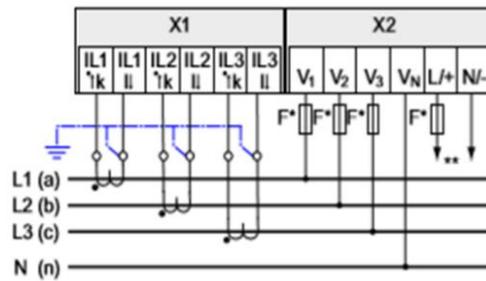


Figura 65. Conexión tipo estrella de la instalación: conexión X2 del fabricante.

Se establece un código de identificación para cada conexión y facilitar su mantenimiento, ver Figura 67. En la Tabla 4 se presenta el significado del rotulo asignado a cada cable.



Figura 66. Conexión estrella en partes X1 y X2 del SP3100.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal



Figura 67. Rotulado de la instalación.

Tabla 4. Código de rotulación de instalación eléctrica para el SP3100.

CÓDIGO	FUNCIÓN	POSICIÓN	COLOR	DESCRIPCIÓN
Línea 1	Cable de fase 1	TC	Rojo	Conductor activo, el conductor que transporta la corriente eléctrica
Línea 2	Cable de fase 2	TC	Negro	
Línea 3	Cable de fase 3	TC	Negro	
Fus L1	Fusible en línea 1	Borne / SP-X2-V1	B-rojo / SP-café	Componente de seguridad utilizado para prevenir daños por exceso de corriente eléctrica
Fus L2	Fusible en línea 2	Borne / SP-X2-V2	B-rojo / SP-café	
Fus L3	Fusible en línea 3	Borne / SP-X2-V3	B-rojo / SP-café	
Neutro	Cable neutro	Borne /SP	Blanco	Conductor con potencial 0 o diferencia de potencial 0
T Física	Tierra física	TC / Borne	Verde	Conductor con una función de protección
L / +	AC: Conexión: Conductor (tensión de fase)	SP-X2-L/+		Alimentación para funcionamiento del dispositivo
	DC: Conexión: Positivo		Café	
N / -	AC: Conexión: Neutro	SP-X2-N/-		
	DC: Conexión: Negativo		Blanco	
IL1-K	Corriente IL1, entrada	SP-X1-↑K-IL1	Café	Nodos terminales o de conexión de la línea k-I (Entrada y Salida).
IL1-I	Corriente IL1, salida	SP-X1-↓I-IL1	Blanco	
IL2-K	Corriente IL1, entrada	SP-X1-↑K-IL2	Café	
IL2-I	Corriente IL1, salida	SP-X1-↓I-IL2	Blanco	
IL3-K	Corriente IL1, entrada	SP-X1-↑K-IL3	Café	
IL3-I	Corriente IL1, salida	SP-X1-↓I-IL3	Blanco	

Por último, se procedió a validar la instalación eléctrica mediante una comprobación de las tensiones entre línea y línea que despliega el SP3100, para esto se compara la lectura del dispositivo contra un multímetro de 1% de precisión en 100 unidades.

En la Tabla 5 se presentan los resultados comparativos de lecturas de tensión (voltajes). En la Tabla 6 se muestran los resultados comparativos obtenidos de corriente (amperajes).

De la Figura 68 a la 74 se ilustran estos valores comparativos de tensión y corriente.

Tabla 5. Lecturas comparativas de tensión (voltajes).

	SP3100 (volts)	Multímetro (volts)
Tensión L1-L2	123	124.1
Tensión L2-L3	124	125.0
Tensión L3-L1	124	125.0

Tabla 6. Lecturas comparativas de corriente (amperajes).

	SP3100 (A)	Multímetro (A)
Corriente L1	0.26	0.13
Corriente L2	0.73	0.65
Corriente L3	0.72	0.64



Figura 68. Tensión medida en línea 1.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal



Figura 69. Tensión medida en línea 2.



Figura 70. Tensión medida en línea 3.



Figura 71. Corriente medida en línea 1.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal



Figura 72. Corriente medida en línea 2.



Figura 73. Corriente medida en línea 3.



Figura 74. Corrientes medidas por SP3100.

4.2 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON LA NUBE

Para facilitar la interfaz del SP3100 con la nube se preparó una instalación de simple conectividad a través de un cople. En la Figura 75, se presenta la comunicación concluida en terminación con el cople de red. En la Figura 76, se muestra el cople de red habilitado para la interfaz.

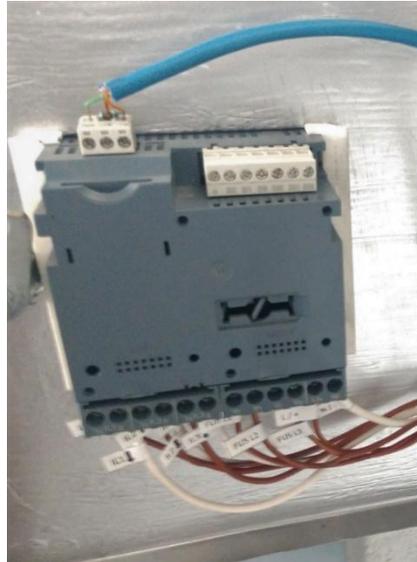


Figura 75. Instalación de conectividad completa del SP3100.

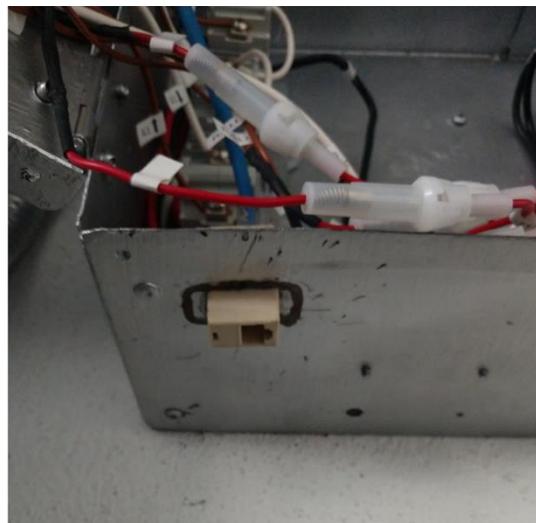


Figura 76. Instalación de cople: vista inferior de gabinete.

La conexión a través del cople de red permite que exista continuidad de señal hasta el borde de la interfaz. En la Figura 77, se presenta la conectividad completa sobre el cople en ambos extremos.

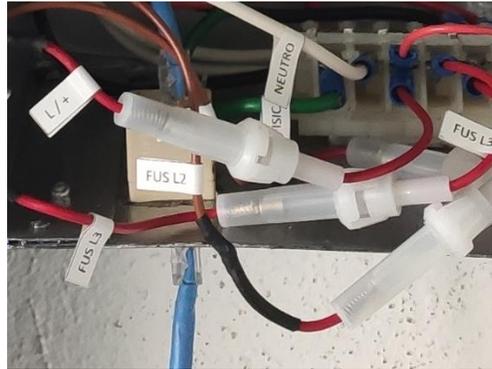


Figura 77. Continuidad de señal por cople.

Varias configuraciones de comunicación (pruebas de lectura) con la nube fueron estudiadas con la finalidad de mudar los arreglos al software de funcionamiento del código de comunicación serial.

4.2.1 Configuración inicial

Para la adquisición de datos del SP3100 se empleó un convertor serial y los drivers correspondientes para poder habilitar la lectura del puerto del dispositivo y lograr la interfaz con un equipo portátil mediante el programa ModbusMAT 1.1 Para la configuración de la conexión para la interfaz solo se consideró los bornes A y B ya que el convertor no necesita del común de la interfaz. Mediante este arreglo se logró obtener las lecturas de tensión de las líneas 1-3 directamente del SP3100.

El arreglo de interfaz construido permitió obtener lecturas de datos de tensiones (volts) y corrientes (amperes). En la Figura 78, se muestra las lecturas obtenidas. Las lecturas se identificaron en las siguientes direcciones:

Dirección 40008 para la línea 1. Lectura de tensión 110.571105957031.

Dirección 40010 para la línea 2. Lectura de tensión 217.155...

Dirección 40012 para la línea 3. Lectura de tensión 106.59...

Dirección 40014 para la línea 1. Lectura de corriente 0.2766646444479752

Dirección 40016 para la línea 2. Lectura de corriente 0.7435...

Dirección 40018 para la línea 3. Lectura de corriente 0.7299...

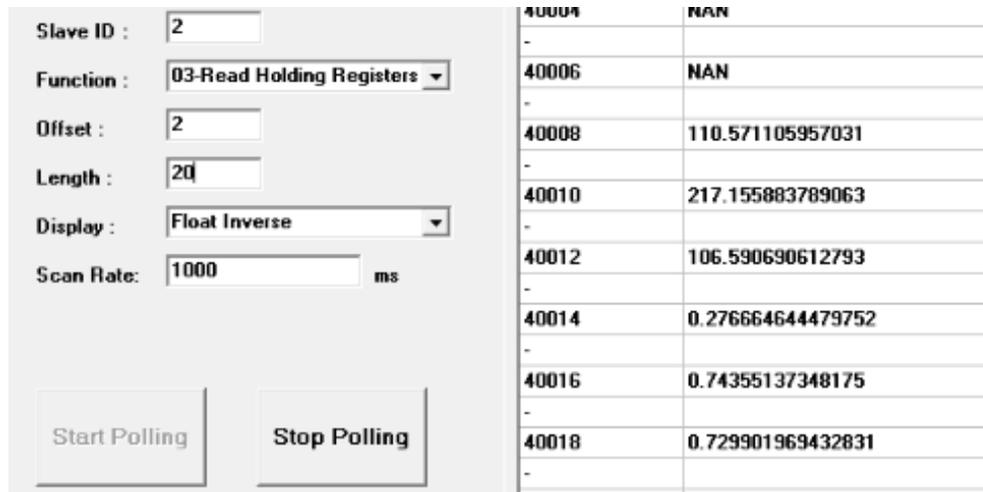


Figura 78. Resultados de lectura vía conversor serial.

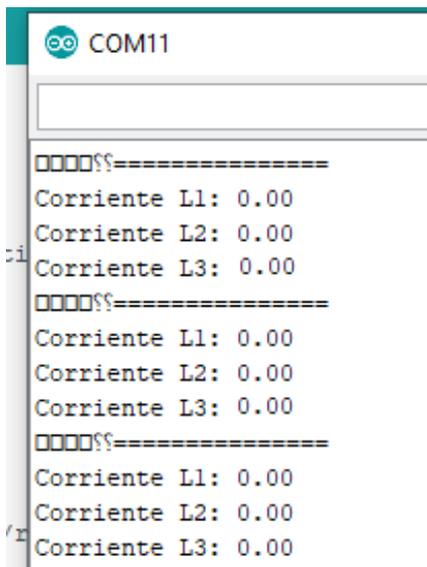
4.2.2 Configuración por Arduino

Para la adquisición de datos del SP3100 se estudia una segunda configuración empleando una placa Arduino IoT. La conexión se estableció de la siguiente manera: cable verde corresponde al COM – tierra, el cable café corresponde al borne de fase +/A y el cable naranjado corresponde al borne de fase -/B.

Para configurar la placa se empleó el IDE Arduino versión gratuita, así como las librerías disponibles en la red, con la cual se logró la interfaz con el SP3100.

Para cargar el programa (código) a la placa basto con solo seleccionar el puerto COM detectado (COM3) y se procede a cargarlo para finalmente abrir el monitor serial de Arduino y poder visualizar los datos generados.

A manera comparativa, se estableció un “blanco” para poder comprobar que se tiene comunicación desde el SP3100 empleando el IDE Arduino. En la Figura 79, se presenta una captura de pantalla del IDE Arduino bajo las siguientes condiciones: comunicación con SP3100 por medio del serial, lecturas de corriente, fresadora apagada en *off*. Se observa que se presenta comunicación, pero sin valores registrados. Los valores de 0 (cero) representan los valores de corriente detectados con la fresadora en *off*.



```
COM11
=====
Corriente L1: 0.00
Corriente L2: 0.00
Corriente L3: 0.00
=====
Corriente L1: 0.00
Corriente L2: 0.00
Corriente L3: 0.00
=====
Corriente L1: 0.00
Corriente L2: 0.00
Corriente L3: 0.00
```

Figura 79. Lecturas obtenidas con Arduino en fresadora en off.

4.2.3 Otras configuraciones (no reportadas)

Otras configuraciones fueron estudiadas. Por secreto industrial no son presentadas en el presente documento.

4.3 SENSADO DE DATOS Y COMUNICACIÓN CON PLATAFORMA MOTEBO® (DISEÑO EXPERIMENTAL)

Ningún diseño experimental robusto fue empleado. La obtención de datos se realizó bajo la siguiente secuencia de operaciones:

- **Programación de condiciones de operación en la fresadora.** Programación de máquina mediante el menú de la máquina y manual del usuario.
- **Interfaz (workstation).** Conexión de hardware y preparación de software.
- **Operación de fresadora.** Encendido de máquina y operación con carga (careo de piezas) y sin carga (vacío).
- **Análisis de datos (lectura de datos).** Registro, almacenamiento y análisis de datos de energía.
- **Comunicación con la nube.** Envío de datos a la nube mediante la plataforma.

4.3.1 Análisis de datos

Se realizó una caracterización de la potencia requerida por la fresadora al realizar una operación convencional de careo (desbaste) con la máquina. Para lo anterior, se realizó el análisis de los datos obtenidos para

determinar el consumo energético generado por la fresadora al trabajar con un material duro, en este caso una placa de acero aleado suave con porcentaje de 0.2-0.3% de carbón, trabajar con un material blando como un bloque de madera aserrada de pino y trabajar al vacío, es decir, sin carga. En la Figura 80, se muestra una imagen ilustrativa del proceso de careo realizado a las piezas de estudio con la fresadora.

Para facilidad de lectura de los datos se desarrolló una interfaz en software LabVIEW con el cual se recolecto los datos al maquinar las piezas antes mencionadas. En la Figura 81, se presenta el IDE LabVIEW desarrollado. Los datos visualizados en el interfaz, entre otros, son: valores de tensión entre líneas, potencia aparente (PS), potencia reactiva (PQ), potencia activa (PA), factor de potencia (FP), potencias totales. Adicional se especifica la ruta de almacenaje del archivo generado.

Finalmente, el conjunto del ModM + LabVIEW fue el arreglo empleado para la recolección de lecturas de datos. El arreglo de hardware y software anterior permitió obtener un archivo de texto extensión *.txt*. Acto seguido, el archivo *.txt* fue exportado a un procesador de texto Excel y así proceder con el análisis de los datos obtenidos de manera gráfica. En la Figura 82 se presenta un ejemplo de la base de datos en ambiente Excel obtenido.

Enseguida se presentan los resultados obtenidos de la lectura de datos de la fresadora durante el proceso de careo realizado a la pieza de metal por ser lo más representativo a un trabajo convencional en fresado. En total fueron 1019 datos recolectados durante 25.9 minutos que duró el careo programado y donde en promedio cada 1.53 segundos se obtenía un dato de lectura. Del tiempo 0 al segundo 22 aproximadamente, aun no se comenzaba el careado de la pieza, este periodo de tiempo corresponde a la estabilización de la maquina donde en el segundo 23 se obtuvo un pico de lectura de intensidad de corriente por encima de los 12 A en cada línea. Lo anterior se atribuye a la necesidad de la máquina de energizar sus componentes, almacenar energía en las bobinas de los motores de la máquina antes de operar adecuadamente y que en ese preciso momento se encendió el motor rotatorio del eje Z para iniciar maquinado. Justamente estos picos son los que representan los gastos de facturación de energía eléctrica que son penalizados por el proveedor de energía.

En el Anexo 2 se presentan las gráficas de lectura de datos obtenidas en el careo de la pieza de madera y de la operación de la maquina al vacío (sin carga). En el caso de datos de lecturas del careo con la pieza de madera fueron 574 datos y se obtuvieron en un tiempo de 15.3 minutos de operación y en promedio cada 1.6 segundos se obtenía un dato de lectura. Los valores con la pieza de madera fueron de 215-218 V de tensión, 1.2-2.2 A de corriente, 0.5-0.6 de factor de potencia y 680-710 VA de potencia aparente. En la pieza de madera también se obtuvo un pico por encima de los 9A en cada línea al momento de estabilizarse la fresadora. Por otro lado, los datos de lecturas con la maquina al vacío fueron de 214-217 V de tensión, 1.2-2.2 A de corriente, 0.51-0.58 de factor de potencia y 660-700 VA de potencia aparente. Se empleó un tiempo de 14.6 minutos de operación para recolectar un total de 547 datos y también se presentó un pico por encima de los 12 A al momento de estabilizarse la fresadora. En promedio cada 1.6 segundos se obtenía un dato de lectura en vacío.

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético
de una Fresadora CNC Universal

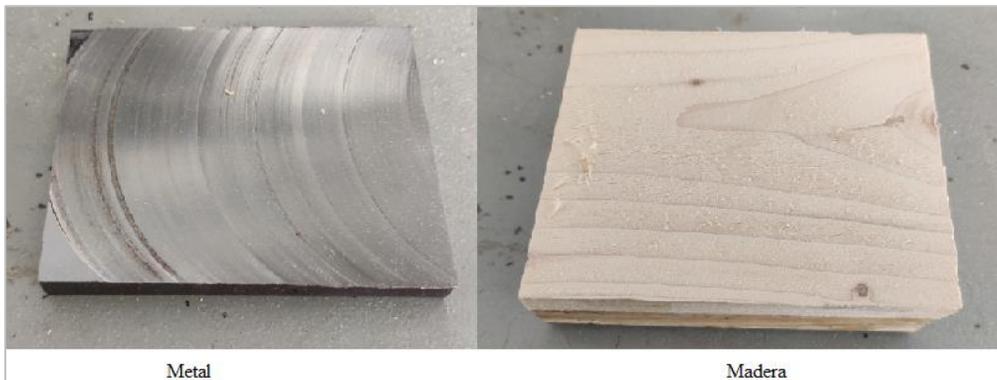


Figura 80. Proceso de careado en fresadora para recolección de datos de energía: operación en proceso (arriba), acabado final de piezas (abajo).

Ingeniería Mecatrónica
Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

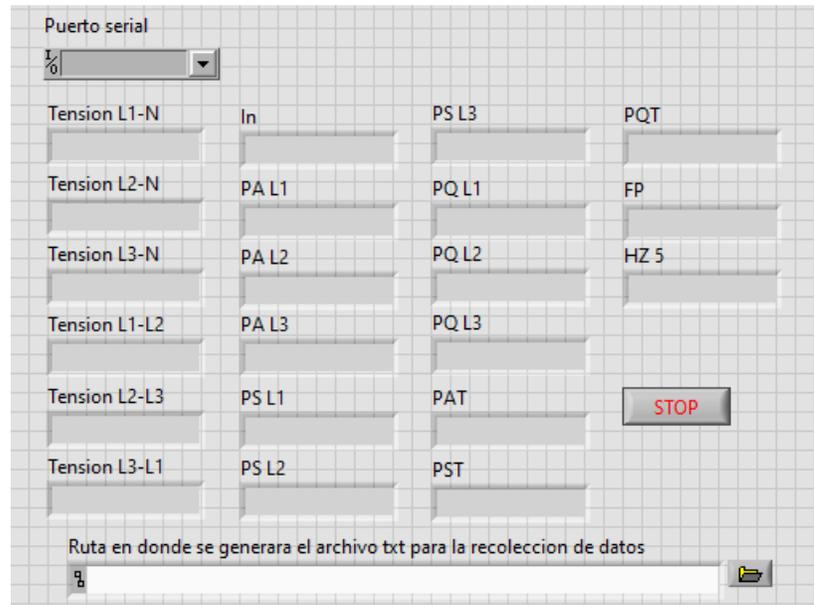


Figura 81. Interfaz creada en LabVIEW.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1								Corriente L1	Corriente L2	Corriente L3	Potencia aparente total	Factor de potencia total
2	Fecha	Tensión L1-N	Tensión L2-N	Tensión L3-N	Tensión L1-L2	Tensión L2-L3	Tensión L3-L1	0.2638	0.7852	0.7706		
3	27/02/2020 01:42:10 p. m.	123.5663	124.5241	123.9589	214.5305	215.4002	214.4699	0.2762	0.8049	0.7862	225.8907	0.5504
4	27/02/2020 01:42:13 p. m.	123.5195	124.5214	123.9675	214.4968	215.3902	214.4429	0.2696	0.8024	0.7891	231.8107	0.5338
5	27/02/2020 01:42:14 p. m.	123.5372	124.5506	123.9715	214.519	215.4447	214.4542	0.2721	0.8033	0.7864	231.0708	0.5375
6	27/02/2020 01:42:15 p. m.	123.5064	124.5367	123.9263	214.5065	215.39	214.3653	0.2402	0.8391	0.81	231.0967	0.5412
7	27/02/2020 01:42:17 p. m.	123.4416	124.507	123.8821	214.4125	215.3676	214.2419	0.2033	0.8093	0.8099	234.4758	0.535
8	27/02/2020 01:42:18 p. m.	123.4818	124.5342	123.8941	214.4895	215.3742	214.2957	0.2564	0.8062	0.7973	226.2282	0.5434
9	27/02/2020 01:42:19 p. m.	123.5174	124.5837	123.9383	214.5472	215.4703	214.3662	0.2517	0.7939	0.782	230.9352	0.5405
10	27/02/2020 01:42:22 p. m.	123.5375	124.5654	123.9549	214.5538	215.4466	214.4152	0.2346	0.783	0.7762	226.9175	0.5461
11	27/02/2020 01:42:23 p. m.	123.5317	124.5614	123.9862	214.5273	215.4665	214.4582	0.2313	0.8061	0.7879	222.7491	0.5551
12	27/02/2020 01:42:24 p. m.	123.5835	124.5998	123.9851	214.5998	215.5139	214.4927	0.2411	0.8097	0.8021	226.7085	0.5438
13	27/02/2020 01:42:27 p. m.	123.5670	124.594	123.9833	214.6197	215.4922	214.4536	0.2572	0.8021	0.7915	230.1376	0.5412
14	27/02/2020 01:42:28 p. m.	123.5070	124.5736	123.975	214.5279	215.4736	214.4101	0.2424	0.8572	0.8242	229.8058	0.5399
15	27/02/2020 01:42:29 p. m.	123.5408	124.581	123.9504	214.569	215.4542	214.4175	0.2225	0.8348	0.8158	238.8989	0.5247
16	27/02/2020 01:42:31 p. m.	123.5214	124.5941	123.9924	214.5599	215.5242	214.4187	0.2189	0.8287	0.8222	232.6392	0.5351
17	27/02/2020 01:42:32 p. m.	123.5714	124.6313	124.029	214.6209	215.5628	214.403	0	0.8308	0.8083	233.477	0.5298
18	27/02/2020 01:42:33 p. m.	123.5623	124.6341	123.9974	214.6334	215.5796	214.4381	12	12	12	203.7626	0.5858
19	27/02/2020 01:42:36 p. m.	123.2504	124.3155	123.6457	214.0875	214.9695	213.8928	1.4909	2.0384	2.1879	4641.9067	0.6238
20	27/02/2020 01:42:37 p. m.	123.5668	124.665	124.0102	214.6404	215.6375	214.4567	1.5012	2.0349	2.1914	709.663	0.6331
21	27/02/2020 01:42:38 p. m.	123.5820	124.6479	124.0323	214.6421	215.5911	214.5366	1.5048	2.0541	2.2065	710.9754	0.6374

Figura 82. Lectura de datos al desbastar madera en la fresadora y exportados en Excel.

En la Tabla 7, se presentan las lecturas promedio obtenidas en el careo de la pieza de metal, madera y al vacío. Los valores de corriente se reportan en amperes y el valor de potencia aparente en VA (voltiamperio).

Tabla 7. Promedio de datos de las lecturas obtenidas.

Descripción		Material	Magnitudes			
			Potencia Aparente	Corriente L1	Corriente L2	Corriente L3
Velocidad de giro en el cortador	1750 rpm	Metal	681.0890	1.3932	2.0078	2.0903
Velocidad de avance en la bancada	25%	Madera	649.5627	1.3133	1.8526	2.0481
Tipo de cortador	Piña de desbaste 5 Hilos	Vacío	621.2241	1.2101	1.8064	1.9574

En la Figura 83, se presentan datos de tensión (voltaje) obtenidas en los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 en el careo de la pieza de metal. Debido a que la corriente de alimentación del taller de manufactura es trifásica a 220 V, entonces los resultados son concordantes. Las lecturas de las tensiones entre pares de líneas durante el proceso de careo de la pieza de metal se pueden considerar cuasi constantes y acorde a la alimentación de trabajo de la fresadora. Los valores de tensión mayoritariamente se mantuvieron en el intervalo de 214-216 V.

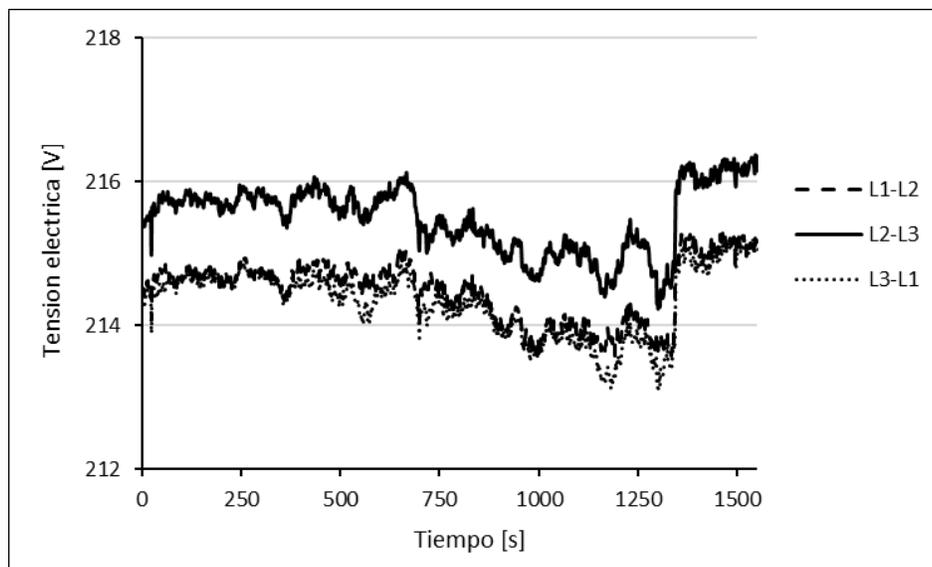


Figura 83. Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en el careo de la pieza de metal.

En la Figura 84, se muestran los datos de corrientes (amperes) obtenidas en las líneas L1, L2 y L3 durante el careo de la pieza de metal. Descartando el pico de 12 A al inicio de la estabilización de la máquina, las líneas 2 y 3 se comportan de manera muy similar y con valores cercanos entre ellas debido a que son las líneas principales

de alimentación de la fresadora y de toda la maquinaria de manufactura especializada existente en el taller de manufactura de la Institución. La línea 1 se mantiene con un comportamiento un tanto alejado de las anteriores ya que esta línea interactúa con el sistema de iluminación (reflectores) del taller de manufactura y durante la operación de la fresadora se encontraban apagadas. Lo anterior permite validar que los resultados obtenidos son concordantes entre sí. Los valores de corrientes estuvieron mayoritariamente en el intervalo de 1.30 a los 2.90 A. En la Figura 85 y 86 se observan acercamientos de valores de corriente obtenidos para una mejor apreciación de las diferencias obtenidas en las líneas 1, 2 y 3.

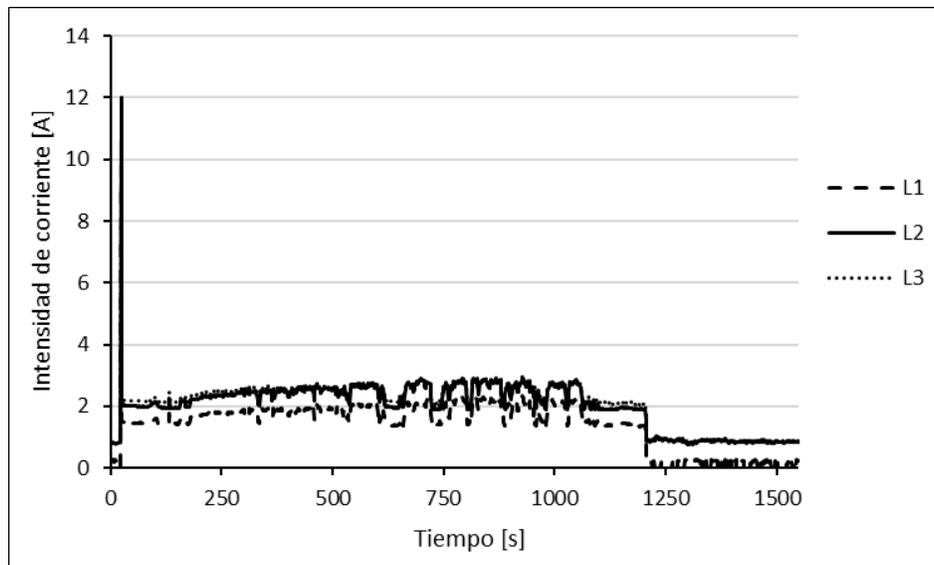


Figura 84. Gráfica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal.

En la Figura 87, se muestran los valores de potencia aparente, en unidades de VA, obtenidos durante el careo de la pieza de metal. Se observa un pico por encima de los 1500 VA, exactamente es un pico de 4641 VA obtenido al segundo 23 de operación, que coincide con el pico de 12 A anteriormente descrito. Esta variable es la más representativa debido a que es la variable que el proveedor de energía eléctrica toma en cuenta para realizar la facturación de energía a las empresas.

En la Figura 88, se observa el factor de potencia logrado durante el careo de la pieza de metal. Lo anterior empleando la herramienta del triángulo de potencias. Los valores de factor de potencia oscilaron entre 0.50 y 0.81. Siendo importante mencionar que la operación de careo de metales en la fresadora exige – por su naturaleza de dureza – la detención del careo de manera constante para poder suministrar refrigeración mecánica y proteger la vida útil de la piña.

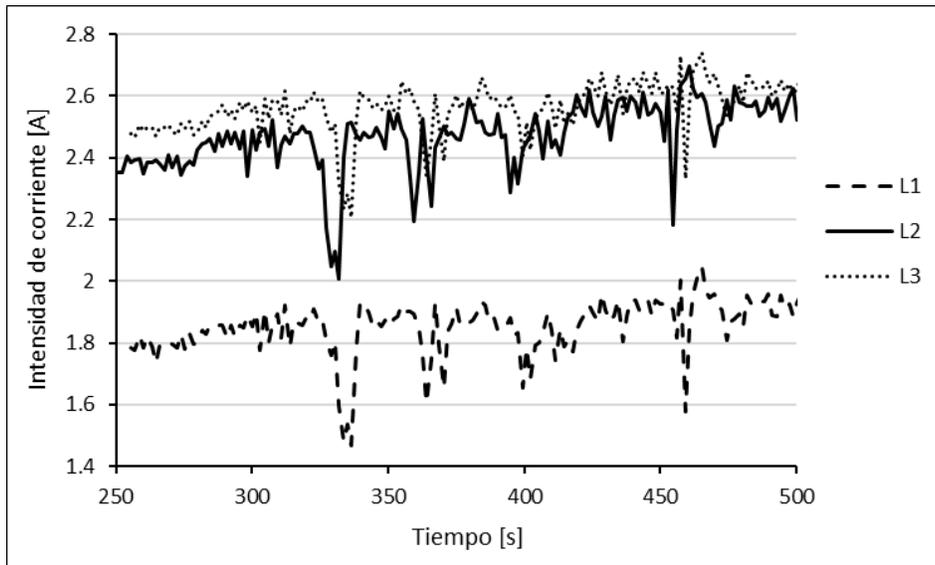


Figura 85. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.

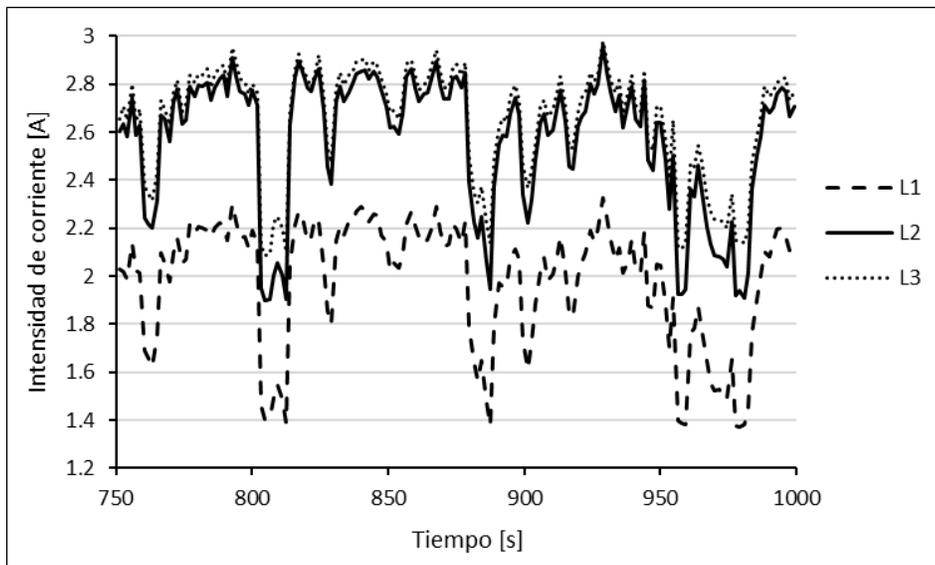


Figura 86. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 750-1000 segundos.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

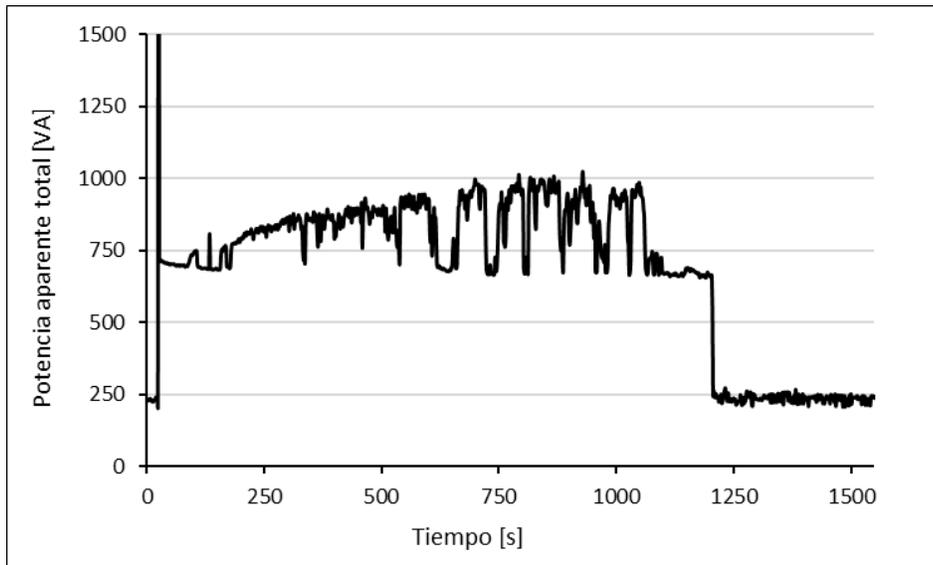


Figura 87. Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida del proceso de careo de la pieza de metal.

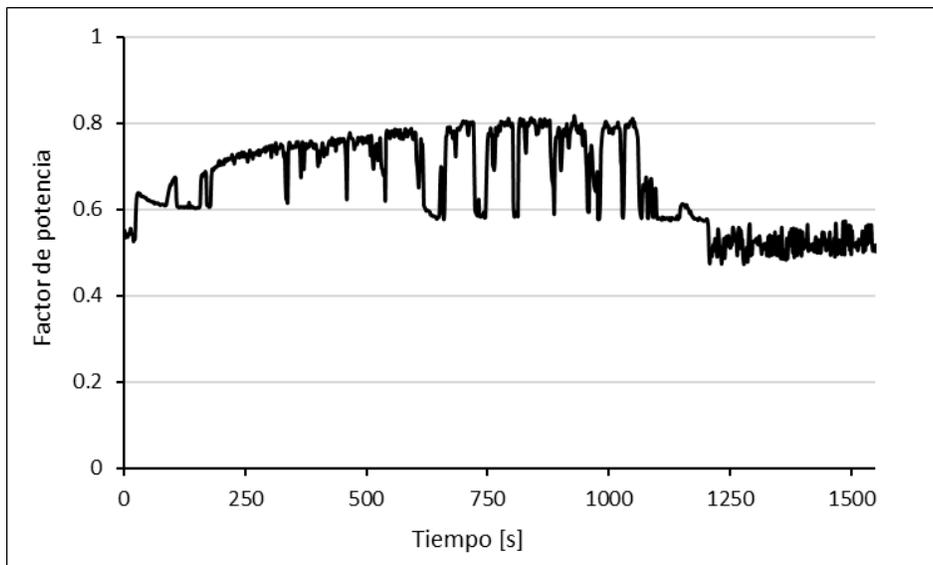


Figura 88. Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de metal.

Un factor de potencia de 1.0 significa que toda la energía eléctrica alimentada es consumida por el receptor, lo que se traduce en un mejor rendimiento de operación de la máquina. Valores de factor de potencia menores a 1.0 significa menores rendimientos de una máquina. Si el factor de potencia es muy bajo, se deben implementar

acciones correctivas para incrementar el mismo a lo más posible a 1.0, motivo por el cual se buscan soluciones prácticas como el objeto fin del presente estudio.

Aunado a lo anterior, el contar con un factor de potencia bajo significa un cobro alto en la facturación de energía eléctrica, ya que un factor de potencia bajo aumenta el costo del proveedor de energía para poder suministrar la potencia activa necesaria porque tiene que ser transmitida más potencia aparente y por lo tanto más amperaje. Siendo un costo que absorbe totalmente la empresa consumidora.

En la Figura 89, se presentan un comparativo de los valores de factores de potencia obtenidos durante el careo de las piezas de metal, madera y al vacío. Se observa que los valores más altos fueron cuando se careo el metal, lo anterior debido a que requiere mayor esfuerzo la fresadora para el maquinado por la dureza de la pieza. Se presenta el intervalo de tiempo de careo/encendido de 100 a 800 segundos para una mejor apreciación de las diferencias marcadas y por ser los intervalos más representativos dado que los tiempos de maquinado de madera y operación al vacío fueron menores.

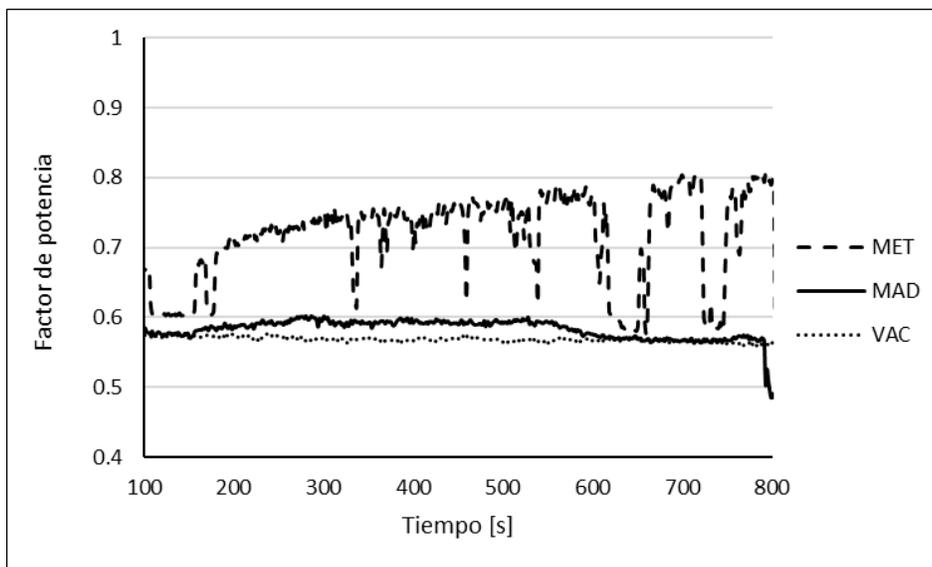


Figura 89. Gráfica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de metal, pieza de madera y al vacío: tiempos de maquinado de 100-800 segundos.

4.3.2 Enmascarado de datos (no presentado)

Después del análisis de datos obtenidos en el maquinado de piezas se realizó un enmascarado de datos para su envío a la nube. Este proceso se realiza una vez que se han obtenido los datos del ModM por lo que se desarrolló una función computacional para tal fin. Por secreto industrial no es presentado el procedimiento empleado.

4.3.3 Lectura de datos en plataforma (comunicación con la nube)

Se validó la comunicación con la nube a través del IDE de la plataforma MoTeBo® en la aplicación diseñada para este fin. En la Figura 90, se observa el IDE de la plataforma con envío desconectado que significa transferencia NO exitosa de datos a la nube. En la Figura 91, se muestra la transferencia SI exitosa con la nube-



Figura 90. Transferencia de datos NO exitosa (desconectada) desde la plataforma MoTeBo®.

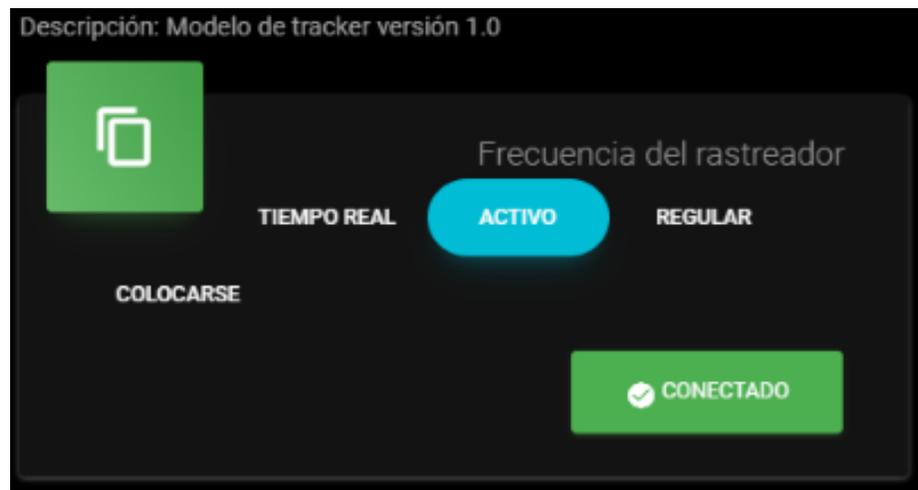


Figura 91. Transferencia de datos SI exitosa (conectada) desde la plataforma MoTeBo®.

V. CONCLUSIONES

Se lograron registrar datos de lectura de consumo eléctrico y comunicarlos a la nube empleando la tecnología IoT MoTeBo® y códigos de desarrollo propio de comunicación serial empleando un módulo de comunicación MoTeBo® (ModM) con interfaz a un analizador de parámetros de red eléctrica SIEMENS SENTRON PAC3100 que a su vez se conectó a una maquina fresadora CNC universal vertical modelo XK7130A.

El diseño y construcción de una instalación eléctrica trifásica y la configuración correcta del protocolo de comunicación serial permitió lograr una interfaz exitosa entre los tres elementos del sistema (maquina-medidor-nube). En consecuencia, se instaló una conexión tipo estrella para el dispositivo y se logró la adaptación de una estación de trabajo propia para la comunicación con la nube.

Se emplearon los softwares ModbusMAT 1.1, Arduino, LabVIEW y otros (no presentados) para desarrollar la programación de los códigos de comunicación con la nube. La comunicación con la nube se logró con el desarrollo del hardware y software vía interfaz serial y empleando el código propio de la empresa con soporte previo de códigos de diseño propio empleando los softwares Arduino, LabVIEW y otros (no presentados). Es decir, primeramente, los códigos de diseño propio permitieron configurar el código de la empresa para él envío de datos a la nube.

La validación del sistema integral de monitoreo se realizó con la lectura, registro, almacenamiento, análisis y enmascarado (no presentado) de los datos experimentales mediante operaciones de careo de una pieza de metal de acero aleado suave con porcentaje de 0.2-0.3% de carbón, una pieza de madera aserrada de pino y al vacío (sin carga) en la maquina fresadora. Los datos experimentales fueron colocados en la nube.

Se logró conformar una base de datos de parámetros de potencia (tensión, intensidad de corriente, potencia aparente total y factor de potencia). Todas las variables fueron monitoreadas por intervalos de tiempo de 25.9, 15.3 y 14.6 minutos para la pieza de metal, madera y al vacío respectivamente. Para el caso de la pieza de metal, los datos más significantes se registraron en el intervalo de 214-216 V de tensión, 1.30-2.90 A de corriente, entre 06-0.8 de *fp* y 600-1000 VA de potencia aparente. Para la pieza de madera fueron de 215-218 V, 1.2-2.2 A, 0.5-0.6 y 680-710 VA. Para las pruebas de vacío las lecturas logradas fueron de 214-217 V, 1.2-2.2 A, 0.51-0.58 y 660-700 VA.

Como trabajo a futuro se contempla para otros proyectos – fuera del alcance del presente trabajo – obtener una base de datos robusta en la operación de demás máquinas de manufactura especializada, así como la puesta en prueba del proyecto directamente en una empresa. Finalmente, el logro del presente trabajo partió de una base de resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto de residencia profesional, sin embargo, fue con el desarrollo de Tesis que se lograron productos académicos y desarrollo tecnológico más significantes y de alto valor agregado para la empresa receptora de la transferencia de tecnología. Además de que fomenta demás trabajo futuro para nuevos posibles temas de investigación y de Tesis.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Secretaria de Gobernación. (2018). Diario Oficial de la Federación: actualización de las tarifas que aplicará la Comisión Federal de Electricidad por el servicio público de distribución de energía eléctrica durante el periodo que comprende del 1 de enero de 2018 al 31 de diciembre de 2018. México: SEGOB. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510836&fecha=18/01/2018.
- (2) Secretaria de Gobernación. (2019). Diario Oficial de la Federación: tarifas reguladas de los servicios de Transmisión, Distribución, Operación del Centro Nacional de Control de Energía, Operación de CFE Suministrador de Servicios Básicos y de los Servicios Conexos no incluidos en el Mercado Eléctrico Mayorista, durante el periodo que corresponde del 1 de enero del 2019 y hasta el 31 de diciembre de 2019. México: SEGOB. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5548443&fecha=18/01/2019.
- (3) Secretaria de Gobernación. (2020). Diario Oficial de la Federación: tarifas reguladas de los servicios de Transmisión, Distribución, Operación del Centro Nacional de Control de Energía, Operación de CFE Suministrador de Servicios Básicos y de los Servicios Conexos no incluidos en el Mercado Eléctrico Mayorista, durante el periodo que corresponde del 1 de enero del 2019 y hasta el 31 de diciembre de 2019. México: SEGOB. Recuperado de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5583943&fecha=14/01/2020.
- (4) MoTeBo. (2018). MoTeBo. Recuperado de <https://www.motebo.co/index.html>.
- (5) Duque-Alas, A. O. (2014). *Optimización del sistema de monitorización remota de medidores de energía eléctrica* (tesis de Licenciatura). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- (6) López, J., Arias, J. & Quintero, E. (2016). Interactive electronic energy meter for residential use. *Prospectiva*, 14(1), 61-72.
- (7) Nakandakari, J. & Rivero, R. (2013). Design of an electronic single-phase energy meter with ethernet communication. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(1), 65-72.
- (8) Pocero, L, Amaxilatis, D., Mylonas, G. & Chatzigiannakis, I. (2017). Open source IoT meter devices for Smart and energy-efficient school buildings. *HardwareX*, 1, 54-67.
- (9) Hossain-B., A., Zahiurl-H., Md & Zhang, L. (2020). IoT based Wireless sensor network for power quality control in Smart grid. *Procedia Computer Science*, 167, 1148-1160.
- (10) Coronel-Basurto, B. M. (2017). *Monitoreo de la red eléctrica del laboratorio de máquinas de la facultad de informática y electrónica aplicando inteligencia artificial* (tesis de Licenciatura). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- (11) Alvarez-Velasco, C. A. & Hernández-Montesdeoca, W. J. (2019). *Implementación de una red GSM para monitoreo de variables eléctricas de un banco de variadores de frecuencia en el laboratorio de control y*

- manipulación automática de la escuela de ingeniería de mantenimiento* (tesis de Licenciatura). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- (12) Brown-d. Rivero, A. (2011). Electricidad, características y opciones de reforma para México. *Análisis económico*, XXVI (61), 154-173.
- (13) Secretaría de Energía. (2016). Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2016-2030 (PRODESEN).
- (14) Energía Hoy. (2018). Grandes consumidores de energía en México: ¿Qué paso? (1992-2013). México: Revista Energía Hoy. Recuperado de <https://energiahoy.com/2020/01/30/grandes-consumidores-de-energia-en-mexico-que-paso-1992-2013/>
- (15) Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). La Comisión Federal de Electricidad, empresa productiva del Estado. México: INAI/Portal de Obligaciones de Transparencia INFOMEX. Recuperado de <https://www.cfe.mx/acercacfe/Quienes%20somos/Pages/conceptocfe.aspx>
- (16) Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). Esquema tarifario vigente, Industria. México: INAI/Portal de Obligaciones de Transparencia INFOMEX. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Industria.aspx>
- (17) Comisión Federal de Electricidad. (s.f.). Gran demanda en media tensión horaria. México: INAI/Portal de Obligaciones de Transparencia INFOMEX. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>
- (18) FactorEnergía. (s.f.). Aprende a calcular el consumo eléctrico de tu casa. España: factorenergia. Recuperado de <https://www.factorenergia.com/es/blog/ahorrar-electricidad/aprende-calculer-consumo-electrico-casa/>
- (19) Técnica Salgar. (s.f.). Factor de potencia. México: Salgar. Recuperado de <https://salgar.com/factor-de-potencia/>
- (20) Díaz-Bautista, A. (2005). El cambio estructural y la regulación del sector eléctrico mexicano. Recuperado de <https://econwp.ub.uni-muenchen.de/econ-wp/io/papers/0504/0504011.pdf>
- (21) Tecnología. (s.f.). Factor de potencia. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/electricidad/factor-de-potencia.html>
- (22) EcuRed. (s.f.). Potencia eléctrica. Cuba: Enciclopedia Cubana. Recuperado de https://www.ecured.cu/Potencia_el%C3%A9ctrica
- (23) Viego-Felipe, P. R., Gómez-Sarduy, J. R., de Armas-Teyra, M. A. y Reyes-Calvo, R. (2014). Determinación *IN-SITU* del factor de potencia y la eficiencia de motores asincrónicos a cargas parciales. *Ingeniería Energética*, XXXV (1), 15-26.
- (24) Circutor. (2015). Que es la eficiencia energética eléctrica. España: CIRCUTOR SA, Recuperado de <http://circutor.es/es/formacion/eficiencia-energetica-electrica/que-es-la-eficiencia-energetica-electrica>
- (25) Francor. (2020). Instalaciones eléctricas industriales. México: Francor Construcción Industrial. Recuperado de <http://francor.com.mx/instalaciones-electricas-industriales/>

- (26) El blog sobre instalaciones eléctricas. (2016). Instalaciones eléctricas industriales: toda la información. España: Instalaciones Moreno & González SL. Recuperado de <https://inst-morenogygonzalez.com/noticias/instalaciones-electricas-industriales/>
- (27) Unidad Educativa Técnico Salesiano. (s.f.). Conexión Estrella-Triangulo. Ecuador. Recuperado de <https://automatismosuets.wordpress.com/conexion-estrella-triangulo/>
- (28) Enriquez-Harper, G. (2013). *Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales*. 2 ed. México, D. F. Editorial Limusa 2 ed.
- (29) SIEMENS. (5/2012). SENTRON aparato de medida PAC3100: manual de producto (A5E02385159D-02). Nürnberg, Alemania: Siemens AG. Versión en español.
- (30) José-Luis, R. (s.f.). Como funciona una fresadora. Recuperado de <https://como-funciona.co/una-fresadora/>
- (31) Gemak. (s.f.). Fresadora. Recuperado de <https://maquinadocnc.com.mx/fresadora/>
- (32) Haas Automation. (2020). Fresadora de utillajes TM-1 de Haas. US: Haas Automation Inc. Recuperado de <https://www.haascnc.com/es/machines/vertical-mills/toolroom-mills/models/tm-1.html>
- (33) De máquinas y herramientas. (2013). ¿Cómo funciona la Fresadora CNC?. Recuperado de <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresadoras-cnc>
- (34) Corona. L. (2011). La fresadora y sus partes de manera sencilla. Recuperado de <http://lafresadora.blogspot.com/2012/10/la-fresadora-y-sus-partes.html>
- (35) Reyes-Morales, G., Guerrero-Hernández, V., Ríos-Ataxca, B. N., Ortiz-Aguilar, O. y Cruz-Lázaro, E. (2019). Metodología para la restauración y puesta en marcha de una maquina fresadora CNC. *Nexo Revista Científica*, 32(2), 179-189.
- (36) PerezCamps. (s.f.). Mantenimiento para las fresadoras CNC. Recuperado de https://www.perezcamps.com/es/strong-mantenimiento-strong-para-las-strong-fresadoras-cnc-strong_8311.
- (37) IPC2U. (2016). The main differences between RS-232, RS-422 and RS-485. US: IPC2U Group. Recuperado de <https://ipc2u.com/articles/knowledge-base/the-main-differences-between-rs-232-rs-422-and-rs-485/>
- (38) Club de integradores Viakon. (2017). RS-232 y RS-485. México: Viakon Conductores Monterrey. Recuperado de <http://clubdeintegradoresviakon.com/rs-232-y-rs-485/>
- (39) Saboya, N. G. F. (2012). Normas de comunicación en serie: RS-232, RS-422 y RS-485. *Revista Ingenio Libre*, 9, 86-94.
- (40) Zocholl, S. E. & Smaha, D. W. (1992). *Current Transformer Concepts*. Proceedings of the 46th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference. Conferencia llevada a cabo en Georgia, US.
- (41) ABB Group. (02/2015). Application Guide ABB Instrument Transformers. Ludvika: Sweden, Publication IHSM 9543 40-00en, Edition 4.
- (42) Osorno-Rivera, W. (2014). *Selección y especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales* (tesis de especialidad). Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.

- (43) Maquinas eléctricas: el transformador. Recuperado de <http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Ec1181ele/Material/Trasformadores/Transformador.PDF>
- (44) Aprendiendoarduino. (2019). Dispositivos Hardware IoT. Recuperado de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2019/10/15/dispositivos-hardware-iot-2/>
- (45) DataScope. (2016). ¿Qué es y cómo funciona la nube?. Recuperado de <https://www.mydatascope.com/blog/es/2018/05/16/que-es-y-como-funciona-la-nube/>
- (46) Ruiz-del Olmo, F. J. (2010). Conocimiento en la nube: características sociocomunicativas del *Cloud Computing*. *Revista Razón y Palabra*, 73.
- (47) KMtronic. (2018). ModbusMAT freeware ModBus program. Recuperado de <https://web-relays.com/en/blog/modbusmat-freeware-modbus-program/>
- (48) Arduino. (2020). What is Arduino? Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- (49) National Instruments. (2020). ¿Qué es LabVIEW?. US: National Instruments. Recuperado de <https://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>

ANEXO 1

Planos con medidas y dimensiones de diseño del gabinete eléctrico, soporte de transformadores y soporte del Sentron PAC3100

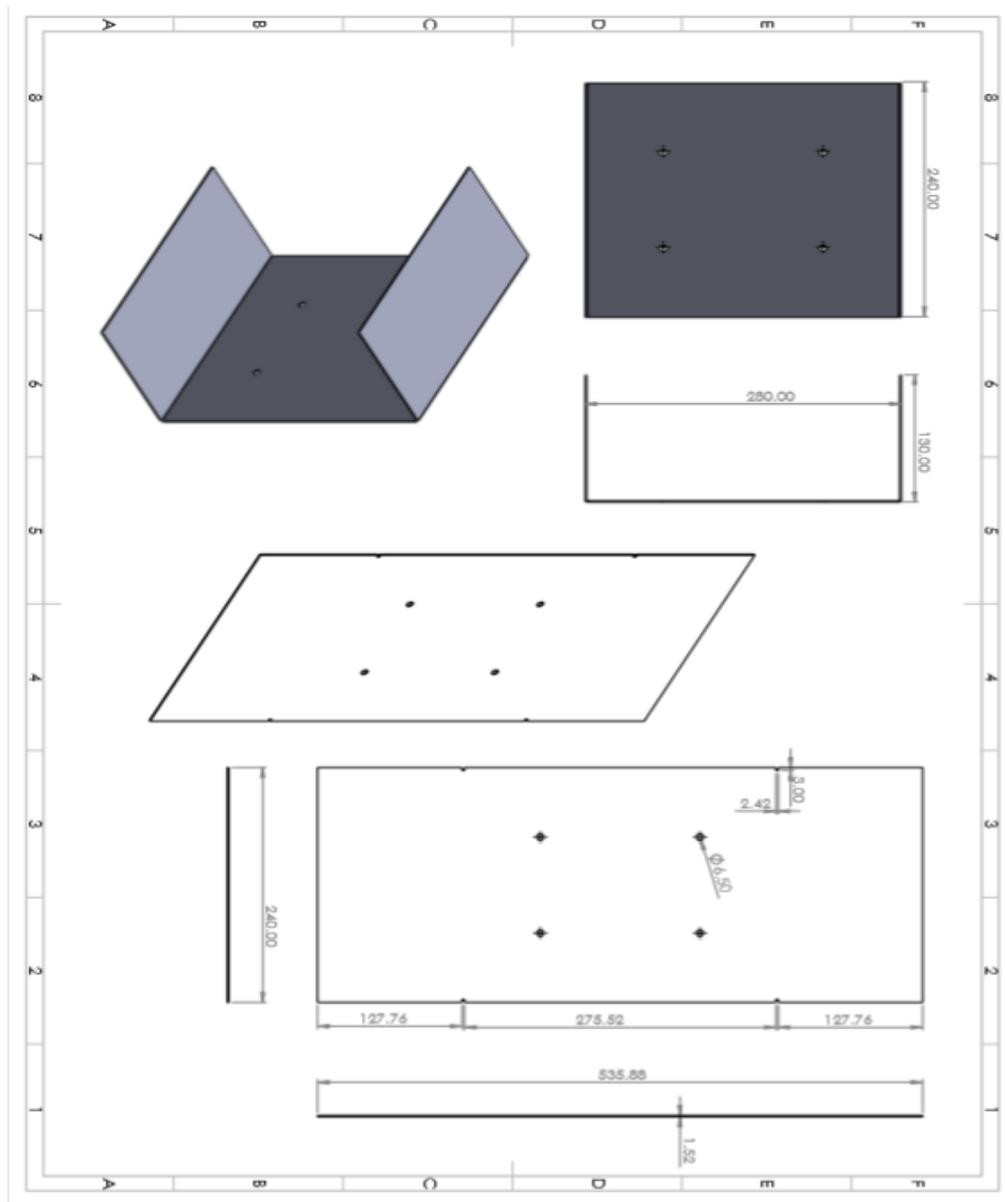


Figura 92. Medidas de la pieza "base" del gabinete eléctrico.

Ingeniería Mecatrónica
 Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético
 de una Fresadora CNC Universal

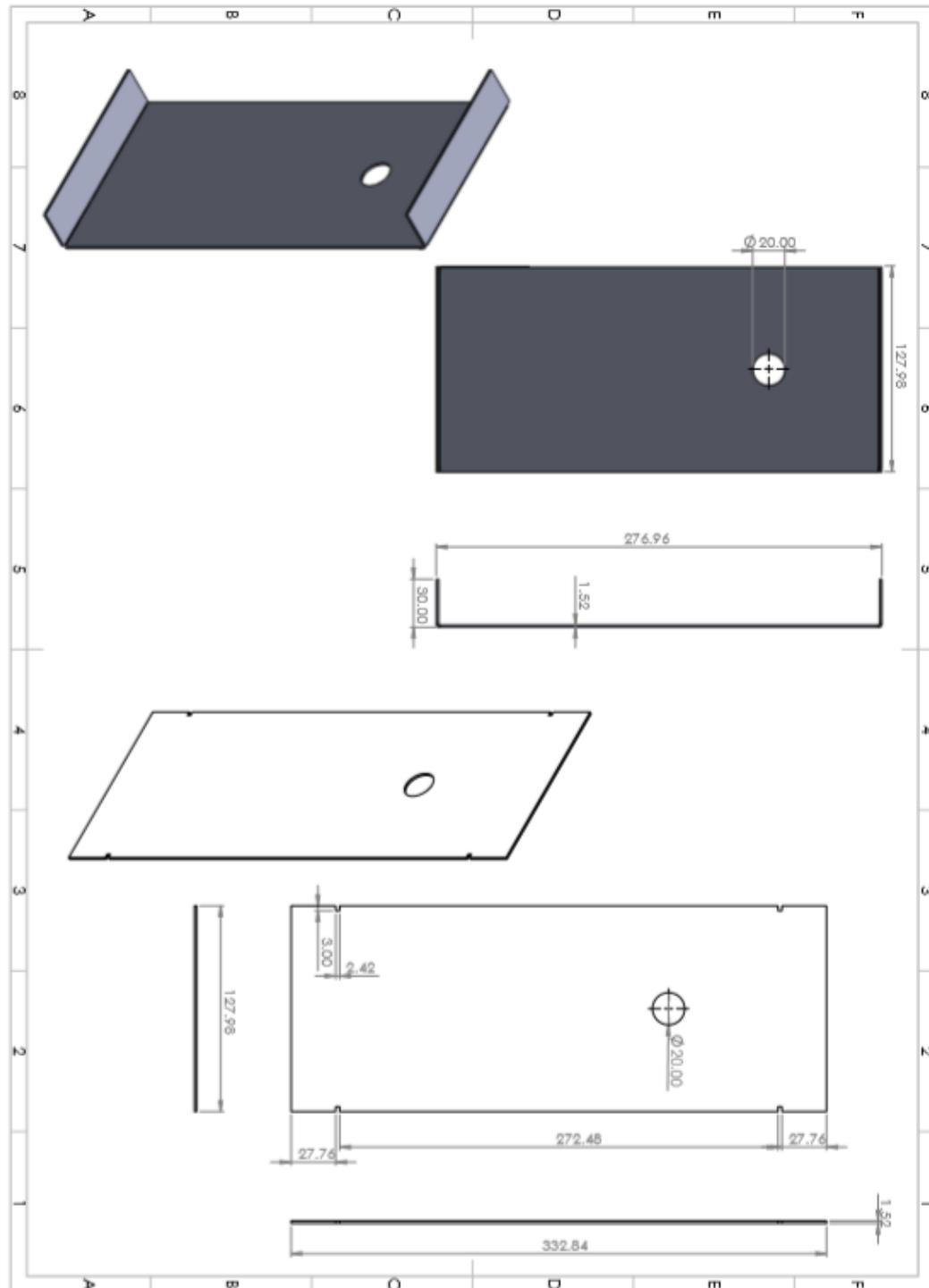


Figura 93. Medidas de la pieza "lateral" del gabinete eléctrico.

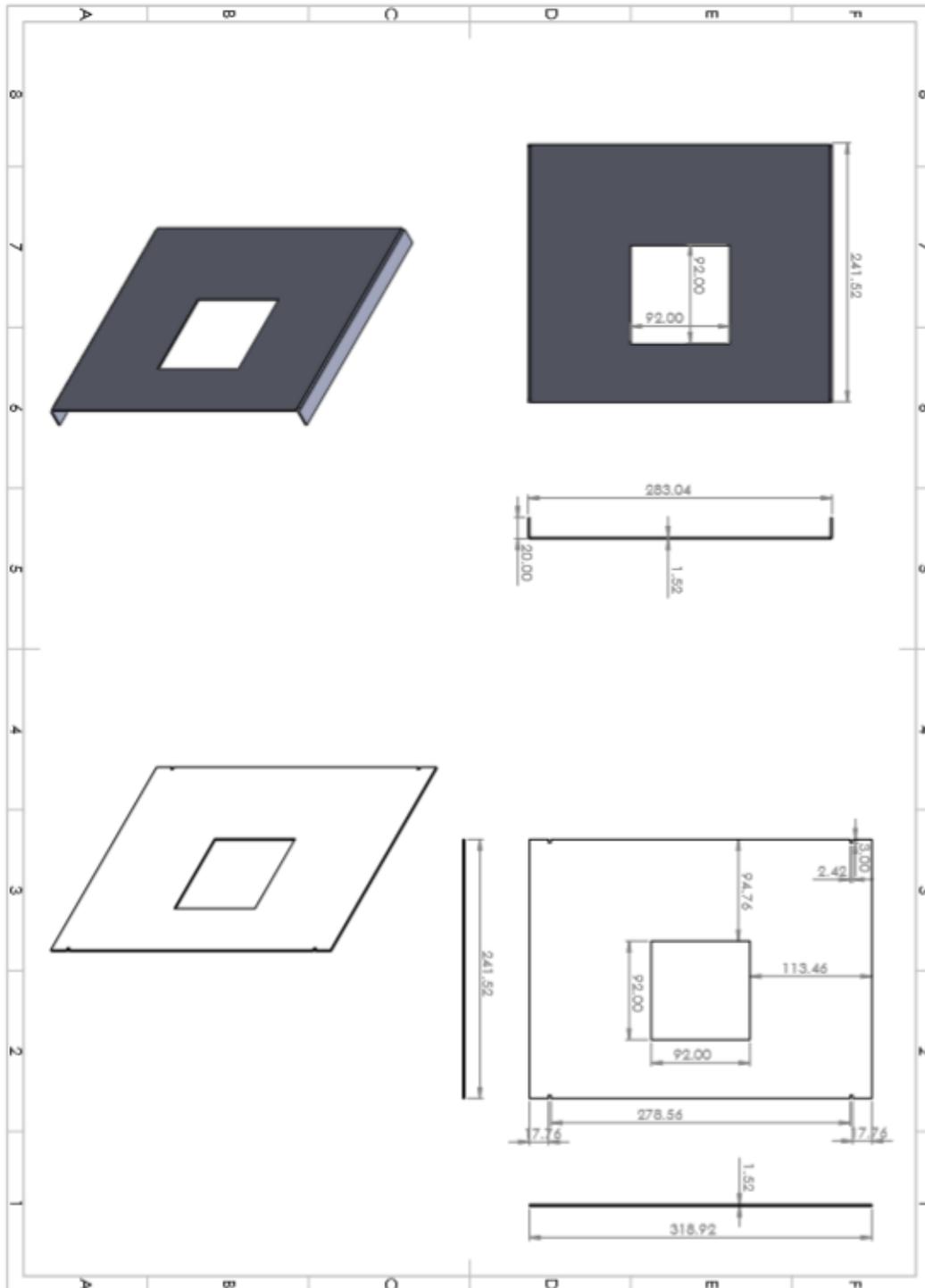


Figura 94. Medidas de la pieza “tapadera” del gabinete eléctrico.

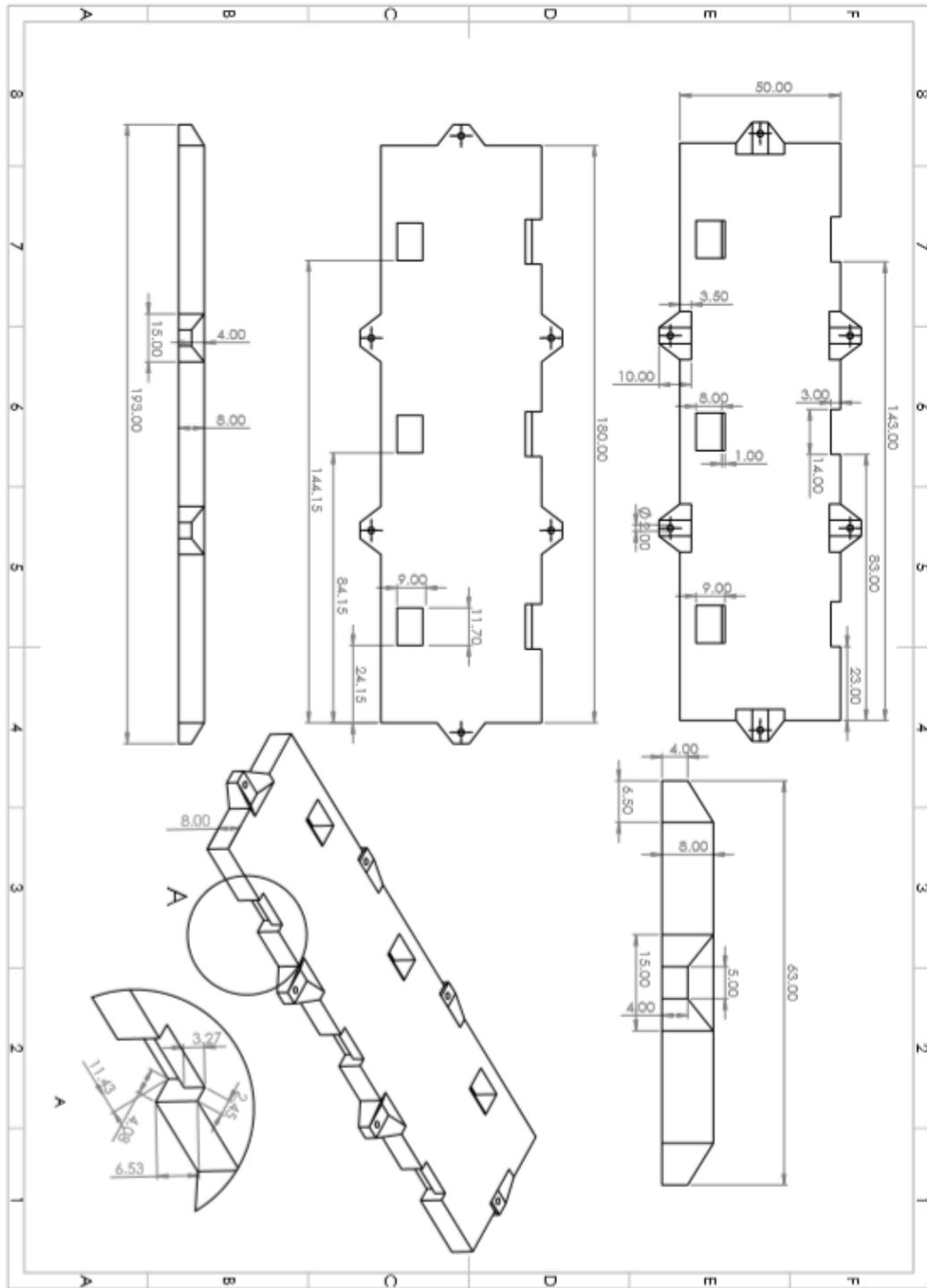


Figura 95. Medidas de la pieza “porta transformador de corriente” del gabinete eléctrico.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

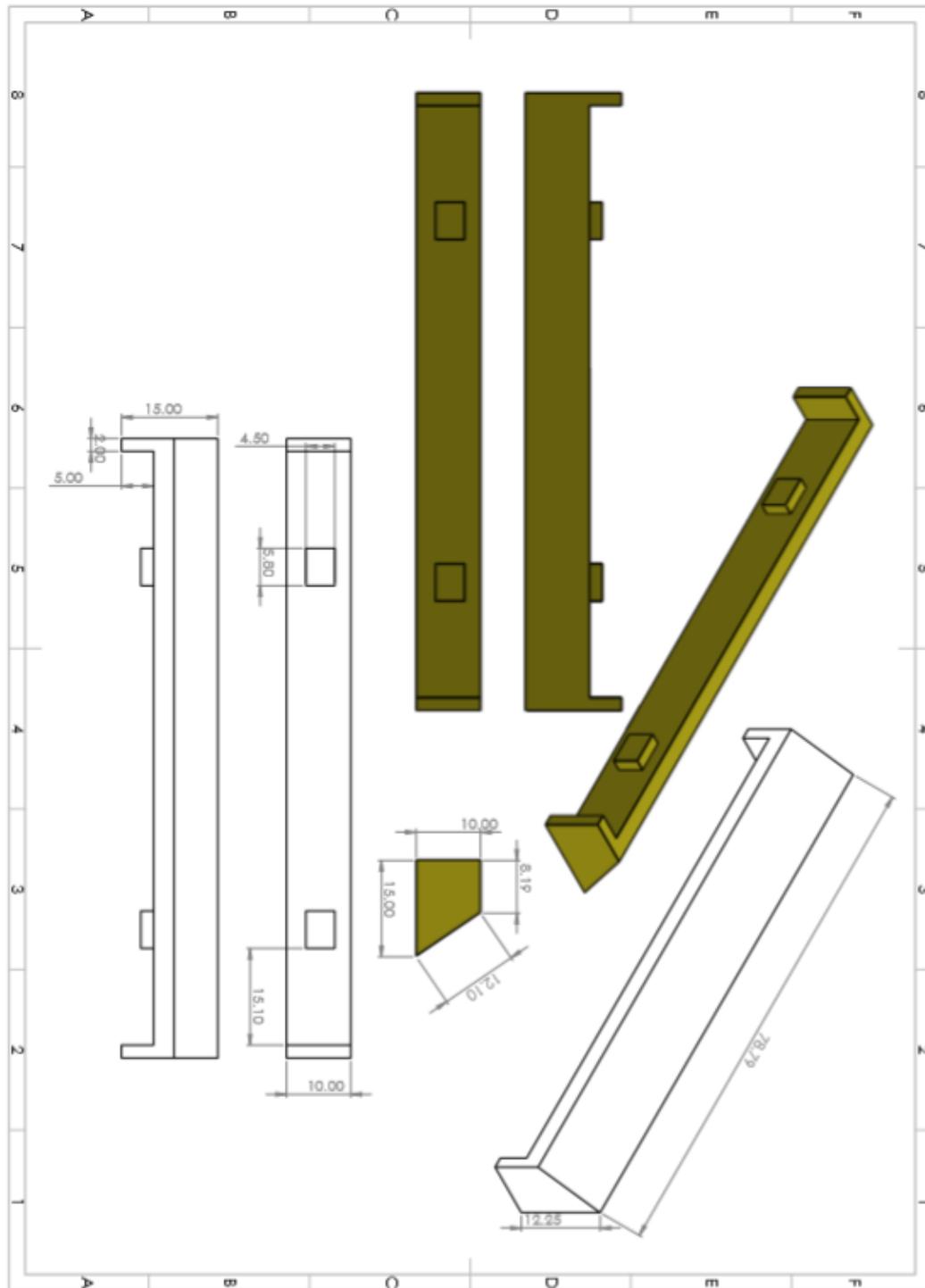


Figura 96. Medidas de la pieza "soporte Sentron PAC3100" del gabinete eléctrico.

ANEXO 2

Graficas de análisis de datos obtenidos del careo de las piezas de metal, madera y al vacío

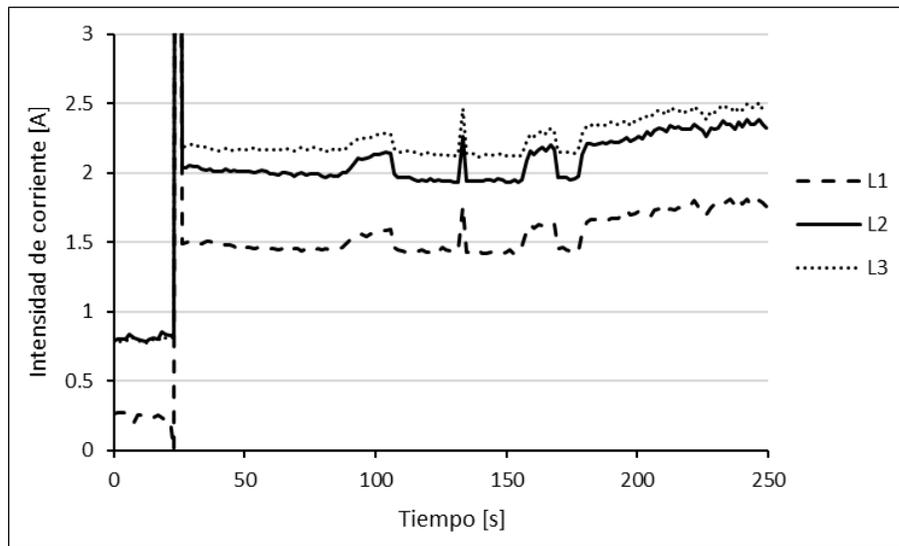


Figura 97. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.

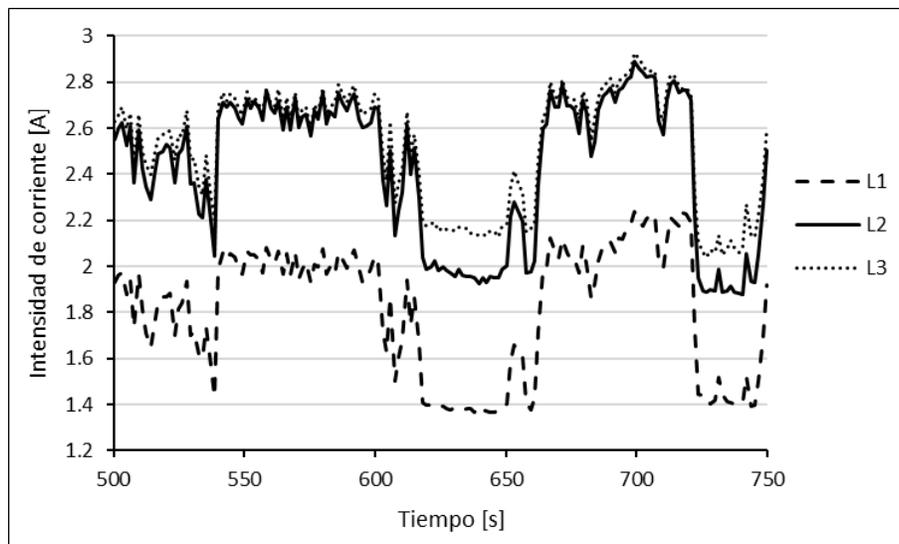


Figura 98. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.

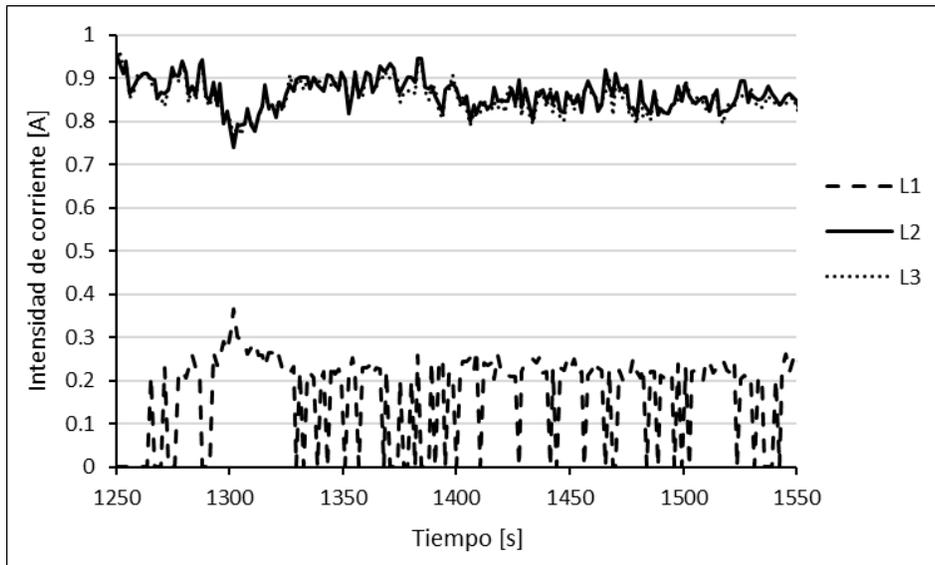


Figura 99. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de metal: tiempos de maquinado de 1250-1550 segundos.

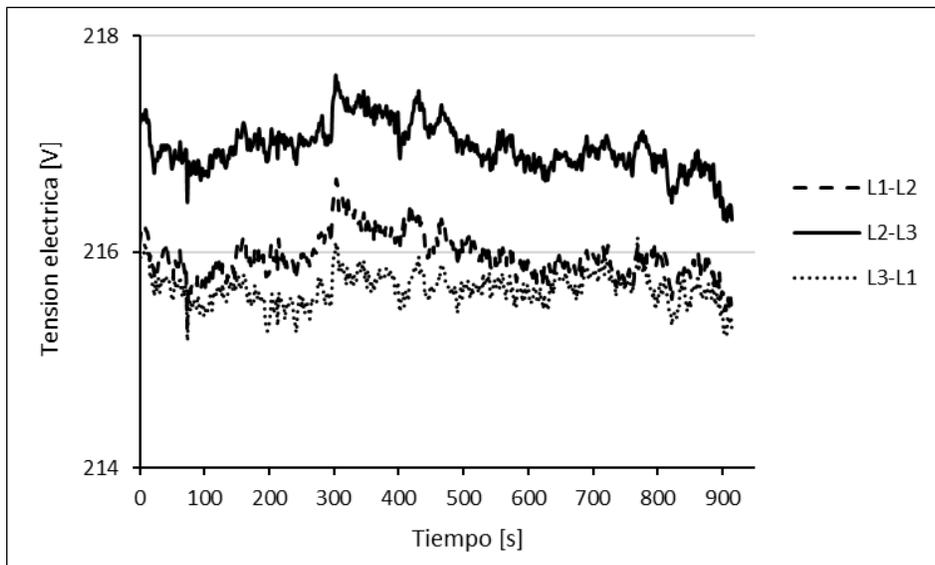


Figura 100. Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en el careo de la pieza de madera.

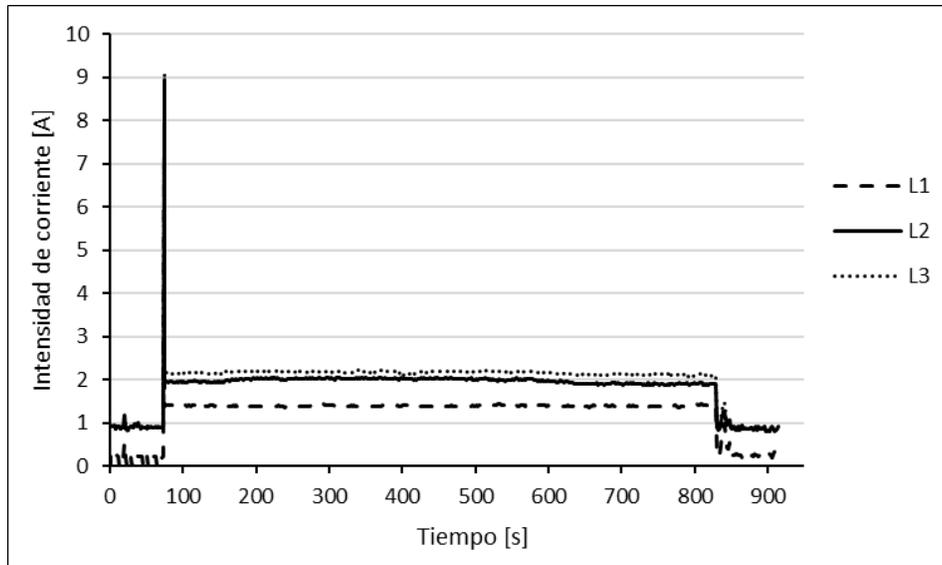


Figura 101. Grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera.

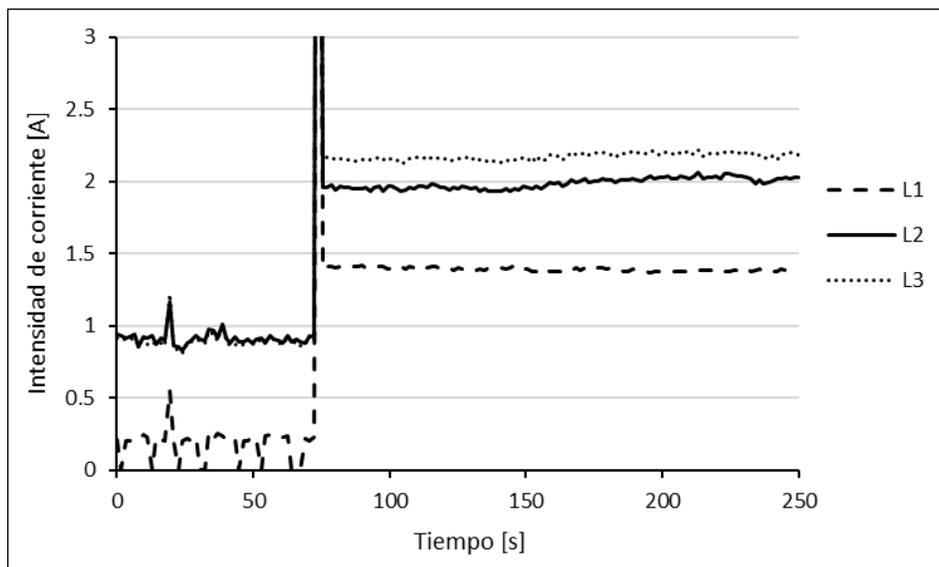


Figura 102. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

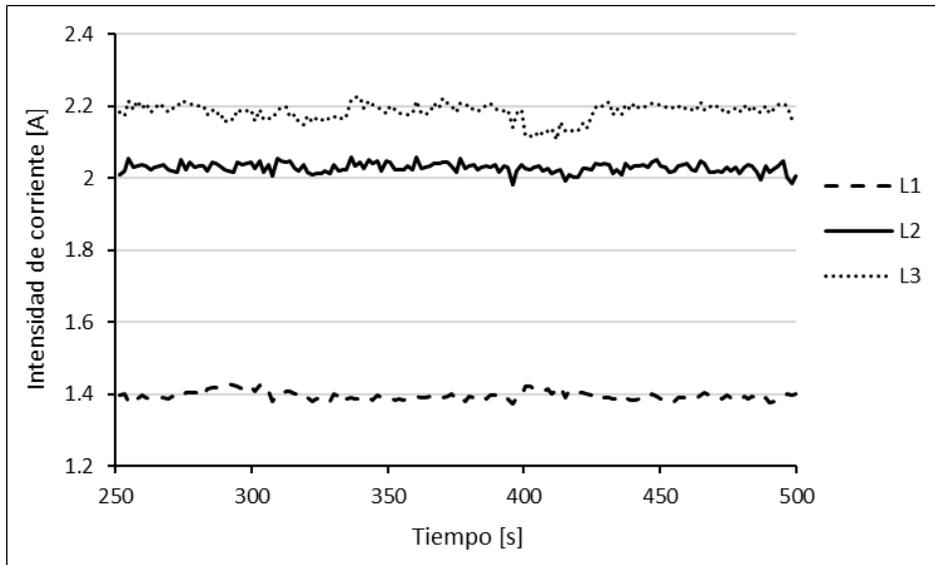


Figura 103. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.

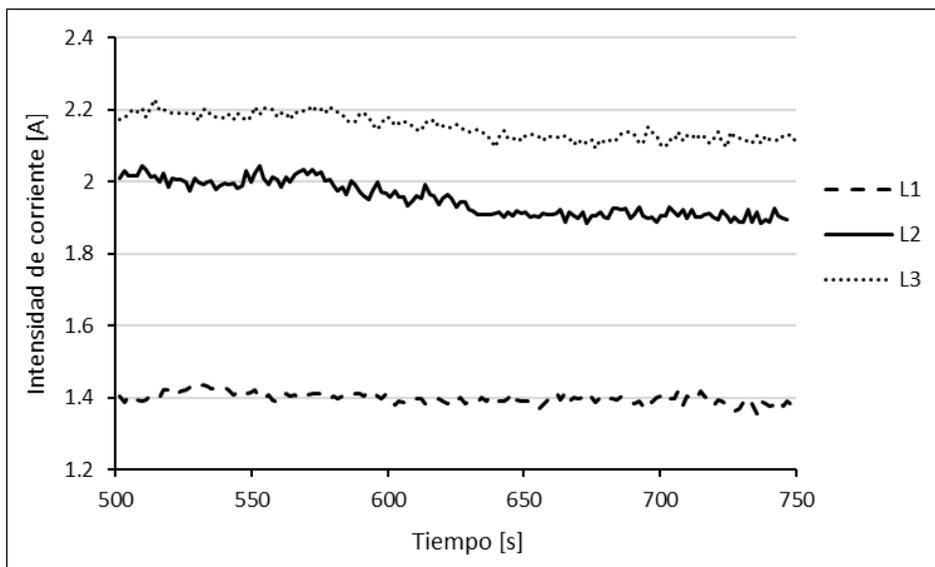


Figura 104. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

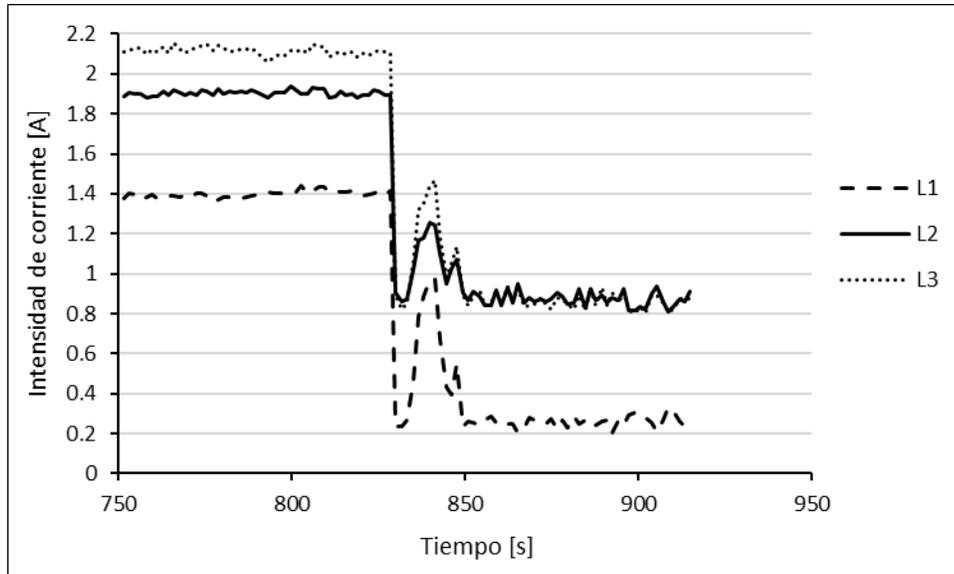


Figura 105. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en el careo de la pieza de madera: tiempos de maquinado de 750-915 segundos.

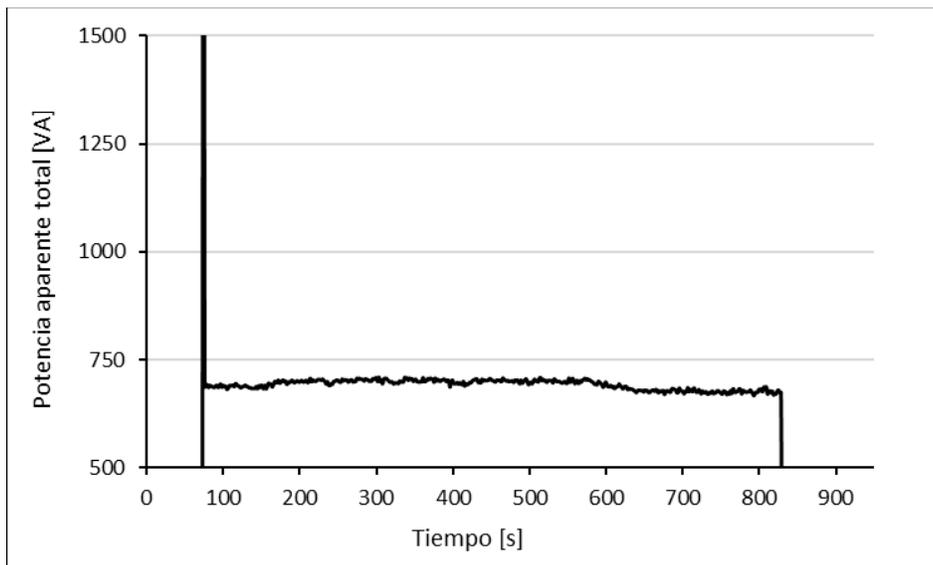


Figura 106. Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida del proceso de careo de la pieza de madera.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

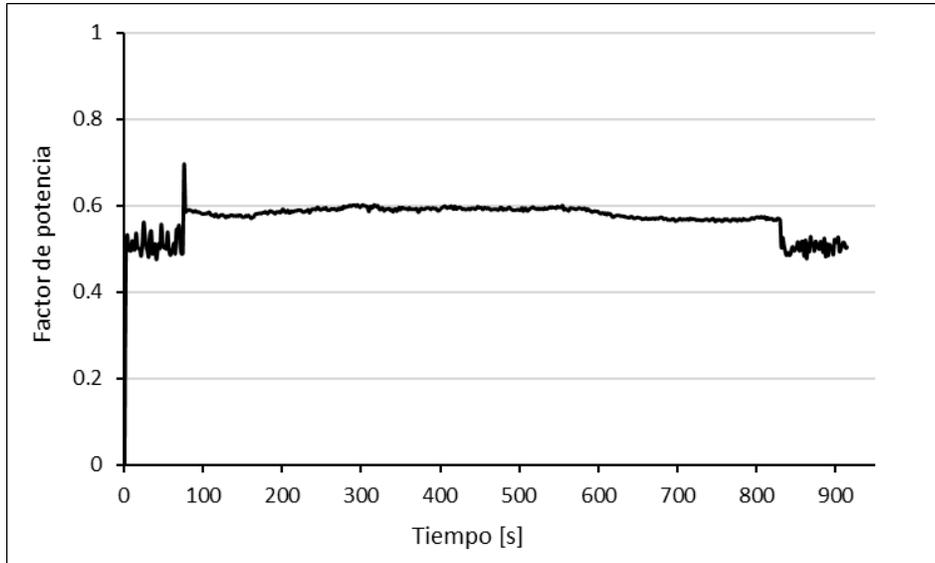


Figura 107. Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida del proceso de careo de la pieza de madera.

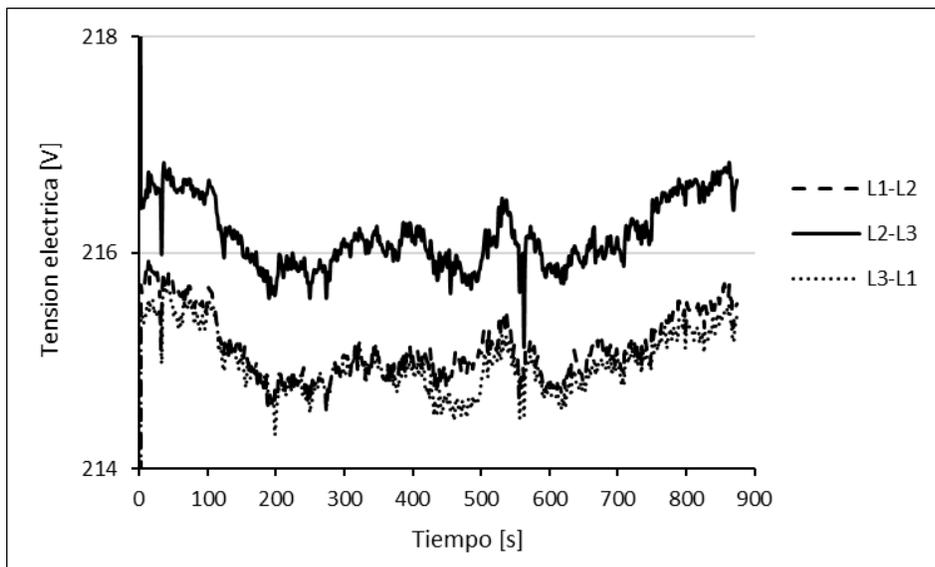


Figura 108. Grafica de tiempo vs tensión eléctrica de los pares de líneas L1-L2, L2-L3 y L3-L1 obtenida en la operación al vacío.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

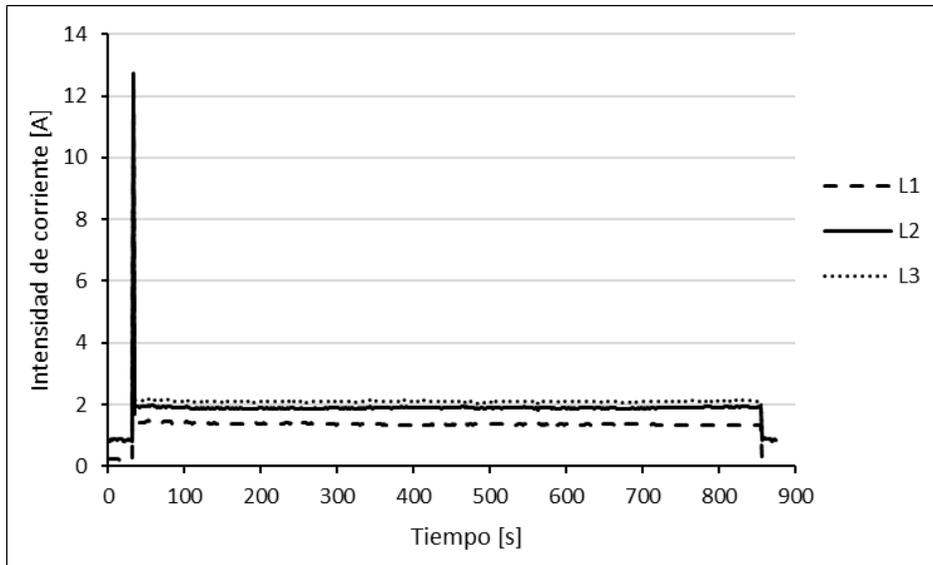


Figura 109. Grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío.

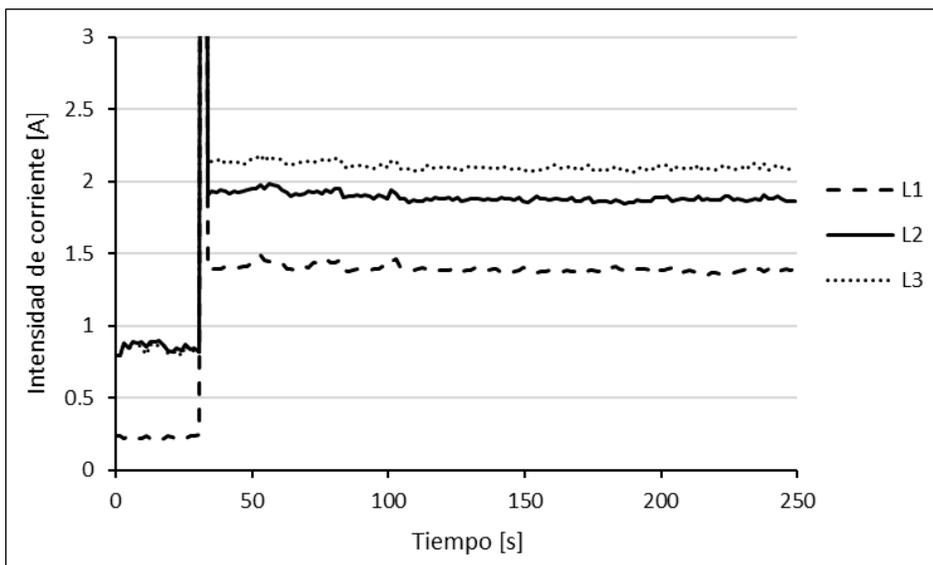


Figura 110. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 0-250 segundos.

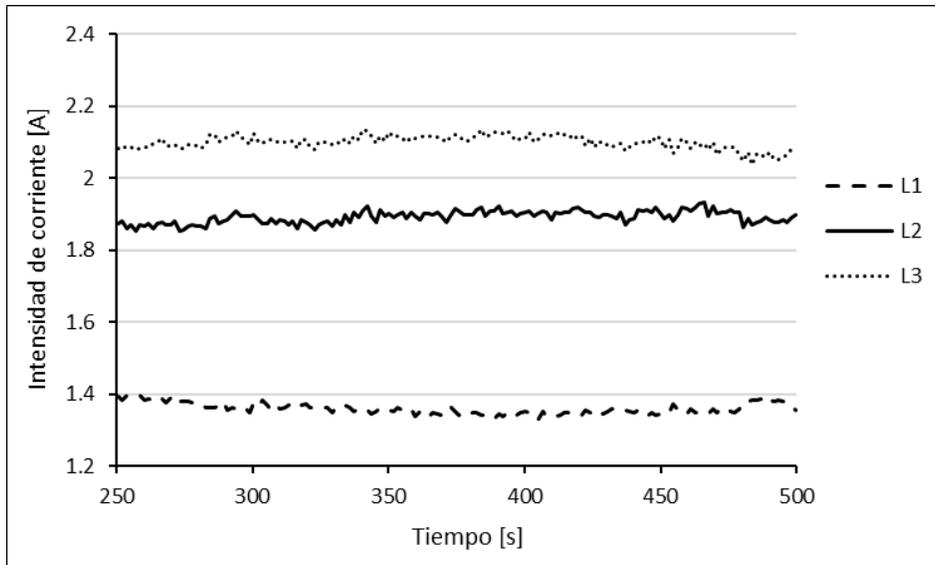


Figura 111. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 250-500 segundos.

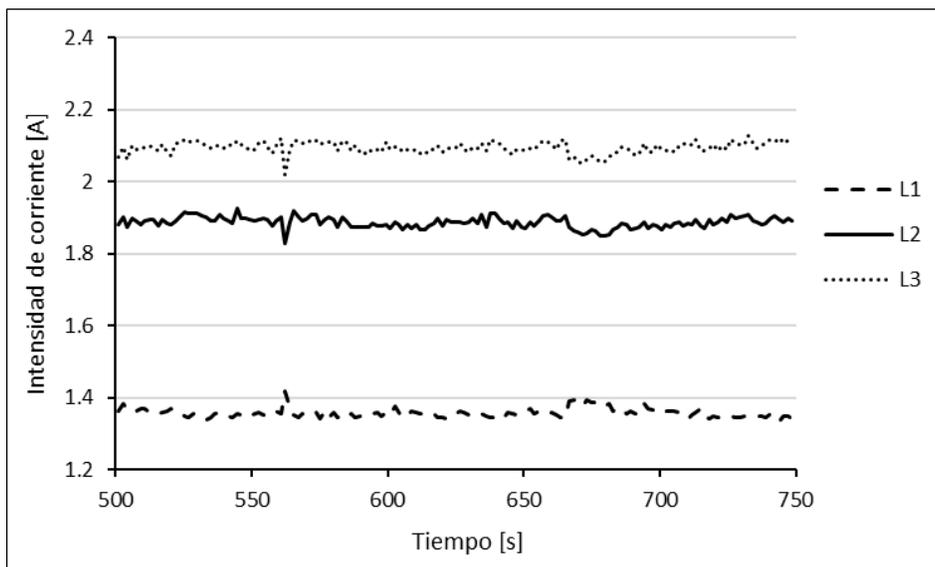


Figura 112. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 500-750 segundos.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

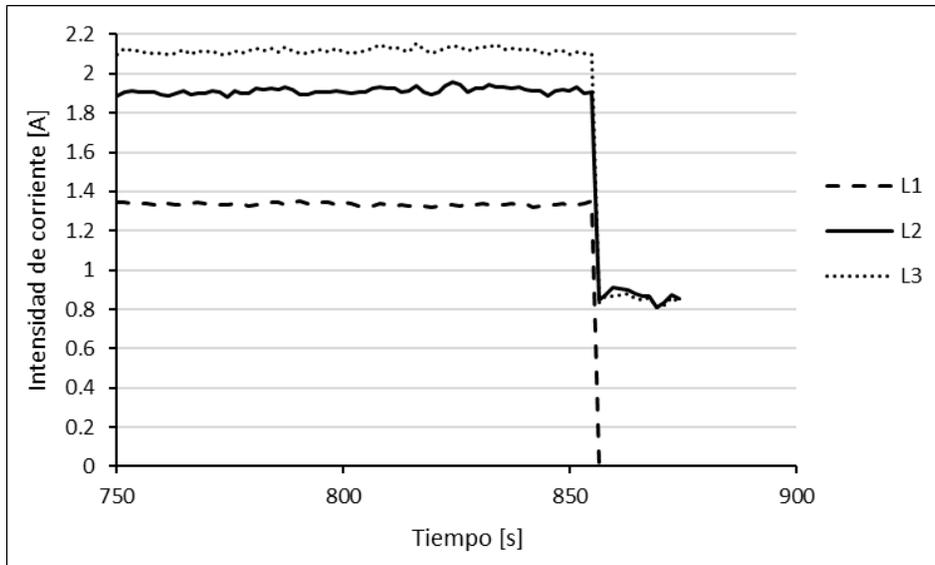


Figura 113. Acercamiento de grafica de tiempo vs intensidad de corriente de las líneas L1, L2 y L3 obtenida en la operación al vacío: tiempos de maquinado de 750-875 segundos.

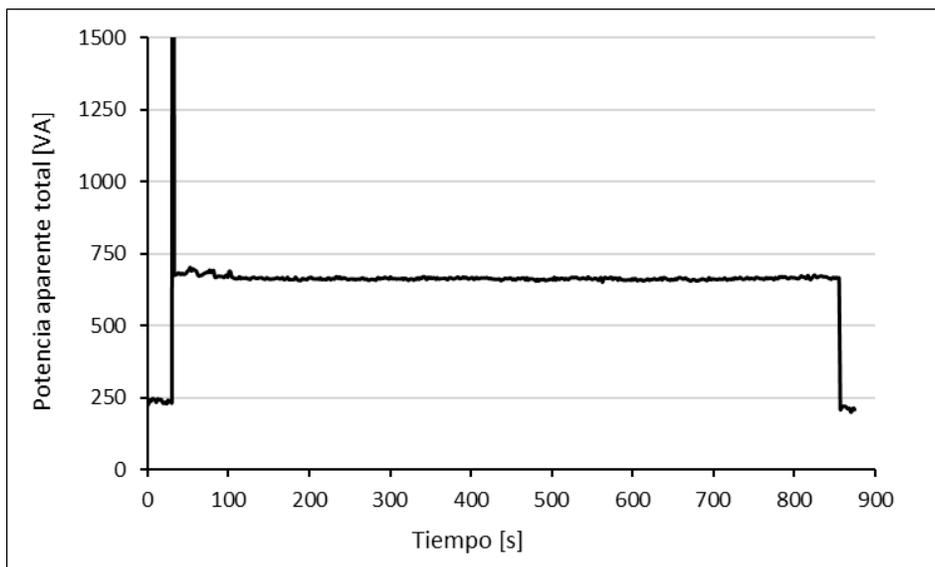


Figura 114. Grafica de tiempo vs potencia aparente obtenida en la operación al vacío.

Ingeniería Mecatrónica

Sistema Integral de Monitoreo de Consumo de Energía Eléctrica mediante Tecnología IoT: Consumo Energético de una Fresadora CNC Universal

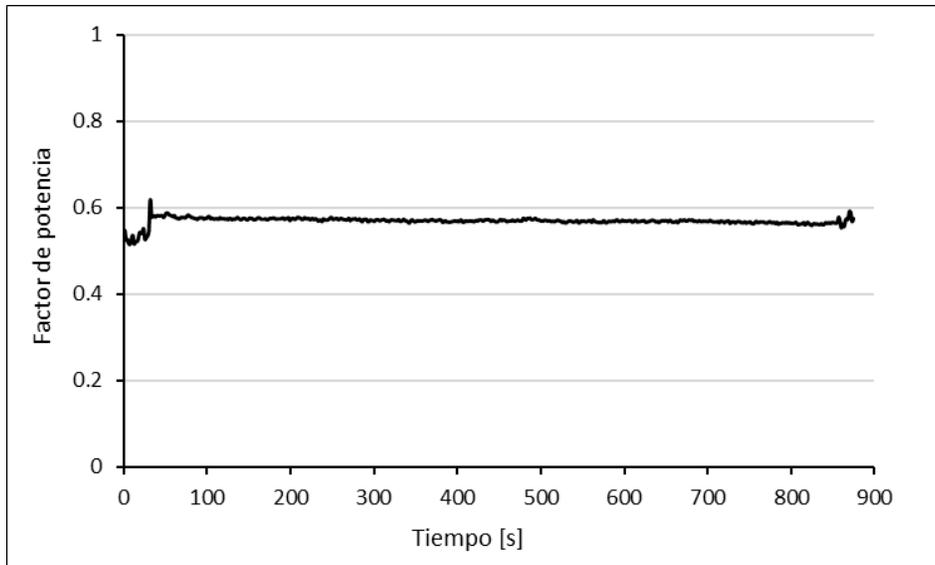


Figura 115. Grafica de tiempo vs factor de potencia obtenida en la operación al vacío.