

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA



**Estudio de demanda energética utilizando software y
hardware libre en el Edificio de Ingeniería Industrial,
UES.**

PRESENTADO POR:

ROBERTO BALMORE GALÁN PARRAS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

Estudio de demanda energética utilizando software y hardware libre en el Edificio de Ingeniería Industrial, UES.

Presentado por :

ROBERTO BALMORE GALÁN PARRAS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

San Salvador, Octubre 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, 3 de octubre de 2014, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. José Wilber Calderón Urrutia
Director

Firma:
Wilber Calderón

2. Ing. Salvador de Jesús Germán
Secretario

Firma:
[Signature]



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- MSc. Carlos Osmin Pocasangre Jiménez

Firma:
[Signature]

2- Ing. Werner David Meléndez Valle

3- Ing. Jose Wilber Calderón Urrutia

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Estudio de demanda energética utilizando software y hardware libre en el Edificio de Ingeniería Industrial, UES.

A cargo del Bachiller:

- Roberto Balmore, Galán Parras

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final, de: 7.8

(Siete punto Ocho)

AGRADECIMIENTOS

A Dios padre y a Jesucristo por darme salud, inteligencia y capacidad de entendimiento, todo lo bueno de mi se lo debo a ellos que la gloria y honra sean para ellos eternamente.

A mis padres Delmy Ruth Parras y Roberto Edmundo Galán por apoyarme, motivarme, brindarme la ayuda económica para poder culminar mi carrera universitaria y porque siempre desean lo mejor para mí; a ellos debo mi carrera universitaria.

A mi abuela Sonia Edith Galán y mis hermanos Marlo Galán y Karia Galán por haber compartido mi infancia y adolescencia llena de buenos momentos y alegría; ellos son parte de motivación y anhelo de superación.

A Gema Ivonne Cheng por haber dado los mejores recuerdos a lo largo de mi estudio universitario, por ayudarme a madurar, por prestarme su laptop todo el tiempo necesario para poder terminar mi tesis, por creer en mí siempre, por esperar lo mejor de mí y perdonar todos mis errores; ella es mi motivación para alcanzar éxito en mi vida.

INDICE.

INTRODUCCION.....	i
OBJETIVOS.....	ii
ALCANCES.....	iii
ANTECEDENTES:.....	iv
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	v
1. REFERENCIA TEORICA SOBRE EFICIENCIA ENERGETICA Y MEDICION DE ENERGIA TRIFASICA.	1
1.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA.	1
1.2 AUDITORIAS ENERGÉTICAS EN EDIFICIOS EXISTENTES.	2
1.3 CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS.....	4
1.4 CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS EN ESPAÑA	4
1.5 LA CERTIFICACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	6
1.6 LINEA BASE.	7
1.7 MEDICIÓN DE POTENCIA TRIFÁSICA	7
1.8 TIPOS DE MEDIDORES SEGÚN CONEXIÓN	7
1.8.1 Medición estrella de 3 conductores.....	7
1.8.2 Medidor de dos elementos	9
1.8.3 Medidor de tres elementos.....	9
1.8.4 Medición delta de 3 conductores.....	10
1.8.5 Medidor de 2 elementos.....	11
1.8.6 Medidor de 3 elementos.....	12
1.8.7 Medición estrella de 4 conductores.....	13
1.8.8 El medidor de 2 1/2 elementos	13
1.8.9 El medidor de tres elementos	14
1.9 Medición delta de 4 conductores	15
1.9.1 El medidor delta de 2 ½ elementos.....	15

1.9.2	El medidor de tres elementos	16
2.	DESCRIPCION, METODOLOGIA Y USO DEL SOFTWARE OPENSTUDIO	19
2.1	EL SOFTWARE DE SIMULACION OPENSTUDIO	19
2.2	HERRAMIENTAS DE OPENSTUDIO	20
2.2.1	Trimble SketchUp	20
2.2.2	EnergyPlus™	20
2.3	ESTUDIO DE DEMANDA ENERGETICA POR MEDIO DEL SOFTWARE OPENSTUDIO.....	20
2.4	METODOLIGIA PARA UTILIZAR EL SOFTWARE DE SIMULACION ENERGETICA OPENSTUDIO.	21
2.4.1	Planificación	21
2.4.2	Determinación de zonas térmicas.....	22
2.5	CONTRUCCION DEL MODELO DEL EDIFICIO CON EL PLUGIN OPENSTUIDIO PARA SKETCHUP. ...	23
2.5.1	SELECCIÓN DE UNA PLANTILLA ADECUADA.....	23
2.5.2	CREACIÓN DE ESPACIOS Y SUPERFICIES.....	24
2.5.3	CREACIÓN DE SUB-SUPERFICIES (VENTANAS Y PUERTAS).....	26
2.5.4	SURFACE MATCHING.....	27
2.5.5	Transferencia de calor entre superficies.....	29
2.5.6	Herramienta inspector de objetos.....	32
2.5.7	Seleccionando una superficie.....	33
2.6	SIMULACION DE DEMANDA ENRGETICA DE UN EDIFICIO CON LA APLICACION OPENSTUDIO.	34
2.6.1	Menu bar.....	36
2.6.2	Site.....	37
2.6.3	Scheludes.....	38
2.6.4	Construction.....	43
	Construction set.....	43
	Construction.....	44
2.6.5	Materials.....	45

2.6.6	Loads.	45
2.6.7	Space Types.	46
2.6.8	Building Stories.	48
2.6.9	Facility.	48
2.6.10	Thermal Zone.	51
2.6.11	HVAC Systems	52
2.6.12	Output Variables.	57
2.6.13	Simulation Setting.	58
2.6.14	Run Simulation.	58
2.6.15	Results Summary.	59
3.	ESTUDIO DE DEMANDA ENERGETICA DEL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL UES CON EL SOFTWARE OPENSTUDIO.	60
3.1	SIMULACION DE DEMANDA ENERGETICA EN EL EDIFICIO DE INGENIERIA INDUSTRIAL, UES.	60
3.2	ILUMINACION.	62
3.3	EQUIPO ELECTRICO	64
3.4	PERSONAL.	65
3.5	CARGAS ELECTRICAS Y TERMICAS POR CADA ESPACIO DECLARADO EN EL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL.	66
3.6	SISTEMAS HVAC.	69
3.7	RESULTADOS OBTENIDOS.	71
3.8	VALIDACION DE RESULTADOS.	73
3.9	Aplicación del pliego tarifario para análisis económico.	75
3.10	CLASIFICACION DEL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL POR EL INDICADOR DE CO ₂ /m ²	77
4.	CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE ENERGIA TRIFASICA PROTOTIPO.	78
4.1	DESCRIPCION DE COMPONENTES DEL HARDWARE.	79
4.1.1	PCDUINO.	79

4.1.2	El IC ADE7758	81
4.1.3	Logic level converter.	85
4.1.4	Pantalla LCD 16X4.....	86
4.2	CIRCUITO IMPLEMENTADO Y FUNCIONAMIENTO DEL IC ADE7758	88
4.2.1	Medición de tensión.....	89
4.2.2	Etapa de atenuación y acondicionamiento de tensión.....	89
4.2.3	Medición de corriente.....	91
4.2.4	Protocolo de comunicación del ade7758.....	93
4.2.5	Interrupciones del ade7758.	95
4.2.6	Operación de escritura serial.	95
4.2.7	Operación de lectura serial.	97
4.2.8	Registros del ADE7758.	98
4.3	CODIFICACION C++ Y USO DE LIBRERIAS DE ARDUINO PARA LA COMUNICACIÓN CON EL SHIELD PROTOTIPO.....	104
4.3.1	Configuración SPI.	104
4.3.2	ACCESO A LOS REGISTROS DE LECTURA Y ESCRITURA DEL ADE7758 CON LA LIBRERÍA ADE7758 105	
4.3.3	TIPOS DE CONEXIONES DISPONIBLES PARA EL IC ADE7758.....	106
4.4	ALMACENAMIENTO DE DATOS.	107
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIDOR DE ENERGIA PROTOTIPO.....	108
5.	RECOMENDACIONES Y CONCLUSINES.....	111
5.1	RECOMENDACIONES.	111
5.2	CONCLUSIONES.	113
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	116
7.	ANEXOS	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Escala de calificación de eficiencia energética	6
Figura 1.2 Medidor de un elemento para conexión estrella 3 hilos.	8
Figura 1.3 Medidor de dos elementos para conexión estrella 3 hilos	9
Figura 1.4 Medidor de tres elementos para conexión estrella 3 hilos.....	10
Figura 1.5 Medidor de dos elementos para conexión delta 3 hilos.	11
Figura 1.6 Medidor de tres elemento para conexión delta 3 hilos.	12
Figura 1.7 Medidor de dos y medio elementos para conexión estrella 4 hilos.	13
Figura 1.8 Medidor de tres elementos para una conexión en estrella 4.	14
Figura 1.9 Medidor de 2 ½ elementos para conexión delta 4 hilos.	16
Figura 1.10 Medidor de 3 elementos para conexión delta 4 hilos.....	17
Figura 2.1 Pasos para realizar estudio de demanda energetica con OpenStudio.....	21
Figura 2.2 Selección de platilla adecuada.....	24
Figura 2.3 Trazando el área de los espacios a crear izq. uso de herramienta crear espacio.	25
Figura 2.4 Efecto de crear espacio con herramienta crear espacio desde diagrama.	25
Figura 2.5 Creación de una sub-superficie ventana.	26
Figura 2.6 Creación de una sub-superficie puerta el cuadro rojo demuestra que se esconden las zonas que no estamos trabajando.	27
Figura 2.7 Sub-superficie puerta ya creada.....	27
Figura 2.8 Demostración del modo de rayos X para poder observar atravésó de las paredes.	28
Figura 2.9 Han separados las superficies, demostrando las superficies sin interceptar.	29
Figura 2.10 Aplicando intercepción de superficies izq. resultado derecha.	29
Figura 2.11 Condiciones de contorno de las superficies antes de aplicar Surface Maching.	30
Figura 2.12 Aplicando Surface Maching.....	31
Figura 2.13 Efecto de Surface Matching por lo general el color verde significa que la superficie tiene un contorno junto a otra superficie.	31
Figura 2.14 Seleccionando un espacio se recomienda editar solo el nombre del espacio.....	32
Figura 2.15 Inspector de objetos seleccionando una superficie	33
Figura 2.16 Seleccionando una sub superficie.	34

Figura 2.17 Modelo completo del Edificio de la Escuela de Ing. Industrial.....	35
Figura 2.18 Descripción de la aplicación OpenStudio[8].....	36
Figura 2.19 Selección de archivo de datos meteorológicos.....	37
Figura 2.20 Pestaña Scheludes.....	38
Figura 2.21 Pestaña Schedule Sets editando un conjunto de horarios.....	39
Figura 2.22 Pestaña Scheludes Set opciones.....	40
Figura 2.23 Edición de un horario.....	41
Figura 2.24 Creación de un nuevo horario.....	41
Figura 2.25 Horario de personal secretaria EISI.....	42
Figura 2.26 Creación de un horario con otro tipo de prioridad.....	42
Figura 2.27 Horario de fines de semana de personal de secretaria EISI.....	43
Figura 2.28 Pestaña Construction Sets.....	44
Figura 2.29 Materiales de construcción de la construcción 000 Exterior Door.....	44
Figura 2.30 Creación y edición de un tipo de carga.....	45
Figura 2.31 Creando un nuevo espacio.....	47
Figura 2.32 Añadiendo una nueva carga al espacio creado.....	47
Figura 2.33 Niveles del edificio pestaña Bulding Histories.....	48
Figura 2.34 Contenido de todas las superficies, sub-superficies, pertenecientes a un espacio en un nivel seleccionado del Edificio.....	49
Figura 2.35 Seleccionando un espacio perteneciente a un nivel.....	50
Figura 2.36 Campos que se muestran al seleccionar una superficie.....	51
Figura 2.37 Pestaña Thermal Zones.....	52
Figura 2.38 Creación de un sistema HVAC y plantillas de sistemas HVAC.....	53
Figura 2.39 Editando la unidad condensadora evaporadora del sistema de aire acondicionado....	54
Figura 2.40 Editando el control máximo y mínimo de temperatura de un sistema HVAC.....	55
Figura 2.41 Añadiendo una zona térmica a la salida del splitter.....	56
Figura 2.42 Editando los parámetros de la zona térmica.....	56
Figura 2.43 Pestaña Output Variables.....	57
Figura 2.44 Pestaña Simulation Seting.....	58

Figura 2.45 Pestaña Run Simulation.....	59
Figura 2.46 Pestaña Result Sumay.....	59
Figura 3.1 Modelo completo del Edificio de la Escuela de Ing. Industrial.....	60
Figura 3.2 Espacios que contienen plenum , fachada y el tercer nivel del edificio.....	61
Figura 3.3 Espacios que contienen el segundo y primer nivel del edificio.	61
Figura 3.4 Tipos de montaje de luminarias.	64
3.5 Equipo eléctrico en el edificio de Ing. Industrial.	65
Figura 3.6 1-Packaged Rooftop Air Contioner 3, 2-Packaged Rooftop Air Contioner 2, 3- Packaged Rooftop Air Contioner 4, 4-Packaged Rooftop Air Contioner 1, 5-Packaged Rooftop Air Contioner.	70
Figura 3.7 Grafico consumo mensual de energía simulado para el año 2014.	71
Figura 3.8 Porcentaje de consumo anual por sistema eléctrico.	72
Figura 3.9 Perfil de demanda Energética Mayo 2014.	73
Figura 3.10 Perfil de Demanda para una semana.	74
Figura 3.11 Pliego tarifario vigente desde 15 julio 2014.....	75
Figura 3.12 Clasificación según relación de emisión de co2 por metro cuadrado del Edificio de Ing. Industrial.....	77
Figura 4.1 Diagrama de bloques del medidor prototipo.....	78
Figura 4.2 Pinout del pduino V1[10].....	79
Figura 4.3 Diagrama de bloques del ADE7758[11].....	82
Figura 4.4 Configuración de pines del ADE7758 [11].....	83
Figura 4.5 Regulador de niveles lógicos utilizado izq. Configuración de pines y tabla de valores[14].....	85
Figura 4.6 Pantalla LCD 16X2 caracteres.	86
Figura 4.7 Descripción de pines del módulo LCD (I2C/SERIAL)[15].....	87
Figura 4.8 Circuito implementado [11].	88
Figura 4.9 Atenuación de la señal de voltaje en la entrada del ADE7758 [11].....	90
Figura 4.10 Respuesta en Frecuencia de filtro RC [11].....	90
Figura 4.11 Relación entrada salida del sensor de corriente[16].....	92

Figura 4.12 Atenuación de la señal de corriente en la entrada del ADE7758[11].	93
Figura 4.13 Direccionamiento de los registros del ADE7758 desde el registro de comunicación [12].....	95
Figura 4.14 Diagrama de tiempos para la operación de escritura serial [11].	96
Figura 4.15 Descripción de los tiempos de los diagramas de lectura y escritura serial [11].	97
Figura 4.16 Diagrama de tiempos de la operación de lectura serial[11].	98
Figura 4.17 El shield ADE7758.	102
Figura 4.18 El diseño de pistas del shield ADE7758.	103
4.19 Base de datos creada para almacenar datos (izq.), descripción de parámetros de la tabla MEDICIONES en la base de datos MEDIDOR_3F4H.....	108
Figura 4.20 Medidor de energía prototipo.....	108
Figura 4.21 Entradas de voltaje-corriente del medidor prototipo.....	109
Figura 4.22 Error de energía acumulada.	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Niveles, espacios y zonas termicas del edificio de Ing. Industrial.....	62
Tabla 3.2 Tipos de luminarias.	63
Tabla 3.3 Valores aproximados de fracción de retorno del aire, fracción radiante y fracción visible para la iluminación fluorescente con diversas configuraciones del alumbrado.....	63
Tabla 3.4 Cargas eléctricas y térmicas por cada espacio.	69
Tabla 3.5 Parámetros de simulación de los sistemas A/C.....	69
Tabla 3.6 Sistemas HVAC instalados en el edificio de Ing. Industrial.	69
Tabla 3.7 Sistemas A/C en funcionamiento.....	71
Tabla 3.8 Consumo mensual de energía para el año 2014.	72
Tabla 3.9 Error de energía por horario tarifario.....	74
Tabla 3.10 Consumo de energía eléctrica y contribución a la facturación mensual proyectado para el año 2014.....	76
Tabla 3.11 Total de área efectiva del edificio de Ing. Industrial.	76
Tabla 4.1 Especificaciones de hardware del PCDUINO[10].....	80
Tabla 4.2 Especificaciones de software del PCDUINO[10].....	80
Tabla 4.3 Descripción de las funciones de los pines del IC ADE7754[12].	84
Tabla 4.4 I2C/Serial conexión de la interface del módulo LCD(I2C/SERIAL)[15].....	88
Tabla 4.5 Especificaciones tecnicas del sensor de corriente Split Core Current Transformer ECS1030-L72 [16].....	91
Tabla 4.6 Configuración de cada bit del registro de máscara de interrupción (MASK 0x18)[11].	101
Tabla 4.7 Descripción de entradas de voltaje-corriente.	103
Tabla 4.8 Bus I2C del shield ADE7758.....	104
Tabla 4.9 Tipo de conexión para potencia activa [6].....	106
Tabla 4.10 Descripción de la base de datos.	107
Tabla 4.11 Descripción de entradas de voltaje-corriente del medidor prototipo	109

INTRODUCCION.

En la actualidad la simulación por software es una herramienta muy importante en muchas ramas y áreas de la ingeniería, para poder predecir el comportamiento de un sistema, por esta razón OpenStudio¹ es una herramienta muy potente que nos permite simular el consumo de energía eléctrica de una manera muy agradable y así poder evaluar si el edificio es eficiente o no. La simulación permite poder evaluar el estado actual con el modelo línea base es decir el modelo en operaciones normales. Una vez obtenido el modelo línea base es posible poder generar propuesta de ahorro energético como cambiar a luminarias y sistemas A/C más eficientes , para ver si la posible inversión económica es viable y en cuanto tiempo se recuperara para generar un ahorro económico.

Cuando se hace un estudio de eficiencia energética en una edificación por medio de software es necesario validar los resultados obtenidos por la simulación por medio de comparación con datos reales de demanda energética de la edificación en la que se realiza el estudio. Actualmente existen muchos dispositivos de bajo costo como tarjetas que implementan microcontroladores y minis PC que son muy fiables en cuanto a su funcionamiento, es posible implementar y desarrollar aplicaciones de libre distribución, código abierto y acceso a diagramas de conexiones para construir el hardware necesario. Debido a la necesidad de validar datos obtenidos por medio de la simulación y a la existencia de dispositivos de rápido procesamiento y buen desempeño este capítulo está dedicado a la construcción de un medidor de energía prototipo implementando un medidor trifásico (TRM) de demanda usando el IC ADE7758 y la mini PC PCDUINO.

¹ OpenStudio: herramienta desarrollada NERL y utiliza como motor de cálculo con algoritmos termodinámicos DOE – EnergyPlus.

OBJETIVOS.

GENERAL:

Hacer un análisis de demanda energética en el edificio de Ing. Industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura para establecer la probable facturación eléctrica y además, esto servirá como línea base para futuras investigaciones en los temas de ahorro y eficiencia energética.

ESPECÍFICOS:

- ❖ Construir un medidor de energía eléctrica de hardware y software de libre distribución.
- ❖ Construcción de una base de datos que permita ver informes de consumo de energía pasado y actual del edificio de Ing. Industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos por el medidor construido con los resultados de su simulación obtenidos por medio de un software de simulación.
- ❖ Realizar una evaluación de la posible existencia de datos atípicos y efectuar las observaciones o diagnósticos sobre su origen si existiesen.
- ❖ Predecir la posible factura generada para el período en estudio, esto servirá para concientizar del gasto generado por prácticas no adecuadas del uso de las instalaciones.

ALCANCES.

La construcción de un medidor de demanda energía eléctrica que cense voltaje y corriente y factor de potencia: siendo capaz de monitorear y almacenar en internet los datos recolectados en el edificio de Ing. Industrial de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, y así, establecer la probable facturación. La tolerancia de los resultados serán limitados por la capacidad de los dispositivos seleccionados para la construcción del medidor de energía pero se espera un máximo de 10%.

ANTECEDENTES:

Con el pasar de los años en nuestro país y en el mundo entero la electricidad se ha vuelto no solo un lujo, sino una necesidad para poder desarrollarse y aumentar el nivel de vida de la población.

Hoy en día es utilizada en mayor medida por equipos de iluminación, refrigeración y climatización de ambientes en edificaciones, en búsqueda de la comodidad y satisfacción de las personas en sus lugares de trabajo y también al clima tan cambiante. También, la calidad de la electricidad se ve afectada por el aumento de dispositivos electrónicos, como computadoras, impresores en el caso de oficinas, lo que da lugar a variaciones y gastos excesivos que podrían disminuirse en la medida en que se disminuya el consumo eléctrico.

En el Campus Central de la Universidad de El Salvador, la facturación eléctrica pagada a la Distribuidora AES CAESS S.A. de C.V. alcanzó solo en los últimos meses Noviembre y Diciembre de 2012 la cantidad de USD\$103,365.09 y en el año cerca de los USD\$1,029,236.52 que representa el 1.6% de los 64.6 millones de dólares del presupuesto generar Universitario [1]. El gasto excesivo en facturación eléctrica es consecuencia directa del uso energéticamente ineficiente de los edificios, debido a gran parte a que la mayoría de edificaciones dedicados a oficinas, aulas o laboratorios fueron construidas sin ningún marco o política energética que rigiera su diseño, construcción y uso, es decir sin una planificación energética adecuada.

Esta situación ha motivado el interés para el desarrollo de estudios sobre consumo energético en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, tal es el caso, para establecer la demanda del Edificio Administrativo.

De esta manera se presentarán alternativas favorables que permitan el ahorro de energía eléctrica, haciendo más eficientes los sistemas y obteniendo otros beneficios adicionales como evitar multas., sin dejar de mencionar que el ahorro de energía se espera ver reflejado en un ahorro económico importante.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AC: alternating current

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

BTU: British thermal unit (Unidad Térmica Británica)

BTU/h: British thermal unit per hour (Unidad Térmica Británica por hora)

C: Celsius

CFM: cubic feet per minute (Pie Cúbicos por Minuto)

COP: Coefficient of performance (Coeficiente de desempeño)

DOE: U.S. Department of Energy (Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norte América)

EER: Energy Efficiency Ratio (Relación de Eficiencia Energética)

h: Horas

HP: Horsepower (Caballos de Fuerza)

HVAC: Heating, Ventilating, and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado)

Hz: Hertz

IC: circuito integrado (siglas en ingles)

kVA: kilovolt-ampere

kW: kilowatt

kWh: kilowatt-hora

m: Metros

NREL: National Renewable Energy aboratory

W: watt

Wh: Watthora

1. REFERENCIA TEORICA SOBRE EFICIENCIA ENERGETICA Y MEDICION DE ENERGIA TRIFASICA.

1.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA.

La energía no se crea ni se destruye[2]. Sólo se transforma (ley de la conservación de la energía). Las transformaciones de energía no son eficientes: cuando una forma de energía se transforma en otra se produce una pérdida de energía aprovechable, normalmente en forma de energía térmica. Así por ejemplo, una lámpara incandescente transforma el 10% de la energía eléctrica en luz y el resto en calor.

El concepto de eficiencia energética tiene que ver con la cantidad de energía útil que se puede obtener de un sistema o de una tecnología en concreto. También se refiere a la utilización de tecnología que necesita menos energía para realizar la misma tarea. Una lámpara fluorescente compacta o CFL utiliza menos energía (dos tercios menos) que las lámparas incandescentes para proporcionar el mismo nivel de iluminación y puede durar entre seis y diez veces más. Las mejoras en eficiencia energética se suelen alcanzar adoptando tecnologías o procesos productivos más eficientes.

La eficiencia energética consta de tres pilares de acción:

1. Eficiencia energética por el lado de la demanda: Incluye una amplia gama de acciones y prácticas dirigidas a reducir la demanda de electricidad (o de hidrocarburos) y/o intentar desviar la demanda de horas punta a horas de menor consumo. Según la Agencia Internacional de la Energía, es una herramienta muy importante para ayudar a equilibrar la oferta y la demanda en los mercados de electricidad, reducir la volatilidad de precios, aumentar la fiabilidad y la seguridad del sistema, racionalizar la inversión en infraestructuras de suministro de electricidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

2. Eficiencia energética por el lado de la oferta: Se refiere al conjunto de medidas adoptadas para garantizar la eficiencia a lo largo de la cadena de suministro de electricidad. Las empresas intentan encontrar medios para realizar un uso más eficaz de sus equipos de generación menos eficientes. Se trata de mejorar el funcionamiento y mantenimiento de los equipos actuales o mejorarlos con tecnologías de vanguardia de eficiencia energética. Algunas empresas tienen sus propias alternativas de generación de electricidad, por lo que tienden a estudiar la eficiencia energética por el lado de la oferta además de por el lado de la demanda.
3. Conservación de la energía: Es el conjunto de actividades dirigidas a reducir el consumo de energía a través de un uso más eficaz de la energía y un menor consumo de energía y/o hidrocarburos.

1.2 AUDITORIAS ENERGÉTICAS EN EDIFICIOS EXISTENTES.

La realización de Auditorías Energéticas[3] permite conocer en detalle los indicadores de mayor interés energético de los edificios y proponer actuaciones para mejorar la eficiencia de los equipos e instalaciones, y así obtener ahorros energéticos y económicos.

En la actualidad, existen edificios que han estado operando por varios años atrás, a estas infraestructuras existentes, por ejemplo la aislación térmica de la envolvente, instalación de elementos de protección solar, etc. y tras aplicar algunos cambios de hábitos energéticos se conduce a una administración eficiente de la energía.

Para iniciar un estudio de EE en estos edificios primero se debe de concebir una metodología que comprenda el funcionamiento de la infraestructura para luego aplicar ciertas medidas de ahorro energético. Los siguientes pasos enumeran brevemente la metodología² a seguir:

- ❖ Obtener información de la envolvente y operación actual del edificio.
- ❖ Analizar el comportamiento del edificio en cuanto a su consumo de energía.

² Véase la sección “Metodología General de Estudio de Eficiencia Energética” para una descripción más detallada de estos pasos, página 38.

- ❖ Establecer medidas de ahorro energético.
- ❖ Realizar la evaluación técnica y económica.

Debido a la clasificación existente de edificios, una metodología no puede ser aplicada a dos edificios que presenten diferente operación, por ejemplo, para un edificio del tipo administrativo se le aplica cierta metodología para un estudio energético, la cual no puede ser utilizada para realizar una auditoría energética a un edificio del tipo hospitalario; este último requiere de una metodología más estricta y rigurosa que abarquen las normas y reglamentos respectivos sobre el diseño y construcción de hospitales, y la adquisición de equipos médicos, sin mencionar otros factores.

Otros países están integrando en sus entidades superiores reglamentos, leyes, políticas, etc., que inserten e integren planes estratégicos, para la gestión del uso racional de la energía; es decir, instituciones, organizaciones, empresas, etc. tienen en proyecto la gestión de energía por medio de metodologías que están siendo impulsadas para ejercer la EE en los distintos tipos de edificios según su uso, así tenemos por ejemplo que el Estado de España, la cual por medio de **El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)** junto con el **Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Ministerio de Vivienda de España** elaboró **El Real Decreto** donde establecen las mayores exigencias en EE, de las cuales se mencionan a continuación:

- ❖ Mayor rendimiento energético en los equipos de generación de calor y frío, así como los destinados al movimiento y transporte de fluidos.
- ❖ Mejor aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos.
- ❖ Mejor regulación y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados.
- ❖ Utilización de energías renovables disponibles, en especial energía solar y biomasa.
- ❖ Incorporación de subsistemas de recuperación de energía y aprovechamiento de energías residuales.
- ❖ Sistemas obligatorios de contabilización de consumos en el caso de instalaciones colectivas.

- ❖ Desaparición gradual de combustibles sólidos más contaminantes y desaparición gradual de equipos generadores menos eficientes.

Así que, la cooperación internacional debe ser un elemento complementario sin que se sustituya el compromiso propio del Estado y la sociedad, queda en manos de las entidades superiores de El Salvador acreditar normativas y exhortarlas al sector de interés (sobre todo al sector público), para que se ejerza al menos las condiciones mínimas de la EE (si es posible la práctica máxima de EE), no solamente en edificios existentes, sino también en edificios que están en fase de diseño.

1.3 CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

La **certificación de la eficiencia energética de los edificios**[4] es un distintivo reconocible y objetivo sobre las características de eficiencia energética de un edificio. Esto se materializa en forma de un certificado o etiqueta que permite valorar y comparar sus prestaciones a los compradores, arrendatarios y otros usuarios.

La eficiencia energética tiene dos aspectos bien diferenciados, la eficiencia activa y la pasiva.

La eficiencia activa es la que consiste en la mejora de las instalaciones del edificio con el uso de las diferentes energías alternativas o combinadas con las energías tradicionales y también con sistemas de nueva generación que mejoran el rendimiento y minimizan el consumo.

La eficiencia pasiva es la que se refiere a las condiciones y características arquitectónicas del edificio en el cual se introducen las energías para obtener el grado de confort.

Un ejemplo claro de todo lo mencionado es el Passive Haus³ corriente surgida en Alemania que las conjuga perfectamente.

1.4 CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS EN ESPAÑA

El certificado de eficiencia energética es el documento suscrito por un técnico certificador que contiene información sobre las características energéticas y la eficiencia energética de un edificio

³ *Passivhaus* (del alemán *casa pasiva*, y en inglés *passive house standard*) es un estándar para la construcción de viviendas originado a partir de una conversación (en mayo de 1988)

o unidad de este, calculada con arreglo a la metodología de cálculo definida por los Ministerios de Industria, Energía y Turismo y de Fomento (España).

La eficiencia pasiva está garantizada con el uso del CTE⁴ en las viviendas de nueva construcción, mientras que en las existentes resulta necesario encontrar el equilibrio entre la eficiencia activa y la pasiva, aspecto fundamental para llegar a consumos energéticos razonables.

El certificado mide la eficiencia energética del edificio teniendo en cuenta el consumo de energía, calculado o medido, que se estima necesario para satisfacer la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación, que incluye la energía consumida en:

- **Calefacción**
- **Refrigeración**
- **Ventilación**
- **Producción de agua caliente sanitaria (ACS)**
- **Iluminación**

El Real Decreto 235/2013 (Legislación Española) prevé tres situaciones en las que es obligatorio obtener el certificado (artículo 2):

- **En edificios nuevos.** Su certificación tendrá dos partes: la de proyecto, que se incluirá en el proyecto de ejecución, y la de edificio terminado, que confirmará los datos de la primera, debiendo modificarse, de no ser así, ésta. (art. 8). El responsable de que se obtenga es el Promotor (agente de la edificación) o propietario (art. 5.1).
- **En edificios existentes o partes de edificios existentes cuando se vendan, o alquilen** a un nuevo arrendatario (por tanto no es aplicable en renovaciones). El responsable de que se obtenga es el propietario (art. 5.1).

⁴ Código Técnico de la Edificación España

- **En edificios o partes de edificios ocupados por una autoridad pública**, frecuentados por el público y con superficie superior a 250 m². La definición de autoridad pública (aclaración 3.1) es la del artículo 2 de la Ley 30/1992. El responsable es el propietario, ya sea un tercero, si la administración es arrendataria, ó la propia administración, si es propietaria.

1.5 LA CERTIFICACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Consiste en analizar el cálculo de energía consumida por un edificio en condiciones de uso y ocupación durante los últimos años[5]. Entonces se ha de referir a los servicios que se utilizan de forma habitual como puede ser la calefacción, agua, luz, etc., para ser más exactos el indicador que se analiza mide los kg de CO₂ dividido por los metros cuadrados de la vivienda (kg CO₂/ m² al año), a raíz de esto surge una escala donde se puede contemplar en qué situación te encuentras y como debes desplazarte hacia una zona de menor emisión, la escala establece un nivel medio que ronda los 6.8 Kg CO₂/ m² año y por debajo de esta se le asigna la letra A , dentro de esta encontramos diferentes rango y a medida que va subiendo la escala se establece un orden alfabético ver Figura 1.1 que a medida que vamos ascendiendo la tasa de emisión de CO₂ es mayor y por tanto se pierde en eficiencia llegando a la última calificación posible que es la G donde la tasa de emisión es igual o superior a 70.9 Kg CO₂ / m² año.

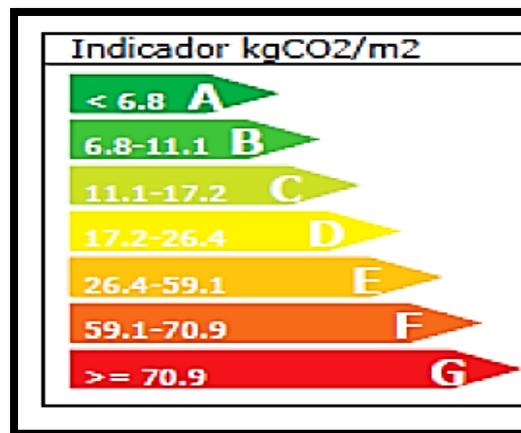


Figura 1.1 Escala de calificación de eficiencia energética

Este tipo de certificados pueden estar al alcance de cualquier inmueble, no se presenta en primera instancia ninguna discriminación sobre el tipo de inmueble. Pero si es de carácter obligatorio para edificios de nueva construcción y también cuando se haya realizado una rehabilitación del inmueble con una superficie útil de 1000m² y que afecte a más del 25% del total de sus cerramientos en cumplimiento del **Real Decreto 235/2013 de 5 de abril**.

1.6 LINEA BASE.

La línea base es la especificación de las condiciones actuales o iniciales de los edificios ya construidos que se encuentran en operación[3]. Ésta es importante porque es el punto de partida de la operación real del edificio en donde se observarán las oportunidades de ahorro energético y sobre los cuales se comparan los resultados de la aplicación de medidas de ahorro que lleguen a implementarse.

1.7 MEDICIÓN DE POTENCIA TRIFÁSICA

Un medidor de energía trifásico puede ser conectado a diferentes tipos de servicio de energía como trifásico de tres líneas o de cuatro líneas, en una carga en arreglo delta o estrella[6].

Para efectos de medición de potencia se proporcionan las fórmulas para cada tipo de configuración, así como el diagrama de conexión y su respectivo diagrama fasorial visto por el medidor.

1.8 TIPOS DE MEDIDORES SEGÚN CONEXIÓN

1.8.1 Medición estrella de 3 conductores

Según el teorema de Blondel, un circuito trifásico de tres conductores requiere de un medidor de dos elementos (2 TI y 2 TT)[6]. Este tipo de medición se pudiera efectuar con un medidor de tres elementos (3 TI y 3 TT) pero incurriría en más gastos, debido a que la exactitud en la medición es razonablemente la misma.

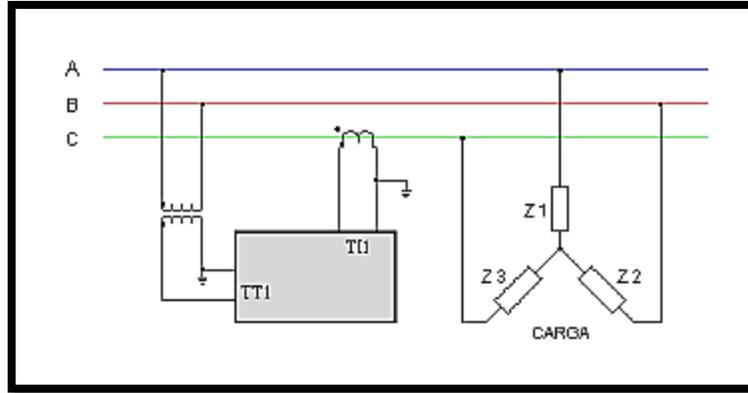


Figura 1.2 Medidor de un elemento para conexión estrella 3 hilos.

En donde:

TT1 mide VC.

TI1 mide IAB.

La potencia trifásica, activa y reactivas, se calculan a partir de la Ecuación 1 y Ecuación 2 :

$$P = \sqrt{3}V_{AB}I_C \cos[90^\circ - (\phi_{V_{AB}} - \phi_{I_{CN}})]$$

Ecuación 1

$$Q = \sqrt{3}V_{AB}I_C \sen[90^\circ - (\phi_{V_{AB}} - \phi_{I_{CN}})]$$

Ecuación 2

1.8.2 Medidor de dos elementos

Este medidor cumple el teorema de Blondel para un circuito trifásico de tres conductores, debido a que tiene dos elementos (2 TI y 2 TT)[6]. En la Fig. 2.8 se puede apreciar la conexión[6].

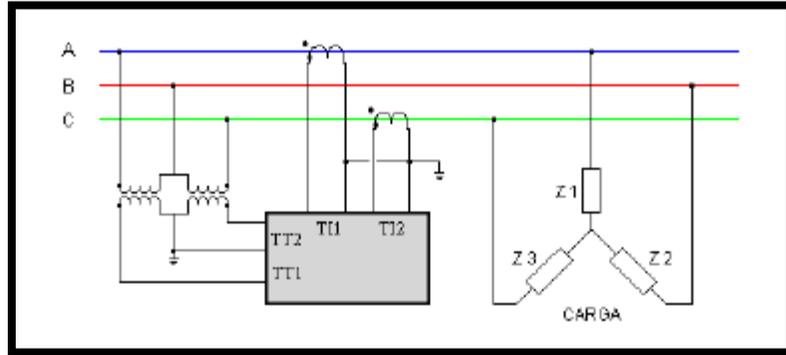


Figura 1.3 Medidor de dos elementos para conexión estrella 3 hilos

TT1 mide V_{AB} y TT2 mide V_{CB} .

TI1 mide I_A y TI2 mide I_C .

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de Ecuación 3 y Ecuación 4:

$$P = V_{AB}I_A (\cos 30^\circ \cos \phi_1 - \sin 30^\circ \sin \phi_1) + V_{CB}I_C (\cos 30^\circ \cos \phi_3 - \sin 30^\circ \sin \phi_3)$$

Ecuación 3

$$P = V_{AB}I_A (\sin 30^\circ \cos \phi_1 - \sin 30^\circ \sin \phi_1) + V_{CB}I_C (\sin 30^\circ \cos \phi_3 - \sin 30^\circ \sin \phi_3)$$

Ecuación 4

1.8.3 Medidor de tres elementos

Con esta configuración se logra una medición más exacta. En la Fig. 2.10 se muestra la conexión[6].

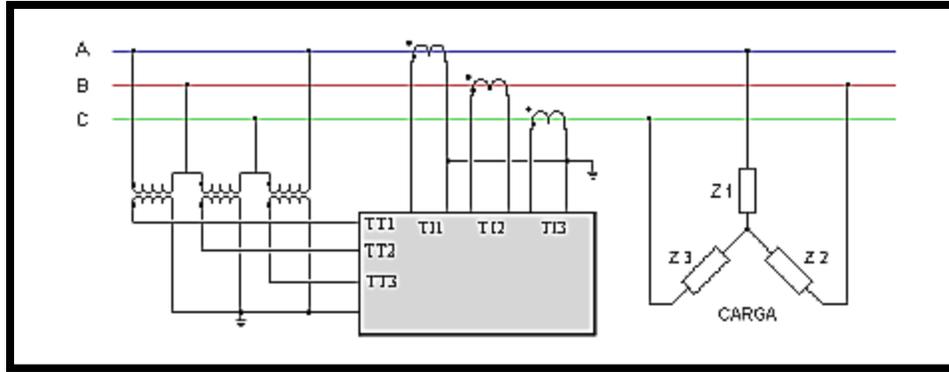


Figura 1.4 Medidor de tres elementos para conexión estrella 3 hilos.

En donde:

TT1 mide V_{AB} , TT2 mide V_{BC} y TT3 mide V_{CA} .

TI1 mide I_A , TI2 mide I_B y TI3 mide I_C .

Las potencias trifásicas, activas y reactivas, se calculan a partir de Ecuación 5 y Ecuación 6:

$$P = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} I_A \cos \phi_1 + \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} I_B \cos \phi_2 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}} I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 5

$$Q = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} I_A \sin \phi_1 + \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} I_B \sin \phi_2 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}} I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 6

1.8.4 Medición delta de 3 conductores

Al igual que la conexión estrella trifásica de tres hilos, se necesita un medidor de dos elementos, según el teorema de Blondel. Esta medición se puede realizar así mismo con un medidor de tres elementos[6].

1.8.5 Medidor de 2 elementos

El diagrama de conexión se muestra a continuación, en la Fig.2.12[6]:

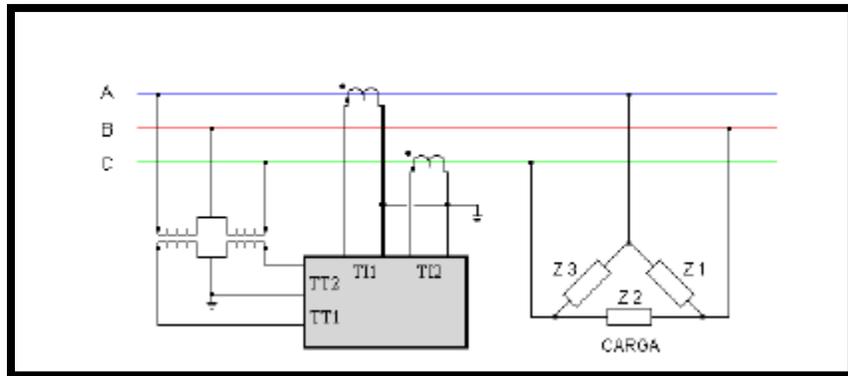


Figura 1.5 Medidor de dos elementos para conexión delta 3 hilos.

En donde:

TT1 mide V_{AB} y TT2 mide V_{CB} .

TI1 mide I_A y TI2 mide I_C .

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan con la Ecuación 7 y Ecuación 8:

$$P = V_{AB}I_A(\cos 30^\circ + \phi_1) + V_{CB}I_C(\cos 30^\circ + \phi_3)$$

Ecuación 7

$$P = V_{AB}I_A(\sin 30^\circ + \phi_1) + V_{CB}I_C(\sin 30^\circ + \phi_3)$$

Ecuación 8

1.8.6 Medidor de 3 elementos

Así como en la carga conectada en estrella, con el medidor de tres elementos se consigue una medición más exacta[6]. El esquema de conexión es el mostrado en la Fig. 2.14.

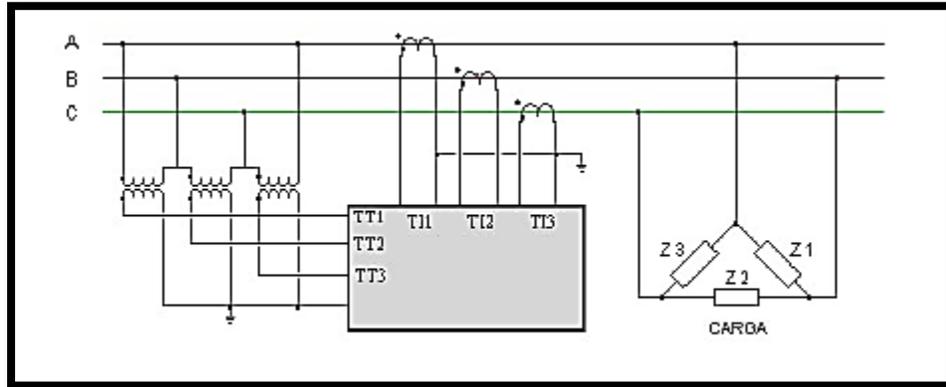


Figura 1.6 Medidor de tres elemento para conexión delta 3 hilos.

En donde:

TT1 mide V_{AB} , TT2 mide V_{BC} y TT3 mide V_{CA} .

TI1 mide I_A , TI2 mide I_B y TI3 mide I_C .

Las potencias trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de la Ecuación 9 y Ecuación 10:

$$P = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} I_A \cos \phi_1 + \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} I_B \cos \phi_2 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}} I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 9

$$Q = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} I_A \sin \phi_1 + \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} I_B \sin \phi_2 + \frac{V_{CA}}{\sqrt{3}} I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 10

1.8.7 Medición estrella de 4 conductores

Según el teorema de Blondel se requiere de un medidor de tres elementos para efectuar la medición de potencia trifásica para una conexión estrella de 4 conductores. Si los voltajes son balanceados, se puede realizar la conexión "Z", que consiste en un medidor de dos y medio elementos (3 TI y 2 TT), con igual exactitud que la anterior[6].

1.8.8 El medidor de 2 1/2 elementos

Este medidor está comprendido de dos sensores de voltaje y tres sensores de corriente. El punto común de los sensores de voltaje deberá ser conectado al conductor neutro[6]. Si los voltajes entre cada línea y el neutro son balanceados entre los límites aceptables, la precisión es generalmente considerada satisfactoria. Ver el diagrama de conexión en la Fig. 2.16.

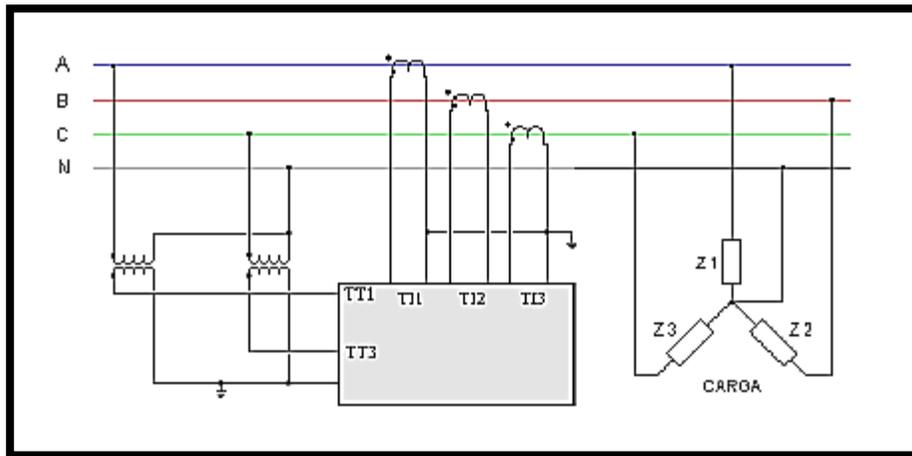


Figura 1.7 Medidor de dos y medio elementos para conexión estrella 4 hilos.

En donde:

TT1 mide VAN y TT3 mide V CN.

TI1 mide IA, TI2 mide IB y TI3 mide IC.

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de la Ecuación 11 y Ecuación 12:

$$P = V_{AN}I_A \cos \phi_1 - (V_{AN} + V_{CN})I_B \cos \phi_2 + V_{CN}I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 11

$$Q = V_{AN}I_A \sin \phi_1 - (V_{AN} + V_{CN})I_B \sin \phi_2 + V_{CN}I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 12

1.8.9 El medidor de tres elementos

Este medidor trifásico está comprendido de tres sensores de voltaje y tres sensores de corriente. El punto común de los sensores de voltaje deberá ser conectado al conductor neutro. Este tipo de conexión cumple conexión es exacto bajo condiciones de carga balanceada o desbalanceada[6]. Ver conexión en la Fig.

2.18.

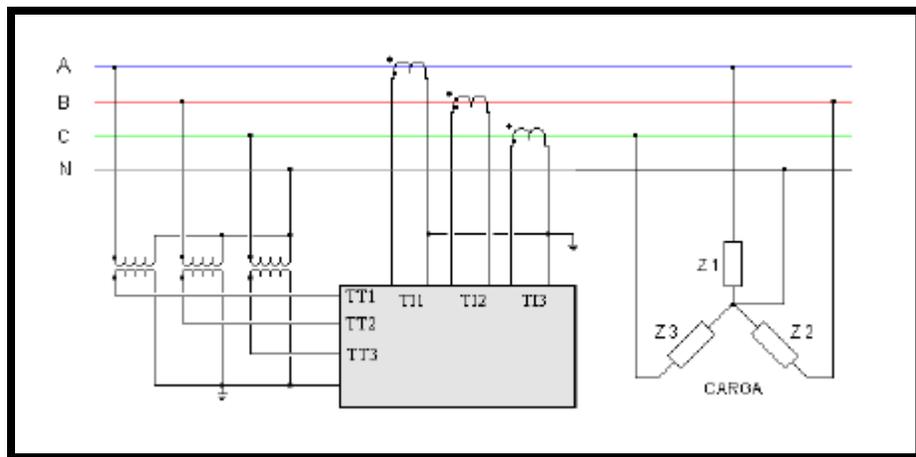


Figura 1.8 Medidor de tres elementos para una conexión en estrella 4.

En donde:

TT1 mide V_{AN} , TT2 mide V_{BN} y TT3 mide V_{CN} .

TI1 mide IA, TI2 mide IB y TI3 mide IC.

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de la Ecuación 13 y Ecuación 14:

$$P = V_{AN}I_A \cos \phi_1 - V_{BN}I_B \cos \phi_2 + V_{CN}I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 13

$$Q = V_{AN}I_A \sin \phi_1 - V_{BN}I_B \sin \phi_2 + V_{CN}I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 14

1.9 Medición delta de 4 conductores

La potencia eléctrica en un circuito trifásico conectado en delta cerrada o abierta de cuatro conductores, con el neutro formado por un punto de conexión al punto medio de uno de los devanados de fase. Según el teorema de Blondel, si se tienen 4 conductores se requiere de un medidor de tres elementos, o de un medidor de dos y medio elementos con la condición de tener los voltajes balanceados[6].

1.9.1 El medidor delta de 2 ½ elementos

Este medidor trifásico está compuesto por dos sensores de voltaje y tres sensores de corriente. El punto común de los sensores de voltaje deberá estar conectado al conductor neutro. Si el neutro está verdaderamente conectado en el borne central (voltajes usados para definir el neutro son iguales entre los límites aceptables)[6]. Entonces solamente dos sensores de voltajes necesitan ser usados. Ver Fig. 2.20 para el tipo de conexión.

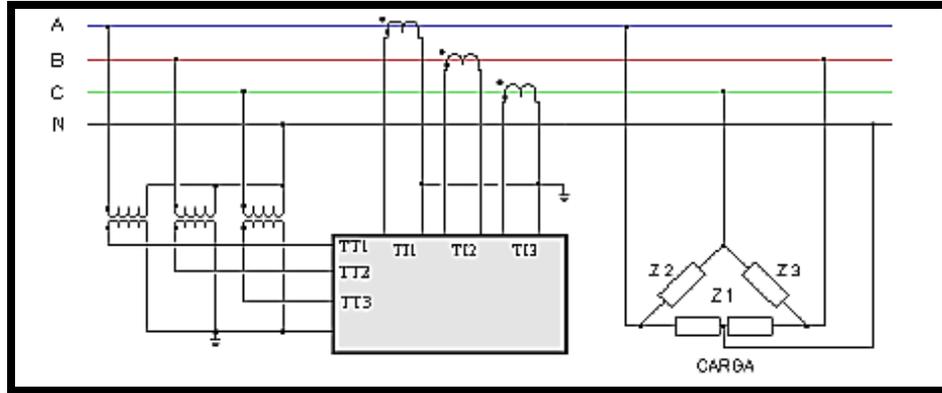


Figura 1.9 Medidor de 2 ½ elementos para conexión delta 4 hilos.

En donde:

TT1 mide V_{AN} y TT3 mide V_{CN} .

TI1 mide I_A , TI2 mide I_B y TI3 mide I_C .

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de la Ecuación 15 y Ecuación 16:

$$P = V_{AN}I_A \cos(30^\circ + \phi_1) + V_{AN}I_B \cos(30^\circ + \phi_2) + V_{CN}I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 15

$$P = V_{AN}I_A \sin(30^\circ + \phi_1) + V_{AN}I_B \sin(30^\circ + \phi_2) + V_{CN}I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 16

1.9.2 El medidor de tres elementos

Este medidor de tres elementos cumple con el teorema de Blondel para mediciones de potencia trifásica de 4 conductores. Uno de los elementos puede tener un medio de la capacidad nominal

de corriente y dos veces la capacidad nominal de voltaje de los otros dos elementos, aunque los tres elementos pueden ser de igual capacidad nominal previendo que en el circuito serán conectados transformadores de intensidad y transformadores de tensión de diferentes relaciones[6]. Ver Fig. 2.22 para conexión.

Las dos bobinas de intensidad de igual capacidad son conectadas una en cada uno de los conductores de fase, entre los que está el devanado con conexión en su punto medio y las bobinas de tensión asociadas conectadas entre estos conductores de fase y el conductor del punto medio del devanado o neutro. La bobina de intensidad de un medio de la capacidad nominal de corriente es conectada en el conductor de fase restante, y su bobina de tensión del doble de capacidad nominal es conectada entre el conductor de fase y el conductor del punto medio del devanado (neutro). Este método es preciso para todas las condiciones de carga y factor de potencia, con o sin desbalance de voltaje.

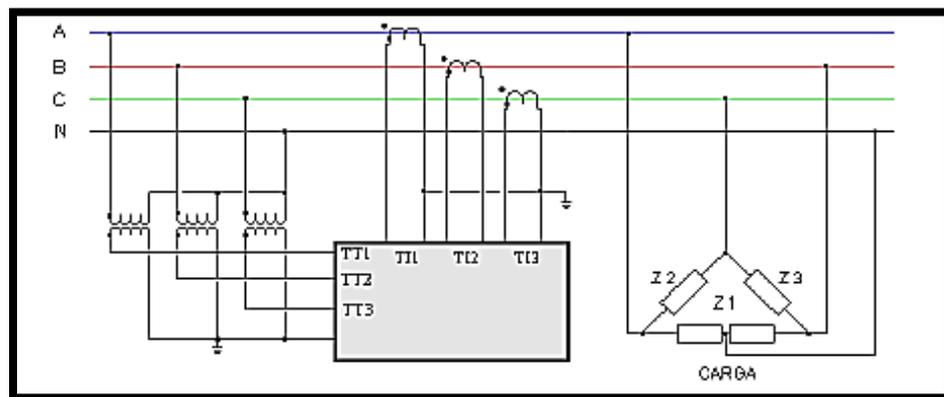


Figura 1.10 Medidor de 3 elementos para conexión delta 4 hilos.

En donde:

TT1 mide VAN, TT2 mide VBN y TT3 mide V CN.

TI1 mide IA, TI2 mide IB y TI3 mide IC.

La potencia trifásica, activa y reactiva, se calculan a partir de la Ecuación 17 y Ecuación 18:

$$P = V_{AN}I_A \cos(30^\circ + \phi_1) + V_{BN}I_B \cos(30^\circ + \phi_2) + V_{CN}I_C \cos \phi_3$$

Ecuación 17

$$Q = V_{AN}I_A \sin(30^\circ + \phi_1) + V_{BN}I_B \sin(30^\circ + \phi_2) + V_{CN}I_C \sin \phi_3$$

Ecuación 18

2. DESCRIPCION, METODOLOGIA Y USO DEL SOFTWARE OPENSTUDIO

2.1 EL SOFTWARE DE SIMULACION OPENSTUDIO

OpenStudio un software multiplataforma (Windows, Mac y Linux) el cual es un conjunto de herramientas de software para apoyar la modelización energética de todo el edificio usando EnergyPlus y análisis avanzado de la luz del día usando Radiance. OpenStudio es un proyecto de código abierto para facilitar a la comunidad de desarrolladores, la extensión, y la aprobación del sector privado. OpenStudio incluye interfaces gráficas, junto con un kit de desarrollo de software (SDK).

La versión anterior de OpenStudio (ahora llamado OpenStudio Plug-in)) sólo incluye el Plug-in para SketchUp.

Las nuevas aplicaciones gráficas Openstudio incluyen la actualización del Plug-in para SketchUp, La aplicación OpenStudio, ParametricAnalysisTool, RunManager y ResultsViewer. El Plug-in para SketchUp es una extensión de la herramienta de modelado 3D popular que agrega contexto OpenStudio al programa SketchUp. El Plug-in permite a los usuarios crear rápidamente geometría y asignar atributos espacio utilizando la funcionalidad integrada de SketchUp incluyendo herramientas existentes dibujo, la integración con Google Earth, Modelador de edificios y fotos del partido. La aplicación OpenStudio es una herramienta gráfica de la energía-modelado. Incluye la visualización y edición de los horarios, la edición de las cargas construcciones y materiales, de arrastrar y soltar interfaz para aplicar recursos a espacios y zonas, una HVAC visual y servicio de calefacción de agua herramienta de diseño y resultados de alto nivel de visualización. Resplandor también se puede integrar en el flujo de trabajo de simulación. Esto se logra mediante el uso de una simulación anual Resplandor para medir la luz del día, y luego la creación de un programa de uso de la iluminación eléctrica para EnergyPlus. OpenStudio también da el modelador de acceso integrado a los datos de la biblioteca de componentes de construcción. El ParametricAnalysisTool permite a los usuarios

modificar un modelo OpenStudio línea base utilizando medidas Openstudio para producir alternativas de diseño. Medidas Openstudio tienen un formato especial scripts Ruby y archivos adjuntos, para la modificación de los modelos energéticos en formato OpenStudio o EnergyPlus. RunManager facilita depurar y simular Energyplus simultáneamente y ResultsViewer permite la navegación, el trazado, y la comparación de los datos EnergyPlus salida de series de tiempo.

OpenStudio permite la construcción de los investigadores y desarrolladores de software para comenzar a trabajar rápidamente a través de sus múltiples puntos de entrada, incluyendo el acceso a C + +, Ruby y C #.

2.2 HERRAMIENTAS DE OPENSTUDIO

2.2.1 Trimble SketchUp

SketchUp (o Trimble SketchUp) es un programa de diseño gráfico y modelado en (3D) tres dimensiones basado en caras. Para entornos de arquitectura, ingeniería civil, diseño industrial, diseño escénico, GIS, videojuegos o películas. Es un programa desarrollado por Last Software, empresa adquirida por Google en 2006 y finalmente vendida a Trimble en 2012.

2.2.2 EnergyPlus™

Motor de cálculo en las solapas Estudio térmico y Climatización de CYPECAD MEP

EnergyPlus™ es un programa de simulación térmica y energética de edificios desarrollado por DOE(Department of Energy, Estados Unidos) con el que se pueden hacer estudios de demanda y consumo energético.

2.3 ESTUDIO DE DEMANDA ENERGETICA POR MEDIO DEL SOFTWARE OPENSTUDIO

Para poder realizar un estudio de demanda energética con el simulador OpenStudio es necesario tener toda la información requerida en la sección 2.4.1 con estos datos se puede proceder a la construcción del modelo 3D del edificio con la ayuda del plugin de OpenStudio para SketchUp , en Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo que muestra el orden que se debe realizar cada paso para poder construir un modelo línea base.

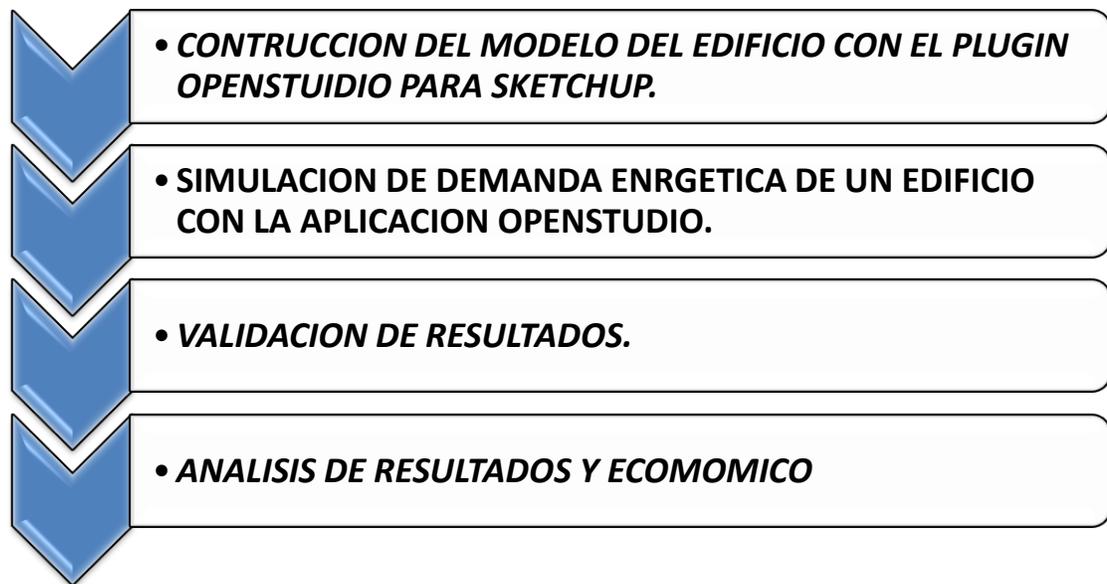


Figura 2.1 Pasos para realizar estudio de demanda energética con OpenStudio.

2.4 METODOLOGIA PARA UTILIZAR EL SOFTWARE DE SIMULACION ENERGETICA OPENSTUDIO.

Los siguientes pasos son lineamientos generales para utilizar el programa de simulación de edificios OpenStudio, a continuación se describen dichos pasos para el simulado OpenStudio que ayudaran a agilizar la creación de modelos de edificios, esta metodología se explicara tomando como base el Edificio de la Escuela de Ingeniería Industrial de la UES.

2.4.1 Planificación

Algunos pasos preliminares que facilitan la construcción del modelo del edificio a simular requieren alguna información específica[7]. La siguiente lista debe ser completada antes de iniciar a construir el archivo de entrada.

- Obtener información de la localización y datos meteorológicos de la ciudad o lugar donde está ubicado el edificio. Si es posible, usar uno de los archivos de meteorológicos disponibles en la base de datos, para el periodo de tiempo en que se realizara la ejecución.
- Obtener suficiente información de la construcción del edificio para permitir la especificación de la geometría total del edificio y las superficies de las construcciones

(incluyendo las paredes exteriores, las paredes interiores, tabiques o divisiones (paredes delgadas que separan dos espacios), pisos, techo, cielo falso, ventanas y puertas).

- Obtener suficiente información del uso del edificio para permitir la especificación de la iluminación y otros equipos (por ejemplo: Electricidad, gas, etc.) y el número de personas en cada área del edificio.
- Obtener suficiente información del control termostático del edificio para permitir la especificación del control de temperatura estratégico para cada área del edificio.
- Obtener suficiente información de la operación de los sistemas HVAC para permitir la especificación y programación de los sistemas de ventilación.

2.4.2 **Determinación de zonas térmicas.**

Se puede determinar una zona térmica según la temperatura del volumen de aire contenido en una habitación, como una práctica común se dice que es una zona térmica aquella que contiene sistema HVAC, las que se encuentran a temperatura ambiente se suelen simplificar en una sola zona térmica. Es posible simplificar el número de zonas térmicas en el modelo a simular, pero si en el futuro se añade a alguna habitación un nuevo sistema de HVAC habrá que hacer muchas modificaciones al modelo actual, por esa razón se recomienda tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

- Se determina una zona térmica si las superficies de las paredes encierran un volumen de aire es decir la superficie de la pared inicia en el piso y termina en el techo o cielo falso sin importar que se encuentre a temperatura ambiente o con sistema A/C. Por lo tanto las superficies que encierran el volumen será de transferencia de calor.
- Si se encuentran divisiones que no encierran un volumen de aire no deberá declararse como una zona térmica esta serán superficies de almacenamiento de calor.
- Si se tiene la información que alguna habitación como baños y bodegas no existe la posibilidad de instalación de A/C, estas áreas se puede simplificar uniéndose al espacio continuo con la misma temperatura ambiente.
- Se debe tomar en cuenta que la ventilación natural no será igual si se eliminan superficies.

2.5 CONTRUCCION DEL MODELO DEL EDIFICIO CON EL PLUGIN OPENSTUDIO PARA SKETCHUP.

Para poder simular el modelo del edificio es necesario tener en cuenta el volumen físico es decir tener las dimensiones físicas del edificio a modelar sumado del conocimiento de los materiales de construcción y tener ya determinadas las zonas térmicas.

Una vez ya obtenidos los datos necesarios se procede al modelado 3D de las dimensiones del edificio a modelar por medio del software Sketchup y el pluggin de OpenStudio. Como ejemplo se tomara el primer nivel del Edificio de Industrial de la UES.

2.5.1 SELECCIÓN DE UNA PLANTILLA ADECUADA.

OpenStudio cuenta con muchas plantillas con distintos tipos de modelos de espacios que cuentan con superficies, horarios, equipos eléctricos luminarias, actividad física de las personas y materiales de construcción. Los diferentes tipos de modelos simplifican el trabajo en la aplicación OpenStudio, solo es necesario elegir la que más se adecue al tipo de edificio que desea modelar.

Para el caso del Edificio De La Escuela Ing. Industrial y Sistemas Informáticos de la UES por el tipo de la actividad física de las personas, la construcción de las paredes exteriores, paredes interiores, equipos eléctricos y cubículos de docentes, se puede determinar que la plantilla más adecuada es MediumOficce (Oficina Mediana).Esta platilla simplificara el trabajo pero no significa el edificio se comporte como tal, El modelo del Edificio con OpenStudio será debidamente editado, creando nuevos horarios definiciones de equipo, etc.

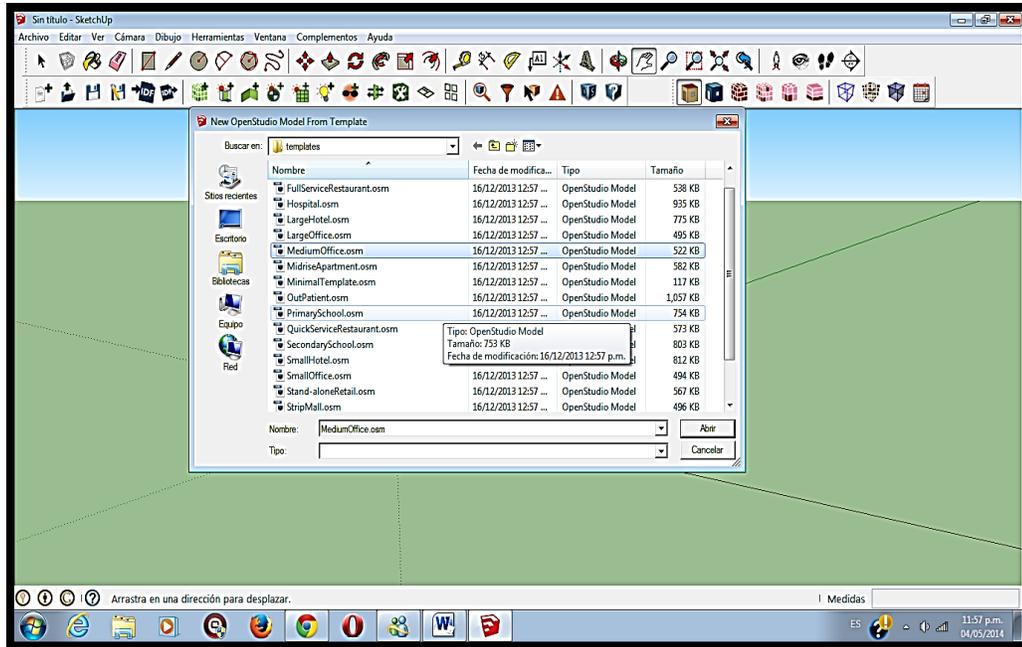


Figura 2.2 Selección de plantilla adecuada.

Para poder seleccionar una plantilla es necesario dar click sobre la herramienta New OpenStudio Model from Template ver Figura 2.2. Esta herramienta abrirá un selector de archivos, para el caso se selecciono es MediumOffice.osm, esta no creara ningún modelo 3D.

2.5.2 CREACIÓN DE ESPACIOS Y SUPERFICIES.

Como primer paso es necesario dibujar un diagrama que las áreas de las zonas térmicas determinadas estas serán el número de espacios creados ver Figura 2.3.

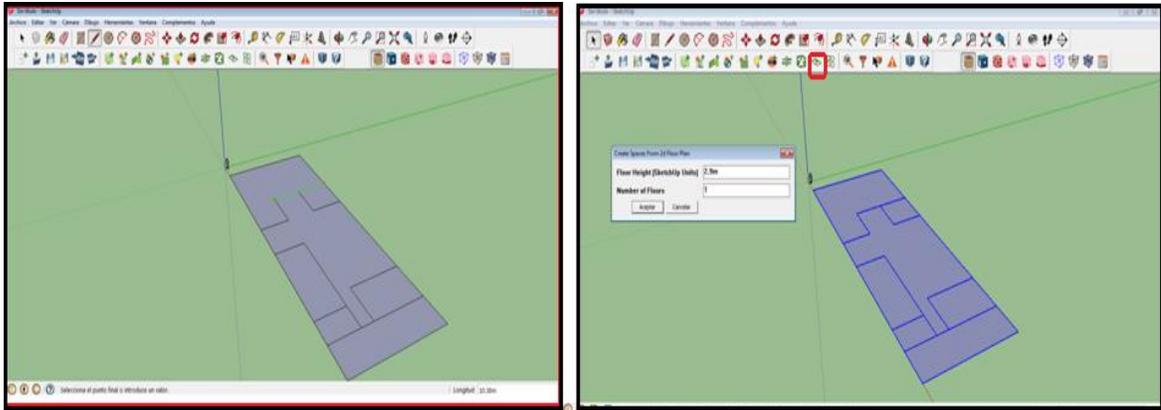


Figura 2.3 Trazando el área de los espacios a crear izq. uso de herramienta crear espacio.

Una vez ya dibujado el diagrama se selecciona con el cursor todas las áreas y se utiliza la herramienta de crear espacios del diagrama y se introduce la altura y la cantidad de niveles deseadas ver Figura 2.4. Esta herramienta construye un espacio con un volumen igual a un área encerrada por la altura seleccionada para el caso 2.9m.

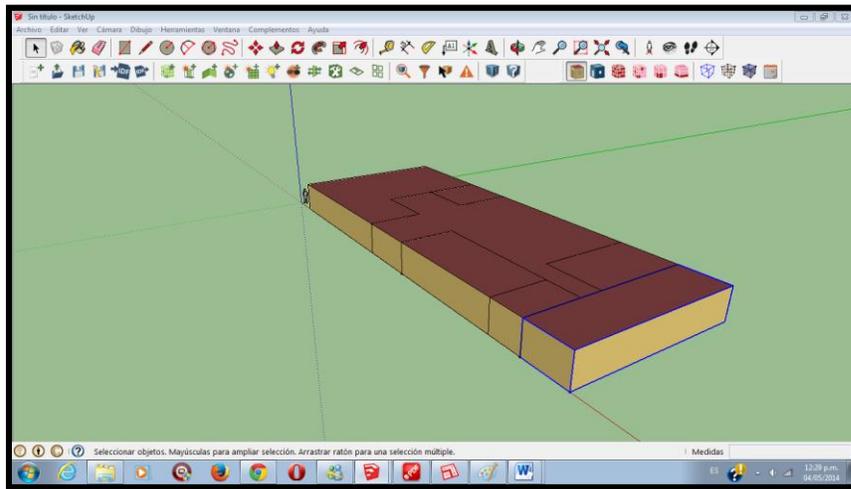


Figura 2.4 Efecto de crear espacio con herramienta crear espacio desde diagrama.

2.5.3 CREACIÓN DE SUB-SUPERFICIES (VENTANAS Y PUERTAS).

Para poder crear una puerta en una superficie es necesario seleccionar el espacio a editar y la superficie sobre la cual se desea la puerta. Una vez seccionada basta con dibujar un rectángulo que no toque el nivel de referencia inferior (el piso del espacio seleccionado) ver Figura 2.5.

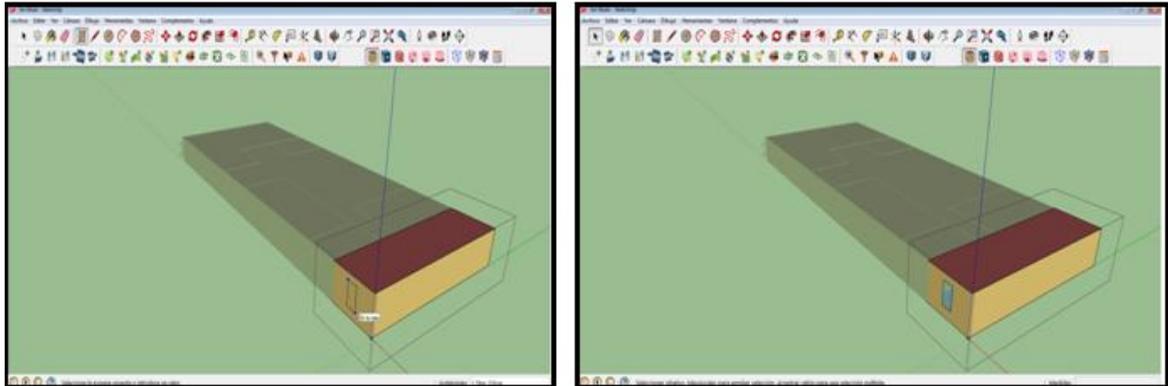


Figura 2.5 Creación de una sub-superficie ventana.

Para poder crear una puerta en una superficie es necesario seleccionar el espacio a editar y la superficie sobre la cual se desea la puerta. Una vez seccionada basta con dibujar un rectángulo que toque el nivel de referencia inferior (el piso del espacio seleccionado).

Debido que es necesario dibujar una puerta en un lugar donde se encuentra otro espacio es necesario auxiliarse de la herramienta Hide Rest of Model ver Figura 2.6, esta herramienta esconde los espacios que no son de interés para poder trabajar libremente en la zona seleccionada.

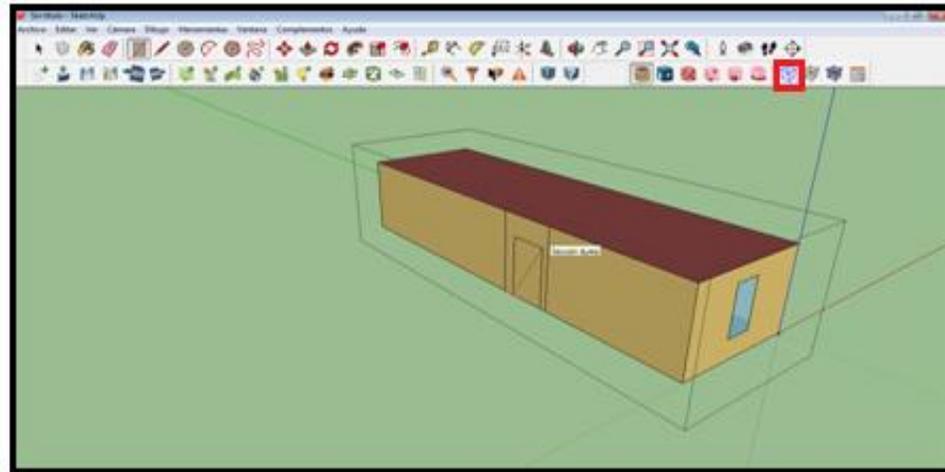


Figura 2.6 Creación de una sub-superficie puerta el cuadro rojo demuestra que se esconden las zonas que no estamos trabajando.

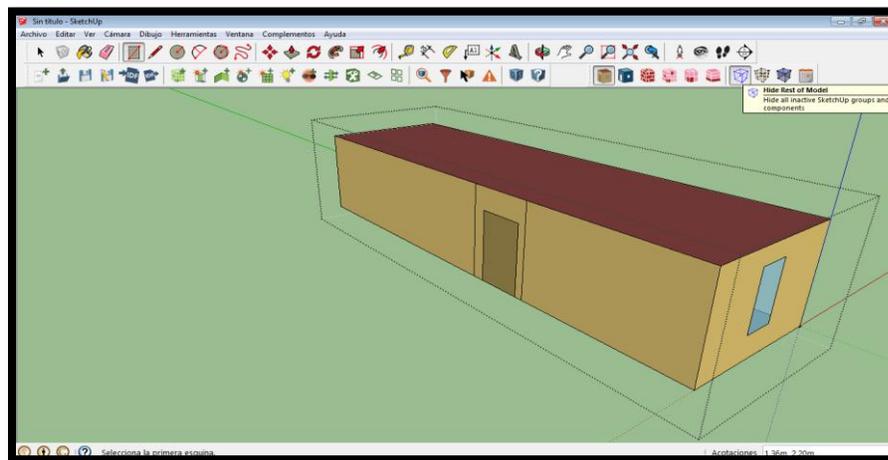


Figura 2.7 Sub-superficie puerta ya creada.

2.5.4 SURFACE MATCHING.

Cando ya se han creado todas las puertas y ventanas tanto interiores como exteriores es necesario interceptar las superficies, debido a que cuando se crea una sub-superficie como una puerta en una zona solo existe para la zona que la contiene ver Figura 2.9, es decir para las zonas adyacentes no existe y no podrá haber transferencia de calor correcta por que se tendrá una puerta contra una pared. Debido a esto es necesario interceptar las superficies para que se creen

automáticamente y en lugar exacto y evitar errores al momento de la simulación y poder asegurar la que las superficies tengan transferencia de calor adecuada ver Figura 2.10.

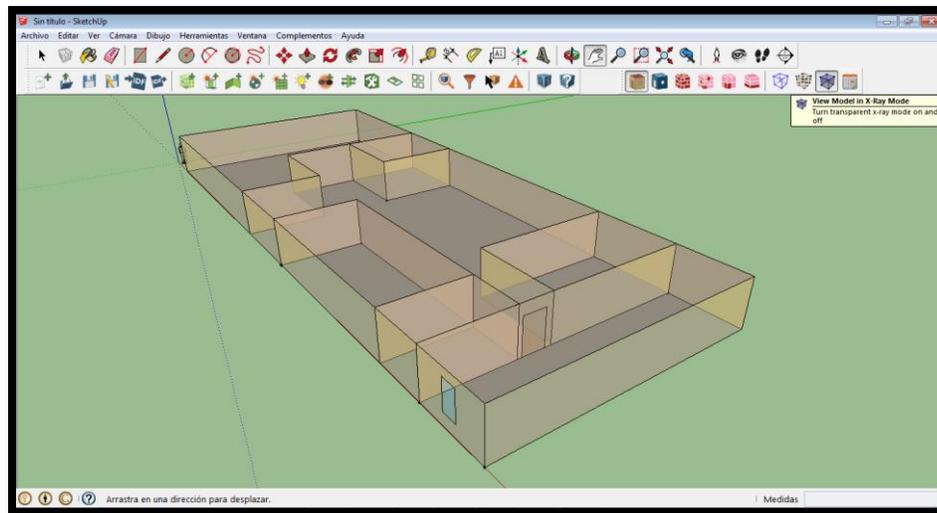


Figura 2.8 Demostración del modo de rayos X para poder observar a través de las paredes.

Para poder interceptar las superficies solo basta con dar click en la herramienta Surface Matching, esta herramienta con tiene un cuadro donde se deberá seleccionar entre las dos opciones de Intersect and Divide Inter-Zone Surfaces a continuación se describen las dos opciones:

Intersect in Entire Model: esta opción interceptara todas las superficies del modelo.

Intersect in Selection: esta opción intercepta superficies seleccionadas, es muy útil cuando se añaden nuevas superficies y no se necesita interceptar todo reduciendo tiempo de ejecución.

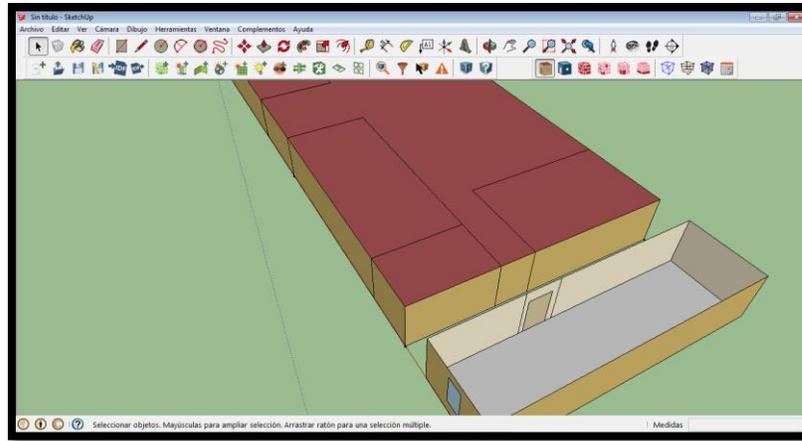


Figura 2.9 Han separados las superficies, demostrando las superficies sin interceptar.

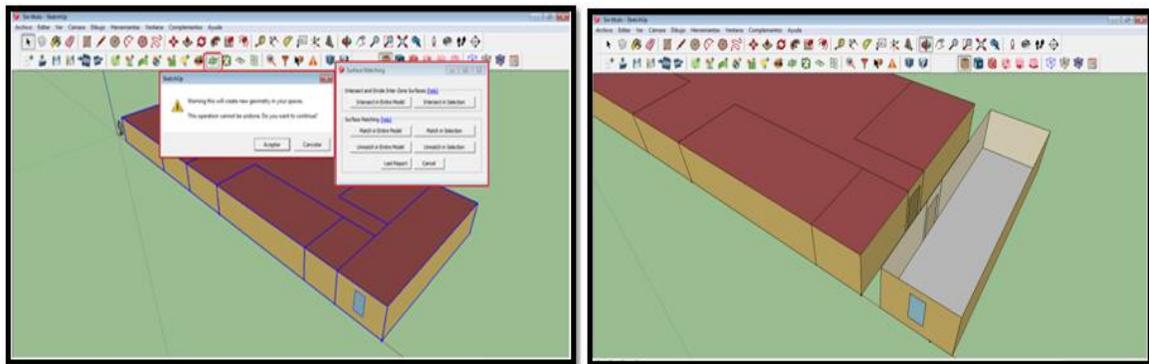


Figura 2.10 Aplicando intercepción de superficies izq. resultado derecha.

2.5.5 Transferencia de calor entre superficies.

Cuando ya se hayan interceptado todas las superficies del modelo es necesario asegurar que exista comunicación entre las superficies de dos zonas térmicas continuas para esto existe la herramienta Surface Matching que al igual que la opción Intersect and Divide Inter-Zone Surfaces tiene dos opciones que son matching todo el modelo y matching zonas seleccionadas.

La herramienta de renderización ver Figura 2.11 ayuda la visualización de transferencia de calor entre las zonas térmicas, esta herramienta cambia de color las superficies indicando si se encuentra expuesta al sol, viento u otra superficie lo rodea. Por defecto el modelo todas las

superficies están expuestas al sol y al aire exterior lo que causa errores de simulación debido a que muchas zonas térmicas tienen a su alrededor otras.

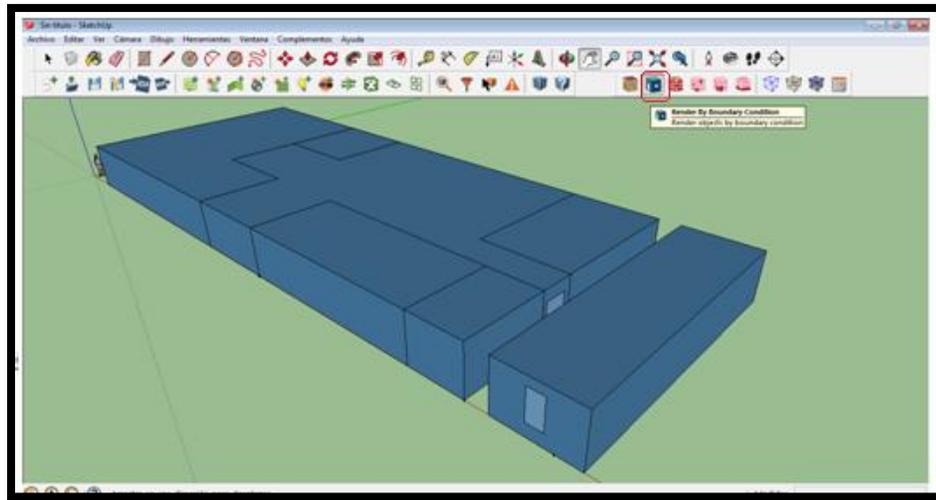


Figura 2.11 Condiciones de contorno de las superficies antes de aplicar Surface Maching.

Al utilizar la herramienta Surface Maching las superficies de las zonas térmicas que estén al lado de otras zonas térmicas cambiara de color a verde indicando que las superficies comunican y hay transferencia de calor, además de indicar si la superficie es extrema o interna ver Figura 2.12 y Figura 2.13.

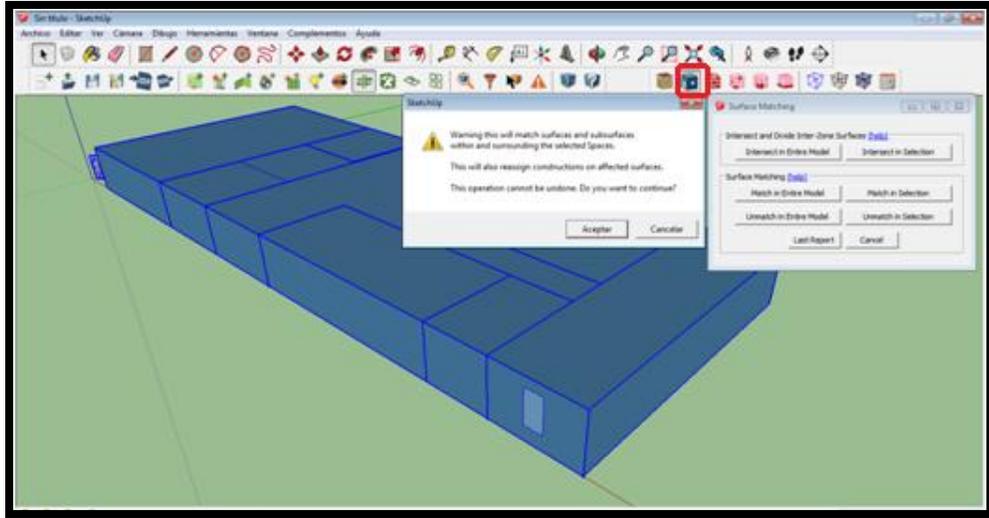


Figura 2.12 Aplicando Surface Matching.

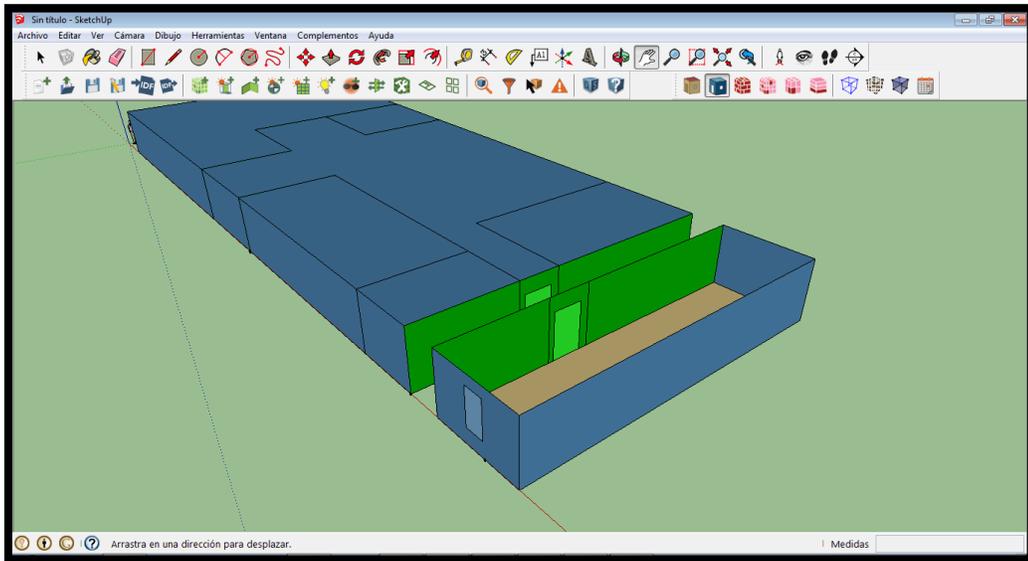


Figura 2.13 Efecto de Surface Matching por lo general el color verde significa que la superficie tiene un contorno junto a otra superficie.

2.5.6 Herramienta inspector de objetos.

La herramienta Inspector es una de las herramientas más útiles permite visualizar y editar muchos atributos del espacio o superficie seleccionada ver Figura 2.14. Seleccionando un espacio.

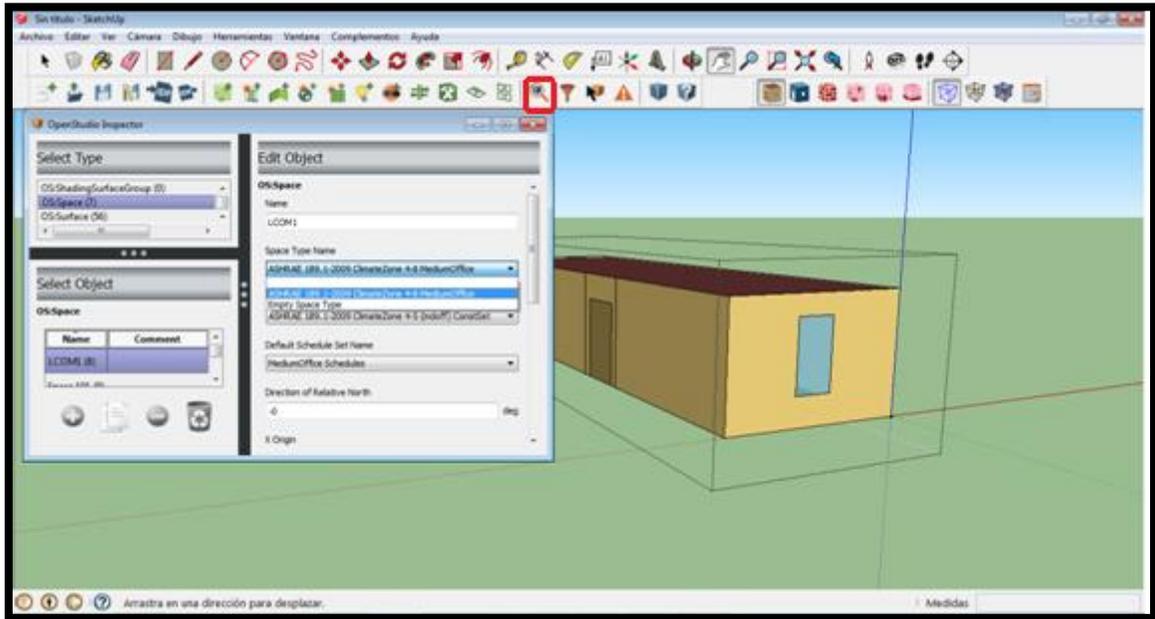


Figura 2.14 Seleccionando un espacio se recomienda editar solo el nombre del espacio.

Como se puede observar en la imagen anterior al activar el inspector se pueden ver los atributos del espacio seleccionado entre ellos se encuentran.

- Nombre.
- Historial de construcción.
- Construcción por defecto.
- Horarios por defecto.
- Zona térmica que contiene.

Todos los datos pueden ser editados desde este inspector pero se recomienda hacer con la aplicación OpenStudio.

2.5.7 Seleccionando una superficie.

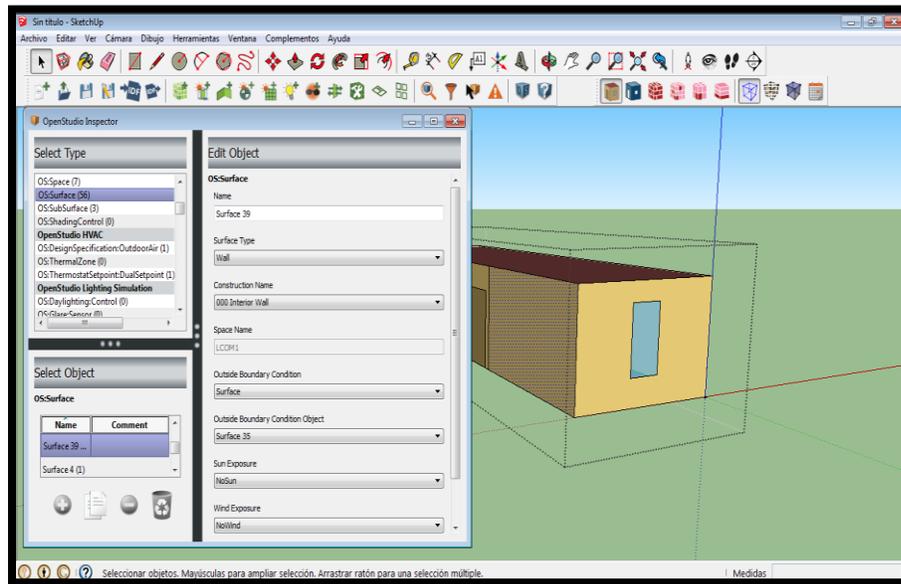


Figura 2.15 Inspector de objetos seleccionando una superficie

Al seleccionar una superficie se puede visualizar y editar (ver Figura 2.15) los siguientes datos:

- Nombre
- Tipo de superficie.
- Espacio a que pertenece.
- Superficie que la rodea.
- El nombre de la superficie que la rodea
- Exposición al sol
- Exposición al aire

Los campos de superficie que la rodea y su nombre, exposición al sol y viento son editados automáticamente cuando se aplica la herramienta Surface Matching. Se recomienda editar el nombre de construcción para el caso se sabe que es una pared interna.

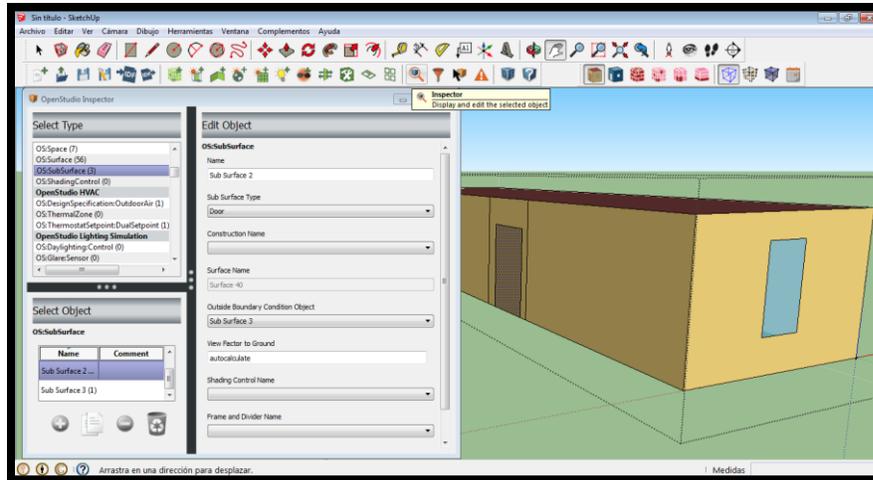


Figura 2.16 Seleccionando una sub superficie.

Al seleccionar una sub-superficie se puede visualizar y editar (ver Figura 2.16) los siguientes datos:

- Nombre
- Tipo de sub-superficie.
- Espacio a que pertenece.
- Objeto que la rodea sub-superficie.
- El nombre de la superficie que la rodea

EL campo con el objeto que la rodea se llena automáticamente cuando se ejecuta el Surface Matching, tanto para ventanas como para puertas, se recomienda solo cambiar el campo Construction name asignado el valor adecuado si es una puerta exterior o interior, igual si se trata de una ventana pero se deberá cambiar Sub Surface Type para elegir si es una ventana operable o fija.

2.6 SIMULACION DE DEMANDA ENRGETICA DE UN EDIFICIO CON LA APLICACION OPENSTUDIO.

Antes de poder simular el consumo energético de un edificio con OpenStudio es necesario tener el modelo 3D completo creado en Sketchup con el pluggin de OpenStudio. Una vez construido y

asegurando que cada una de las superficies internas tienen transferencia de calor se puede proceder a ejecutar la aplicación de OpenStudio y así definir cargas como: HVAC, números de personas, luminarias, equipos eléctricos, actividad física y horarios (uso de equipos eléctricos, permanencia de personas, termostatos, uso de luminarias etc.)

Se puede ejecutar directamente desde la barra de herramientas dando click en la herramienta Launch Openstudio ver Figura 2.17.

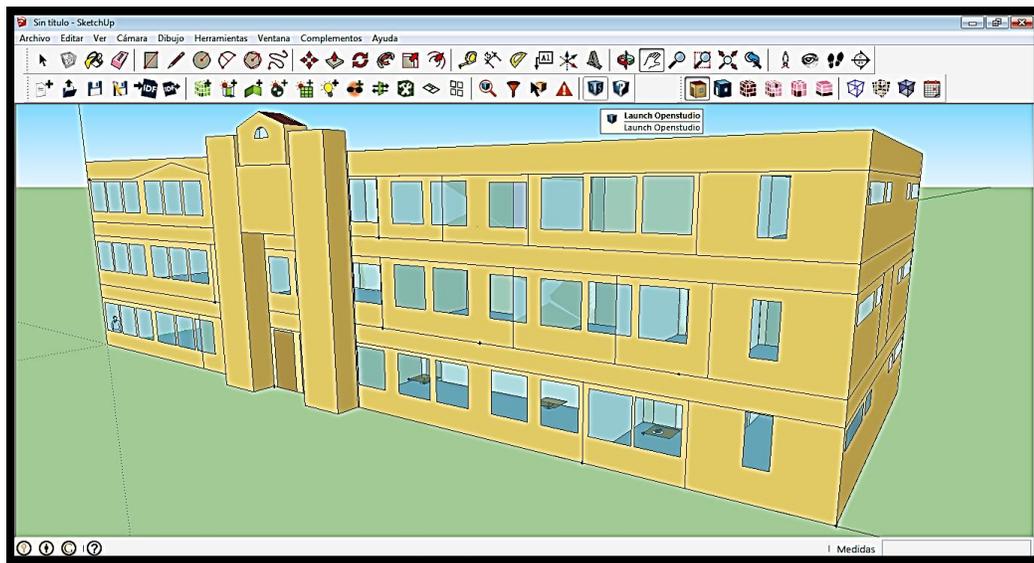


Figura 2.17 Modelo completo del Edificio de la Escuela de Ing. Industrial.

La Figura 2.18 muestra el menú completo de la aplicación cada una de sus campos serán descritos y detallados para poder editar el modelo creado en SketchUp con el plugin de OpenStudio a continuación.

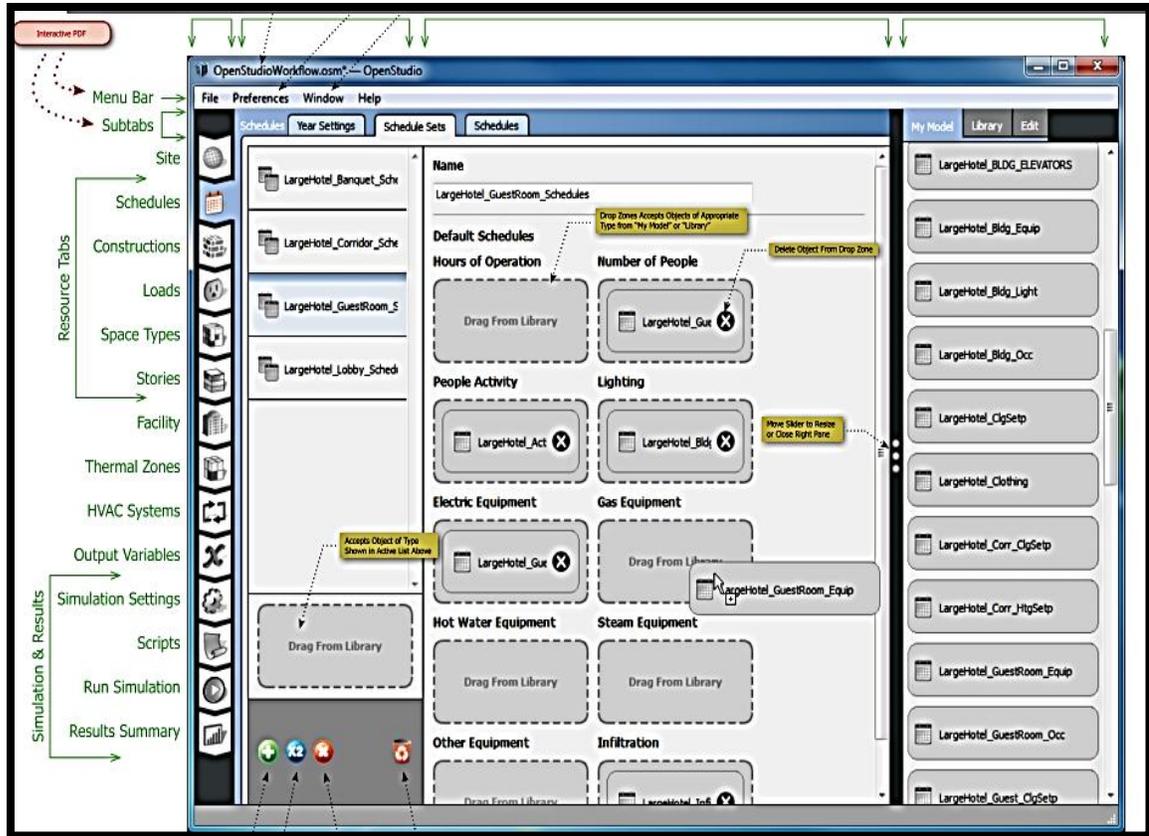


Figura 2.18 Descripción de la aplicación OpenStudio[8].

2.6.1 Menu bar.

Esta es la barra de menú donde se podrá seleccionar archivo, preferencias, Online BCL y Ayuda.

Al seleccionar file se mostrara el menú de la imagen de al lado donde se podrá crear nuevo archivo, abrir archivo, cargar otras librerías, guardar, exportar el archivo osm a IDF y viceversa.

Cuando se selecciona Preferences muestra un pequeño menú en el cual se podrá elegir el sistema de unidades como el sistema métrico y el sistema Ingles.

2.6.2 Site.

En esta pestaña se encuentran 4 pestañas pero solo se describirá una debido a que las demás no son necesarias para la simulación.

Weather File & Design Day

Al seleccionar esta pestaña se encontraran los campos Weather File, Design Day y Location.

Weather File: este campo muestra el archivo meteorológico (.epw) seleccionado, se puede seleccionar otro archivo al dar click sobre el botón Browse ver Figura 2.19 Selección de archivo de datos meteorológicos, si no se cuenta con un archivo es posible descargar uno en el enlace que se encuentra con letras azules.

Design Day: este campo muestra el archivo de diseño de días (ddy) es archivo contine los días festivos y asuetos, se puede seleccionar otro archivo al dar click sobre el botón Browse, si no se cuenta con un archivo es posible descargar uno en el enlace que se encuentra con letras azules.

Location: este campo se auto completa al selección el archivo de clima (.epw) contiene los datos de coordenadas de ubicación, elevación, zona horaria

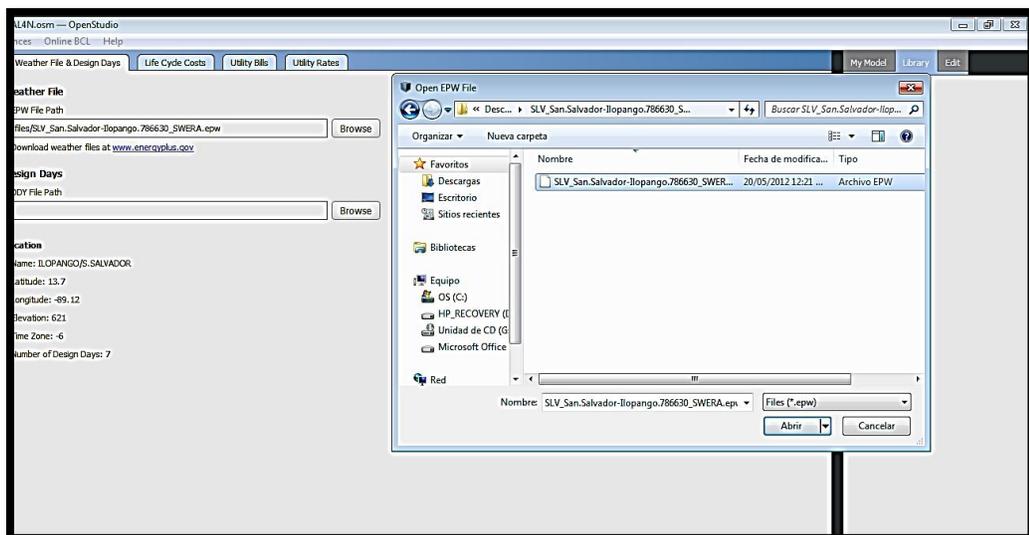


Figura 2.19 Selección de archivo de datos meteorológicos

2.6.3 Scheludes.

Dentro de esta pestaña se encuentran otras 3 pestañas Year Settin, Schelude Sets y Scheludes mostrada en Figura 2.20 .

Year Settin

Esta pestaña se puede seleccionar el año del calendario con y se puede editar el perio del horario del verano activando daylight saving time.

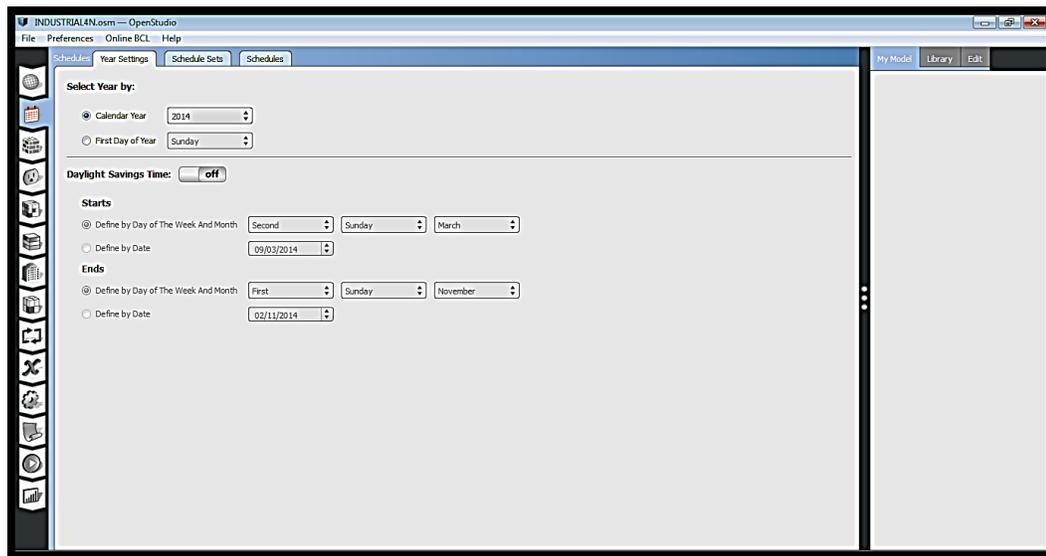


Figura 2.20 Pestaña Scheludes.

Schedule Sets.

En esta pestaña se pueden editar conjuntos de horarios y crearlos siempre y cuando el tipo de horario corresponda al mismo tipo de horario de destino (horario número de persona, luminarias, equipo eléctrico, termostato, etc.).

Editando un conjunto de horarios.

Para poder editar un horario por ejemplo no se desea que el conjunto de horario tenga otro tipo de horario de luminarias, se puede seleccionar otro desde la pestaña de la derecha ya sea de My Model o Libraries estos horarios deben ser extraídos de la pestaña Ruleset Schelude, para poder modificar solo basta con arrastrar el horario seleccionado sobre el horario a sustituir o agregar ver Figura 2.21.

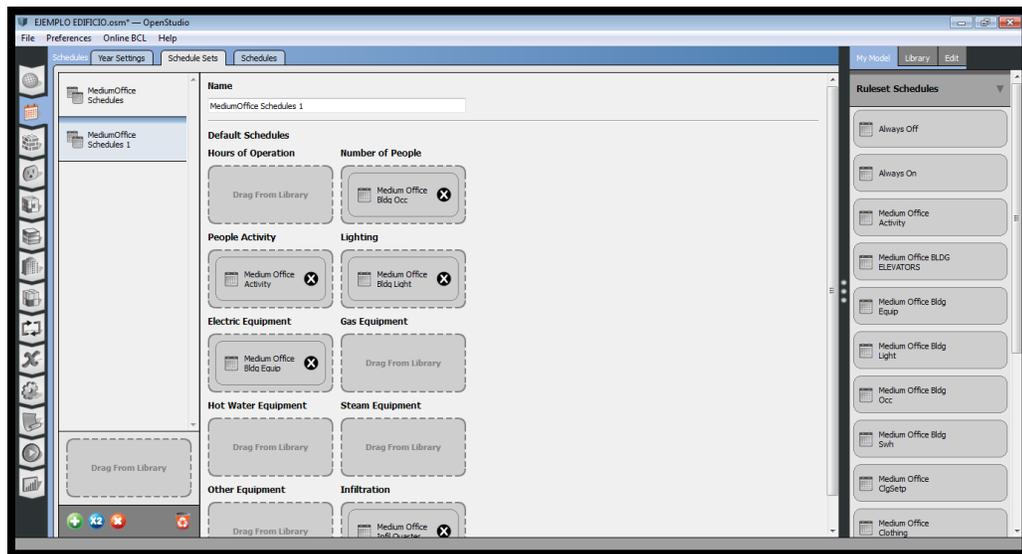


Figura 2.21 Pestaña Schedule Sets editando un conjunto de horarios

Creando un conjunto de horarios.

Para poder crear un conjunto horario se da click sobre el botón verde que es add new object automáticamente aparece un conjunto de horarios vacíos, se puede seleccionar horarios desde la pestaña de la derecha ya sea de My Model o Libraries estos horarios deben ser extraídos de la pestaña Ruleset Schelude, para poder añadirlos solo basta con arrastrar el horario seleccionado sobre el campo vacío.

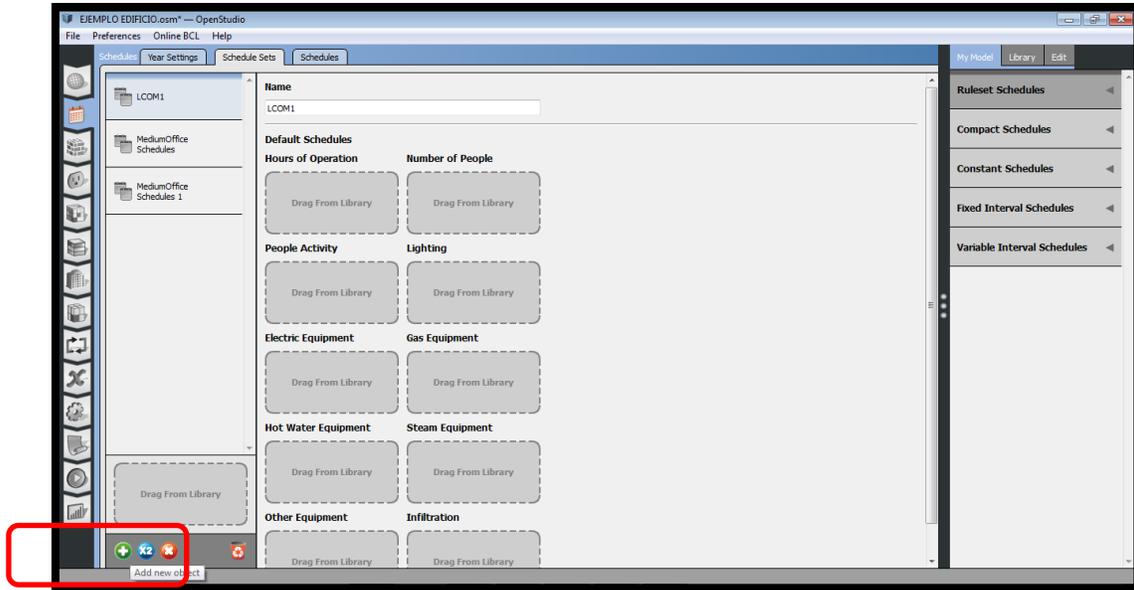


Figura 2.22 Pestaña Schedules Set opciones.

En la Figura 2.21 el cuadro rojo muestra las opciones crear nuevo set de horarios, eliminar o copiar (verde azul y rojo respectivamente).

Schedule.

Esta pestaña muestra detalladamente el horario que uno seleccione por ejemplo el uso del elevador en un edificio.

Editando un horario.

EL horario puede ser editado simplemente dando doble click sobre un segmento de una recta en la gráfica, esta se puede hacer más precisa pulsando los botones de Hourly, 15 minutes y 1 minutes, se puede elegir el porcentaje de operación para las secciones de tiempo deseadas ver **Figura 2.23**.

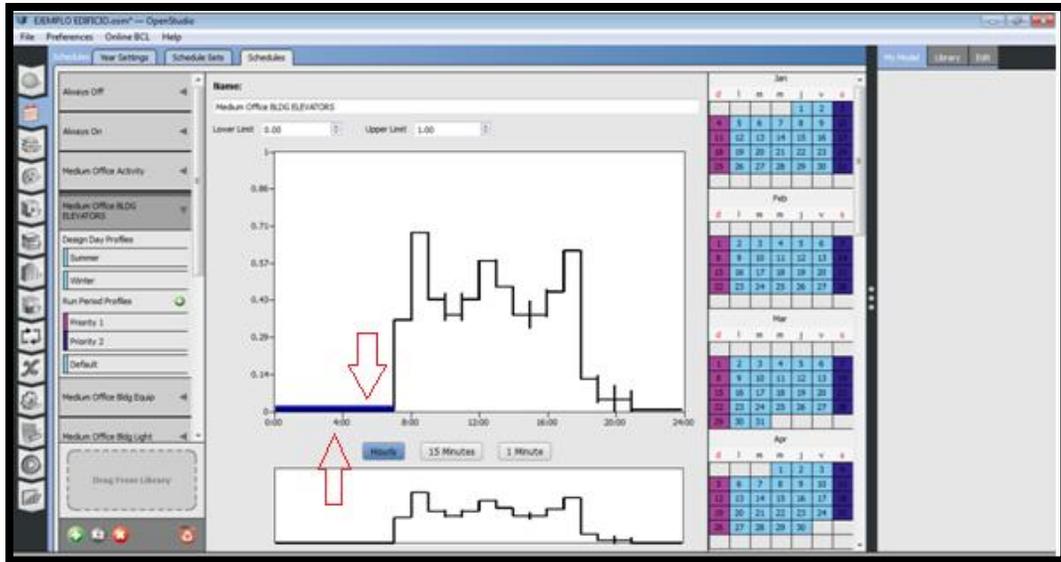


Figura 2.23 Edición de un horario.

Creando un nuevo horario.

Para poder crear un horario por ejemplo el horario de permanencia de personal de trabajo de la secretaria de la Escuela de Ing.

Para crear el horario de personal de la secretaria se debe pulsar sobre el botón verde y se selecciona la clase de horario people y el tipo de horario número de personas.

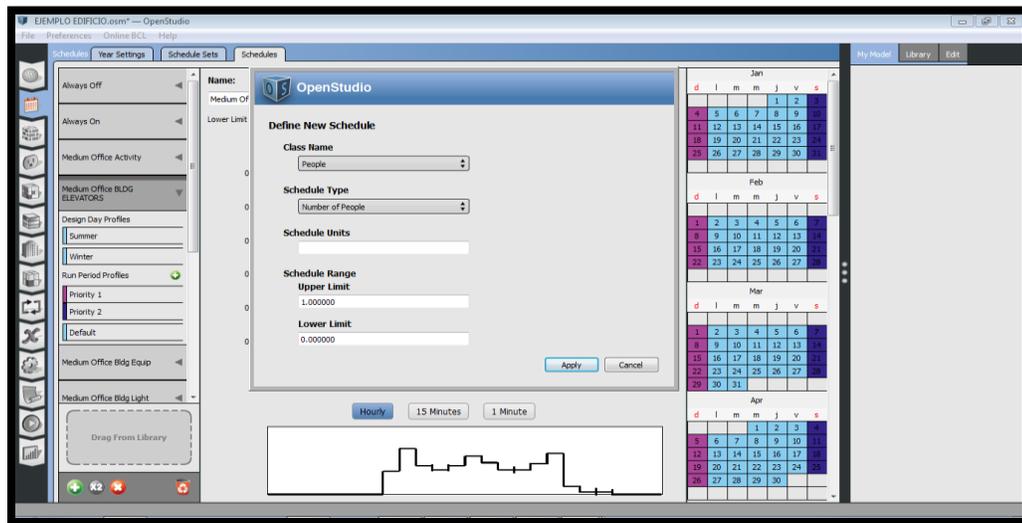


Figura 2.24 Creación de un nuevo horario.

Cuando se ha seleccionado el tipo de horario se puede editar el nombre del horario y el horario como lo indica la sección de edición de horario. El horario que aparece es el por defecto es decir este horario se aplicara a todos los días de la semana (se puede observar que en el calendario esta todo del mismo color). Para poder agregar otro horario con otra prioridad se selecciona el botón que dice Run Period Profiles como lo muestra la Figura 2.25.

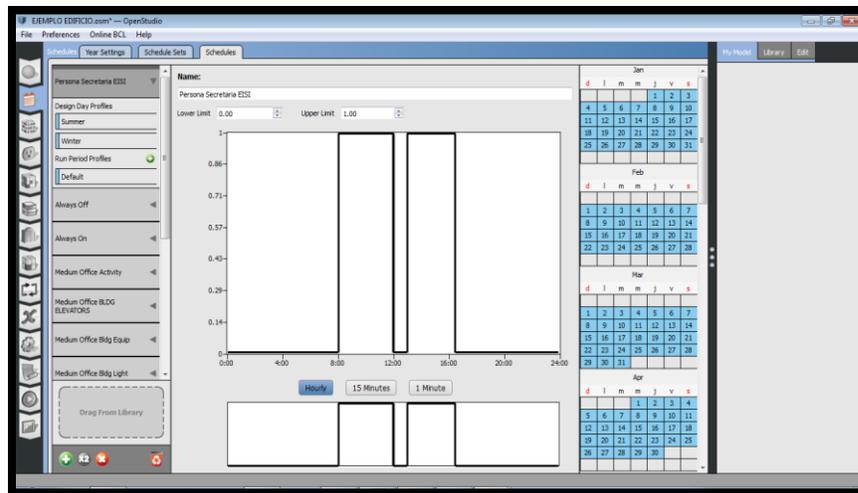


Figura 2.25 Horario de personal secretaria EISI.

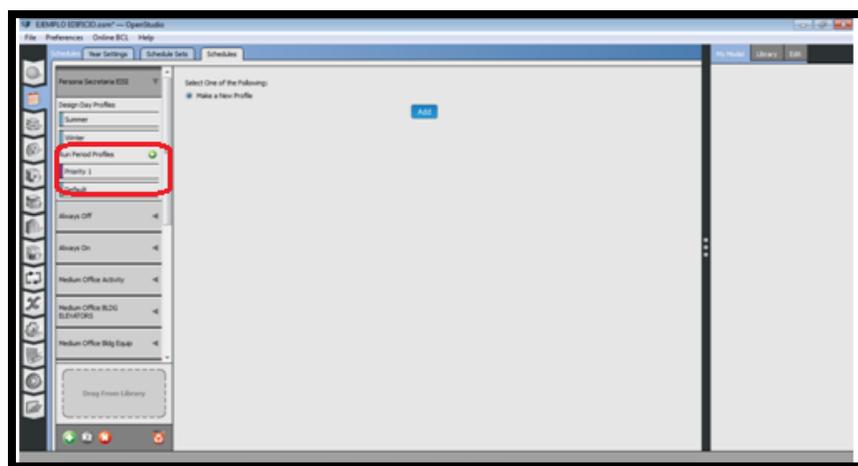


Figura 2.26 Creación de un horario con otro tipo de prioridad.

Dando click sobre Add aparece un nuevo horario sobre ese horario Default este puede ser editado, se da click sobre los botones de días y estos cambian de color al color del horario seleccionado ver Figura 2.27.

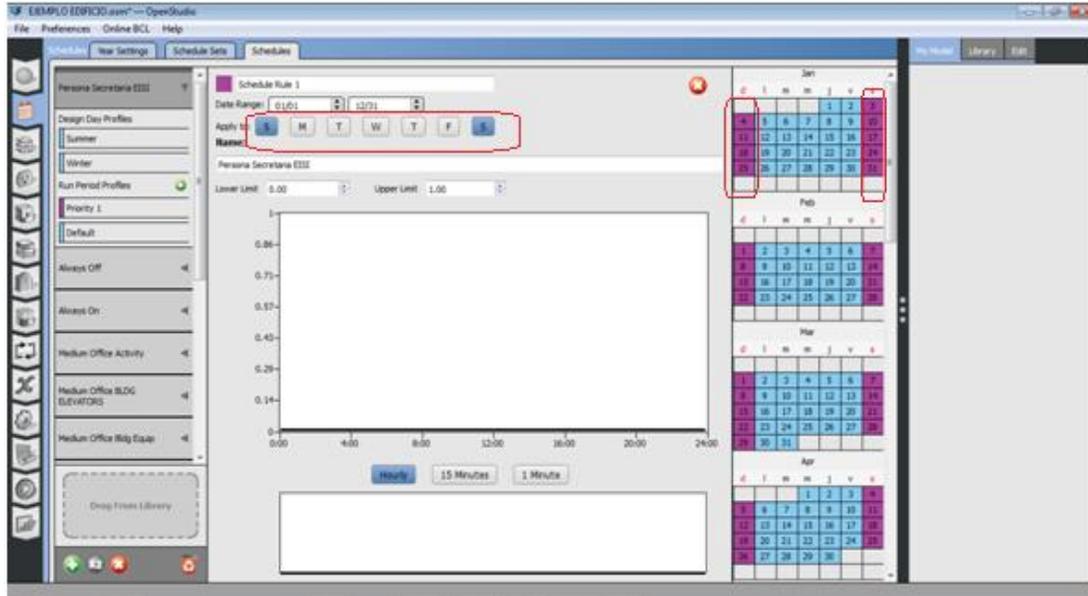


Figura 2.27 Horario de fines de semana de personal de secretaria EISI.

2.6.4 Construction.

Esta pestaña contiene todo lo relacionado con los materiales de la construcción de cada una de las superficies creadas, si se escogió una plantilla del modelo estas estarán serán seleccionadas por defecto y pueden ser editadas o cambiadas. Dentro de esta pestaña se encuentran tres pestañas más.

Construction set.

Esta pestaña (Figura 2.28) muestra las construcciones seleccionadas para paredes, techos, puertas, ventanas, etc. Estas pueden ser modificadas arrastrando un tipo de construcción de My Library o Library

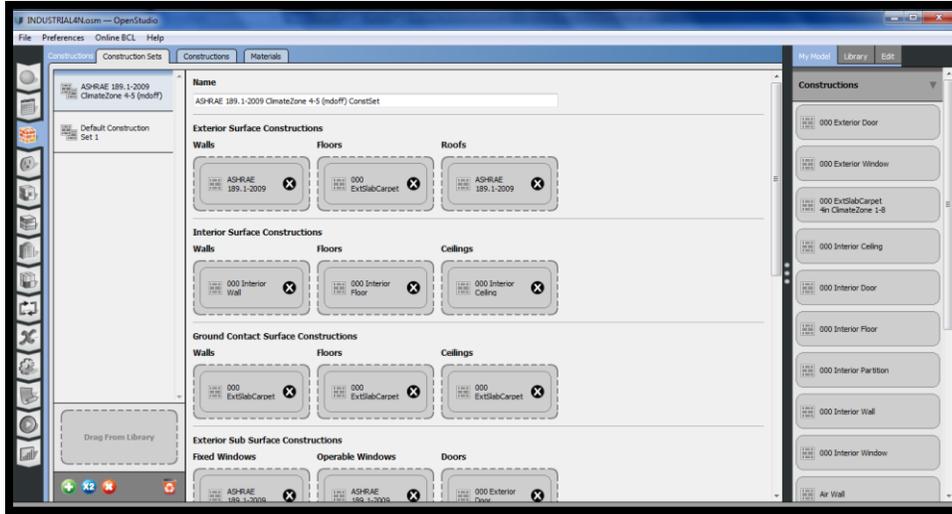


Figura 2.28 Pestaña Construction Sets

Construction

Esta pestaña muestra los materiales de construcción seleccionados para una construcción específica, por ejemplo la construcción 000 Exterior Door (Figura 2.29) está construida con dos materiales 000 F08 Metal surface y 000 I01 25mm insulation. Estos materiales pueden ser cambiados o agregar más.

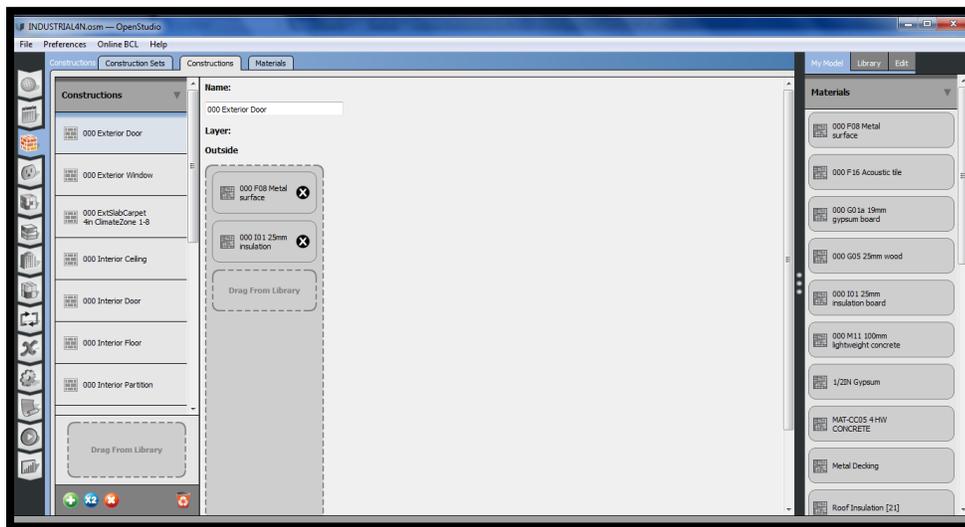


Figura 2.29 Materiales de construcción de la construcción 000 Exterior Door.

2.6.5 Materials.

En esta pestaña se pueden editar las propiedades físicas de un material seleccionado.

2.6.6 Loads.

En esta pestaña se pueden crear y editar cargas tanto eléctricas como cargas térmicas.

Editando una carga existente por ejemplo una de tipo luces ASHRAE 189.1-2009 ClimateZone 4-8 MediumOffice LightsDef, para poder editar los valores de potencia, fraction de radiación o fracción visible es necesario colocarse sobre el campo cambiar según sea la necesidad

Creando una nueva carga

Cuando no se encuentra una carga en la plantilla selecciona como por ejemplo una laptop i3 (Figura 2.30) con un consumo de potencia de 65W, se determina que esta será un equipo eléctrico por lo tanto se creara un nuevo equipo eléctrico se da click sobre Electric Equipment Definitions y se da click sobre el botón verde para crear una nueva carga, automáticamente esta se creara y se edita el nombre y la potencia en Watt.

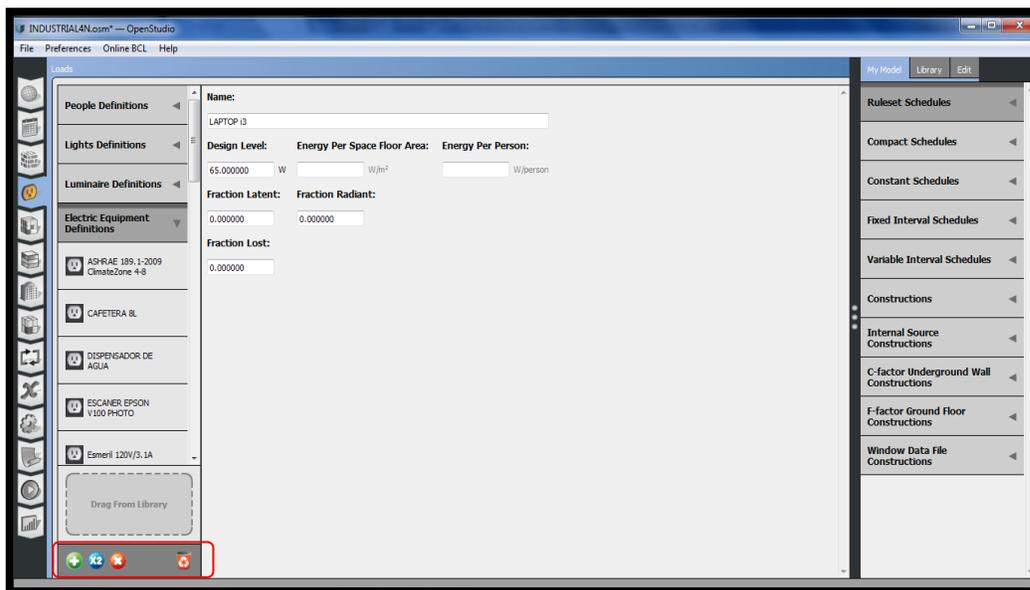


Figura 2.30 Creación y edición de un tipo de carga.

2.6.7 Space Types.

Esta pestaña muestra los diferentes tipos de espacios, las cargas que contiene y los horarios correspondientes a cada una de ellas. Por defecto solo existe un tipo de espacio si selecciono una plantilla.

Por lo general todos los espacios no contienen las mismas cargas eléctricas y térmicas como por ejemplo el espacio LCOM1, Secretaria EISI y Bodega EII, no tienen los mismos horarios de usos, números de computadoras o sistema HVAC. Por lo tanto es necesario crear nuevos espacios que contengan sus respectivas cargas y horarios.

Creando un nuevo espacio.

Para crear un nuevo espacio se debe dar click en el botón verde y este creara un nuevo espacio con todos los campos vacios. La imagen muestra un nuevo espacio vacío donde el cuadro de color rojo muestra las definiciones de los elementos existentes que se pueden seleccionar solo deberá arrastrar el elemento deseado ver Figura 2.31.

Para añadir una nueva carga se arrastran sobre el recuadro vacio que se encuentra bajo el campo New Load verFigura 2.32, cuando se haya seleccionada de las definiciones existentes, cuando se añade una carga se podrá editar el numero equipos, personas luminarias, etc. en el espacio creado

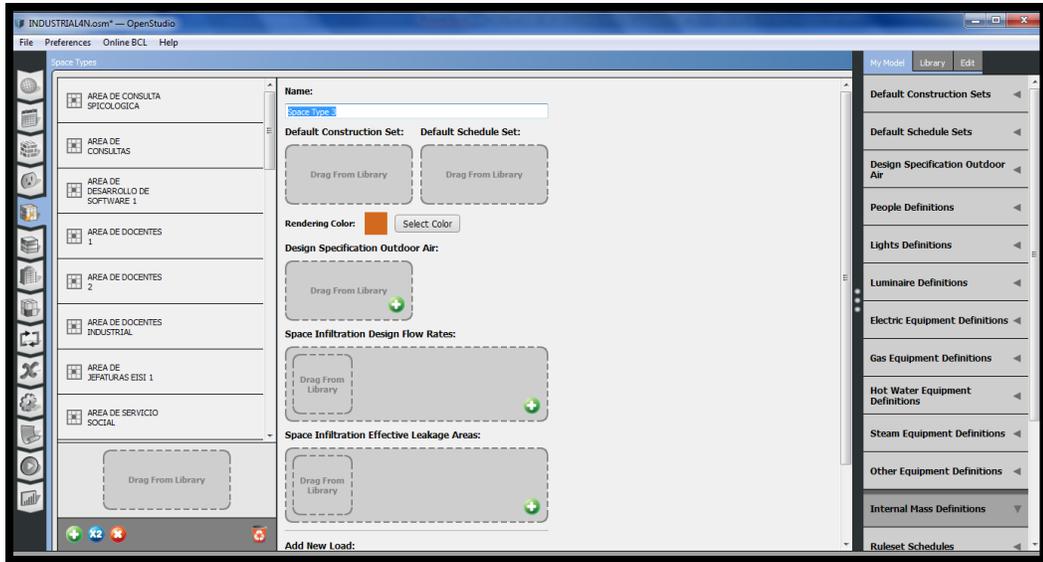


Figura 2.31 Creando un nuevo espacio.

Cuando se selecciona un Default Schedule Set los campos con horarios serán auto llenados, pero se puede seleccionar uno a uno.

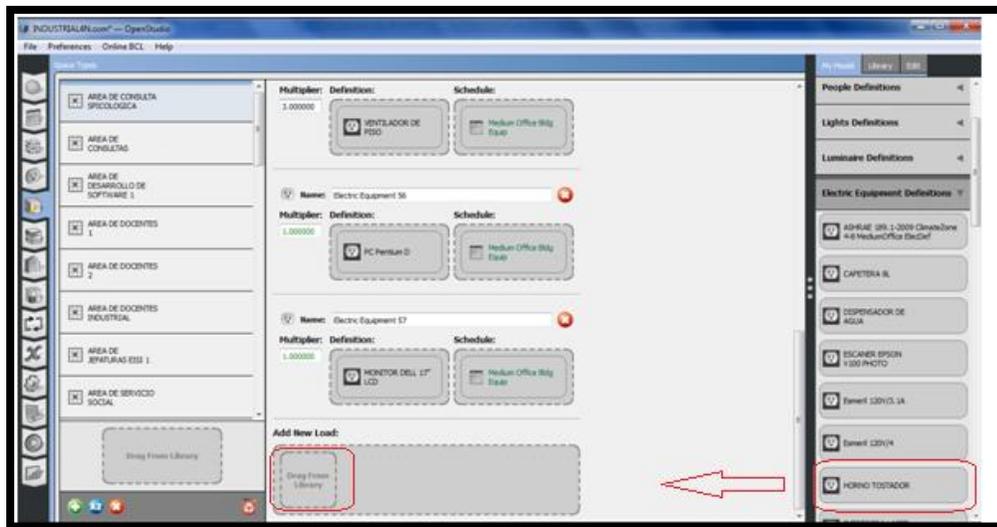


Figura 2.32 Añadiendo una nueva carga al espacio creado.

2.6.8 Building Stories.

Esta pestaña muestra el número de niveles del edificio, cada vez que se agrega un nuevo nivel (piso) en el modelo 3D de Sketchup se crea un nuevo Building Story.

Se puede crear nuevos niveles pero ya que se crean automáticamente solo se deberán editar el nombre si es deseado y llenar los campos de Default Constructin Set y Default Schedule Set, esto no es necesario esto se puede editar en la pestaña Facility.

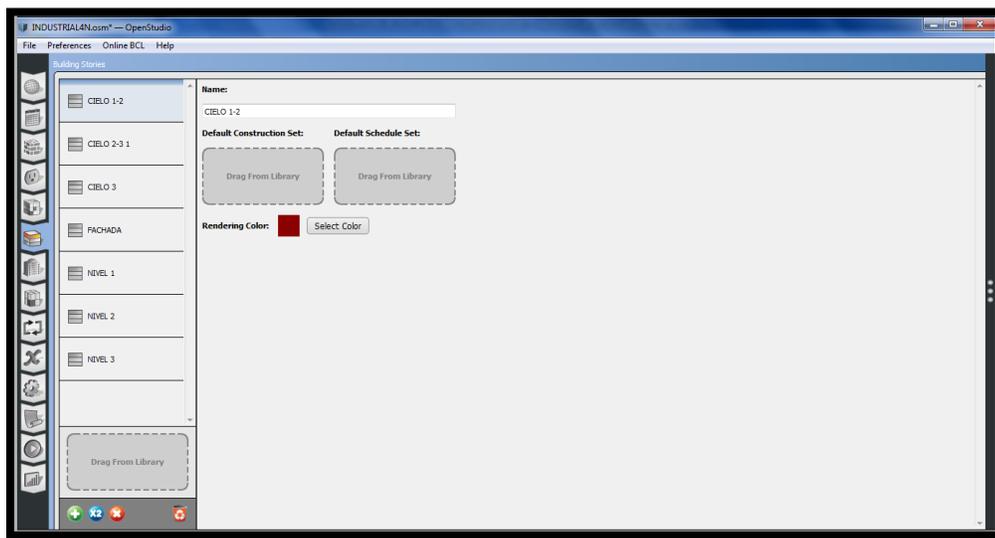


Figura 2.33 Niveles del edificio pestaña Bulding Histories.

La Figura 2.33 muestra en número y nombre asignado a cada uno de los niveles del edificio Modelado en Sketchup.

2.6.9 Facility.

Esta pestaña permite visualizar en forma de diagrama de árbol el edificio total, es de decir si se selecciona un nivel muestra los espacios asignados a este nivel; si seleccionamos un espacio veremos los tipos superficies como paredes, techos, pisos, etc.; si seleccionamos un tipo de superficie si contiene sub-superficie como puertas ver imagen. Cada objeto seleccionado puede ser editado directamente desde esta pestaña si es necesario.

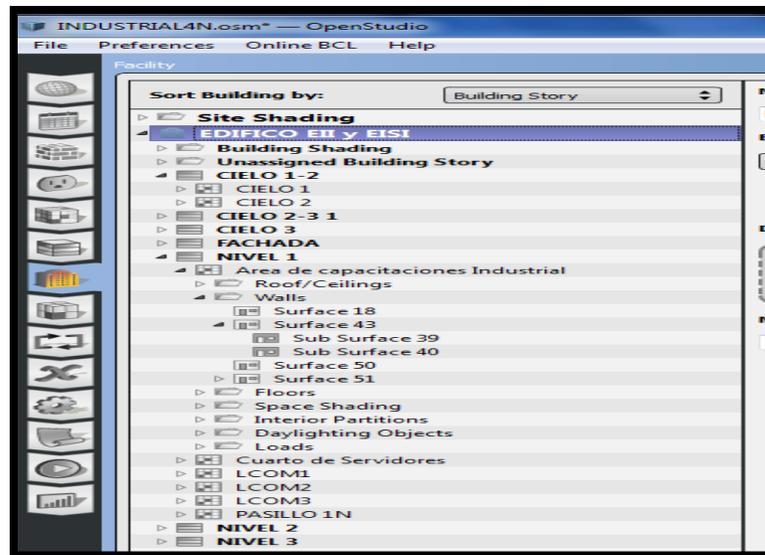


Figura 2.34 Contenido de todas las superficies, sub-superficies, pertenecientes a un espacio en un nivel seleccionado del Edificio.

Selecciona un Espacio.

Cuando se crea un nuevo espacio OpenStudio no sabe a qué nivel pertenece, que zona térmica corresponde y qué tipo de espacio es (cuando se selecciona una plantilla asume que todos los espacios son iguales al espacio por defecto). Estos campos deberán ser seleccionados de la pestaña My Model.

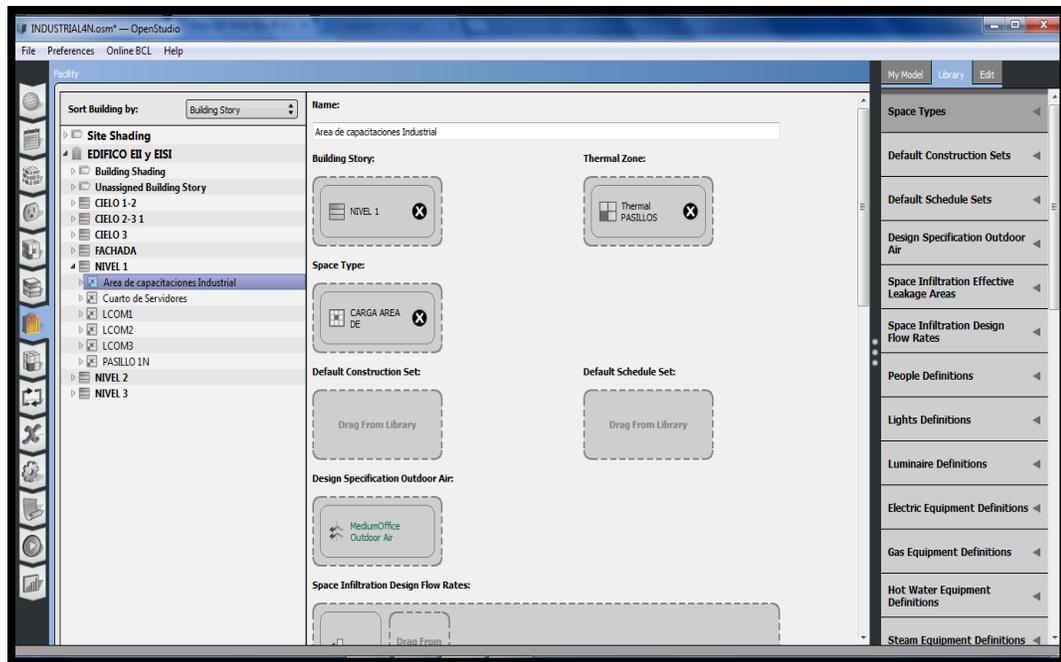


Figura 2.35 Seleccionando un espacio perteneciente a un nivel.

Selecciona una superficie o sub-superficie.

Al seleccionar una superficie o sub-superficie mostrara campos como material de construcción y la superficie con quien transfiere calor. Si no se edito la superficie de tranferencia de calor desde el Surface Matching en Sketchup se puede hacer desde esta pestaña solo se deberá saber con exactitud cuál es la superficie que la rodea.

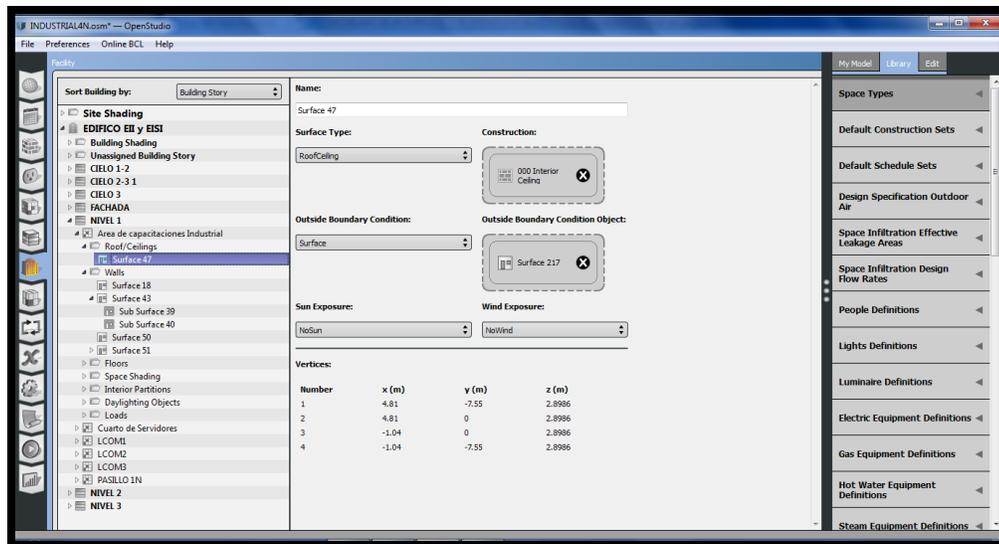


Figura 2.36 Campos que se muestran al seleccionar una superficie.

2.6.10 Thermal Zone.

Esta pestaña por defecto se encuentra vacía debido a que OpenStudio no sabe cuántos HVAC existen o cuántos flujos de aire natural hay. Por esa razón ya habiendo determinado cuantas Zonas Termales existen se deberán crear el número necesarias.

A continuación se describen los campos que se encuentran en esta pestaña

HVAC System.

Este campo se auto complementa cuando se agrega un HVAC.

Thermostat.

En este campo se agregan los horarios con las temperaturas deseadas a determinada hora tanto como para enfriamiento como para calefacción.

Sizing Parameter.

Estos campos están llenos por defecto pero se pueden editar, se recomienda solo cambiar las temperaturas de diseño como la temperatura del aire frio y la temperatura del aire caliente.

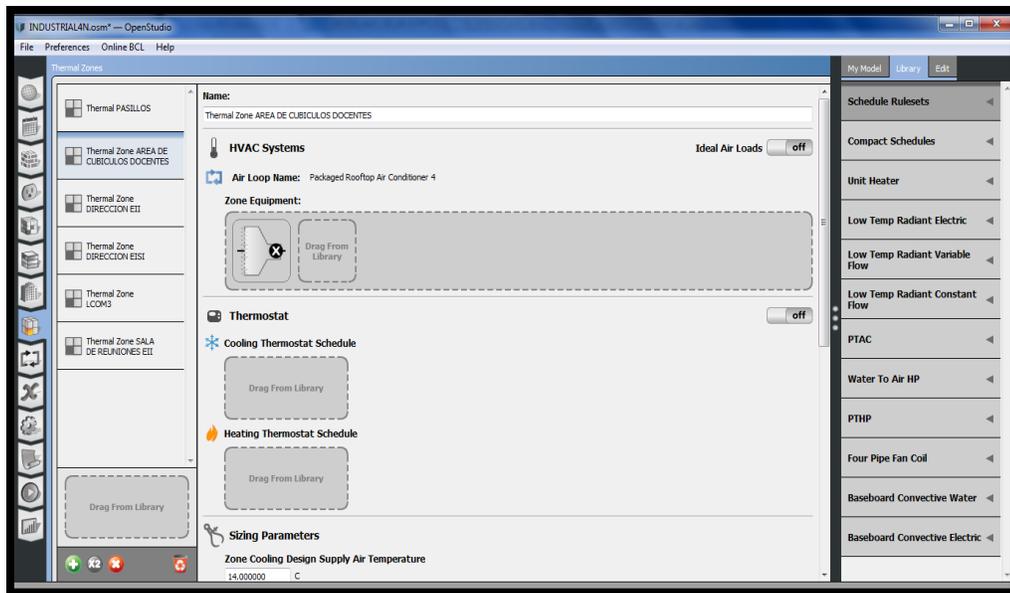


Figura 2.37 Pestaña Thermal Zones.

2.6.11 HVAC Systems

Esta pestaña ayuda a crear editar sistemas HVAC de una manera grafica y amigable. Como se menciona que por defecto no existen zonas terminas al igual no existen HVAC por lo cual tendrán que ser creadas.

Creando un sistema HVAC.

Para crear un sistema HVAC se deberá dar click sobre el botón verde y seleccionar una plantilla de HVAC que se adecue mas al HVAC real.

Debido a que el edificio solo cuenta con sistemas de aire acondicionado se selecciona la plantilla Packaged Rooftop Unit(un paquete unidad de techo ver Figura 2.38). El sistema seleccionado cuenta con calefacción puede ser eliminado. Pero debido a que la temperatura nunca desciende lo necesario para necesitar calefacción, lo cual ocurre con nuestra temperatura ambiente el consumo de este equipo será cero, lo que significa que no es necesario eliminarlo.

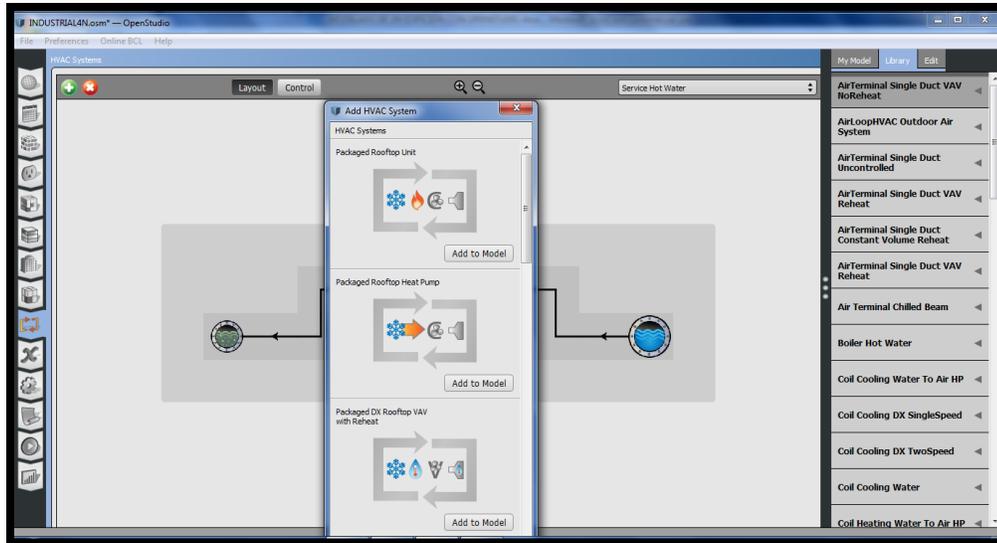


Figura 2.38 Creación de un sistema HVAC y plantillas de sistemas HVAC.

Editando el sistema HVAC.

Para poder editar un sistema HVAC se explicaran los elementos básicos de un sistema A/C en las secciones siguientes.

- Coil Cooling DX Single Speed.
- Setpoint Manager Single Zone Reheat.
- Salida del Splitter.

Coil Cooling DX Single Speed

Esta es la unidad condensadora del sistema de aire acondicionado se deberá editar la capacidad de enfriamiento y el COP según los datos de placa del sistema instalado ver Figura 2.39.

Por ejemplo la capacidad de enfriamiento del sistema de de aire acondicionado de la dirección de la Escuela de Ingeniería en Sistemas Informáticos tiene

Capacidad: 5276W

COP: 2.64

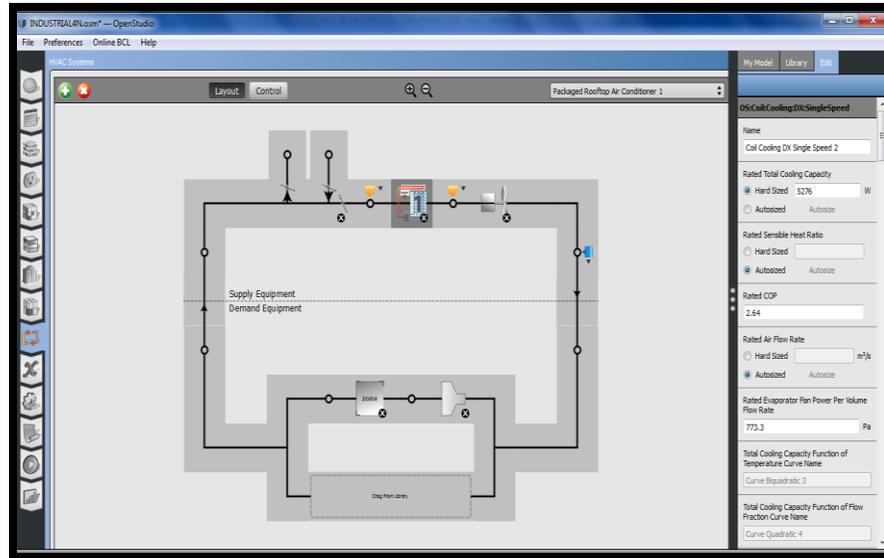


Figura 2.39 Editando la unidad condensadora evaporadora del sistema de aire acondicionado

Setpoint Manager Single Zone Reheat

Este es el termostato aquí se deberán editar la temperatura mínima y la temperatura máxima, además el nombre de la zona térmica que monitorea.

Se desea que tenga una temperatura mínima de 18°C y una máxima de 23°C deberá monitorear la zona térmica Therma Zonel DIRECCION EISI ver Figura 2.40.

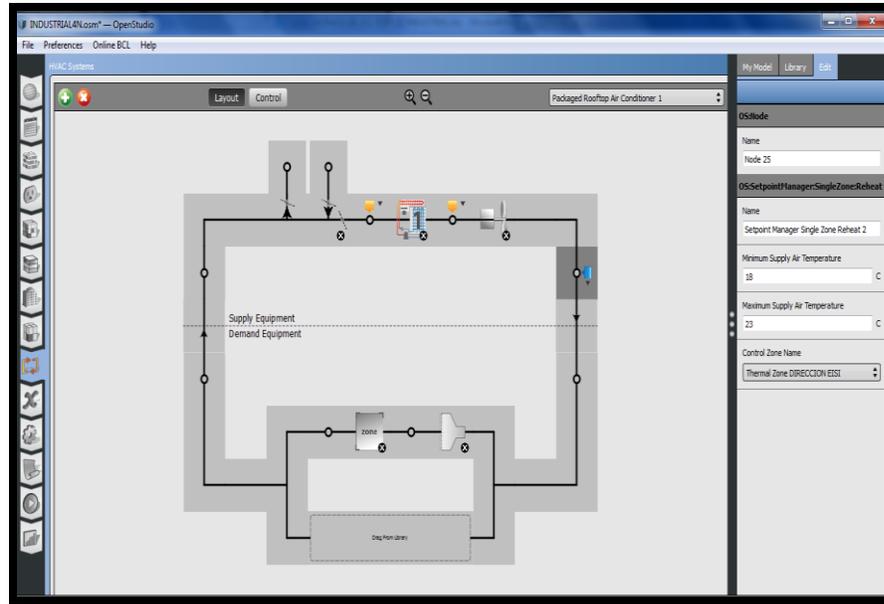


Figura 2.40 Editando el control máximo y mínimo de temperatura de un sistema HVAC.

Salida del Splitter.

Por defecto cuando se crea una zona el sistema creado no sabe a qué zona térmica pertenecerá el sistema HVAC. Para poder indicar se deberá selección el nodo antes del Splitter y aparece las zonas térmicas existentes solo se deberá dar click sobre la zona a la que se desea añadir el sistema HVAC y esta aparece a la salida del splitter ver Figura 2.41.

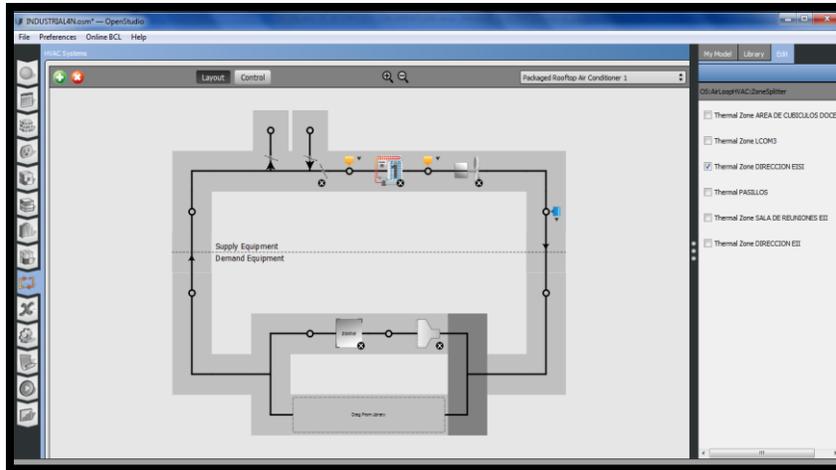


Figura 2.41 Añadiendo una zona térmica a la salida del splitter.

Editando la zona térmica del sistema HVAC.

El único campo que se debería editar es el campo de Cooling Design Air Flow Rate. Este campo es muy importante para los cálculos que OpenStudio hace al momento de inicializar los sistemas HVAC durante la simulación, muchas veces este campo es requerido aunque pocas veces puede ser auto calculado (no es necesario agregarlo para este caso).

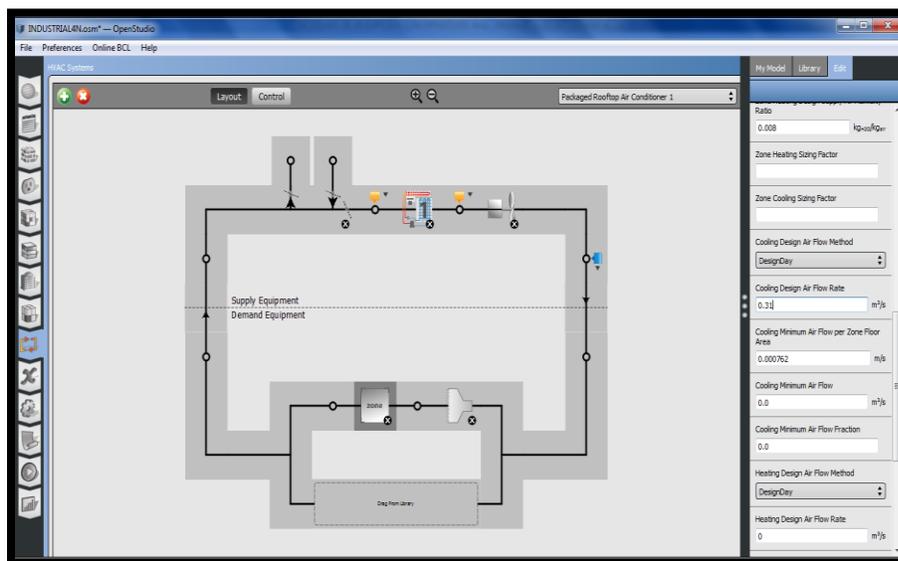


Figura 2.42 Editando los parámetros de la zona térmica.

Muchas veces este campo es necesario para cálculos realizados por OpenStudio durante la simulación.

2.6.12 Output Variables.

En esta pestaña (Figura 2.43) se pueden elegir todas las posibles variables de salida para su respectivo análisis, como por ejemplo la energía calorífica irradiada por persona. Todas las variables de salida pueden ser activadas pero esto aumentara el tiempo de simulación, es recomendable activar solo las variables de salida de interés.

Cada una de las variables puede ser analizada en periodos de hora, semana, mes, espacios de tiempo, periodo de simulación y un periodo más detallado.



Figura 2.43 Pestaña Output Variables.

2.6.13 Simulation Setting.

En esta pestaña se puede modificar el periodo de simulación, cálculos que debe efectuar durante la simulación (no se recomienda cambiarlos) y los parámetros que controlan los algoritmos de cálculo que efectúa el motor de cálculo de EnergyPlus.

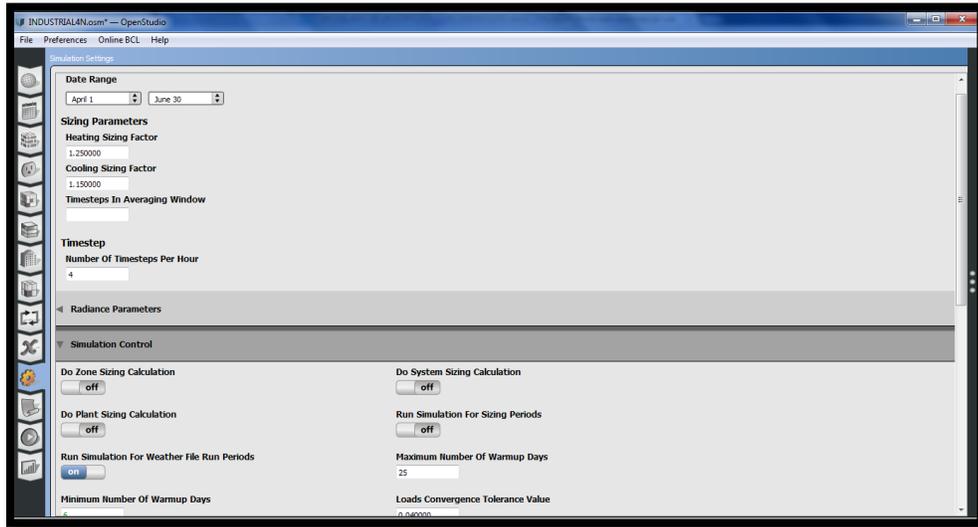


Figura 2.44 Pestaña Simulation Setting.

2.6.14 Run Simulation.

En esta pestaña es para ejecutar la simulación y visualizar el árbol de variables de archivos de salida de Energyplus.

3. ESTUDIO DE DEMANDA ENERGETICA DEL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL UES CON EL SOFTWARE OPENSTUDIO.

3.1 SIMULACION DE DEMANDA ENERGETICA EN EL EDIFICIO DE INGENIERIA INDUSTRIAL, UES.

La simulacion del edificio de Ing. Ingeniria Idustrial se efectuo segun el procedimiento descrito en la seccion dando como resultado un total de 30 tipos de espacios y 5 zonas termicas, en la figura se muestra el modelo 3D contruido en SkecthUp. Los espacios, su ubicaci3n y la zona termica a la cual pertenecen son descritos en la Tabla 3.1 Niveles, espacios y zonas termicas del edificio de Ing. Industrial. y las Figura 3.2 y Figura 3.3.

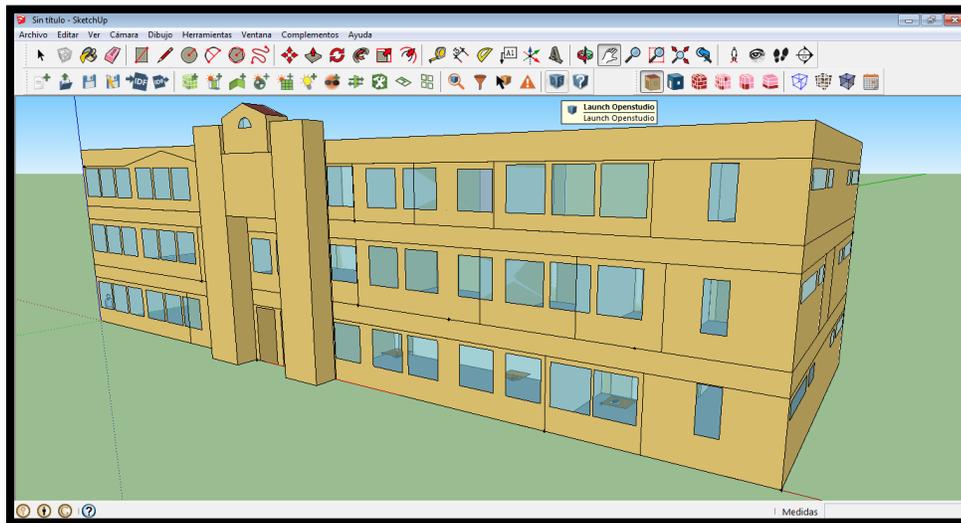


Figura 3.1 Modelo completo del Edificio de la Escuela de Ing. Industrial.

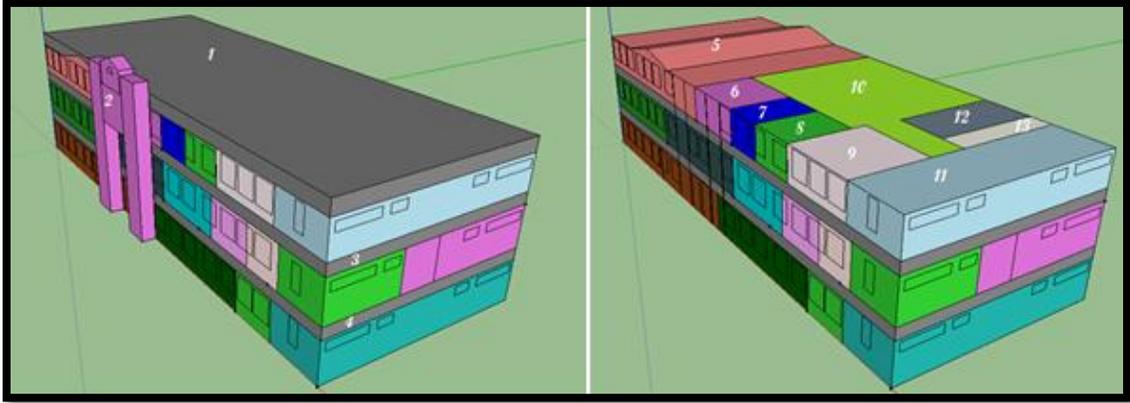


Figura 3.2 Espacios que contienen plenum , fachada y el tercer nivel del edificio.

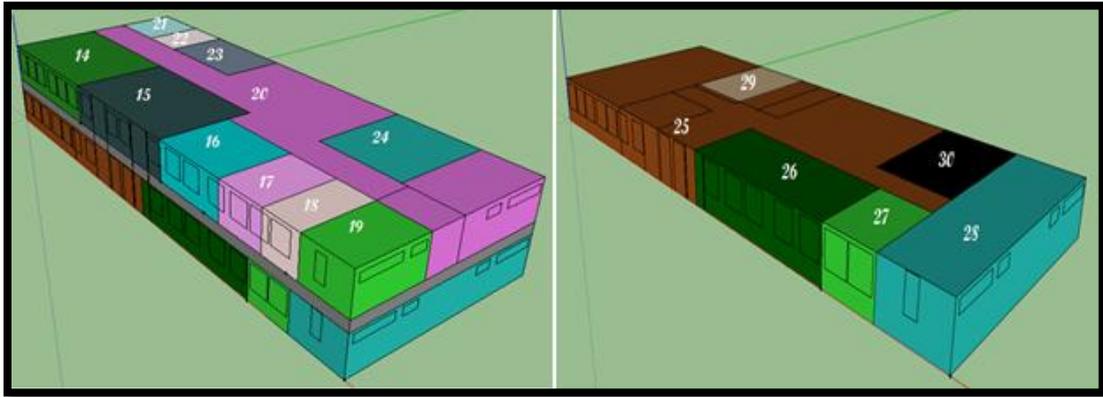


Figura 3.3 Espacios que contienen el segundo y primer nivel del edificio.

NIVEL DEL EDIFICIO	No	ESPACIO	ZONA TERMICA
CIELO 3	1	Empty Space Type	Thermal Zone 2
FACHADA	2	FACHADA	Thermal Zone 2
CIELO 2-3	3	Empty Space Type	Thermal Zone 2
CIELO 1-2	4	Empty Space Type	Thermal Zone 2
NIVEL 3	5	AREA DE DOCENTES INDUSTRIAL	Thermal Zone AREA DE CUBICULOS DOCENTES
	6	BODEGA INDUSTRIAL	Thermal Zone 2
	7	DIRECCION INSDUSTRIAL	Thermal Zone DIRECCION EII
	8	SECRETARIA INDUSTRIAL	Thermal Zone 2
	9	SALA DE REUNIONES	Thermal Zone SALA DE REUNIONES EII
	10	PASILLO 3er NIVEL	Thermal Zone 2
	11	AREA DE CONSULTAS	Thermal Zone 2
	12	CENTRO DE COMPUTO (BIBLOTECA)	Thermal Zone 2
	13	AREA DE CONSULTA SPICOLOGICA	Thermal Zone 2
NIVEL 2	14	AREA DE DOCENTES 2	Thermal Zone 2
	15	AREA DE DOCENTES 1	Thermal Zone 2
	16	SECRETARIA EISI	Thermal Zone 2
	17	DIRECCION EISI	Thermal Zone DIRECCION EISI
	18	SECRETARIA SUB-DIRECCION	Thermal Zone 2
	19	AREA DE DESARROLLO DE SOFTWARE 1	Thermal Zone 2
	20	PASILLO 2N 1	Thermal Zone 2
	21	AREA DE SERVICIO SOCIAL	Thermal Zone 2
	22	SALA DE SECCIONES 1	Thermal Zone 2
	23	LCOM4	Thermal Zone 2
NIVEL 1	24	AREA DE JEFATURAS EISI 1	Thermal Zone 2
	25	CARGA PASILLO 1N	Thermal Zone 2
	26	CARGA LCOM2	Thermal Zone 2
	27	CARGA CUARTO DE SERVIDORES	Thermal Zone 2
	28	CARGA LCOM 1	Thermal Zone LCOM1
	29	CARGA AREA DE CAPACITACIONES INDUSRIAL	Thermal Zone 2
	30	CARGA LCOM3	Thermal Zone 2

Tabla 3.1 Niveles, espacios y zonas termicas del edificio de Ing. Industrial.

En las siguientes secciones se describen :

- ILUMINACION
- EQUIPO ELECTRICO
- PERSONAL
- SISTEMAS HVAC

3.2 ILUMINACION

Dentro del sistema de iluminación del edificio de Ing. Industrial se encuentra solamente dos tipos de cargas

Planificación

En la Tabla 3.2 se describen cuáles son y los parámetros necesarios para su simulación. Dichos parámetros se obtienen de la Tabla 3.3, los parámetros dependen del tipo de montaje en la imagen se describe cada uno de ellos mostrado en la Figura 3.4 Tipos de montaje de luminarias. Figura 3.4

TIPO DE LUMINARIA	TIPO DE MONTAJE	LIGHTING POWER[W]	RETURN AIR FRACTION	FRACTION RADIANT	FRACTION VISIBLE
3X32[W]	RECESSED	96	0	0.37	0.18
2X40[40]	RECESSED	80	0	0.37	0.18

Tabla 3.2 Tipos de luminarias.

Field Name	Luminaire Configuration, Fluorescent Lighting				
	Suspended	Surface mount	Recessed	Luminous and louvered ceiling	Return-air ducted
Return Air Fraction	0.0	0.0	0.0	0.0	0.54
Fraction Radiant	0.42	0.72	0.37	0.37	0.18
Fraction Visible	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
$f_{convected}$	0.40	0.10	0.45	0.45	0.10

Tabla 3.3 Valores aproximados de fracción de retorno del aire, fracción radiante y fracción visible para la iluminación fluorescente con diversas configuraciones del alumbrado.

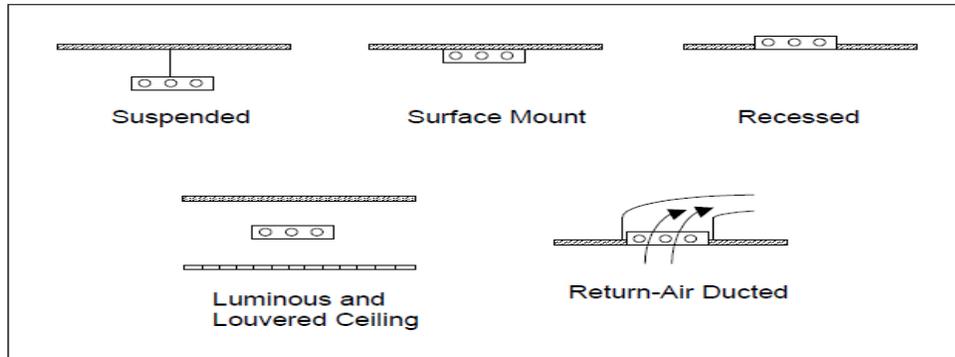


Figura 3.4 Tipos de montaje de luminarias.

3.3 EQUIPO ELECTRICO

El edificio de Ing. Industrial cuenta con distintos tipos de equipos eléctricos desde equipo de oficina, herramientas eléctricas, ventiladores de piso y equipos de cocina en otros es tos equipos y su nivel de diseño [W] para su simulación se detallan en la Tabla 3.5.

EQUIPO	DESIGN LEVEL [w]	FUENTE
CAFETERA 8L	950	Dato placa
DISPENSADOR DE AGUA	500	Dato placa
ESCANER EPSON V100 PHOTO	18	Dato placa
Esmeril 1 120V/3.1A	375	Dato placa
Esmeril 1 120V/4A	480	Dato placa
HORNO TOSTADO	100	Dato placa
IMPRESORA LASER	445	Dato placa
IMPRESORA MULTIFUNCIONAL	64	Dato placa
LAPTOP i3	25.5	Energy Star(http://www.eu-energystar.org/es/es_008.shtml)
MICRO ONDAS	1050	Dato placa

EQUIPO	DESIGN LEVEL [w]	FUENTE
MONITOR 14" CRT	55	Tabla 8-nonresidential cooling and heating load calculation procedures
MONITOR 17" LCD	35	Energy Star(http://www.eu-energystar.org/es/es_008.shtml)
PC i5	41	Energy Star(http://www.eu-energystar.org/es/es_008.shtml)
PC i7	65	Energy Star(http://www.eu-energystar.org/es/es_008.shtml)
PC pentium D	75	Tabla 8-nonresidential cooling and heating load calculation procedures
Proyector	218	Dato placa
Switch 3COM 2024	10	Dato placa
ROUTER	5	Dato placa
TALADRO 110v/6A	660	Dato placa
TALADRO 110v/8A	880	Dato placa
UPS pequeño	8	Energy Star(http://www.eu-energystar.org/es/es_008.shtml)
VENTILADOR DE PISO	40	Dato placa
MILLER THUNDEVOLT 225	10465	Dato placa(maximo)

3.5 Equipo eléctrico en el edificio de Ing. Industrial.

3.4 PERSONAL

El personal del edificio de Ing. Industrial varía mucho la cantidad según el espacio en el que se encuentre pero todas las personas tienen el mismo nivel de actividad física por esta razón solo se encuentra una sola declaración utiliza la cual es MediumOffice PeopDef 1, las variables necesarias para su simulación son auto generadas solo es necesario agregar al tipo de espacio e introducir el número de personas en ese espacio.

3.5 CARGAS ELECTRICAS Y TERMICAS POR CADA ESPACIO DECLARADO EN EL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL

En la Tabla 3.4 se muestra el total de cargas en todo el edificio estas están clasificadas según al espacio al que pertenecen el cual su ubicación dentro del edificio es detallado en las Figura 3.2 y Figura 3.3 y la Tabla 3.1.

ESPACIO	TIPO DE CARGA	DESCRIPCION	CANTIDAD
AREA DE CONSULTA SPICOLOGICA	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	4
	EQUIPO ELECTRICO	VENTILADOR DE PISO	3
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC PENTIUM D	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeñ	1
AREA DE CONSULTA	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	1
	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	33
AREA DE DESARROLLO DE SOFTWARE	LUMINARIA		
AREA DE DOCENTES 1	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	11
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	12
	EQUIPO ELECTRICO	CAFETERA 8l	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	13
	EQUIPO ELECTRICO	DISPENSADOR DE AGUA	1
	EQUIPO ELECTRICO	MICRO ONDAS 700w salida	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	8
	EQUIPO ELECTRICO	HORNO TOSTADOR	1
AREA DE DOCENTES 2	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	8
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	12
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	4
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	13
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	13
	EQUIPO ELECTRICO	UPS peñO	13
AREA DE DOCENTES INDUSTRIAL	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	29
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	20
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	26
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	26
	EQUIPO ELECTRICO	LAPTOP i3	1
	EQUIPO ELECTRICO	ROUTER	1
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	4
	EQUIPO ELECTRICO	DISPENSADOR DE AGUA	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	13
AREA DE JEFATURAS EISI	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	4
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	6
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	2
	EQUIPO ELECTRICO	PC i7	2
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	4
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	2
	EQUIPO ELECTRICO	ROUTER	1
	EQUIPO ELECTRICO	ESCANER EPSON V100	1
	EQUIPO ELECTRICO	DISPENSADOR DE AGUA	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	4
AREA DE SERVICIO SOCIAL	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	2
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	4
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	1
BODEGA INDUSTRIAL	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	2
AREA DE CAPACITACIONES INDUSTRIAL	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	9
	EQUIPO ELECTRICO	PROYECTOR	1
CUARTO DE SERVIDORES	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	2
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC PENTIUM D	1
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	4
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR CRT 14"	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	3

ESPACIO	TIPO DE CARGA	DESCRIPCION	CANTIDAD
PASILLO 1N	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	26
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	2
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	10
	EQUIPO ELECTRICO	ESMERIL 120V/3.1	1
	EQUIPO ELECTRICO	ESMERIL 120V/4	1
	EQUIPO ELECTRICO	MILLER THUNDERVOLT 225	1
	EQUIPO ELECTRICO	TALADRO 110V/8A	1
CENTRO DE COMPUTO(BIBLIOTECA)	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	4
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	2
DIRECCION EISI	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	2
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	1
DIRECCION INDUSTRIAL	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	4
	EQUIPO ELECTRICO	LAPTOP i3	1
	EQUIPO ELECTRICO	IMPRESORA MULTIFUNCIONAL	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	1
LCOM4	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	16
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	7
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	16
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	16
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	2
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	16
PASILLO 2N	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	12
PASILLO 3er NIVEL	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	8
SALA DE REUNIONES	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	6
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	6
	EQUIPO ELECTRICO	LAPTOP i3	3
	EQUIPO ELECTRICO	PROYECTOR	1
SALA DE SECCIONES	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	10
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	5
	EQUIPO ELECTRICO	PROYECTOR	1
SECRETARIA EISI	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	4
	EQUIPO ELECTRICO	IMPRESORA LASER	1
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	1
SECRETARIA INSDUSTRIAL	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	2
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	2
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	2
	EQUIPO ELECTRICO	VENTILADOR DE PISO	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	2
SECRETARIA SUB-DIRECCION	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	1
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	3
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	1
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	1
LCOM 1	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	28
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	12
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	27
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	27
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	27
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	27

ESPACIO	TIPO DE CARGA	DESCRIPCION	CANTIDAD
LCOM 2	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	27
	LUMINARIA	LUMINARIA 3X32	6
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	2
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	26
	EQUIPO ELECTRICO	PCD i5	26
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	26
LCOM 3	PERSONAL	MediumOfficePeopDef 1	21
	LUMINARIA	LUMINARIA 2X40	12
	EQUIPO ELECTRICO	MONITOR 17" LCD	20
	EQUIPO ELECTRICO	PC i5	20
	EQUIPO ELECTRICO	Switch 3com 2024	1
	EQUIPO ELECTRICO	UPS pequeño	20

Tabla 3.4 Cargas eléctricas y térmicas por cada espacio.

3.6 SISTEMAS HVAC

Dentro del edificio de Ing. Industrial actualmente se encuentran en funcionamiento 4 sistemas de A/C los cuales solo difieren de la capacidad de enfriamiento en BTU en la tabla muestra los datos necesarios para la simulación de los sistemas HVAC La capacidad de enfriamiento, el número de sistemas, nombre del sistema HVAC y la zona térmica a la cual pertenecen se muestra en la Tabla 3.6 .

MARCA/MODELO	YORK /mhc25b16
COP	2.46
eficiencia de motor	0.7
Flujo de aire Max [m3/s]	0.55

Tabla 3.5 Parámetros de simulación de los sistemas A/C.

ZONA TERMIMCA	Capacidad de enfriamiento (BTU)	TOTAL DE SISTEMAS SPLIT	HVAC Systemss
SALA DE REUNIONES EII	22300	1	Packaged Rooftop Air Contioner 3
DIRECCION EII	3300	1	Packaged Rooftop Air Contioner 2
AREA DE CUBICULOS INDUSTRIAL	33000	3	Packaged Rooftop Air Contioner 4
DIRECCION EISI	18000	1	Packaged Rooftop Air Contioner 1
LCOM1	22300	3	Packaged Rooftop Air Contioner

Tabla 3.6 Sistemas HVAC instalados en el edificio de Ing. Industrial.

Los diagramas esquemáticos de los sistemas HVAC se muestran en la Figura 3.6, además de los 5 sistemas A/C se tiene un sistema de flujo de aire que ventila todo el edificio a temperatura ambiente. El este sistema de ventilación vacío (Air loop HVAC 1) es para todos los espacios que no cuentan con sistema A/C.

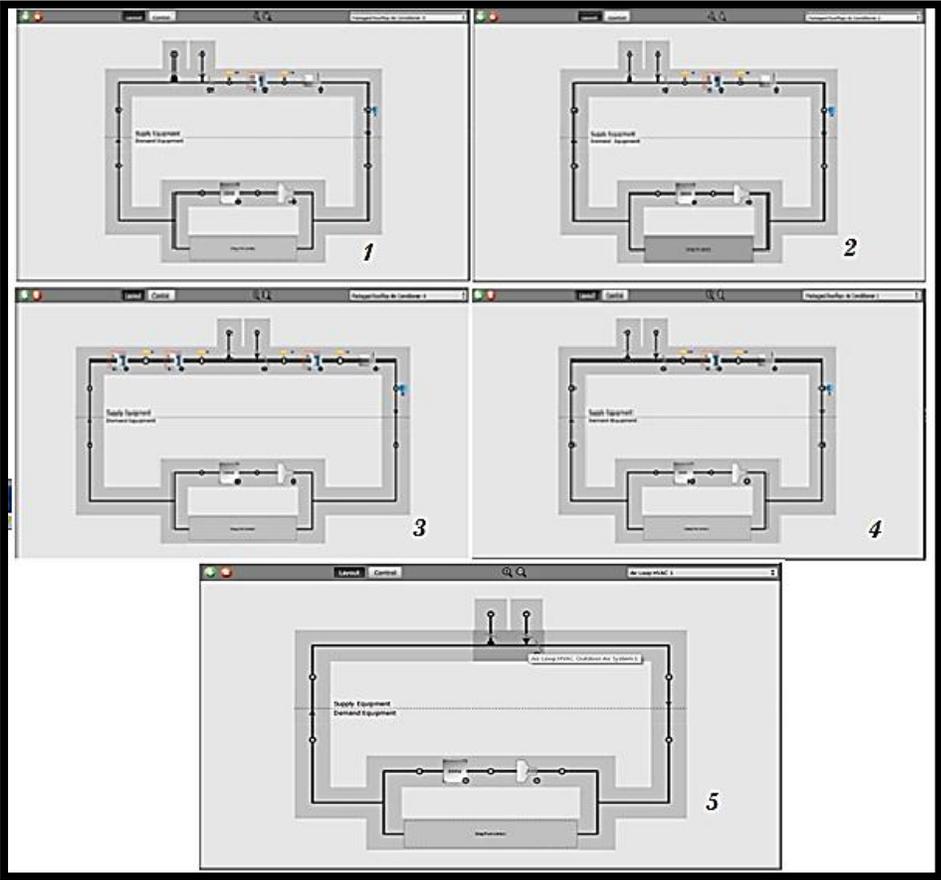


Figura 3.6 1-Packaged Rooftop Air Contioner 3, 2-Packaged Rooftop Air Contioner 2, 3- Packaged Rooftop Air Contioner 4, 4-Packaged Rooftop Air Contioner 1, 5-Packaged Rooftop Air Contioner.

3.7 RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados obtenidos de esta sección son obtenidos simulando el estado actual de operación de cada uno de los sistemas de iluminación, equipos eléctricos y sistemas HVAC detallados en la sección anterior. El consumo de sistema A/C es bajo comparado a los demás debido a que actualmente solo operan dos sistemas, el cual uno de ellos no opera con todo sus sistemas A/C. En la Tabla 3.7 se detalla cuales sistemas HVAC se encuentran en operación.

ZONA TERMIMCA	Capacidad de enfriamiento (BTU)	TOTAL DE SISTEMAS SPLIT	HVAC Systemss
AREA DE CUBICULOS INDUSTRIAL	33000	1	Packaged Rooftop Air Contioner 4
LCOM1	22300	3	Packaged Rooftop Air Contioner

Tabla 3.7 Sistemas A/C en funcionamiento

El consumo de energía eléctrica mensual para el modelo línea base se detalla en la tabla

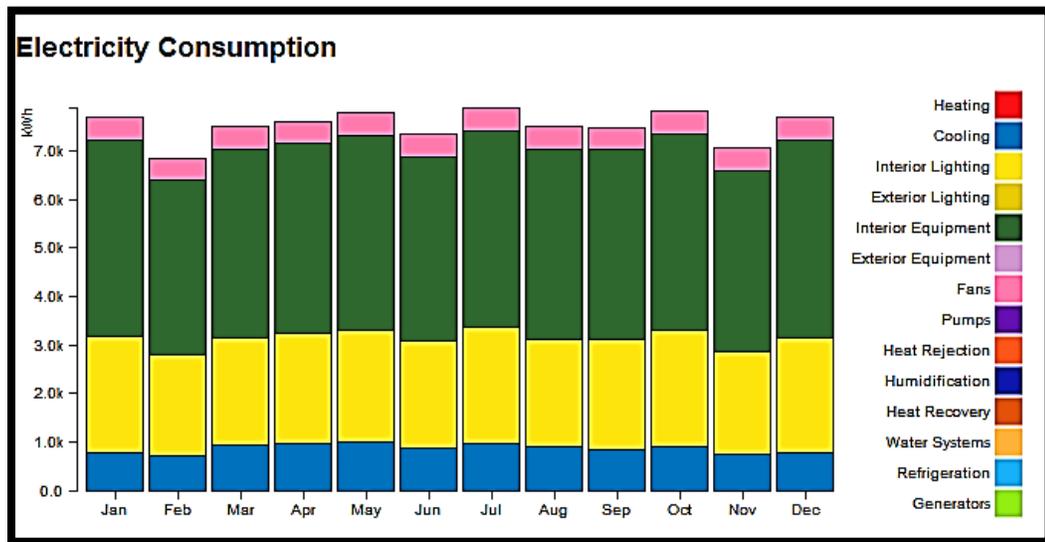


Figura 3.7 Grafico consumo mensual de energía simulado para el año 2014.

Electricity Consumption (kWh)													
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Cooling	810.375	753.106	971.208	1,011.90	1,057.07	925.386	1,002.83	962.353	879.211	935.697	776.958	801.153	10,887.25
Interior Lighting	2,672.41	2,326.21	2,456.16	2,547.82	2,573.23	2,439.15	2,666.68	2,455.53	2,543.40	2,672.41	2,344.39	2,659.59	30,356.95
Interior Equipment	3,430.03	3,045.72	3,297.03	3,301.50	3,369	3,228.11	3,428.11	3,290.33	3,306.03	3,430.03	3,162.58	3,435.94	39,724.42
Fans	520.678	470.036	517.972	505.464	537.392	484.758	520.678	522.178	503.689	520.678	503.25	520.189	6,126.96
Total	7,433.49	6,595.08	7,242.36	7,366.68	7,536.68	7,077.40	7,618.30	7,230.40	7,232.33	7,558.81	6,787.18	7,416.87	87,095.57

Tabla 3.8 Consumo mensual de energía para el año 2014.

De la Tabla 3.8 se puede resumir que el consumo de energía anual que contribuye cada sistema es mostrado en la Figura 3.8 de la cual se obtiene:

- El 46% del consumo anual es consumido por los equipos eléctricos, lo que es muy aceptable debido a la cantidad de equipos eléctricos que tiene el edificio.
- El 35% del consumo es contribuido por los sistemas de iluminación.
- El 19% del consumo anual es consumido en sistemas A/C que lo constituyen la energía en enfriamiento y ventiladores que posee cada sistema.

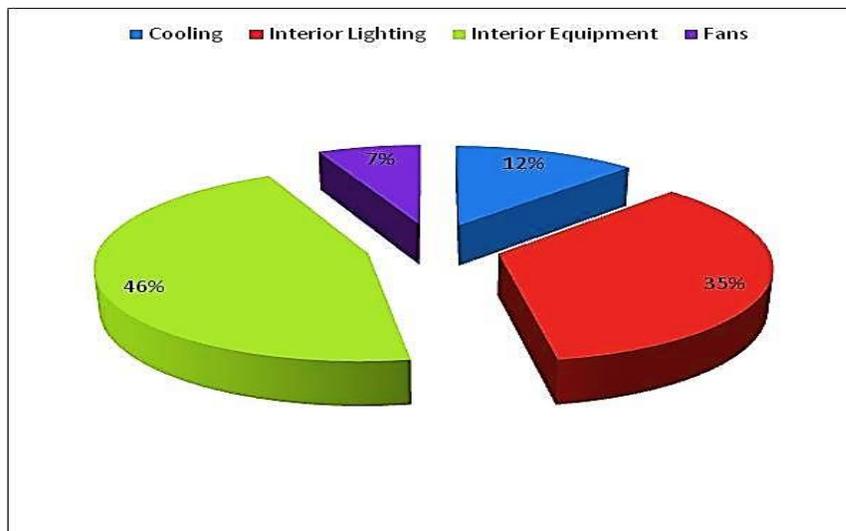


Figura 3.8 Porcentaje de consumo anual por sistema eléctrico.

3.8 VALIDACION DE RESULTADOS.

Los resultados de la sección 3.7 deben ser comparados con datos reales del consumo de energía real para poder demostrar que los resultados obtenidos por la simulación son aproximados a la operación real y poder decir que los datos de operación son el modelo línea base.

Debido a que no se cuenta con facturaciones y mediciones de meses y años anteriores debido a que la energía eléctrica consumida por este edificio no es efectuada directamente (contribuye a la facturación de la acometida del COMPLEJO DEPORTIVO UES).

Se efectuó la medición del perfil de demanda por medio del medidor PCE-PA 8000 del cual se obtuvo la gráfica de potencia vs tiempo mostrada en la Figura 3.9 para poder calcular la energía en los horarios tarifarios. Los datos se tomaron durante el mes de mayo 2014 por lo cual serán comparados con los datos simulados del mes correspondiente.

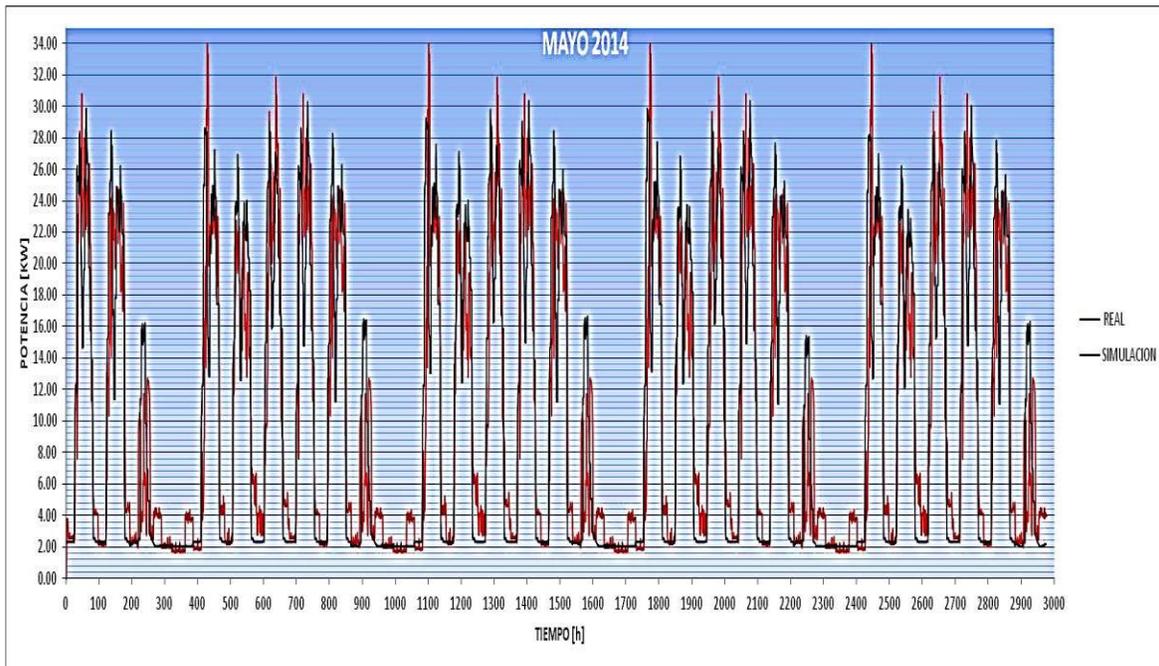


Figura 3.9 Perfil de demanda Energética Mayo 2014.

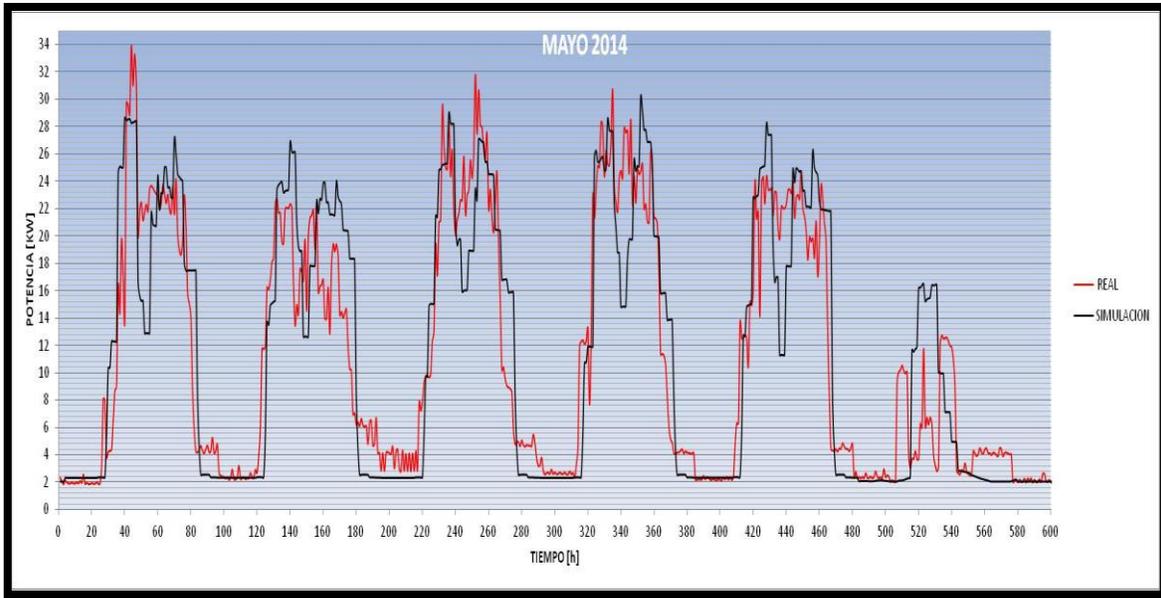


Figura 3.10 Perfil de Demanda para una semana.

De la Figura 3.9 se puede observar que los perfiles de demandas para todo es mes de mayo 2014 son parecidos pero es necesario comprobar que el error dentro de cada horario tarifario para poder validar los datos de simulación y decir que el modelo simulado es el modelo línea base, en la Figura 3.10 se puede apreciar el perfil de demanda para una semana para una mejor apreciación. En la Tabla 3.9 Error de energía por horario tarifario. Se puede observar el error entre la energía simulada y real consumida durante el mes de mayo de 2014, el error total es de %1 lo que indica que el modelo es aceptable⁵.

MAYO 2014	PUNTA [kWh]	RESTO [kWh]	VALLE [kWh]	TOTAL [kWh]
DEMANDA REAL	1405.58	5805.2315	400.268	7611.08
DEMANDA SIMULADA	1201.206253	5914.232401	421.2471911	7536.685845
%ERROR	14.5	1.8	5.2	1.0

Tabla 3.9 Error de energía por horario tarifario.

$$^5 e = \frac{\text{Simulación} - \text{Real}}{\text{Real}} \cdot 100\%$$

Debido a que el error total es de 1% Tabla 3.9 y el perfil de la Figura 3.9 es parecido al comportamiento real del edificio se puede tomar como modelo línea base el comportamiento de simulación del edificio de Ing. Industrial UES⁶.

3.9 Aplicación del pliego tarifario para análisis económico.

Como se comprobó que el modelo de simulación es el modelo línea base en la sección anterior, es posible hacer un análisis económico para tener una aproximación a la contribución de energía facturada. Para poder hacer un cálculo económico es necesario aplicar el pliego tarifario vigente el cual se muestra en la Figura 3.11 y es aplicado en la Tabla 3.10 se puede observar que el total de la contribución de energía facturada es aproximado a USD\$17,667.77. Debido a que la energía consumida por el edificio de energía solo contribuye a la facturación total de la facultad de Ing. Y Arq. De la UES no es necesario aplicar cargos por potencia pico y cargos por distribución.

III. GRANDES DEMANDAS (>50 kW)									
BAJA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
	CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO	
Cargo de Comercialización:									
Atención al Cliente	US\$/Usuario-m	12.974283	14.561436	12.340965	13.989288	13.938035	17.666082	3.299270	6.630030
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.193389	0.198821	0.195187	0.197198	0.199698	0.205871	0.151426	0.198906
Energía en Resto	US\$/kWh	0.197325	0.199966	0.199895	0.201349	0.205150	0.207186	0.157099	0.202292
Energía en Valle	US\$/kWh	0.184980	0.198170	0.191896	0.194753	0.199307	0.202612	0.143305	0.188018
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	13.164120	21.411636	21.637792	27.086359	26.645839	36.086870	8.306436	19.659880

Figura 3.11 Pliego tarifario vigente desde 15 julio 2014⁷.

⁶ En la Figura 3.10 se puede apreciar que los perfiles tienen mucha diferencia y esto es debido según la apreciación personal del autor, que los datos de los perfiles de horarios no son los correctos según entrevistas con el personal del edificio.

⁷ Fuente SIGET

MES	ENERGIA VALLE [KWh]	COSTO VALLE [\$]	ENERGIA PUNTA [KWh]	COSTO PUNTA [\$]	ENERGIA RESTO [KWh]	COSTO RESTO [\$]	TOTAL ENERGIA [KWh]	TOTAL MENSUAL [\$]
ENERO	427.438464	79.0675672	1219.71692	235.879836	5786.48535	1141.81822	7433.641	1456.7656
FEBRERO	385.274398	71.2680582	1077.08228	208.295865	5140.82022	1014.41235	6603.177	1293.9763
MARZO	421.660126	77.9986901	1159.11592	224.160269	5661.5859	1117.17244	7242.362	1419.3314
ABRIL	407.964731	75.465316	1185.28557	229.221191	5773.43529	1139.24312	7366.686	1443.9296
MAYO	421.247191	77.9223054	1201.20625	232.300076	5914.2324	1167.02591	7536.686	1477.2483
JUNIO	409.397853	75.7304148	1148.40399	222.0887	5519.6118	1089.1574	7077.414	1386.9765
JULIO	425.964929	78.7949926	1227.41827	237.369191	5964.90963	1177.02579	7618.293	1493.19
AGOSTO	423.865715	78.40668	1168.73982	226.021426	5637.79693	1112.47828	7230.402	1416.9064
SEPTIEMBRE	410.184833	75.8759905	1180.63992	228.322774	5727.34874	1130.14909	7318.173	1434.3479
OCTUBRE	424.558524	78.5348357	1228.00378	237.482424	5906.23477	1165.44778	7558.797	1481.465
NOVIEMBRE	409.713353	75.788776	1099.17296	212.56796	5278.29121	1041.53881	6787.178	1329.8955
DICIEMBRE	426.469416	78.8883126	1218.9038	235.722587	5771.49851	1138.86094	7416.872	1453.4718
TOTAL	4993.73953	923.741939	14113.6895	2729.4323	68082.2507	13434.3301	87189.68	17087.504

Tabla 3.10 Consumo de energía eléctrica y contribución a la facturación mensual proyectado para el año 2014

En la Tabla 3.11 muestra el total de área efectiva del edificio de Ing. Industrial.

	Area [m2]
Total Building Area	834.23
Net Conditioned Building Area	834.23
Unconditioned Building Area	0

Tabla 3.11 Total de área efectiva del edificio de Ing. Industrial.

3.10 CLASIFICACION DEL EDIFICIO DE ING. INDUSTRIAL POR EL INDICADOR DE CO₂/m²

En un edificio, la eficiencia energética se calcula midiendo la energía consumida todos los años en condiciones normales de uso y ocupación. Para ello se tienen en cuenta todos los servicios utilizados de manera habitual es decir el modelo linea base del edificio. En concreto, el indicador recoge los kilogramos de CO₂ divididos por los metros cuadrados del edificio (kg CO₂/m² al año). La escla de calificación es mostrada en la figura donde la letra A significa mas eficiente.

Con los resultados de la tabla Tabla 3.8 es posible calcular la cantidad de CO₂ por kWh (0.5925⁸ kg de CO₂ por kWh) además se conoce el total de area fectiva en la Tabla 3.11 , con estos datos se calcula el indicador KgCo₂/m².

El resultado de la Figura 3.12 se puede observar que la calificación total del edificio es una letra F que es el punto muy bajo escala, lo que significa que el edificio de Ing. Industrial de la UES no es eficiente.

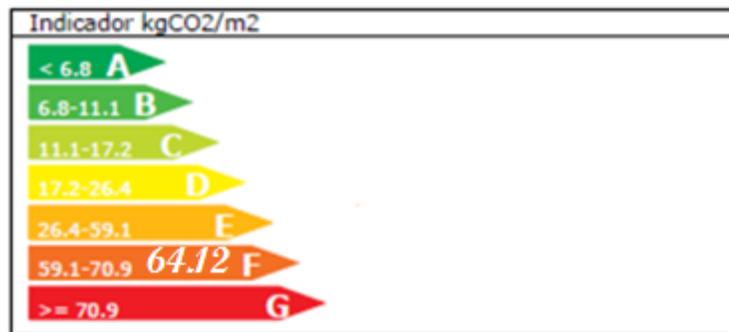


Figura 3.12 Clasificación según relación de emisión de co₂ por metro cuadrado del Edificio de Ing. Industrial

⁸ Fuente: EPA eGrid **Tablas Resumen** y **archivos de datos** <http://www.epa.gov/>

4. CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE ENERGIA TRIFASICA PROTOTIPO.

Para poder construir un medidor de energía trifásica es necesaria una mejor comprensión de los dispositivos que serán parte del medidor y su funcionamiento por esta razón este capítulo se divide en:

- Descripción de componentes del Hardware.
- Circuito implementado y funcionamiento del IC ade7758.
- El shield ade7758 prototipo para PCDUINO v1.
- Almacenamiento de datos.

La Figura 4.1 de bloques muestra la configuración del sistema en una forma general.

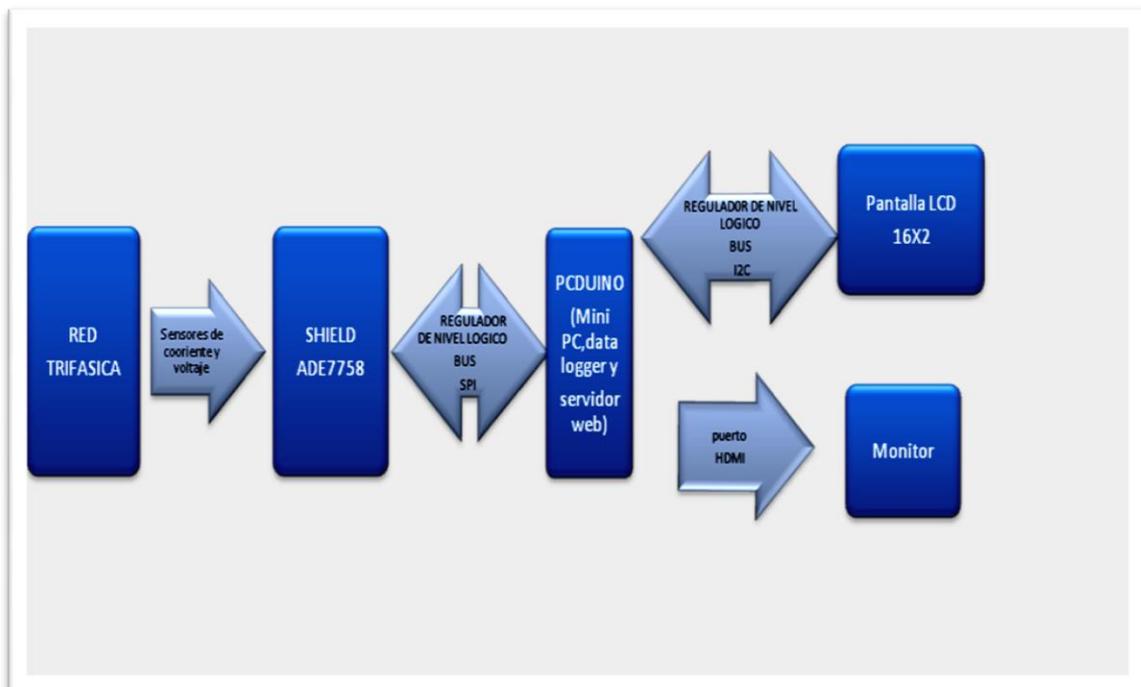


Figura 4.1 Diagrama de bloques del medidor prototipo.

4.1 DESCRIPCION DE COMPONESTES DEL HARDWARE.

Para poder entender el funcionamiento del medidor prototipo es necesario conocer el funcionamiento, la capacidad

4.1.1 PCDUINO.

Es una Mini plataforma PC que funciona como PC OS como Ubuntu y Android ICS[9]. Hace salir su pantalla para HDMI TV habilitado o monitor a través de la incorporada en la interfaz HDMI. Está especialmente dirigido para el rápido crecimiento de las demandas de la comunidad de código abierto. La plataforma podría ejecutar PC en toda regla como OS fácil de usar con la cadena de herramientas y compatible con el popular ecosistema Arduino como Arduino Shields (puede necesitar un escudo puente) y proyectos de código abierto, etc. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se muestran las especificaciones de hardware y software.

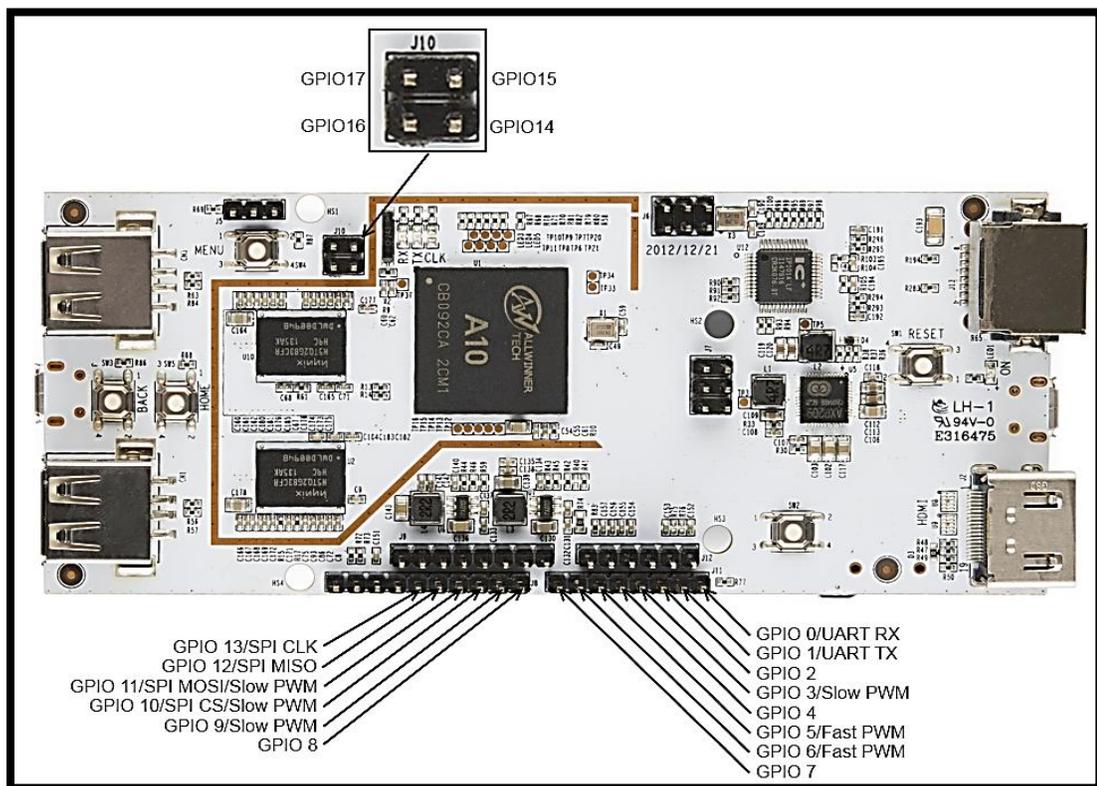


Figura 4.2 Pinout del pcdduino V1[10].

Artículos	Detalles
UPC	1GHz ARM Cortex A8
GPU	OpenGL ES2.0, OpenVG 1.1 Mali 400 core
DRAM	1GB
A bordo de almacenamiento	2GB Flash, tarjeta microSD (TF) ranura para hasta 32GB
Salida de vídeo	HDMI
OS	Linux3.0 + Ubuntu 12.04 Android ICS 4.0
Interfaz de Extensión	2.54 mm Headers
Interfaz de red	10/100 Mbps RJ45 y extensión WiFi USB (no incluido)
Potencia	5V, 2000mA
Tamaño general	125mm X 52mm

Tabla 4.1 Especificaciones de hardware del PCDUINO[10].

Artículos	Descripción
OS	Ubuntu 12.04
	ICS Android 4.0
Idioma	Inglés
API	Todos los pines de malla de Arduino son accesibles con la API proporcionada
	Se compone de API para acceder a las siguientes interfaces:
	UART
	ADC
	PWM
	GPIO
	I2C
SPI	
Apoyo Lenguaje de programación	C, C + + con la cadena de herramientas GNU
	Java con el estándar SDK de Android
	Pitón

Tabla 4.2 Especificaciones de software del PCDUINO[10].

4.1.2 **El IC ADE7758**

Características. Según las especificaciones suministradas por el fabricante este circuito ofrece como principales características:

- Alta precisión, soportando las normas **IEC4 60687, IEC 61036, IEC 61268, IEC 62053-21, IEC 62053-22, e IEC 62053-23.**
- Compatibilidad con las conexiones trifásicas y, delta, 3hilos y 4 hilos.
- Menos del 0,1% de error en la medición de energía activa en un rango dinámico de 1000 a 1
- Adquiere y calcula energía activa, reactiva y aparente, voltaje y corriente rms, además de permitir obtención de la forma de onda de las señales involucradas.
- Salidas pulsantes de frecuencia programable (2 en total), separadas para totalización de la energía activa, reactiva y aparente.
- Capacidad de detección de caídas de tensión, sobretensión, suspensión de servicio, frecuencia de línea e inclusive error en la secuencia de fases conectadas.
- Posee convertidores analógicos digitales de ganancia programable que permiten la conexión de por ejemplo, un shunt para medición de corriente directamente sin necesidad de alguna interfaz analógica adicional.
- Permite acceso a sus registros mediante comunicación SPI.

El ADE7758 abarca dos etapas: la de conversión analógico/digital y la de procesamiento de datos y cálculo de variables. Esto es posible ya que el ADE7758 incorpora una circuitería aritmética, programable y consultable a través de la interfaz SPI.

En la siguiente Figura 4.3 Diagrama de bloques del ADE7758. Se muestra el diagrama de bloques funcional del ADE7758 del cual se extrae la siguiente información:

- Tanto la entrada de corriente como la de voltaje son Diferenciales.

- Los convertidores analógicos digitales son de ganancia programable.
- Las salidas pulsantes son el resultado de la suma de potencias activas y reactivas de las tres fases, siendo éstas las únicas salidas que totalizan de manera trifásica.

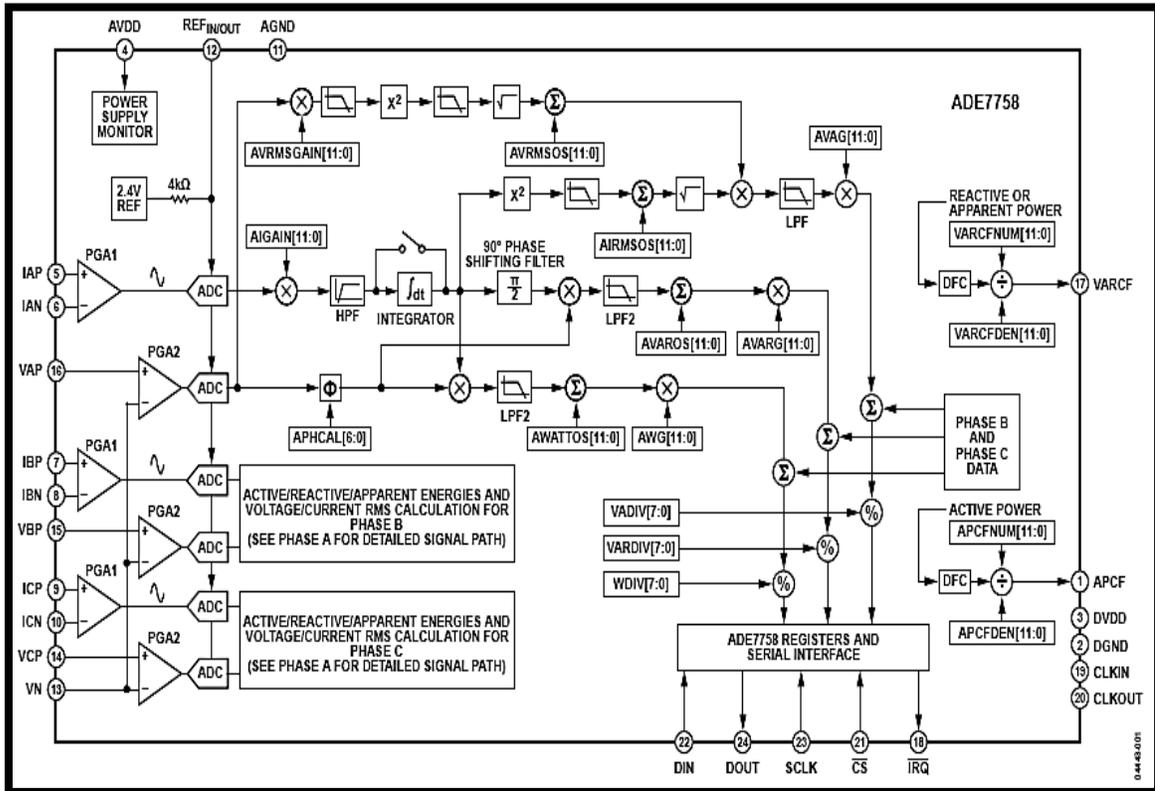


Figura 4.3 Diagrama de bloques del ADE7758[11].

Descripción de las funciones de los pines

En la Figura 4.4 Configuración de pines del ADE7758 . Se muestra la configuración física del IC ADE 7758, en la Tabla 4.3 se muestra la descripción de cada uno de ellos.

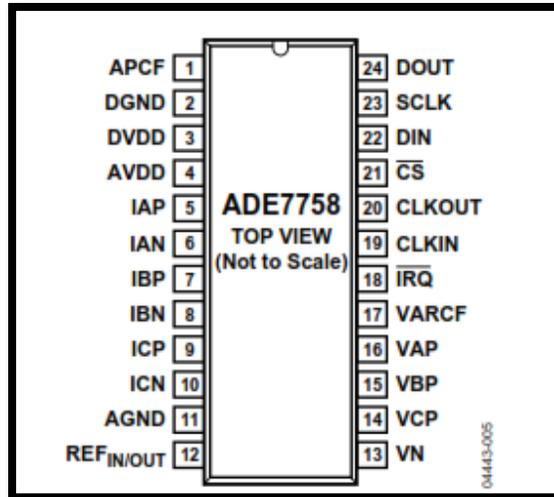


Figura 4.4 Configuración de pines del ADE7758 [11].

PIN	NEMONICO	DESCRIPCION
1	APCF	Frecuencia de calibración de potencia activa (APCF) Salida lógica. Ofrece información de la potencia activa. Esta salida se utiliza para fines operativos y de calibración. La frecuencia de salida a escala completa se puede escalar por escrito a los registros APCFNUM y APCFDEN (ver la sección de salida Frecuencia Potencia Activa).
2	DGND	Esta es la referencia a tierra para los circuitos digitales (porejemplo multiplicadores, filtros y convertidores digital-a-frecuencia).
3	DVDD	Fuente de alimentación digital. La alimentación debe ser $5V \pm 5\%$. Este pin deberá ser desacoplado de DGND con un capacitor de 10uF en paralelo con un capacitor cerámico de 100 nF.
4	AVDD	Fuente de alimentación análoga. La alimentación debe ser $5V \pm 5\%$. Este pin deberá ser desacoplado de AGND de la misma manera que DVDD.
5,6 7,8 9,10	IAP,IAN; IBP,IBN; ICP,ICN	Entradas análogas para canales de corriente. Este canal se utiliza en conjunto con su transductor de corriente. Estas entradas son diferenciales con un máximo de $\pm 0.5V$, $\pm 0.25V$, y $\pm 0.125V$, dependiendo de la selección del registro de ganancia PGA.
11	AGND	Esta es la referencia a tierra análoga. Usada para ADC's, sensor de temperatura, y referencia; y debería ser utilizado para todos los circuitos análogos como filtros anti-aliasing y transductores de voltaje y corriente.
12	REFIN/OUT	Este pin provee el acceso a la referencia de voltaje del IC, que tiene un valor de $2.4V \pm 8\%$. Una referencia externa puede ser conectada en este pin. Este pin debería ser desacoplado de AGND con un capacitor cerámico de 1 uF.
13,14 15,16	VN,VCP;VBP,V AP	Entradas análogas para el canal de voltaje. Este canal se utiliza en conjunto con su etapa de atenuación. Estas entradas son tienen un nivel máximo de $\pm 0.5V$, $\pm 0.25V$, y $\pm 0.125V$, dependiendo de la selección de ganancia PGA.
17	VARCF	Salida lógica potencia reactiva de calibración de frecuencia. Le da potencia reactiva o información de potencia aparente en función del ajuste del bit VACF del registro WAVMODE. Esta salida se utiliza para fines operativos y de calibración. Frecuencia de salida a escala completa se puede escalar por escrito al VARCFNUM y VARCFDEN registros (ver la sección de salida Frecuencia Potencia Reactiva).circuitaría digital en una condición de reset.
18	/IRQ	Salida de petición de interrupción. Este es un pin activo bajo, de salida lógica de drenaje abierto.
19	CLKIN	Master Clock para ADCs y procesamiento digital de señales. Se puede utilizar un reloj externo con sus respectivos capacitores, o un resonador. La frecuencia debe ser de 10MHz. Los capacitores deben ser de 22pF a 33pF según los requerimientos del cristal.
20	CLKOUT	Esta salida puede ser utilizada por otros dispositivos, y contiene la señal del oscilador.
21	/CS	Chip Select. Es parte de la interfase serial. Este pin activo bajo permite al ADE7754 compartir el bus serial con otros dispositivos.
22	DIN	Data Input para la interfase serial. Es la entrada de datos.
23	SCLK	Serial Clock Input para la interfase serial síncrona. Toda la transferencia de datos serie son sincronizadas a este reloj.
24	DOUT	Data Output para la interfase serial. Esta es la salida de datos.

Tabla 4.3 Descripción de las funciones de los pines del IC ADE7754[12].

4.1.3 Logic level converter.

El convertidor de nivel (Figura 4.5) lógico SparkFun es un pequeño dispositivo que los pasos de forma segura por las señales de 5V a 3.3V y pasos hasta 3.3V a 5V[13]. Este convertidor de nivel también trabaja con dispositivos de 2.8V y 1.8V. Cada convertidor de nivel tiene la capacidad de convertir 4 pines en la parte alta de 4 pines en la parte baja. Dos entradas y dos salidas se proporcionan para cada lado.

Se puede utilizar con serie normal, I2C, SPI, y cualquier otra señal digital. No funciona con una señal analógica.

El convertidor de nivel es muy fácil de usar. La junta tiene que ser alimentado de las dos fuentes voltajes (alta tensión y baja tensión) que su sistema está utilizando. De alta tensión (por ejemplo 5V) para el pasador 'HV', de bajo voltaje (2.8V por ejemplo) a 'LV', y tierra del sistema para el pasador 'GND'.

Los clavos se etiquetan como las entradas y salidas. Estos son en relación con la junta directiva. Uno digital de entrar en el pin RXI en el lado de 5V se mostrará en el pasador RXO en el lado 3.3V como 3.3V. Uno digital de entrar en el pin TXI en el lado de 3.3 V se mostrará en el pasador TXO en el lado de 5V como 5V.

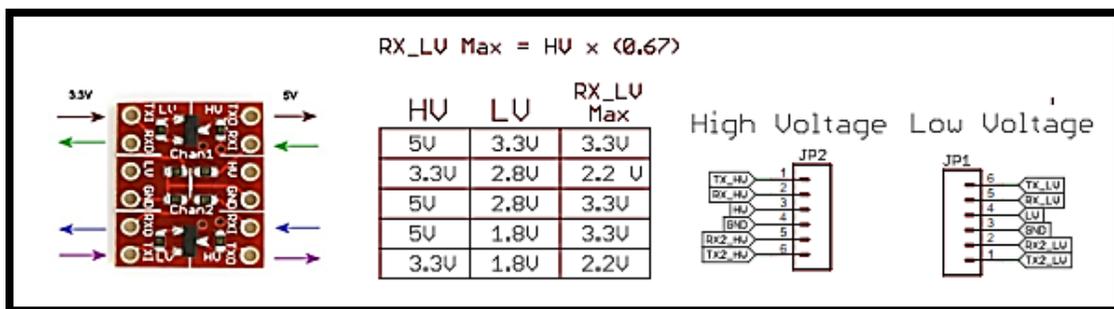


Figura 4.5 Regulador de niveles lógicos utilizado izq. Configuración de pines y tabla de valores[14].

4.1.4 Pantalla LCD 16X4.

LCD (Figura 4.6) de serie incluye el módulo LCD estándar y el controlador de serie para proporcionar una interfaz serial de comunicación para su microcontrolador o PC. El controlador de serie se encarga de todos los comandos entre el LCD y el microcontrolador y utiliza sólo dos líneas de comunicaciones.

La estructura de mando simple permite que el texto y los gráficos de barras que se muestran en la pantalla.



Figura 4.6 Pantalla LCD 16X2 caracteres.

Modulo LCD (I2C / Interface Serial).

El módulo I2C y display de serie proporciona un fácil manejo de una pantalla LCD de caracteres estándar. La estructura simple comando permite que el texto que se mostrará en la pantalla. Se ha previsto hasta 8 caracteres definidos por el usuario. El módulo incluye puerto también 8 bits digital para conectar el 4x4 teclado matricial u 8 botones separados y puerto IR del mando a distancia (Figura 4.7).

La luz de fondo y contraste LDC pueden ajustar bajo el control del programa para compensar diferentes condiciones de iluminación y ángulos de visión.

El módulo es compatible con 2 interfaces:

- Interfaz esclavo I2C.
- Interfaz TTL de serie.

El módulo tiene las siguientes características:

- Comunicarse a través de I2C o interfaz TTL de serie 48 búfer de bytes para los mensajes recibidos a través de la interfaz de comunicación.
- Hasta 8 caracteres personalizados se pueden definir Retroiluminación LCD controlada vía software, cuenta con 254 niveles de brillo contraste LCD controlada vía software.
- Cuenta con 254 niveles de contraste.
- 8 bits de puerto digital para conectar la matriz del teclado hasta 16 teclas (4 filas por 4 columnas) o 8 botones separados.

Puerto IR del mando a distancia 3

Conexión del módulo.

El módulo dispone de 4 conectores: LCD, interfaz I2C/Seria, conector de teclado y control remoto IR conector de control ver Tabla 4.4.

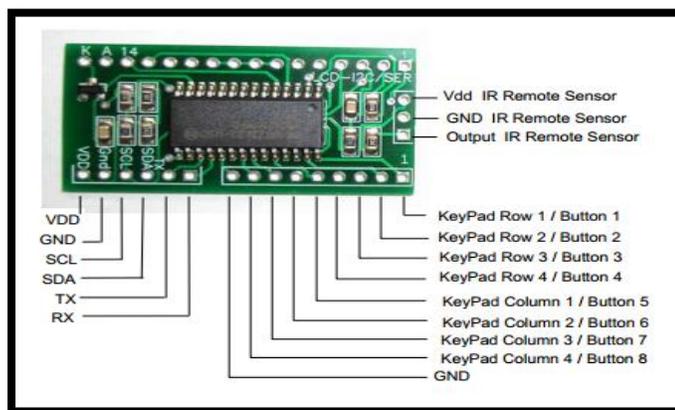


Figura 4.7 Descripción de pines del módulo LCD (I2C/SERIAL)[15].

Pin No.	Pin Name	Description
1	RX	RX – LCD controller serial receive line
2	TX	TX – LCD controller serial transmit line
3	SDA	I2C SDA signal
4	SCL	I2C SCL signal
5	GND	Ground connection
6	VDD	Supply voltage

Tabla 4.4 I2C/Serial conexión de la interface del módulo LCD(I2C/SERIAL)[15].

4.2 CIRCUITO IMPLEMENTADO Y FUNCIONAMIENTO DEL IC ADE7758

En este apartado se mostrara el funcionamiento del circuito implementado el cual se muestra en la Figura 4.8; además de la descripción de los registros del IC ADE7758 y su protocolo de comunicación para poder entender como leer y escribir en sus registros.

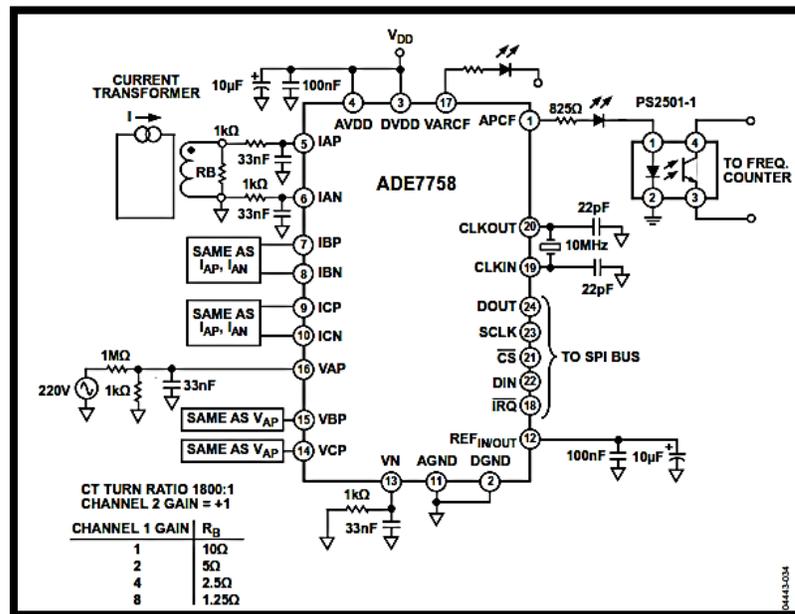


Figura 4.8 Circuito implementado [11].

4.2.1 **Medición de tensión.**

Para esta medición se debe hacer un arreglo de los filtros descritos anteriormente como entrada de la señal trifásica de voltaje, para la disminución del voltaje de entrada, ya que este es muy elevado, y podría dañar el integrado de medida.

4.2.2 **Etapas de atenuación y acondicionamiento de tensión.**

En la hoja de datos del ADE7758 se indica que el canal de voltaje, al igual que el de corriente, posee un rango de entrada de conversión lineal desde -500mV hasta 500mV, en una entrada diferencial respecto del neutro común y con protección a descargas electrostáticas (ESD protection)[12]. Esta entrada de conversión de voltaje soporta hasta 6V de manera prolongada sin producirse daño alguno, por lo que haciendo una división sencilla se obtiene que el ADE7758 sea capaz de soportar sobretensiones doce veces mayores que la tensión nominal. Esta holgura entre el nivel de tensión correspondiente al mayor valor de conversión y el nivel máximo de voltaje que soporta la entrada de conversión permite diseñar una red atenuadora basada en resistencias y elementos de protección, sin necesidad de aislar eléctricamente con un transformador de tensión que pudiese presentar desventajas importantes como: incremento considerable del costo e introducción de un error de desfase entre la corriente y la tensión.

La hoja de datos del ADE7758 propone precisamente una red atenuadora y de acondicionamiento de señales basada solo en elementos pasivos como resistencias y condensadores, los valores de los elementos se deben a su función de filtro de primer orden antialiasing cuya respuesta en frecuencia se muestra a continuación, ofreciendo una atenuación cercana a -40db a 833Khz siendo ésta la frecuencia de muestreo del convertidor Además de este filtro RC(respuesta en frecuencia ver Figura 4.10), a la entrada del convertidor se encuentra un filtro pasa bajo integrado dentro del ADE7758 para el canal de tensión que limita el ancho de banda a solo 260Hz. Eso significa que por más esfuerzos que se hagan para una entrada de armónicos¹⁴ de alta frecuencia, el ADE7758 propiamente limita el ancho de banda hasta el 4to armónico en los canales de tensión.

La mayor protección de los circuitos digitales a las fluctuaciones de la línea conectadas eléctricamente al ADE7758 se encuentra en el convertidor ADC del integrado, que posee separadas eléctricamente la circuitería de conversión analógica de la circuitería de comunicación y procesamiento digital; por esta razón el chip presenta dos entradas de alimentación y dos tierras, aislando al resto de los circuitos digitales de control y comunicaciones, de la línea.

Por tanto se utilizó el divisor de tensión descrito en la data del ADE7758. Que consta de una resistencia de $1\text{M}\Omega$ en serie con una resistencia de $1\text{k}\Omega$ y condensador de 33nF ver Figura 4.9.

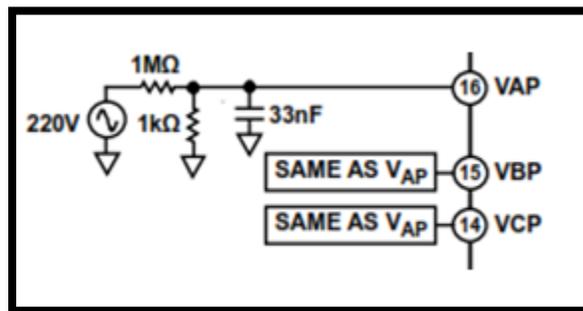


Figura 4.9 Atenuación de la señal de voltaje en la entrada del ADE7758 [11].

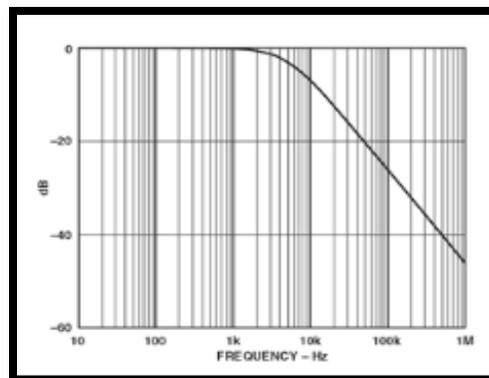


Figura 4.10 Respuesta en Frecuencia de filtro RC [11].

Mientras de mayor calidad y rango dinámico sean los componentes de esta etapa, más exacto y preciso será el prototipo. Para efectos de este proyecto y minimización de costos, se utilizaron resistencias de tolerancias de 5% como máximo, siendo éstas las más fáciles de encontrar.

4.2.3 Medición de corriente.

La medición de corriente realiza por medio del sensor seleccionado el cual es un Split Core Current Transformer ECS1030-L72 a continuación se muestra las especificaciones de fabricante en la Figura 4.11 y Tabla 4.5.

Electrical Specifications	
Rated Primary Current(Amp.) 50/60Hz	30nom(1~60A max)
Turnn ratio	Np:Ns=1:2000
Current Ratio	30A/15mA
D.C.Resistance at 20 °C	250 Ω
Accuracy @RL ≤ 10Ω	2%
Linearity @RL ≤ 10Ω	0.5%
Phase error at rated current range	≅ 4°
Operating Temperature Range	-40~65 °C
Storage Temperature Range	-45~85 °C
Dielectric Withstanding Voltage(Hi-pot)	2.5KV/1mA/1min
Insulation Resistance	DC500V/100MΩ min
Mechanical Specifications	
CUP	PBT
Opening Dimensions	>10mm
Output type	UL1015 22AWG PVC WIRE(doubling wire)
Approx.Weight	60g

Tabla 4.5 Especificaciones tecnicas del sensor de corriente Split Core Current Transformer ECS1030-L72 [16].

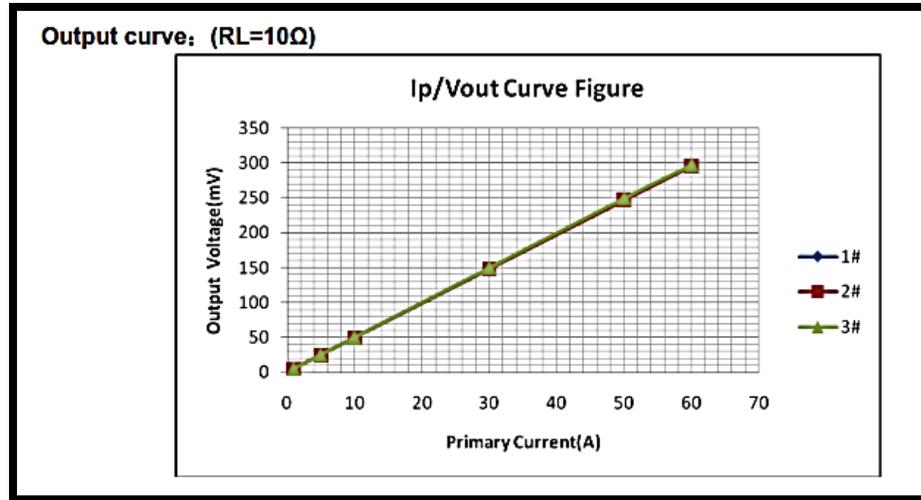


Figura 4.11 Relación entrada salida del sensor de corriente[16].

Etapa de Atenuación y Acondicionamiento de Corriente.

Se establece como rango nominal del prototipo de 0 a 30 Ampere aunque se vea limitado por la capacidad de corriente de los conductores y uniones utilizadas para el canal de corriente (en caso de hacer una medición directa).

Los canales de corriente tienen las mismas características que los canales de tensión en cuanto a los convertidores analógicos digitales. Las diferencias se presentan en el hecho de poseer tres entradas diferenciales sin tener un neutro "común" entre las tres fases, las mismas son puramente bipolares. Al igual que los canales de tensión, requieren de un filtro antialiasing de primer orden conformado por un condensador de 33uf y una resistencia de 1K mostrado en la Figura 4.12.

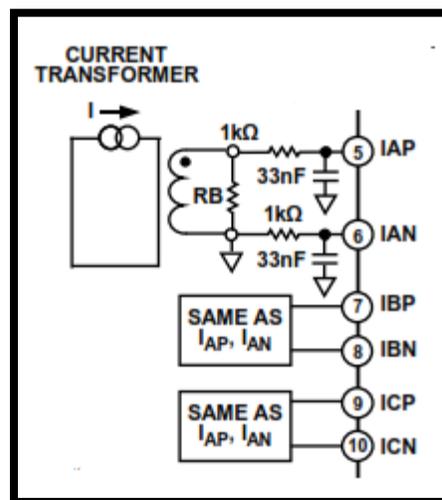


Figura 4.12 Atenuación de la señal de corriente en la entrada del ADE7758[11].

4.2.4 Protocolo de comunicación del ade7758.

El **IC ADE7758** se comunica con el microcontrolador por medio de la interfaz serial **SPI** (Serial peripheral interface) la cual consta de cuatro señales que son:

SCLK : Es la entrada de reloj para la transmisión serial. Permite la utilización de los pulsos ascendente y descendente de la señal reloj.

DIN : Es la entrada lógica al integrado; los datos entran al **ADE7758** en el flanco descendente de *SCLK* .

DOUT : Salida lógica del integrado; los datos salen del **ADE7758** en el flanco ascendente de *SCLK*.

CS : Selecciona la entrada del dispositivo; esta entrada es usada cuando varios dispositivos comparten el bus serial. Un nivel bajo en la entrada pone al integrado en el modo de comunicación, y, durante la transferencia, un nivel alto en la entrada aborta la transferencia y pone al dispositivo en un estado de alta impedancia. Como el **ADE7758** no comparte la conexión serial con ningún otro dispositivo, la entrada \overline{CS} siempre está en nivel bajo.

Todas las operaciones de transferencia de datos, tanto de lectura como de escritura empiezan con una escritura en el registro de comunicación. Los datos escritos en el registro de comunicación contienen la dirección y especifican si es una operación de lectura o escritura. El registro de comunicación es un registro de 8 *bits* de solo escritura. El MSB determina si la próxima operación es una lectura o una escritura, y los siete LSBs *bits* restantes contienen la dirección del registro a ser accedido.

La Figura 4.13 muestra el direccionamiento de los registros que hace el **ADE7758** desde el registro de comunicación.

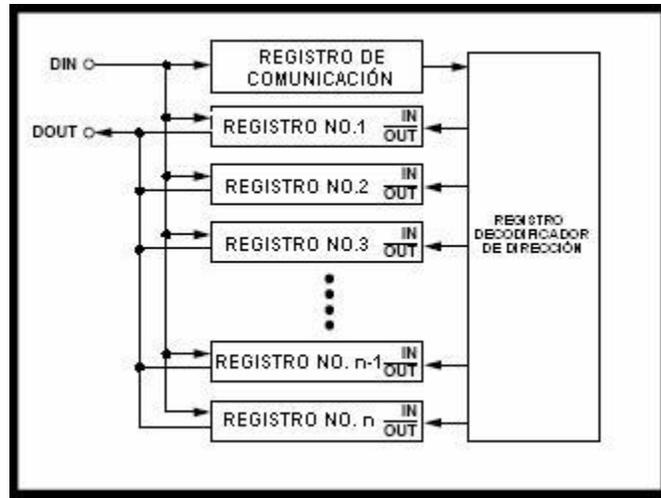


Figura 4.13 Direccionamiento de los registros del ADE7758 desde el registro de comunicación [12].

4.2.5 Interrupciones del ade7758.

Las interrupciones en el ADE7758 son manejadas en el registro de estados de interrupción (**STATUS[23:0]**, dirección 0x19) y en el registro máscara de interrupciones (**MASK[23:0]**, dirección 0x18). Cuando una interrupción ocurre la bandera correspondiente en el registro **STATUS** se vuelve un uno lógico. Si el *bit* para ésta interrupción en el registro **MASK** es un uno lógico la salida *IRQ* se pone a nivel bajo. Para determinar la fuente de la interrupción el sistema maestro (**MCU**) debe permitir la lectura del registro de estados de interrupción con reset (**RSTATUS[23:0]**, dirección 0x1A).

4.2.6 Operación de escritura serial.

Con *CS* a nivel bajo, sigue una escritura al registro de comunicación. El MSB del byte a ser transferido debe ser 1, indicando que la próxima operación de transferencia es una escritura al registro. Los restantes 7 *bits* contiene la dirección del registro a ser escrito. El **ADE7758** empieza a escribir en el registro, en el flanco descendente de *SCLK* y los restantes *bits* se transfieren en los subsecuentes flancos descendentes de *SCLK*. Si ocurre una transferencia de otro *byte* al puerto serial, esta debe terminar como mínimo 900nS después de que haya ocurrido

la transferencia del *byte* anterior. En la Figura 4.14 se muestra el diagrama de tiempos de la operación de escritura.

Como algunos registros del **ADE7758** pueden ser de 3 *Bytes* de ancho, el primer *byte* puesto en *DIN* es transferido como el *byte* más significativo del registro destino.

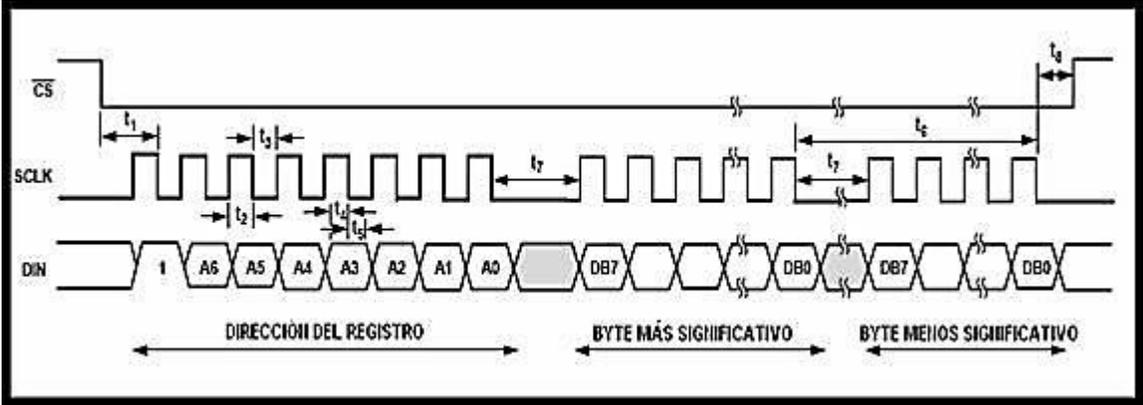


Figura 4.14 Diagrama de tiempos para la operación de escritura serial [11].

El valor de los tiempos t_1 a t_{13} para la escritura serial se muestra en la Figura 4.15.

Table 2.			
Parameter ^{1,2}	Specification	Unit	Test Conditions/Comments
WRITE TIMING			
t_1	50	ns (min)	\overline{CS} falling edge to first SCLK falling edge
t_2	50	ns (min)	SCLK logic high pulse width
t_3	50	ns (min)	SCLK logic low pulse width
t_4	10	ns (min)	Valid data setup time before falling edge of SCLK
t_5	5	ns (min)	Data hold time after SCLK falling edge
t_6	1200	ns (min)	Minimum time between the end of data byte transfers
t_7	400	ns (min)	Minimum time between byte transfers during a serial write
t_8	100	ns (min)	\overline{CS} hold time after SCLK falling edge
READ TIMING			
t_9^3	4	μ s (min)	Minimum time between read command (that is, a write to communication register) and data read
t_{10}	50	ns (min)	Minimum time between data byte transfers during a multibyte read
t_{11}^4	30	ns (min)	Data access time after SCLK rising edge following a write to the communications register
t_{12}^5	100	ns (max)	Bus relinquish time after falling edge of SCLK
	10	ns (min)	
t_{13}^5	100	ns (max)	Bus relinquish time after rising edge of \overline{CS}
	10	ns (min)	

Figura 4.15 Descripción de los tiempos de los diagramas de lectura y escritura serial [11].

4.2.7 Operación de lectura serial.

En la operación de lectura los datos son transferidos al exterior a través de *DOUT* en los flancos ascendentes de *SCLK*; como para la operación de escritura, primero se escribe en el registro de comunicación[12].

Con *CS* a nivel bajo el *MSB* del dato transferido al registro de comunicación debe ser cero, indicando que la próxima instrucción es una lectura. Los siete *bits* restantes indican la dirección del registro a leer. Los *bits* salen por el pin *DOUT* en los flancos ascendentes de *SCLK*. La salida *DOUT* conmuta a un estado de alta impedancia en el último flanco descendente de *SCLK*. La operación es abortada si hay un nivel alto en *CS* antes de que termine la transmisión.

Cuando un registro es seleccionado para una operación de lectura, el contenido entero de este registro pasa al bus de datos serial. Los comandos de lectura deben mandarse al registro de comunicaciones con una diferencia mayor a 1,1 μ s después de finalizada la operación de escritura en el registro de comunicación para no perder datos. La Figura 4.16 muestra el

diagrama de tiempos de la operación de lectura serial ver figura 12 para descripción de los tiempos.

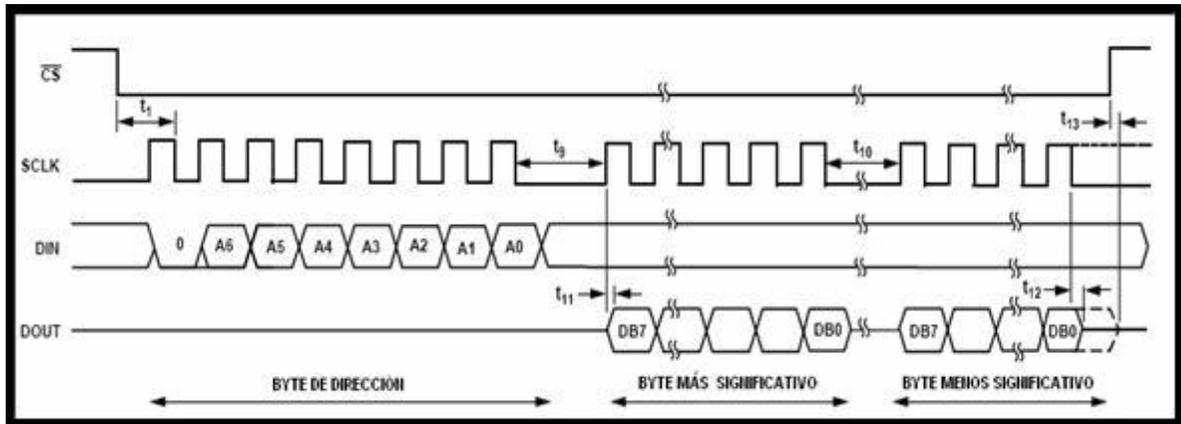


Figura 4.16 Diagrama de tiempos de la operación de lectura serial[11].

4.2.8 Registros del ADE7758.

La funcionalidad del **ADE7758** es aprovechada gracias a los registros que en él se incorporan. En total el **ADE7758** tiene 74 registros de los cuales 24 son de sólo lectura y 50 son de lectura y escritura[11][12].

A continuación se listan los registros más importantes del integrado con sus respectivas funciones. Para ver el listado de todos los registros y sus direcciones ver la tabla 13 en la hoja de datos del integrado en el anexo 1 del libro.

Registro de modo de operación (OPMODE 0x13)

Este registro de 8 *bits* cuya dirección de memoria es 0x13 realiza la configuración general del **ADE7758** y tiene las siguientes funciones[12]:

Habilita o deshabilita los filtros pasa-altas y pasa-bajas en los canales de corriente.

Deshabilita las salidas de pulsos **APCF** y **VARCF**. Apaga los conversores analógico-digital.

Pone al integrado en modo de baja potencia. Reinicia el integrado.

Registro de modo de medición (MMODE 0x14)

Este registro de 8 *bits* que se encuentra en la dirección de memoria 0x14, permite elegir el canal para la medición de la frecuencia de la línea de tensión, selecciona el canal para la medición de tensiones pico y corrientes pico y habilita una interrupción cuando se detectan valores de corriente y de tensión por encima de un valor pico seleccionado, para cada uno de los canales de tensión y corriente del ADE7758[12].

Registro de modo forma de onda (WAVMODE 0x15)

Se encuentra en la posición de memoria 0x15, configura la forma de muestreo de la onda de tensión y de corriente mediante las siguientes funciones:

- Selecciona la fase para la cual se va a realizar el muestreo de la onda. Selecciona el tipo de onda: corriente, tensión, salida del multiplicador para potencia activa, salida del multiplicador para potencia reactiva, salida del multiplicador para potencia aparente.
- Selecciona la tasa de muestreo: 26kSPS, 13kSPS, 6,5kSPS, 3,3kSPS.
- Configura la salida de pulso **VARCF** para mostrar el valor de potencia reactiva, o, el valor de potencia aparente[12].

Registro de modo de cómputo (COMPMODE 0x16)

Este registro de 8 *bits* se encuentra en la posición 0x16 de memoria configura el modo de cómputo en el **ADE7758** mediante las siguientes funciones:

- Selecciona la entrada para los registros de acumulación de energía. Selecciona las fases que van a ser incluidas en las salidas de pulso **APCF** y **VARCF**.
- Permite que la salida de **APCF** sea proporcional a la suma de los valores absolutos de los registros de energía activa.
- Pone la salida **VARCF** en modo de ajuste de signo, en el cual se muestra la suma de los registros de acumulación de energía reactiva. Si la potencia activa es negativa la salida **VARCF** invierte su signo[11][12].

Registro de modo de acumulación por ciclo de línea (LCYCMODE 0x17)

Es un registro de 8 *bits* que se encuentra ubicado en la dirección de memoria 0x17, el cual permite configurar el modo de acumulación por ciclo de línea del **ADE7758**[11][12].

Las funciones del registro **LCYCMODE** son:

- Pone los registros de acumulación de energía activa, reactiva, aparente en modo de acumulación por ciclo de línea.
- Selecciona las fases usadas para el conteo de cruce por cero de la línea de tensión.
- Permite poner a cero lógico los registros de acumulación de energía cuando estos sean leídos.
- Selecciona si el registro **FREQ** muestra el periodo o la frecuencia de la línea de entrada.

Registro máscara de interrupción (MASK 0x18)

Cuando ocurre una interrupción en el **ADE7758** la salida *IRQ* pasa a nivel bajo si el evento está habilitado en el registro **MASK**. La salida *IRQ* vuelve a su estado por defecto de colector abierto cuando se lee el **RSTATUS**[11][12]. La Tabla 4.6 muestra los eventos de interrupción que se pueden habilitar en el **ADE7758**.

Bit Location	Interrupt Flag	Default Value	Description
0	AEHF	0	Enables an interrupt when there is a change in Bit 14 of any one of the three WATTHR registers, that is, the WATTHR register is half full.
1	REHF	0	Enables an interrupt when there is a change in Bit 14 of any one of the three VARHR registers, that is, the VARHR register is half full.
2	VAEHF	0	Enables an interrupt when there is a 0 to 1 transition in the MSB of any one of the three VAHR registers, that is, the VAHR register is half full.
3	SAGA	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase A.
4	SAGB	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase B.
5	SAGC	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase C.
6	ZXTOA	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase A.
7	ZXTOB	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase B.
8	ZXTOC	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase C.
9	ZXA	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase A (see the Zero-Crossing Detection section).
10	ZXB	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase B (see the Zero-Crossing Detection section).
11	ZXC	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase C (see the Zero-Crossing Detection section).
12	LENERGY	0	Enables an interrupt when the energy accumulations over LINECYC are finished.
13	Reserved	0	Reserved.
14	PKV	0	Enables an interrupt when the voltage input selected in the MMODE register is above the value in the VPINTLVL register.
15	PKI	0	Enables an interrupt when the current input selected in the MMODE register is above the value in the IPINTLVL register.
16	WFSM	0	Enables an interrupt when data is present in the WAVEMODE register.
17	REVPAP	0	Enables an interrupt when there is a sign change in the watt calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
18	REVPRP	0	Enables an interrupt when there is a sign change in the VAR calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
19	SEQERR	0	Enables an interrupt when the zero crossing from Phase A is followed not by the zero crossing of Phase C but with that of Phase B.

Tabla 4.6 Configuración de cada bit del registro de máscara de interrupción (MASK 0x18)[11].

Registro de estados y estados con reinicio (STATUS 0x19, RSTATUS 0x1A)

Estos registros son usados para determinar la fuente de interrupción en el **ADE7758**[11][12]. El contenido de estos dos registros es el mismo, la diferencia radica en que al leer el **RSTATUS** desde el microcontrolador ambos registros se reinicia y vuelven a sus valores por defecto. Estos registros tienen la misma configuración del registro **MASK** mostrada en la Tabla 4.6.

Checksum register (0x7E)

Contiene los *bits* de datos recibidos en la última operación de lectura. Este registro de 8 *bits* es reiniciado antes de que el *MSB* del registro a ser leído sea puesto en la salida **DOUT**. Durante la operación de lectura serial cuando los bits son habilitados por el flanco de subida de **SCLK** son adicionados al **CHECKSUM REGISTER**. Al final de la operación de lectura el contenido del

CHECKSUM REGISTER es igual a la suma de todos los unos del registro previamente leído, con esto el usuario puede determinar si un error ocurrió en la última operación de lectura[11][12]EL SHIELD ADE7758 PROTOTIPO PARA PCDUINO V1

El shield prototipo implementa el circuito de prueba recomendado por la hoja de datos del fabricante del chip AD7758 mostrado en la Figura 4.8. Este shield utiliza reguladores de nivel lógicos descritos en la sección para poder implementar la pantalla LCD 16X2 por medio del bus I2C que se describe en la sección y el bus SPI del PCDUINO, en la Figura 4.17 se muestra como es físicamente.

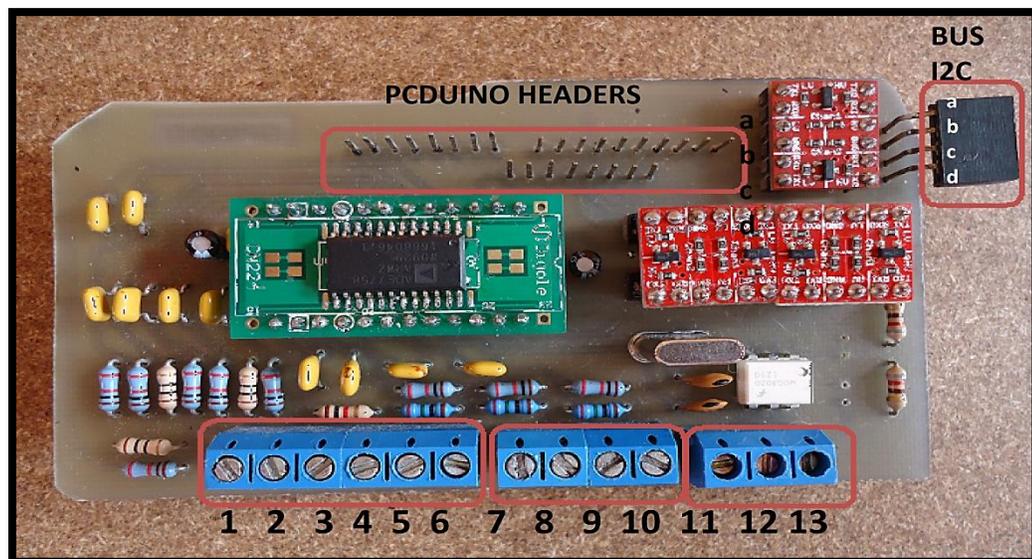


Figura 4.17 El shield ADE7758.

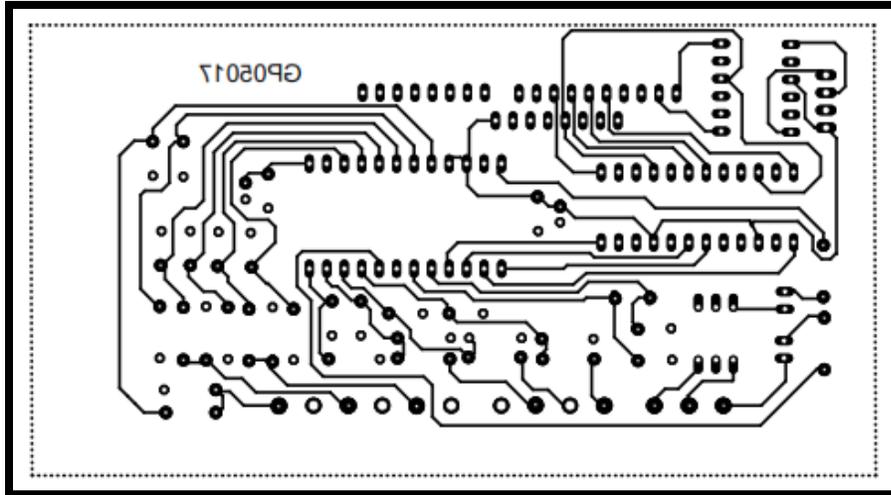


Figura 4.18 El diseño de pistas del shield ADE7758.

Descripción de entradas y salidas del shield mostrado en la Tabla 4.7 y Tabla 4.8 .

ENTRADAS/SALIDAS DEVOLTAJE Y CORRIENTE	
No	DESCRIPCION
1	IA1
2	IA2
3	IB1
4	IB2
5	IC1
6	IC2
7	VA
8	VB
9	VC
10	VN
11	APCF hacia frecuencímetro +
12	APCF hacia frecuencímetro -
13	VARCF

Tabla 4.7 Descripción de entradas de voltaje-corriente.

BUS I2C 3.3V	
N.	DESCRIPCION
A	SDA
B	SCL
C	GND
D	VDD(+5V)

Tabla 4.8 Bus I2C del shield ADE7758.

4.3 CODIFICACION C++ Y USO DE LIBRERIAS DE ARDUINO PARA LA COMUNICACIÓN CON EL SHIELD PROTOTIPO

Para la correcta comunicación con el shield ADE7758 se implementa la librería de Arduino “SPI.h”, además se debe incluir la librería “core.h” para que el PCDUINO implemente correctamente la configuración de los pines de salida/entrada.

4.3.1 Configuración SPI.

Es necesario configurar los parámetros como el de orden de bits(más o menos significativo primero), divisor del la señal de reloj (12Mhz máx.) y el modo de comunicación, a continuación se detalla la configuración de cada una de ellas.

- **setDataMode:** debido a que la operación de escritura se efectúa en los flancos ascendentes del SCK y los datos de lectura se efectúan durante los flancos descendentes además valor base del reloj es uno (ver figuras), corresponde al SPI_MODE2
- **SetBitOrder:** como indica la sección de escritura y lectura se debe enviar y recibir primero al bit más significativo lo que corresponde a MSBFIRST.
- **SetClockDivider:** como indica la hoja de datos en la sección de escritura y escritura la señal de prueba de SCK es de 10MHz debido a que esa frecuencia no es un divisor entero de 12Mhz que es frecuencia máxima de comunicación SPI del PCDUINO deberá ser SPI_CLOCK_DIV2 (6Mhz).

Ejemplo 1. Configuración SPI

```
SPIEX.begin();
SPIEX.setDataMode(SPI_MODE2);
SPIEX.setBitOrder(MSBFIRST);
SPIEX.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
```

4.3.2 ACCESO A LOS REGISTROS DE LECTURA Y ESCRITURA DEL ADE7758 CON LA LIBRERÍA

ADE7758

Para poder leer y escribir en los registros del ADE7758 es necesario tomar en cuenta el tamaño en bits del registro por leer o escribir 8 bits, 16 bits y 24bits (existen registros de 12 bit pero la sección de escritura y lectura muestra que se los datos se envían de 8 en 8 bits lo que quiere decir que con escribir o leer 16 bits es suficiente). Los anexo ADE7758.h y ADE7758.cpp muestra como leer en las funciones read8, read16 y read24 también escribir por medio de las funciones write8, write16 y write24.el siguiente ejemplo 2 muestra como leer y el ejemplo 3 como escribir 8 bits.

Ejemplo 2: lectura de un registro de 24 bit

```
long int b2;
int b1;
char b0;
enableChip(); //habilitamos el IC poniendo en active low el pin CS(10)
delayMicroseconds(50); // esperamos 50us para poder leer
SPI.transfer(AVRMS, SPI_CONTINUE); //se escriben el registro a leer
delayMicroseconds(4); // esperamos 4us para recibir los primeros 8 bits
b2=SPI.transfer(0x00, SPI_CONTINUE); //se reciben los primeros 8 bits
delayMicroseconds(4); // esperamos 4us para recibir los siguientes 8 bits
b1=SPI.transfer(0x00, SPI_CONTINUE); //se reciben 8 bits
delayMicroseconds(4); // esperamos 4us para recibir los siguientes 8 bits
b0=SPI.transfer(0x00, SPI_LAST); //se reciben los últimos 8 bits
delayMicroseconds(50); // esperamos 50us para validar la lectura
disableChip(); //se deshabilita el chip poniendo activa alta el pin CS
b2=b2<<16 | b1<<8 | b0; // se concatenan para formar un dato de 24 bit
```

Ejemplo 3: escritura de 8 bit

```
enableChip(); // habilitamos el IC
delayMicroseconds(50); // se espera 50us para poder escribir
SPItransfer((unsigned char)(AVRMS|0x80),SPI_CONTINUE); // se pone en 1 el
bit más significativo del registro para indicar que se va a escribir en los
registros
delayMicroseconds(4); // esperamos 4us para poder escribir 8 bits.
SPI.transfer((unsigned char)data,SPI_LAST); // escribimos en el registro
enviando los 8 bits deseados
delayMicroseconds(50); // se espera 50us para validar la escritura
disableChip(); // deshabilitamos el IC
```

4.3.3 TIPOS DE CONEXIONES DISPONIBLES PARA EL IC ADE7758

Para obtener los valores correctos de los parámetros de potencia trifásica es necesario tomar en cuenta el tipo de conexión del sistema trifásico si el sistema está conectado en estrella o delta, con o sin referencia a tierra. Para poder configurar adecuadamente se debe escribir en el registro COMPMODE los valores indicados en la siguiente tabla

Los tipos de conexiones disponibles según la ANSI C12.10 para el ADE7758 son descritos en la tabla Tabla 4.9

Numero de hilos	Tipo de conexión	Número de elementos	Fórmula	Valor a escribir en OMPMODE
3 hilos	Delta	3 elementos	$P = VA * IA + VB * IB + VC * IC$	0x1C
4 hilos	Estrella	2 ½ elementos	$P = VA*(IA-IB) + VC*(IC-IB)$	0x1D
4 hilos	Delta	2 ½ elementos	$P = VA*(IA-IB) + VC * IC$	0x1E
4 hilos	Estrella	3 elementos	$P = VA * IA + VB * IB + VC * IC$	0x1C

Tabla 4.9 Tipo de conexión para potencia activa [6].

4.4 ALMACENAMIENTO DE DATOS.

Es necesario poder almacenar los datos de una manera segura y de fácil acceso por esa razón los datos serán almacenados en una base de datos creada en MySQL.

Los datos podrán ser monitoreados remotamente por medio de un cliente web el cual gestionara un servidor APACHE2 y un administrador del servidor MySQL con phpMyAdmin instalado en el PCDUINO. A continuación en la 4.19 se muestra la base de datos MEDDIDOR_3F4H y la descripción de los parámetros de la tabla que contiene en la Tabla 4.10.

TABLA MEDICIONES PERTENECIENTE A LA BASE DE DATOS MEDIDOR_3F4H		
Campo	Descripción	Tipo de dato.
Fecha	Este campo se almacena la fecha con el siguiente formato YYYY-MM-DD	date
hora	Este campo se almacena la hora con el siguiente formato HH:MM:SS	time
PotenciaA	Este campo se almacena la potencia activa total de las tres fase	float
PotenciaR	Este campo se almacena la potencia reactiva total de las tres fase	float
PotenciaS	Este campo se almacena la potencia aparente total de las tres fase	float
FP	Este campo se almacena el factor de potencia	float
VA	Este campo se almacena el valor de voltaje de la fase A	float
VB	Este campo se almacena el valor de voltaje de la fase B	float
VC	Este campo se almacena el valor de voltaje de la fase C	float
IA	Este campo se almacena el valor de corriente de la fase A	float
IB	Este campo se almacena el valor de corriente de la fase B	float
IC	Este campo se almacena el valor de corriente de la fase C	float

Tabla 4.10 Descripción de la base de datos.



Figura 4.21 Entradas de voltaje-corriente del medidor prototipo.

No.	DESCRIPCIÓN
0	Entrada de corriente Fase A
1	Entrada de corriente Fase B
2	Entrada de corriente Fase C
3	Entrada de corriente voltaje fase C
4	Entrada de corriente voltaje fase B
5	Entrada de corriente voltaje fase C
6	Entrada de VN

Tabla 4.11 Descripción de entradas de voltaje-corriente del medidor prototipo

Los resultados fueron comparados con el analizador de potencia PCE-PA 8000 la carga medida es puramente resistiva debido a que no es posible poder leer los registros de potencia activa, reactiva, y aparente del IC ADE7758 con la librería SPI de ARDUINO. Tomando en cuenta que el

valor de energía activa de regencia fue tomado con el medidor PC-PA 800 y se compara con la energía aparente del medidor prototipo, las mediciones fueron tomadas cada 5 minutos.

		FASE A				FASE B				FASE C				ERROR
PC-PA 8000	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL [KWh]	-18.53
		0.405	0.004	0.409	0.990	0.577	0	0.57696	1.000	0.2609	0.005	0.266	0.98	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.104	
	120.300		120.200		121.0100		3.400		4.800		2.200			
MEDIDOR PROTOTIPO	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL [KVA]	-18.53
	-	-	0.485	-	-	-	0.68148	-	-	-	0.307	-	0.123	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.123	
	124.300		126.200		118.0100		3.900		5.400		2.600			
PC-PA 8000	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL	-6.73774
	0.405	0.004	0.409	0.990	0.572	0	0.5724	1.000	0.2616	0.005	0.267	0.98	0.226	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.226	
	120.200		120.000		120.800		3.400		4.770		2.210			
MEDIDOR PROTOTIPO	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL	-6.73774
	-	-	0.376	-	-	-	0.6916	-	-	-	0.354	-	0.241	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.241	
	125.300		133.000		122.0100		3.000		5.200		2.900			
PC-PA 8000	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL	0.575894
	0.405	0.004	0.409	0.990	0.572	0	0.5724	1.000	0.2616	0.005	0.267	0.98	0.344	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.344	
	120.200		120.000		120.800		3.400		4.770		2.210			
MEDIDOR PROTOTIPO	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	POTENCIA ACTIVA [KW]	POTENCIA REACTIVA [KVAR]	POTENCIA APARENTE [KVA]	FP	ENERGIA TOTAL	0.575894
	-	-	0.468	-	-	-	0.4968	-	-	-	0.250	-	0.342	
	VA [V]		VB [V]		VC [V]		IA [A]		IB [A]		IC [A]		0.342	
	130.000		124.200		125.0100		3.600		4.000		2.000			

Figura 4.22 Error de energía acumulada.

5. RECOMENDACIONES Y CONCLUSINES.

5.1 RECOMENDACIONES.

- ❖ Para realizar un estudio de demanda energética es necesario tener todos los datos requeridos en la sección III.1.1 para poder obtener un modelo línea base lo más real posible.
- ❖ No es necesario crear espacios y zonas térmicas equivalentes que contengan cargas eléctricas y térmicas equivalentes debido a que eso implica que el modelo creado en SketchUp no serán creados espacios que realmente la edificación contiene, la razón es que en un futuro si se quiere añadir un nuevo sistema A/C será necesario editar el modelo en SketchUp para añadir los límites de la zona térmica y editar el modelo para asignar cargas térmicas y eléctricas al nuevo espacio además de modificar el espacio previamente simplificado
- ❖ Simular el funcionamiento energético de un edificio con el software OpenStudio permite hacer evaluaciones del funcionamiento actual y poder evaluar si es eficiente o no, pero es necesario tener un parámetro como facturaciones y mediciones de la demanda real para poder concluir que los resultados dados por la simulación es válido por esta razón se recomienda instalar permanentemente un medidor de energía eléctrica en el tablero principal o en el banco de transformadores para que se cuente con un historial de la demanda energética real del edificio de Ing. Industrial.
- ❖ Se recomienda utilizar un microcontrolador como el picPIC18F2455/2550/4455/4550 para no perder bits en la escritura o lectura ya que este microcontrolador puede ser el maestro del Shield ADE7758 y garantizar que la comunicación SPI está bien sincronizada

con la señal CLK, los datos obtenidos pueden ser enviados por otro protocolo de comunicación al PCDUINO como el SERIAL.

- ❖ Para poder medir cargas mayores con el medidor de energía prototipo es necesario cambiar el sensor de corriente por uno de mayor capacidad como los Non-invasive AC current sensor SCT-019 200A max, el cual tiene una abertura máxima de 19mm.
- ❖ Para tener mejores resultados y reducir el error de medición del medidor prototipo es necesario llevar a cabo la calibración recomendada por la hoja de datos del IC ADER7758.
- ❖ Para poder lograr que el medidor funcione por largos periodos y sin interrupciones será necesario incluir sistemas de enfriamiento como disipadores y extractores de calor ya que el PCDUINO se apaga cuando alcanza temperaturas no muy elevadas.

5.2 CONCLUSIONES.

- ❖ La calificación energética del edificio de Ing. Industrial mostrada en la **Error! Reference source not found.** es una calificación F lo que significa que el edificio no es eficiente, esto es debido a que los sistemas de iluminación y sistemas A/C actualmente en funcionamiento no son eficientes. Es necesario hacer los cambios en los sistemas de iluminación y sistemas A/C y tener una mejor administración de equipos eléctricos como UPS y equipos de cómputo.
- ❖ En la Tabla 3.10 \$923.74 representa el 5.4% de la facturación anual obtenida por simulación para el año 2014, representa la energía que es consumida en el horario tarifario valle, lo que significa que solo equipos como servidores, swicht, router y ups (equipos que siempre se mantienen encendidos) consumen esa energía en dicho horario.
- ❖ El error total de energía entre el valor real medido y el valor simulado es de 0.98% ver Tabla 3.9 lo por lo tanto el modelo del edificio construido y simulado es el modelo línea base es y posible hacer simulaciones con otros parámetros como cambios de luminarias a unas eficientes y mejores sistemas de A/C sin hacer una inversión y evaluar si estos cambios son viables.
- ❖ El shield prototipo de un medidor trifásico implementado el IC ADE7758 para el PCDUINO es un circuito que se puede construir fácilmente y es relativamente fácil poder acceder a los registros del IC por medio de la librería ADE7758.h que permite obtener valores de corriente y voltaje para ser mostrados casi instantáneamente y poder ser almacenados en una base de datos casi instantáneamente.
- ❖ Debido a que el PCDUINO cuenta con un sistema operativo Linux es posible gestionar remotamente la base de datos por medio de un cliente web y así poder monitorear y descargar datos de mediciones sin necesidad de extraer una memoria del medidor o interrumpir las mediciones.

- ❖ No es posible leer y escribir correctamente en los registros del IC ADE7758 con la librería SPI que implementa dicho protocolo, debido a que el PCDUINO no cuenta con un RTC o un circuito oscilador dedicado exclusivamente a los protocolos de comunicación, el PCDUINO comparte su reloj en todas las operaciones realizadas por el sistema operativo lo que causa retardos. Por esta razón no es posible leer y escribir correctamente como indica en los diagramas de tiempo para lectura y escritura recomendados por la hoja de datos mostrados en las Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16.

- ❖ No es posible obtener lecturas correctas de los registros de energía activa, reactiva y aparente debido a los problemas de comunicación ya que es necesario poder escribir correctamente en el registro LINECYC el número de medios ciclos que se desea acumular energía, después se debe elegir a qué tipo de energía se desea acumular modificando el registro LCYC_MODE y esperar que ocurra la interrupción de fin de acumulación de energía detectando un cambio en el bit LENERGY del registro STATUS para posteriormente leer el registro de energía deseado. Debido a este proceso por a la pérdida de bits en la comunicación no es posible obtener una lectura correcta con la librería ADE7758 para el PCDUINO.

- ❖ El error de las mediciones de voltaje y corriente es debido a que es necesario poder detectar cambios en los bit banderas de registro STATUS ZXA, ZXB y ZXC que detectan los cruces por cero de cada una de las fases, la hoja de datos del IC ADE7758 recomienda tomar lectura de voltaje o corriente justo después de un cruce por cero debido a esto muchas veces el error es muy elevado debido a que se pierden bits en la comunicación SPI debido a retardos causados por el sistema operativo en el PCDUINO, es necesario tener una señal de reloj estable.

- ❖ La comparación entre la demanda medida por el medidor prototipo y la demanda de energía simulada, no se pudo llevar a cabo debido a la capacidad de los sensores de

corriente del instrumento esta limita físicamente y su capacidad amperimétrica es de 30 A.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Jefe Uniad Financiera UES, "Facturación Eléctrica CAESS 2012," 2013.
- [2] GREEPYME. (2014) GREEPYME Web site. [Online]. <http://greenpyme.iic.org/es/eficiencia-energ%C3%A9tica>
- [3] Juan Pablo Cartagena Portillo, "EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR. ," in *EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS EDIFICIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.*. San Salvador, El Salvador, 2012.
- [4] Ingeniería y Arquitectura. (2014) www.ingenieria-arquitectura.com. [Online]. <http://www.ingenieria-arquitectura.com/certificado-energetico/>
- [5] Rodrigo González González. (2013, julio) PDCAHOME. [Online]. <http://www.pdcahome.com/4909/certificacion-de-eficiencia-energetica-en-edificios/>
- [6] DANIEL ANTONIO CORTEZ FRANCO, DOUGLAS ALBERTO LÓPEZ HERNÁNDEZ FERNANDO ALBERTO ARÉVALO NAVAS, "Diseño e implementación de un medidor trifásico multifunción utilizando el IC ADE7754". San Salvador, 2005.
- [7] José Luis Gálvez Osorto, *APLICACIÓN DE SIMULADORES DE ENERGIA*. San Salvador, El Salvador, 2010.
- [8] NREL. (2012, julio) openstudio.nrel.gov. [Online]. http://openstudio.nrel.gov/files/openstudio_interface_workflow-080_verA.pdf
- [9] pcduino. (2014) pcduino. [Online]. <http://www.pcduino.com/>
- [10] pcduino. (2014) pcduino. [Online]. <http://www.pcduino.com/features/>
- [11] ANALOG DEVICE, *Data Sheet ADE7758*, Rev.E ed., Analog Device, Ed. Norwood, MA, U.S.A: Analog Device, 2004-2011.
- [12] Hernandez Rodriguez Iván Darío Romero Larrota Adrian, *PROTOTIPO DE UN EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICO PARA MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS*. Bucaramanga,

Colombia, 2006.

[13] Spark Fun Electronics. (2014) Sparkfun. [Online]. <https://www.sparkfun.com/products/retired/8745>

[14] Spark Fun Electronics, Logic Level Converter, 2013, Digrama esquematico.

[15] Web4Robot, *LCD I2C/Serial User's Guide.*, 2006.

[16] Ltd ECHUN Electronic Co., Split Core Current Transformer ECS1030-L72 , 2014, Hoja de datos.

[17] M.Romero Schmidtke. (2009, febrero) enciclopedia.us.es. [Online].
http://enciclopedia.us.es/index.php/Integral_y_funci%C3%B3n_primitiva

7. ANEXOS



**ANALOG
DEVICES**

Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with Per Phase Information

Data Sheet

ADE7758

FEATURES

- Highly accurate; supports IEC 60687, IEC 61036, IEC 61268, IEC 62053-21, IEC 62053-22, and IEC 62053-23
- Compatible with 3-phase/3-wire, 3-phase/4-wire, and other 3-phase services
- Less than 0.1% active energy error over a dynamic range of 1000 to 1 at 25°C
- Supplies active/reactive/apparent energy, voltage rms, current rms, and sampled waveform data
- Two pulse outputs, one for active power and the other selectable between reactive and apparent power with programmable frequency
- Digital power, phase, and rms offset calibration
- On-chip, user-programmable thresholds for line voltage SAG and overvoltage detections
- An on-chip, digital integrator enables direct interface-to-current sensors with di/dt output
- A PGA in the current channel allows direct interface to current transformers
- An SPI-compatible serial interface with $\overline{\text{IRQ}}$

- Proprietary ADCs and DSP provide high accuracy over large variations in environmental conditions and time
- Reference 2.4 V (drift 30 ppm/°C typical) with external overdrive capability
- Single 5 V supply, low power (70 mW typical)

GENERAL DESCRIPTION

The ADE7758 is a high accuracy, 3-phase electrical energy measurement IC with a serial interface and two pulse outputs. The ADE7758 incorporates second-order Σ - Δ ADCs, a digital integrator, reference circuitry, a temperature sensor, and all the signal processing required to perform active, reactive, and apparent energy measurement and rms calculations.

The ADE7758 is suitable to measure active, reactive, and apparent energy in various 3-phase configurations, such as WYE or DELTA services, with both three and four wires. The ADE7758 provides system calibration features for each phase, that is, rms offset correction, phase calibration, and power calibration. The APCF logic output gives active power information, and the VARCF logic output provides instantaneous reactive or apparent power information.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

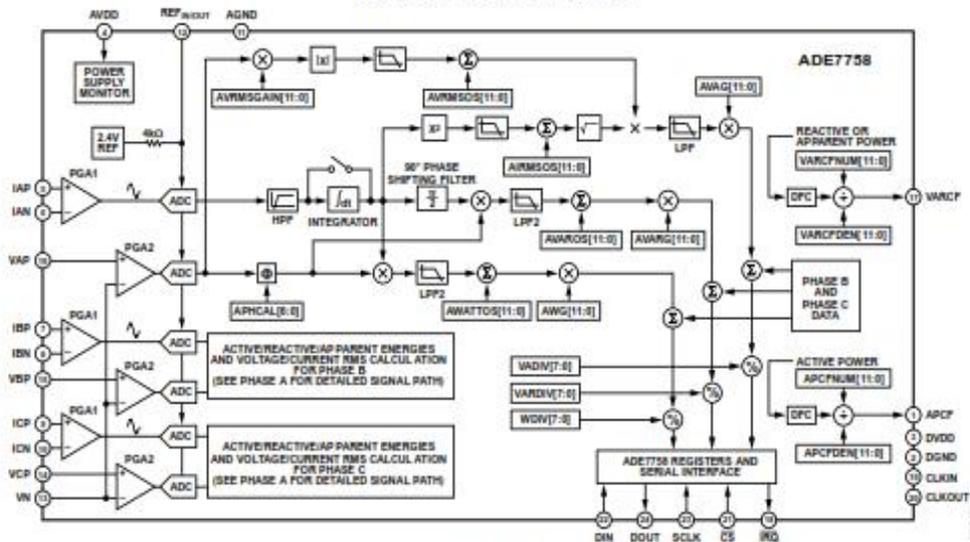


Figure 1.

Rev. E

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2004-2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

FEATURES

- Highly accurate; supports IEC 60687, IEC 61036, IEC 61268, IEC 62053-21, IEC 62053-22, and IEC 62053-23
- Compatible with 3-phase/3-wire, 3-phase/4-wire, and other 3-phase services
- Less than 0.1% active energy error over a dynamic range of 1000 to 1 at 25°C
- Supplies active/reactive/apparent energy, voltage rms, current rms, and sampled waveform data
- Two pulse outputs, one for active power and the other selectable between reactive and apparent power with programmable frequency
- Digital power, phase, and rms offset calibration
- On-chip, user-programmable thresholds for line voltage SAG and overvoltage detections
- An on-chip, digital integrator enables direct interface-to-current sensors with di/dt output
- A PGA in the current channel allows direct interface to current transformers
- An SPI®-compatible serial interface with \overline{IRQ}

- Proprietary ADCs and DSP provide high accuracy over large variations in environmental conditions and time
- Reference 2.4 V (drift 30 ppm/°C typical) with external overdrive capability
- Single 5 V supply, low power (70 mW typical)

GENERAL DESCRIPTION

The ADE7758 is a high accuracy, 3-phase electrical energy measurement IC with a serial interface and two pulse outputs. The ADE7758 incorporates second-order Σ - Δ ADCs, a digital integrator, reference circuitry, a temperature sensor, and all the signal processing required to perform active, reactive, and apparent energy measurement and rms calculations.

The ADE7758 is suitable to measure active, reactive, and apparent energy in various 3-phase configurations, such as WYE or DELTA services, with both three and four wires. The ADE7758 provides system calibration features for each phase, that is, rms offset correction, phase calibration, and power calibration. The APCF logic output gives active power information, and the VARCF logic output provides instantaneous reactive or apparent power information.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

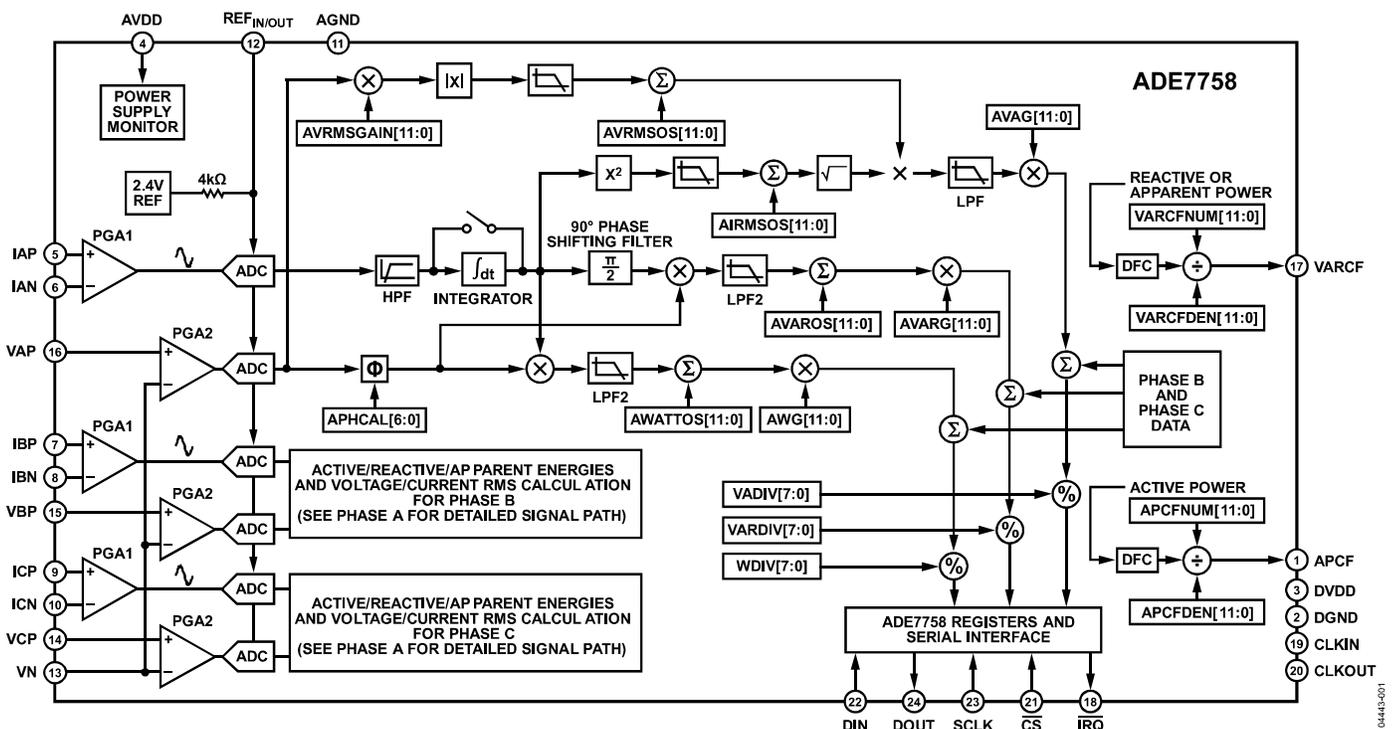


Figure 1.

Rev. E

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Temperature Measurement	27
General Description	1	Root Mean Square Measurement	28
Functional Block Diagram	1	Active Power Calculation	30
General Description	4	Reactive Power Calculation	35
Specifications	5	Apparent Power Calculation	39
Timing Characteristics	6	Energy Registers Scaling	41
Timing Diagrams	7	Waveform Sampling Mode	41
Absolute Maximum Ratings	8	Calibration	42
ESD Caution	8	Checksum Register	55
Pin Configuration and Function Descriptions	9	Interrupts	55
Terminology	11	Using the Interrupts with an MCU	56
Typical Performance Characteristics	12	Interrupt Timing	56
Test Circuits	17	Serial Interface	56
Theory of Operation	18	Serial Write Operation	57
Antialiasing Filter	18	Serial Read Operation	59
Analog Inputs	18	Accessing the On-Chip Registers	59
Current Channel ADC	19	Registers	60
di/dt Current Sensor and Digital Integrator	20	Communications Register	60
Peak Current Detection	21	Operational Mode Register (0x13)	64
Overcurrent Detection Interrupt	21	Measurement Mode Register (0x14)	64
Voltage Channel ADC	22	Waveform Mode Register (0x15)	65
Zero-Crossing Detection	23	Computational Mode Register (0x16)	66
Phase Compensation	23	Line Cycle Accumulation Mode Register (0x17)	67
Period Measurement	25	Interrupt Mask Register (0x18)	68
Line Voltage SAG Detection	25	Interrupt Status Register (0x19)/Reset Interrupt Status Register (0x1A)	69
SAG Level Set	26	Outline Dimensions	70
Peak Voltage Detection	26	Ordering Guide	70
Phase Sequence Detection	26		
Power-Supply Monitor	27		
Reference Circuit	27		

Revision History

10/11—Rev. D to Rev. E

Changes to Figure 1	1	Changes to Equation 25	34
Changes to Figure 41	19	Changes to Figure 69	34
Changes to Figure 60	27	Changes to Table 17	62
Added Figure 61; Renumbered Sequentially	27	Change to Table 18	64
Changes to Phase Sequence Detection Section	27	Changes to Table 24	69
Changes to Power-Supply Monitor Section	27	Changes to Ordering Guide	70
Changes to Figure 62	28		
Changes to Figure 67	32	10/08—Rev. C to Rev. D	
Changes to Figure 68	32	Changes to Figure 1	1
		Changes to Phase Sequence Detection Section and Figure 60	27

Changes to Current RMS Calculation Section.....	28	Changes to Energy Accumulation Mode Section.....	33
Changes to Voltage Channel RMS Calculation Section and Figure 63.....	29	Changes to the Reactive Power Calculation Section.....	35
Changes to Table 17.....	60	Added Equation 32.....	36
Changes to Ordering Guide.....	70	Changes to Energy Accumulation Mode Section.....	38
7/06—Rev. B to Rev. C		Changes to the Reactive Power Frequency Output Section.....	38
Updated Format.....	Universal	Changes to the Apparent Energy Calculation Section.....	40
Changes to Figure 1.....	1	Changes to the Calibration Section.....	42
Changes to Table 2.....	6	Changes to Figure 76 through Figure 84.....	43–54
Changes to Table 4.....	9	Changes to Table 15.....	59
Changes to Figure 34 and Figure 35.....	17	Changes to Table 16.....	63
Changes to Current Waveform Gain Registers Section and Current Channel Sampling Section.....	19	Changes to Ordering Guide.....	69
Changes to Voltage Channel Sampling Section.....	22	9/04—Rev. 0 to Rev. A	
Changes to Zero-Crossing Timeout Section.....	23	Changed Hexadecimal Notation.....	Universal
Changes to Figure 60.....	27	Changes to Features List.....	1
Changes to Current RMS Calculation Section.....	28	Changes to Specifications Table.....	5
Changes to Current RMS Offset Compensation Section and Voltage Channel RMS Calculation Section.....	29	Change to Figure 25.....	16
Added Table 7 and Table 9; Renumbered Sequentially.....	29	Additions to the Analog Inputs Section.....	19
Changes to Figure 65.....	30	Added Figures 36 and 37; Renumbered Subsequent Figures.....	19
Changes to Active Power Offset Calibration Section.....	31	Changes to Period Measurement Section.....	26
Changes to Reactive Power Frequency Output Section.....	38	Change to Peak Voltage Detection Section.....	26
Changes to Apparent Power Frequency Output Section and Waveform Sampling Mode Section.....	41	Added Figure 60.....	27
Changes to Gain Calibration Using Line Accumulation Section.....	49	Change to the Current RMS Offset Compensation Section.....	29
Changes to Example: Power Offset Calibration Using Line Accumulation Section.....	53	Edits to Active Power Frequency Output Section.....	33
Changes to Calibration of IRMS and VRMS Offset Section.....	54	Added Figure 68; Renumbered Subsequent Figures.....	33
Changes to Table 18.....	64	Changes to Reactive Power Frequency Output Section.....	37
Changes to Table 20.....	65	Added Figure 73; Renumbered Subsequent Figures.....	38
11/05—Rev. A to Rev. B		Change to Gain Calibration Using Pulse Output Example.....	44
Changes to Table 1.....	5	Changes to Equation 37.....	45
Changes to Figure 23 Caption.....	14	Changes to Example—Phase Calibration of Phase A Using Pulse Output.....	45
Changes to Current Waveform Gain Registers Section.....	19	Changes to Equations 56 and 57.....	53
Changes to di/dt Current Sensor and Digital Integrator Section.....	20	Addition to the ADE7758 Interrupts Section.....	54
Changes to Phase Compensation Section.....	23	Changes to Example-Calibration of RMS Offsets.....	54
Changes to Figure 57.....	25	Addition to Table 20.....	66
Changes to Figure 60.....	27	1/04—Revision 0: Initial Version	
Changes to Temperature Measurement Section and Root Mean Square Measurement Section.....	28		
Inserted Table 6.....	28		
Changes to Current RMS Offset Compensation Section.....	29		
Inserted Table 7.....	29		
Added Equation 17.....	31		

GENERAL DESCRIPTION

The ADE7758 has a waveform sample register that allows access to the ADC outputs. The part also incorporates a detection circuit for short duration low or high voltage variations. The voltage threshold levels and the duration (number of half-line cycles) of the variation are user programmable. A zero-crossing detection is synchronized with the zero-crossing point of the line voltage of any of the three phases. This information can be used to measure the period of any one of the three voltage inputs. The zero-crossing detection is used inside the chip for the line cycle energy accumulation mode. This mode permits faster and more accurate calibration by synchronizing the energy accumulation with an integer number of line cycles.

Data is read from the ADE7758 via the SPI serial interface. The interrupt request output ($\overline{\text{IRQ}}$) is an open-drain, active low logic output. The $\overline{\text{IRQ}}$ output goes active low when one or more interrupt events have occurred in the ADE7758. A status register indicates the nature of the interrupt. The ADE7758 is available in a 24-lead SOIC package.

SPECIFICATIONS

AVDD = DVDD = 5 V ± 5%, AGND = DGND = 0 V, on-chip reference, CLKIN = 10 MHz XTAL, T_{MIN} to T_{MAX} = -40°C to +85°C.

Table 1.

Parameter ^{1,2}	Specification	Unit	Test Conditions/Comments
ACCURACY			
Active Energy Measurement Error (per Phase)	0.1	% typ	Over a dynamic range of 1000 to 1
Phase Error Between Channels			Line frequency = 45 Hz to 65 Hz, HPF on
PF = 0.8 Capacitive	±0.05	°max	Phase lead 37°
PF = 0.5 Inductive	±0.05	°max	Phase lag 60°
AC Power Supply Rejection			AVDD = DVDD = 5 V + 175 mV rms/120 Hz
Output Frequency Variation	0.01	% typ	V1P = V2P = V3P = 100 mV rms
DC Power Supply Rejection			AVDD = DVDD = 5 V ± 250 mV dc
Output Frequency Variation	0.01	% typ	V1P = V2P = V3P = 100 mV rms
Active Energy Measurement Bandwidth	14	kHz	
IRMS Measurement Error	0.5	% typ	Over a dynamic range of 500:1
IRMS Measurement Bandwidth	14	kHz	
VRMS Measurement Error	0.5	% typ	Over a dynamic range of 20:1
VRMS Measurement Bandwidth	260	Hz	
ANALOG INPUTS			
Maximum Signal Levels	±500	mV max	See the Analog Inputs section
Input Impedance (DC)	380	kΩ min	Differential input
ADC Offset Error ³	±30	mV max	Uncalibrated error, see the Terminology section
Gain Error ³	±6	% typ	External 2.5 V reference
WAVEFORM SAMPLING			
Current Channels			Sampling CLKIN/128, 10 MHz/128 = 78.1 kSPS
Signal-to-Noise Plus Distortion	62	dB typ	See the Current Channel ADC section
Bandwidth (-3 dB)	14	kHz	
Voltage Channels			See the Voltage Channel ADC section
Signal-to-Noise Plus Distortion	62	dB typ	
Bandwidth (-3 dB)	260	Hz	
REFERENCE INPUT			
REF _{IN/OUT} Input Voltage Range	2.6	V max	2.4 V + 8%
	2.2	V min	2.4 V - 8%
Input Capacitance	10	pF max	
ON-CHIP REFERENCE			
Reference Error	±200	mV max	Nominal 2.4 V at REF _{IN/OUT} pin
Current Source	6	μA max	
Output Impedance	4	kΩ min	
Temperature Coefficient	30	ppm/°C typ	
CLKIN			
Input Clock Frequency	15	MHz max	All specifications CLKIN of 10 MHz
	5	MHz min	
LOGIC INPUTS			
DIN, SCLK, CLKIN, and $\overline{\text{CS}}$			
Input High Voltage, V _{INH}	2.4	V min	DVDD = 5 V ± 5%
Input Low Voltage, V _{INL}	0.8	V max	DVDD = 5 V ± 5%
Input Current, I _{IN}	±3	μA max	Typical 10 nA, V _{IN} = 0 V to DVDD
Input Capacitance, C _{IN}	10	pF max	

Parameter ^{1,2}	Specification	Unit	Test Conditions/Comments
LOGIC OUTPUTS			
$\overline{\text{IRQ}}$, DOUT, and CLKOUT			DVDD = 5 V ± 5% $\overline{\text{IRQ}}$ is open-drain, 10 kΩ pull-up resistor
Output High Voltage, V _{OH}	4	V min	I _{SOURCE} = 5 mA
Output Low Voltage, V _{OL}	0.4	V max	I _{SINK} = 1 mA
APCF and VARCF			
Output High Voltage, V _{OH}	4	V min	I _{SOURCE} = 8 mA
Output Low Voltage, V _{OL}	1	V max	I _{SINK} = 5 mA
POWER SUPPLY			
AVDD	4.75	V min	For specified performance 5 V – 5%
	5.25	V max	5 V + 5%
DVDD	4.75	V min	5 V – 5%
	5.25	V max	5 V + 5%
A _{DD}	8	mA max	Typically 5 mA
D _{DD}	13	mA max	Typically 9 mA

¹ See the Typical Performance Characteristics.

² See the Terminology section for a definition of the parameters.

³ See the Analog Inputs section.

TIMING CHARACTERISTICS

AVDD = DVDD = 5 V ± 5%, AGND = DGND = 0 V, on-chip reference, CLKIN = 10 MHz XTAL, T_{MIN} to T_{MAX} = –40°C to +85°C.

Table 2.

Parameter ^{1,2}	Specification	Unit	Test Conditions/Comments
WRITE TIMING			
t ₁	50	ns (min)	$\overline{\text{CS}}$ falling edge to first SCLK falling edge
t ₂	50	ns (min)	SCLK logic high pulse width
t ₃	50	ns (min)	SCLK logic low pulse width
t ₄	10	ns (min)	Valid data setup time before falling edge of SCLK
t ₅	5	ns (min)	Data hold time after SCLK falling edge
t ₆	1200	ns (min)	Minimum time between the end of data byte transfers
t ₇	400	ns (min)	Minimum time between byte transfers during a serial write
t ₈	100	ns (min)	$\overline{\text{CS}}$ hold time after SCLK falling edge
READ TIMING			
t ₉ ³	4	μs (min)	Minimum time between read command (that is, a write to communication register) and data read
t ₁₀	50	ns (min)	Minimum time between data byte transfers during a multibyte read
t ₁₁ ⁴	30	ns (min)	Data access time after SCLK rising edge following a write to the communications register
t ₁₂ ⁵	100	ns (max)	Bus relinquish time after falling edge of SCLK
	10	ns (min)	
t ₁₃ ⁵	100	ns (max)	Bus relinquish time after rising edge of $\overline{\text{CS}}$
	10	ns (min)	

¹ Sample tested during initial release and after any redesign or process change that may affect this parameter. All input signals are specified with tr = tf = 5 ns (10% to 90%) and timed from a voltage level of 1.6 V.

² See the timing diagrams in Figure 3 and Figure 4 and the Serial Interface section.

³ Minimum time between read command and data read for all registers except waveform register, which is t₉ = 500 ns min.

⁴ Measured with the load circuit in Figure 2 and defined as the time required for the output to cross 0.8 V or 2.4 V.

⁵ Derived from the measured time taken by the data outputs to change 0.5 V when loaded with the circuit in Figure 2. The measured number is then extrapolated back to remove the effects of charging or discharging the 50 pF capacitor. This means that the time quoted here is the true bus relinquish time of the part and is independent of the bus loading.

TIMING DIAGRAMS

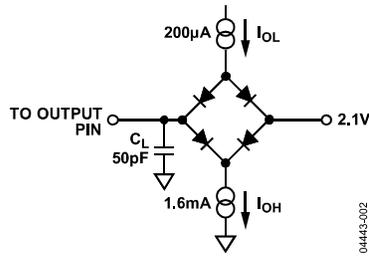


Figure 2. Load Circuit for Timing Specifications

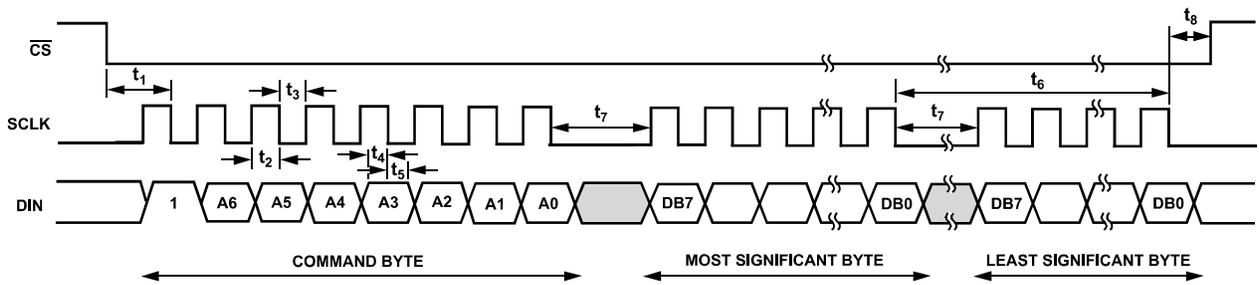


Figure 3. Serial Write Timing

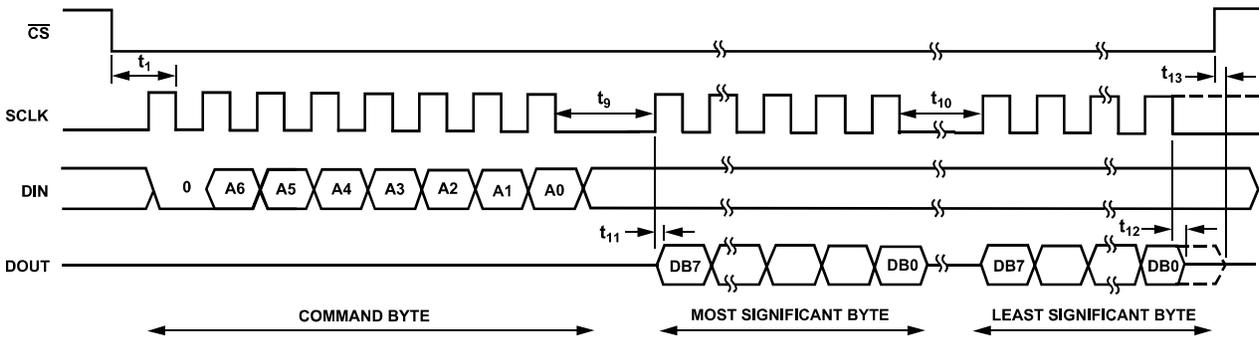


Figure 4. Serial Read Timing

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 3.

Parameter	Rating
AVDD to AGND	-0.3 V to +7 V
DVDD to DGND	-0.3 V to +7 V
DVDD to AVDD	-0.3 V to +0.3 V
Analog Input Voltage to AGND, IAP, IAN, IBP, IBN, ICP, ICN, VAP, VBP, VCP, VN	-6 V to +6 V
Reference Input Voltage to AGND	-0.3 V to AVDD + 0.3 V
Digital Input Voltage to DGND	-0.3 V to DVDD + 0.3 V
Digital Output Voltage to DGND	-0.3 V to DVDD + 0.3 V
Operating Temperature	
Industrial Range	-40°C to +85°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C
24-Lead SOIC, Power Dissipation	88 mW
θ_{JA} Thermal Impedance	53°C/W
Lead Temperature, Soldering	
Vapor Phase (60 sec)	215°C
Infrared (15 sec)	220°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those listed in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

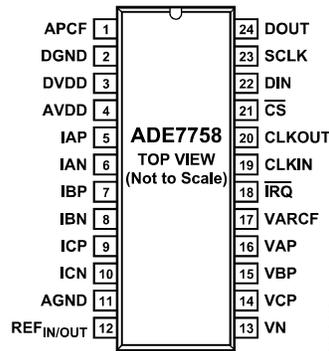


Figure 5. Pin Configuration

Table 4. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	APCF	Active Power Calibration Frequency (APCF) Logic Output. It provides active power information. This output is used for operational and calibration purposes. The full-scale output frequency can be scaled by writing to the APCFNUM and APCFDEN registers (see the Active Power Frequency Output section).
2	DGND	This provides the ground reference for the digital circuitry in the ADE7758, that is, the multiplier, filters, and digital-to-frequency converter. Because the digital return currents in the ADE7758 are small, it is acceptable to connect this pin to the analog ground plane of the whole system. However, high bus capacitance on the DOUT pin can result in noisy digital current that could affect performance.
3	DVDD	Digital Power Supply. This pin provides the supply voltage for the digital circuitry in the ADE7758. The supply voltage should be maintained at $5\text{ V} \pm 5\%$ for specified operation. This pin should be decoupled to DGND with a $10\ \mu\text{F}$ capacitor in parallel with a ceramic $100\ \text{nF}$ capacitor.
4	AVDD	Analog Power Supply. This pin provides the supply voltage for the analog circuitry in the ADE7758. The supply should be maintained at $5\text{ V} \pm 5\%$ for specified operation. Every effort should be made to minimize power supply ripple and noise at this pin by the use of proper decoupling. The Typical Performance Characteristics show the power supply rejection performance. This pin should be decoupled to AGND with a $10\ \mu\text{F}$ capacitor in parallel with a ceramic $100\ \text{nF}$ capacitor.
5, 6, 7, 8, 9, 10	IAP, IAN, IBP, IBN, ICP, ICN	Analog Inputs for Current Channel. This channel is used with the current transducer and is referenced in this document as the current channel. These inputs are fully differential voltage inputs with maximum differential input signal levels of $\pm 0.5\text{ V}$, $\pm 0.25\text{ V}$, and $\pm 0.125\text{ V}$, depending on the gain selections of the internal PGA (see the Analog Inputs section). All inputs have internal ESD protection circuitry. In addition, an overvoltage of $\pm 6\text{ V}$ can be sustained on these inputs without risk of permanent damage.
11	AGND	This pin provides the ground reference for the analog circuitry in the ADE7758, that is, ADCs, temperature sensor, and reference. This pin should be tied to the analog ground plane or the quietest ground reference in the system. This quiet ground reference should be used for all analog circuitry, for example, antialiasing filters, current, and voltage transducers. To keep ground noise around the ADE7758 to a minimum, the quiet ground plane should be connected to the digital ground plane at only one point. It is acceptable to place the entire device on the analog ground plane.
12	REF _{IN/OUT}	This pin provides access to the on-chip voltage reference. The on-chip reference has a nominal value of $2.4\text{ V} \pm 8\%$ and a typical temperature coefficient of $30\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$. An external reference source can also be connected at this pin. In either case, this pin should be decoupled to AGND with a $1\ \mu\text{F}$ ceramic capacitor.
13, 14, 15, 16	VN, VCP, VBP, VAP	Analog Inputs for the Voltage Channel. This channel is used with the voltage transducer and is referenced as the voltage channels in this document. These inputs are single-ended voltage inputs with the maximum signal level of $\pm 0.5\text{ V}$ with respect to VN for specified operation. These inputs are voltage inputs with maximum input signal levels of $\pm 0.5\text{ V}$, $\pm 0.25\text{ V}$, and $\pm 0.125\text{ V}$, depending on the gain selections of the internal PGA (see the Analog Inputs section). All inputs have internal ESD protection circuitry, and in addition, an overvoltage of $\pm 6\text{ V}$ can be sustained on these inputs without risk of permanent damage.

Pin No.	Mnemonic	Description
17	VARCF	Reactive Power Calibration Frequency Logic Output. It gives reactive power or apparent power information depending on the setting of the VACF bit of the WAVMODE register. This output is used for operational and calibration purposes. The full-scale output frequency can be scaled by writing to the VARCFNUM and VARCFDEN registers (see the Reactive Power Frequency Output section).
18	$\overline{\text{IRQ}}$	Interrupt Request Output. This is an active low open-drain logic output. Maskable interrupts include: an active energy register at half level, an apparent energy register at half level, and waveform sampling up to 26 kSPS (see the Interrupts section).
19	CLKIN	Master Clock for ADCs and Digital Signal Processing. An external clock can be provided at this logic input. Alternatively, a parallel resonant AT crystal can be connected across CLKIN and CLKOUT to provide a clock source for the ADE7758. The clock frequency for specified operation is 10 MHz. Ceramic load capacitors of a few tens of picofarad should be used with the gate oscillator circuit. Refer to the crystal manufacturer's data sheet for the load capacitance requirements
20	CLKOUT	A crystal can be connected across this pin and CLKIN as previously described to provide a clock source for the ADE7758. The CLKOUT pin can drive one CMOS load when either an external clock is supplied at CLKIN or a crystal is being used.
21	$\overline{\text{CS}}$	Chip Select. Part of the 4-wire serial interface. This active low logic input allows the ADE7758 to share the serial bus with several other devices (see the Serial Interface section).
22	DIN	Data Input for the Serial Interface. Data is shifted in at this pin on the falling edge of SCLK (see the Serial Interface section).
23	SCLK	Serial Clock Input for the Synchronous Serial Interface. All serial data transfers are synchronized to this clock (see the Serial Interface section). The SCLK has a Schmidt-trigger input for use with a clock source that has a slow edge transition time, for example, opto-isolator outputs.
24	DOUT	Data Output for the Serial Interface. Data is shifted out at this pin on the rising edge of SCLK. This logic output is normally in a high impedance state, unless it is driving data onto the serial data bus (see the Serial Interface section).

REGISTERS

COMMUNICATIONS REGISTER

The communications register is an 8-bit, write-only register that controls the serial data transfer between the ADE7758 and the host processor. All data transfer operations must begin with a write to the communications register.

The data written to the communications register determines whether the next operation is a read or a write and which register is being accessed.

Table 16 outlines the bit designations for the communications register.

Table 16. Communications Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Description
0 to 6	A0 to A6	The seven LSBs of the communications register specify the register for the data transfer operation. Table 17 lists the address of each ADE7758 on-chip register.
7	W/R	When this bit is a Logic 1, the data transfer operation immediately following the write to the communications register is interpreted as a write to the ADE7758. When this bit is a Logic 0, the data transfer operation immediately following the write to the communications register is interpreted as a read operation.

DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
W/R	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0

Table 17. ADE7758 Register List

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x00	Reserved	–				Reserved.
0x01	AWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase A. Active power is accumulated over time in this read-only register. The AWATTHR register can hold a maximum of 0.52 seconds of active energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Active Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the active energy is processed from the six analog inputs.
0x02	BWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x03	CWATTHR	R	16	S	0	Watt-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x04	AVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase A. Reactive power is accumulated over time in this read-only register. The AVARHR register can hold a maximum of 0.52 seconds of reactive energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Reactive Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the reactive energy is processed from the six analog inputs.
0x05	BVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x06	CVARHR	R	16	S	0	VAR-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x07	AVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase A. Apparent power is accumulated over time in this read-only register. The AVAHR register can hold a maximum of 1.15 seconds of apparent energy information with full-scale analog inputs before it overflows (see the Apparent Energy Calculation section). Bit 0 and Bit 1 of the COMPMODE register determine how the apparent energy is processed from the six analog inputs.
0x08	BVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase B.
0x09	CVAHR	R	16	S	0	VA-Hour Accumulation Register for Phase C.
0x0A	AIRMS	R	24	S	0	Phase A Current Channel RMS Register. The register contains the rms component of the Phase A input of the current channel. The source is selected by data bits in the mode register.
0x0B	BIRMS	R	24	S	0	Phase B Current Channel RMS Register.
0x0C	CIRMS	R	24	S	0	Phase C Current Channel RMS Register.
0x0D	AVRMS	R	24	S	0	Phase A Voltage Channel RMS Register.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x0E	BVRMS	R	24	S	0	Phase B Voltage Channel RMS Register.
0x0F	CVRMS	R	24	S	0	Phase C Voltage Channel RMS Register.
0x10	FREQ	R	12	U	0	Frequency of the Line Input Estimated by the Zero-Crossing Processing. It can also display the period of the line input. Bit 7 of the LCYCMODE register determines if the reading is frequency or period. Default is frequency. Data Bit 0 and Bit 1 of the MMODE register determine the voltage channel used for the frequency or period calculation.
0x11	TEMP	R	8	S	0	Temperature Register. This register contains the result of the latest temperature conversion. Refer to the Temperature Measurement section for details on how to interpret the content of this register.
0x12	WFORM	R	24	S	0	Waveform Register. This register contains the digitized waveform of one of the six analog inputs or the digitized power waveform. The source is selected by Data Bit 0 to Bit 4 in the WAVMODE register.
0x13	OPMODE	R/W	8	U	4	Operational Mode Register. This register defines the general configuration of the ADE7758 (see Table 18).
0x14	MMODE	R/W	8	U	0xFC	Measurement Mode Register. This register defines the channel used for period and peak detection measurements (see Table 19).
0x15	WAVMODE	R/W	8	U	0	Waveform Mode Register. This register defines the channel and sampling frequency used in the waveform sampling mode (see Table 20).
0x16	COMPmode	R/W	8	U	0x1C	Computation Mode Register. This register configures the formula applied for the energy and line active energy measurements (see Table 22).
0x17	LCYCMODE	R/W	8	U	0x78	Line Cycle Mode Register. This register configures the line cycle accumulation mode for WATT-HR, VAR-HR, and VA-Hr (see Table 23).
0x18	Mask	R/W	24	U	0	IRQ Mask Register. It determines if an interrupt event generates an active-low output at the IRQ pin (see the Interrupts section).
0x19	Status	R	24	U	0	IRQ Status Register. This register contains information regarding the source of the ADE7758 interrupts (see the Interrupts section).
0x1A	RSTATUS	R	24	U	0	IRQ Reset Status Register. Same as the STATUS register, except that its contents are reset to 0 (all flags cleared) after a read operation.
0x1B	ZXTOUT	R/W	16	U	0xFFFF	Zero-Cross Timeout Register. If no zero crossing is detected within the time period specified by this register, the interrupt request line (IRQ) goes active low for the corresponding line voltage. The maximum timeout period is 2.3 seconds (see the Zero-Crossing Detection section).
0x1C	LINECYC	R/W	16	U	0xFFFF	Line Cycle Register. The content of this register sets the number of half-line cycles that the active, reactive, and apparent energies are accumulated for in the line accumulation mode.
0x1D	SAGCYC	R/W	8	U	0xFF	SAG Line Cycle Register. This register specifies the number of consecutive half-line cycles where voltage channel input may fall below a threshold level. This register is common to the three line voltage SAG detection. The detection threshold is specified by the SAGLVL register (see the Line Voltage SAG Detection section).
0x1E	SAGLVL	R/W	8	U	0	SAG Voltage Level. This register specifies the detection threshold for the SAG event. This register is common to all three phases' line voltage SAG detections. See the description of the SAGCYC register for details.
0x1F	VPINTLVL	R/W	8	U	0xFF	Voltage Peak Level Interrupt Threshold Register. This register sets the level of the voltage peak detection. Bit 5 to Bit 7 of the MMODE register determine which phases are to be monitored. If the selected voltage phase exceeds this level, the PKV flag in the IRQ status register is set.
0x20	IPINTLVL	R/W	8	U	0xFF	Current Peak Level Interrupt Threshold Register. This register sets the level of the current peak detection. Bit 5 to Bit 7 of the MMODE register determine which phases are to be monitored. If the selected current phase exceeds this level, the PKI flag in the IRQ status register is set.
0x21	VPEAK	R	8	U	0	Voltage Peak Register. This register contains the value of the peak voltage waveform that has occurred within a fixed number of half-line cycles. The number of half-line cycles is set by the LINECYC register.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x22	IPEAK	R	8	U	0	Current Peak Register. This register holds the value of the peak current waveform that has occurred within a fixed number of half-line cycles. The number of half-line cycles is set by the LINECYC register.
0x23	Gain	R/W	8	U	0	PGA Gain Register. This register is used to adjust the gain selection for the PGA in the current and voltage channels (see the Analog Inputs section).
0x24	AVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase A VRMS Gain Register. The range of the voltage rms calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x25	BVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase B VRMS Gain Register.
0x26	CVRMSGAIN	R/W	12	S	0	Phase C VRMS Gain Register.
0x27	AIGAIN	R/W	12	S	0	Phase A Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x28	BIGAIN	R/W	12	S	0	Phase B Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x29	CIGAIN	R/W	12	S	0	Phase C Current Gain Register. This register is not recommended to be used and it should be kept at 0, its default value.
0x2A	AWG	R/W	12	S	0	Phase A Watt Gain Register. The range of the watt calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x2B	BWG	R/W	12	S	0	Phase B Watt Gain Register.
0x2C	CWG	R/W	12	S	0	Phase C Watt Gain Register.
0x2D	AVARG	R/W	12	S	0	Phase A VAR Gain Register. The range of the VAR calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x2E	BVARG	R/W	12	S	0	Phase B VAR Gain Register.
0x2F	CVARG	R/W	12	S	0	Phase C VAR Gain Register.
0x30	AVAG	R/W	12	S	0	Phase A VA Gain Register. The range of the VA calculation can be adjusted by writing to this register. It has an adjustment range of $\pm 50\%$ with a resolution of 0.0244%/LSB.
0x31	BVAG	R/W	12	S	0	Phase B VA Gain Register.
0x32	CVAG	R/W	12	S	0	Phase C VA Gain Register.
0x33	AVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase A Voltage RMS Offset Correction Register.
0x34	BVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase B Voltage RMS Offset Correction Register.
0x35	CVRMSOS	R/W	12	S	0	Phase C Voltage RMS Offset Correction Register.
0x36	AIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase A Current RMS Offset Correction Register.
0x37	BIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase B Current RMS Offset Correction Register.
0x38	CIRMSOS	R/W	12	S	0	Phase C Current RMS Offset Correction Register.
0x39	AWATTOS	R/W	12	S	0	Phase A Watt Offset Calibration Register.
0x3A	BWATTOS	R/W	12	S	0	Phase B Watt Offset Calibration Register.
0x3B	CWATTOS	R/W	12	S	0	Phase C Watt Offset Calibration Register.
0x3C	AVAROS	R/W	12	S	0	Phase A VAR Offset Calibration Register.
0x3D	BVAROS	R/W	12	S	0	Phase B VAR Offset Calibration Register.
0x3E	CVAROS	R/W	12	S	0	Phase C VAR Offset Calibration Register.
0x3F	APHCAL	R/W	7	S	0	Phase A Phase Calibration Register. The phase relationship between the current and voltage channel can be adjusted by writing to this signed 7-bit register (see the Phase Compensation section).
0x40	BPHCAL	R/W	7	S	0	Phase B Phase Calibration Register.
0x41	CPHCAL	R/W	7	S	0	Phase C Phase Calibration Register.
0x42	WDIV	R/W	8	U	0	Active Energy Register Divider.
0x43	VARDIV	R/W	8	U	0	Reactive Energy Register Divider.
0x44	VADIV	R/W	8	U	0	Apparent Energy Register Divider.

Address [A6:A0]	Name	R/W ¹	Length	Type ²	Default Value	Description
0x45	APCFNUM	R/W	16	U	0	Active Power CF Scaling Numerator Register. The content of this register is used in the numerator of the APCF output scaling calculation. Bits [15:13] indicate reverse polarity active power measurement for Phase A, Phase B, and Phase C in order; that is, Bit 15 is Phase A, Bit 14 is Phase B, and so on.
0x46	APCFDEN	R/W	12	U	0x3F	Active Power CF Scaling Denominator Register. The content of this register is used in the denominator of the APCF output scaling.
0x47	VARCFNUM	R/W	16	U	0	Reactive Power CF Scaling Numerator Register. The content of this register is used in the numerator of the VARCF output scaling. Bits [15:13] indicate reverse polarity reactive power measurement for Phase A, Phase B, and Phase C in order; that is, Bit 15 is Phase A, Bit 14 is Phase B, and so on.
0x48	VARCFDEN	R/W	12	U	0x3F	Reactive Power CF Scaling Denominator Register. The content of this register is used in the denominator of the VARCF output scaling.
0x49 to 0x7D	Reserved	–	–	–	–	Reserved.
0x7E	CHKSUM	R	8	U	–	Checksum Register. The content of this register represents the sum of all the ones in the last register read from the SPI port.
0x7F	Version	R	8	U	–	Version of the Die.

¹ This column specifies the read/write capability of the register. R = Read only register. R/W = Register that can be both read and written.

² Type decoder: U = unsigned; S = signed.

OPERATIONAL MODE REGISTER (0x13)

The general configuration of the ADE7758 is defined by writing to the OPMODE register. Table 18 summarizes the functionality of each bit in the OPMODE register.

Table 18. OPMODE Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value	Description																																				
0	DISHPF	0	The HPFs in all current channel inputs are disabled when this bit is set.																																				
1	DISLPF	0	The LPFs after the watt and VAR multipliers are disabled when this bit is set.																																				
2	DISCF	1	The frequency outputs APCF and VARCF are disabled when this bit is set.																																				
3 to 5	DISMOD	0	By setting these bits, the ADE7758 ADCs can be turned off. In normal operation, these bits should be left at Logic 0.																																				
			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">DISMOD[2:0]</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Normal operation.</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Redirect the voltage inputs to the signal paths for the current channels and the current inputs to the signal paths for the voltage channels.</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>Switch off only the current channel ADCs.</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>Switch off current channel ADCs and redirect the current input signals to the voltage channel signal paths.</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>Switch off only the voltage channel ADCs.</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>Switch off voltage channel ADCs and redirect the voltage input signals to the current channel signal paths.</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>Put the ADE7758 in sleep mode.</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>Put the ADE7758 in power-down mode (reduces I_{DD} to 1 mA typ).</td> </tr> </tbody> </table>	DISMOD[2:0]			Description	0	0	0	Normal operation.	1	0	0	Redirect the voltage inputs to the signal paths for the current channels and the current inputs to the signal paths for the voltage channels.	0	0	1	Switch off only the current channel ADCs.	1	0	1	Switch off current channel ADCs and redirect the current input signals to the voltage channel signal paths.	0	1	0	Switch off only the voltage channel ADCs.	1	1	0	Switch off voltage channel ADCs and redirect the voltage input signals to the current channel signal paths.	0	1	1	Put the ADE7758 in sleep mode.	1	1	1	Put the ADE7758 in power-down mode (reduces I _{DD} to 1 mA typ).
DISMOD[2:0]			Description																																				
0	0	0	Normal operation.																																				
1	0	0	Redirect the voltage inputs to the signal paths for the current channels and the current inputs to the signal paths for the voltage channels.																																				
0	0	1	Switch off only the current channel ADCs.																																				
1	0	1	Switch off current channel ADCs and redirect the current input signals to the voltage channel signal paths.																																				
0	1	0	Switch off only the voltage channel ADCs.																																				
1	1	0	Switch off voltage channel ADCs and redirect the voltage input signals to the current channel signal paths.																																				
0	1	1	Put the ADE7758 in sleep mode.																																				
1	1	1	Put the ADE7758 in power-down mode (reduces I _{DD} to 1 mA typ).																																				
6	SWRST	0	Software Chip Reset. A data transfer to the ADE7758 should not take place for at least 166 μs after a software reset.																																				
7	Reserved	0	This should be left at 0.																																				

MEASUREMENT MODE REGISTER (0x14)

The configuration of the PERIOD and peak measurements made by the ADE7758 is defined by writing to the MMODE register. Table 19 summarizes the functionality of each bit in the MMODE register.

Table 19. MMODE Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value	Description															
0 to 1	FREQSEL	0	These bits are used to select the source of the measurement of the voltage line frequency.															
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>FREQSEL1</th> <th>FREQSEL0</th> <th>Source</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Phase A</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>Phase B</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>Phase C</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Reserved</td> </tr> </tbody> </table>	FREQSEL1	FREQSEL0	Source	0	0	Phase A	0	1	Phase B	1	0	Phase C	1	1	Reserved
FREQSEL1	FREQSEL0	Source																
0	0	Phase A																
0	1	Phase B																
1	0	Phase C																
1	1	Reserved																
2 to 4	PEAKSEL	7	These bits select the phases used for the voltage and current peak registers. Setting Bit 2 switches the IPEAK and VPEAK registers to hold the absolute values of the largest current and voltage waveform (over a fixed number of half-line cycles) from Phase A. The number of half-line cycles is determined by the content of the LINECYC register. At the end of the LINECYC number of half-line cycles, the content of the registers is replaced with the new peak values. Similarly, setting Bit 3 turns on the peak detection for Phase B, and Bit 4 for Phase C. Note that if more than one bit is set, the VPEAK and IPEAK registers can hold values from two different phases, that is, the voltage and current peak are independently processed (see the Peak Current Detection section).															
5 to 7	PKIRQSEL	7	These bits select the phases used for the peak interrupt detection. Setting Bit 5 switches on the monitoring of the absolute current and voltage waveform to Phase A. Similarly, setting Bit 6 turns on the waveform detection for Phase B, and Bit 7 for Phase C. Note that more than one bit can be set for detection on multiple phases. If the absolute values of the voltage or current waveform samples in the selected phases exceeds the preset level specified in the VPINTLVL or IPINTLVL registers the corresponding bit(s) in the STATUS registers are set (see the Peak Current Detection section).															

WAVEFORM MODE REGISTER (0x15)

The waveform sampling mode of the ADE7758 is defined by writing to the WAVMODE register. Table 20 summarizes the functionality of each bit in the WAVMODE register.

Table 20. WAVMODE Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value	Description	
0 to 1	PHSEL	0	These bits are used to select the phase of the waveform sample.	
			PHSEL[1:0]	Source
			0 0	Phase A
			0 1	Phase B
			1 0	Phase C
1 1	Reserved			
2 to 4	WAVSEL	0	These bits are used to select the type of waveform.	
			WAVSEL[2:0]	Source
			0 0 0	Current
			0 0 1	Voltage
			0 1 0	Active Power Multiplier Output
			0 1 1	Reactive Power Multiplier Output
			1 0 0	VA Multiplier Output
Others-	Reserved			
5 to 6	DTRT	0	These bits are used to select the data rate.	
			DTRT[1:0]	Update Rate
			0 0	26.04 kSPS (CLKIN/3/128)
			0 1	13.02 kSPS (CLKIN/3/256)
			1 0	6.51 kSPS (CLKIN/3/512)
1 1	3.25 kSPS (CLKIN/3/1024)			
7	VACF	0	Setting this bit to Logic 1 switches the VARCF output pin to an output frequency that is proportional to the total apparent power (VA). In the default state, Logic 0, the VARCF pin outputs a frequency proportional to the total reactive power (VAR).	

COMPUTATIONAL MODE REGISTER (0x16)

The computational method of the ADE7758 is defined by writing to the COMPMODE register. Table 21 summarizes the functionality of each bit in the COMPMODE register.

Table 21. COMPMODE Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value	Description			
0 to 1	CONSEL	0	These bits are used to select the input to the energy accumulation registers. CONSEL[1:0] = 11 is reserved. \overline{IA} , \overline{IB} , and \overline{IC} are IA, IB, and IC phase shifted by -90° , respectively.			
			Registers	CONSEL[1, 0] = 00	CONSEL[1, 0] = 01	CONSEL[1, 0] = 10
			AWATTHR	$VA \times IA$	$VA \times (IA - IB)$	$VA \times (IA - IB)$
			BWATTHR	$VB \times IB$	0	0
			CWATTHR	$VC \times IC$	$VC \times (IC - IB)$	$VC \times IC$
			AVARHR	$VA \times \overline{IA}$	$VA \times (\overline{IA} - \overline{IB})$	$VA \times (IA - IB)$
			BVARHR	$VB \times \overline{IB}$	0	0
			CVARHR	$VC \times \overline{IC}$	$VC \times (\overline{IC} - \overline{IB})$	$VC \times IC$
			AVAHR	$VA_{RMS} \times IA_{RMS}$	$VA_{RMS} \times IA_{RMS}$	$VA_{RMS} \times A_{RMS}$
			BVAHR	$VB_{RMS} \times IB_{RMS}$	$(VA_{RMS} + VC_{RMS})/2 \times IB_{RMS}$	$VA_{RMS} \times IB_{RMS}$
CVAHR	$VC_{RMS} \times IC_{RMS}$	$VC_{RMS} \times IC_{RMS}$	$VC_{RMS} \times IC_{RMS}$			
2 to 4	TERMSEL	7	These bits are used to select the phases to be included in the APCF and VARCF pulse outputs. Setting Bit 2 selects Phase A (the inputs to AWATTHR and AVARHR registers) to be included. Bit 3 and Bit 4 are for Phase B and Phase C, respectively. Setting all three bits enables the sum of all three phases to be included in the frequency outputs (see the Active Power Frequency Output and the Reactive Power Frequency Output sections).			
5	ABS	0	Setting this bit places the APCF output pin in absolute only mode. Namely, the APCF output frequency is proportional to the sum of the absolute values of the watt-hour accumulation registers (AWATTHR, BWATTHR, and CWATTHR). Note that this bit only affects the APCF pin and has no effect on the content of the corresponding registers.			
6	SAVAR	0	Setting this bit places the VARCF output pin in the signed adjusted mode. Namely, the VARCF output frequency is proportional to the sign-adjusted sum of the VAR-hour accumulation registers (AVARHR, BVARHR, and CVARHR). The sign of the VAR is determined from the sign of the watt calculation from the corresponding phase, that is, the sign of the VAR is flipped if the sign of the watt is negative, and if the watt is positive, there is no change to the sign of the VAR. Note that this bit only affects the VARCF pin and has no effect on the content of the corresponding registers.			
7	NOLOAD	0	Setting this bit activates the no-load threshold in the ADE7758.			

LINE CYCLE ACCUMULATION MODE REGISTER (0x17)

The functionalities involved the line-cycle accumulation mode in the [ADE7758](#) are defined by writing to the LCYCMODE register. Table 22 summarizes the functionality of each bit in the LCYCMODE register.

Table 22. LCYCMODE Register

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value	Description
0	LWATT	0	Setting this bit places the watt-hour accumulation registers (AWATTHR, BWATTHR, and CWATTHR registers) into line-cycle accumulation mode.
1	LVAR	0	Setting this bit places the VAR-hour accumulation registers (AVARHR, BVARHR, and CVARHR registers) into line-cycle accumulation mode.
2	LVA	0	Setting this bit places the VA-hour accumulation registers (AVAHR, BVAHR, and CVAHR registers) into line-cycle accumulation mode.
3 to 5	ZXSEL	7	These bits select the phases used for counting the number of zero crossings in the line-cycle accumulation mode. Bit 3, Bit 4, and Bit 5 select Phase A, Phase B, and Phase C, respectively. More than one phase can be selected for the zero-crossing detection, and the accumulation time is shortened accordingly.
6	RSTREAD	1	Setting this bit enables the read-with-reset for all the WATTHR, VARHR, and VAHR registers for all three phases, that is, a read to those registers resets the registers to 0 after the content of the registers have been read. This bit should be set to Logic 0 when the LWATT, LVAR, or LVA bits are set to Logic 1.
7	FREQSEL	0	Setting this bit causes the FREQ (0x10) register to display the period, instead of the frequency of the line input.

INTERRUPT MASK REGISTER (0x18)

When an interrupt event occurs in the ADE7758, the $\overline{\text{IRQ}}$ logic output goes active low if the mask bit for this event is Logic 1 in the MASK register. The $\overline{\text{IRQ}}$ logic output is reset to its default collector open state when the RSTATUS register is read. Table 23 describes the function of each bit in the interrupt mask register.

Table 23. Function of Each Bit in the Interrupt Mask Register

Bit Location	Interrupt Flag	Default Value	Description
0	AEHF	0	Enables an interrupt when there is a change in Bit 14 of any one of the three WATTHR registers, that is, the WATTHR register is half full.
1	REHF	0	Enables an interrupt when there is a change in Bit 14 of any one of the three VARHR registers, that is, the VARHR register is half full.
2	VAEHF	0	Enables an interrupt when there is a 0 to 1 transition in the MSB of any one of the three VAHR registers, that is, the VAHR register is half full.
3	SAGA	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase A.
4	SAGB	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase B.
5	SAGC	0	Enables an interrupt when there is a SAG on the line voltage of the Phase C.
6	ZXTOA	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase A.
7	ZXTOB	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase B.
8	ZXTOC	0	Enables an interrupt when there is a zero-crossing timeout detection on Phase C.
9	ZXA	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase A (see the Zero-Crossing Detection section).
10	ZXB	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase B (see the Zero-Crossing Detection section).
11	ZXC	0	Enables an interrupt when there is a zero crossing in the voltage channel of Phase C (see the Zero-Crossing Detection section).
12	LENERGY	0	Enables an interrupt when the energy accumulations over LINECYC are finished.
13	Reserved	0	Reserved.
14	PKV	0	Enables an interrupt when the voltage input selected in the MMODE register is above the value in the VPINTLVL register.
15	PKI	0	Enables an interrupt when the current input selected in the MMODE register is above the value in the IPINTLVL register.
16	WFSM	0	Enables an interrupt when data is present in the WAVEMODE register.
17	REVPAP	0	Enables an interrupt when there is a sign change in the watt calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
18	REVPRP	0	Enables an interrupt when there is a sign change in the VAR calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
19	SEQERR	0	Enables an interrupt when the zero crossing from Phase A is followed not by the zero crossing of Phase C but with that of Phase B.

INTERRUPT STATUS REGISTER (0x19)/RESET INTERRUPT STATUS REGISTER (0x1A)

The interrupt status register is used to determine the source of an interrupt event. When an interrupt event occurs in the [ADE7758](#), the corresponding flag in the interrupt status register is set. The $\overline{\text{IRQ}}$ pin goes active low if the corresponding bit in the interrupt mask register is set. When the MCU services the interrupt, it must first carry out a read from the interrupt status register to determine the source of the interrupt. All the interrupts in the interrupt status register stay at their logic high state after an event occurs. The state of the interrupt bit in the interrupt status register is reset to its default value once the reset interrupt status register is read.

Table 24. Interrupt Status Register

Bit Location	Interrupt Flag	Default Value	Event Description
0	AEHF	0	Indicates that an interrupt was caused by a change in Bit 14 among any one of the three WATTHR registers, that is, the WATTHR register is half full.
1	REHF	0	Indicates that an interrupt was caused by a change in Bit 14 among any one of the three VARHR registers, that is, the VARHR register is half full.
2	VAEHF	0	Indicates that an interrupt was caused by a 0 to 1 transition in Bit 15 among any one of the three VAHR registers, that is, the VAHR register is half full.
3	SAGA	0	Indicates that an interrupt was caused by a SAG on the line voltage of the Phase A.
4	SAGB	0	Indicates that an interrupt was caused by a SAG on the line voltage of the Phase B.
5	SAGC	0	Indicates that an interrupt was caused by a SAG on the line voltage of the Phase C.
6	ZXTOA	0	Indicates that an interrupt was caused by a missing zero crossing on the line voltage of the Phase A.
7	ZXTOB	0	Indicates that an interrupt was caused by a missing zero crossing on the line voltage of the Phase B.
8	ZXTOC	0	Indicates that an interrupt was caused by a missing zero crossing on the line voltage of the Phase C.
9	ZXA	0	Indicates a detection of a rising edge zero crossing in the voltage channel of Phase A.
10	ZXB	0	Indicates a detection of a rising edge zero crossing in the voltage channel of Phase B.
11	ZXC	0	Indicates a detection of a rising edge zero crossing in the voltage channel of Phase C.
12	LENERGY	0	In line energy accumulation, indicates the end of an integration over an integer number of half-line cycles (LINECYC). See the Calibration section.
13	Reset	1	After Bit 6 (SWRST) in OPMODE register is set to 1, the ADE7758 enters software reset. This bit becomes 1 after 166 μsec , indicating the reset process has ended and the registers are set to their default values. It stays 1 until the reset interrupt status register is read and then becomes 0.
14	PKV	0	Indicates that an interrupt was caused when the selected voltage input is above the value in the VPINTLVL register.
15	PKI	0	Indicates that an interrupt was caused when the selected current input is above the value in the IPINTLVL register.
16	WFSM	0	Indicates that new data is present in the waveform register.
17	REVPAP	0	Indicates that an interrupt was caused by a sign change in the watt calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
18	REVPRP	0	Indicates that an interrupt was caused by a sign change in the VAR calculation among any one of the phases specified by the TERMSEL bits in the COMPMODE register.
19	SEQERR	0	Indicates that an interrupt was caused by a zero crossing from Phase A followed not by the zero crossing of Phase C but by that of Phase B.

con esto el usuario puede determinar si un error ocurrió en la última operación de lectura.

3.2 CALIBRACIÓN.

Para la calibración del *IC* medidor energía *ADE7758* es necesario un medidor de referencia o una fuente precisa. Hay dos formas de calibrar el integrado: usando la salida de pulsos **APCF** y **VARCF** o usando el modo de acumulación por ciclo de línea.

Si se usa la salida de pulsos se requiere un medidor de referencia y se calibra cada fase por separado, y, si se hace la calibración usando el modo de acumulación por ciclo de línea se necesita una fuente precisa, teniendo la ventaja de llevar a cabo la calibración de las tres fases simultáneamente.

Llevar a cabo la calibración del *ADE7758* tiene dos objetivos: establecer la constante *impulsos/kW-hr* en la salida de pulsos y obtener la constante que relacione el peso del *bit* menos significativo en los registros de energía y valor eficaz con las medidas *WATT-hr*, *VAR-hr*, *VA-hr*, amperios y voltios. Adicionalmente la calibración compensa variaciones en el diseño del medidor, así como desfases y efectos de *offset* debido al sensor de corriente o a otros dispositivos de entrada.

Para el desarrollo de este proyecto de grado se usó la calibración utilizando el modo de acumulación por ciclo de línea, para llevar a cabo la calibración de las 3 fases simultáneamente.

A continuación se muestra el diagrama de flujo general y la explicación detallada del proceso de calibración del *ADE7758* usando el modo de acumulación de línea.

Cabe aclarar que para efectos de la aplicación que se desarrolló en este proyecto no se realizó la calibración de la fase de las señales de tensión y corriente dado que los sensores de corriente no introducen ningún desfase. Se

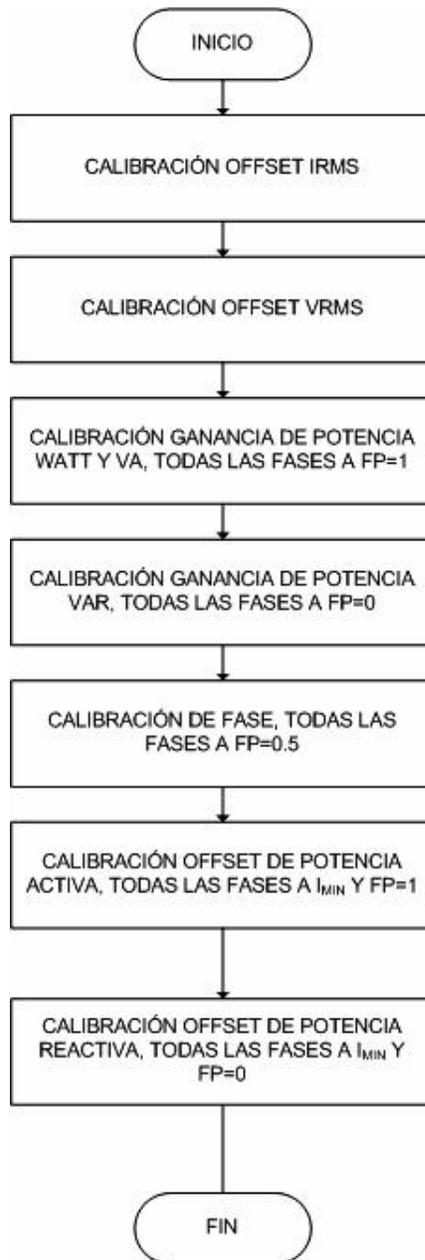
deja indicado por si en un desarrollo posterior se usan otro tipo de sensores de corriente.

3.2.1. CALIBRACIÓN USANDO EL MODO DE ACUMULACIÓN DE LÍNEA EN EL ADE7758.

El modo de acumulación por ciclo de línea configura los nueve registros de energía para que acumulen un monto de energía durante un periodo de tiempo igual a un número entero de medios ciclos de línea, hasta que ocurra la interrupción. El beneficio de usar este método es que desaparece la componente senoidal en la potencia activa.

La figura 34 muestra el proceso de calibración del *ADE7758*.

Figura 34. Calibración usando el modo de ciclo de línea.



Fuente[Autores]

3.2.1.1. CALIBRACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO IRMS Y VRMS.

Se usa para eliminar ruido y efectos de desplazamiento presentes en las entradas del ADE7758.

La calibración del desplazamiento de la señal consiste básicamente en sincronizar la lectura de los registros de valor eficaz de corriente y tensión con el cruce por cero de la señal de tensión a la entrada del *ADE7758*, se leen los registros de valor eficaz de corriente y tensión, se saca un promedio de *n* lecturas para diferentes señales de tensión y corriente en las entradas del *ADE7758* para después calcular el valor que se escribe en los registros de corrección de *offset xVRMSOS* e *xIRMSOS*.

La figura 35 muestra el diagrama de flujo del programa implementado en el microcontrolador para la calibración del desplazamiento de corriente eficaz y de tensión eficaz.

En el **PASO 11** el valor a escribir en los registros *xVRMSOS* e *xIRMSOS* se calcula de las siguientes ecuaciones:

Ecuación 58.

$$IRMSOS = -\frac{1}{16,384} \times \frac{(I_{TEST}^2 \times I_{MAX/X-RMS}^2) - (I_{MAX/X}^2 \times I_{TEST-RMS}^2)}{I_{MAX/X}^2 - I_{TEST}^2}$$

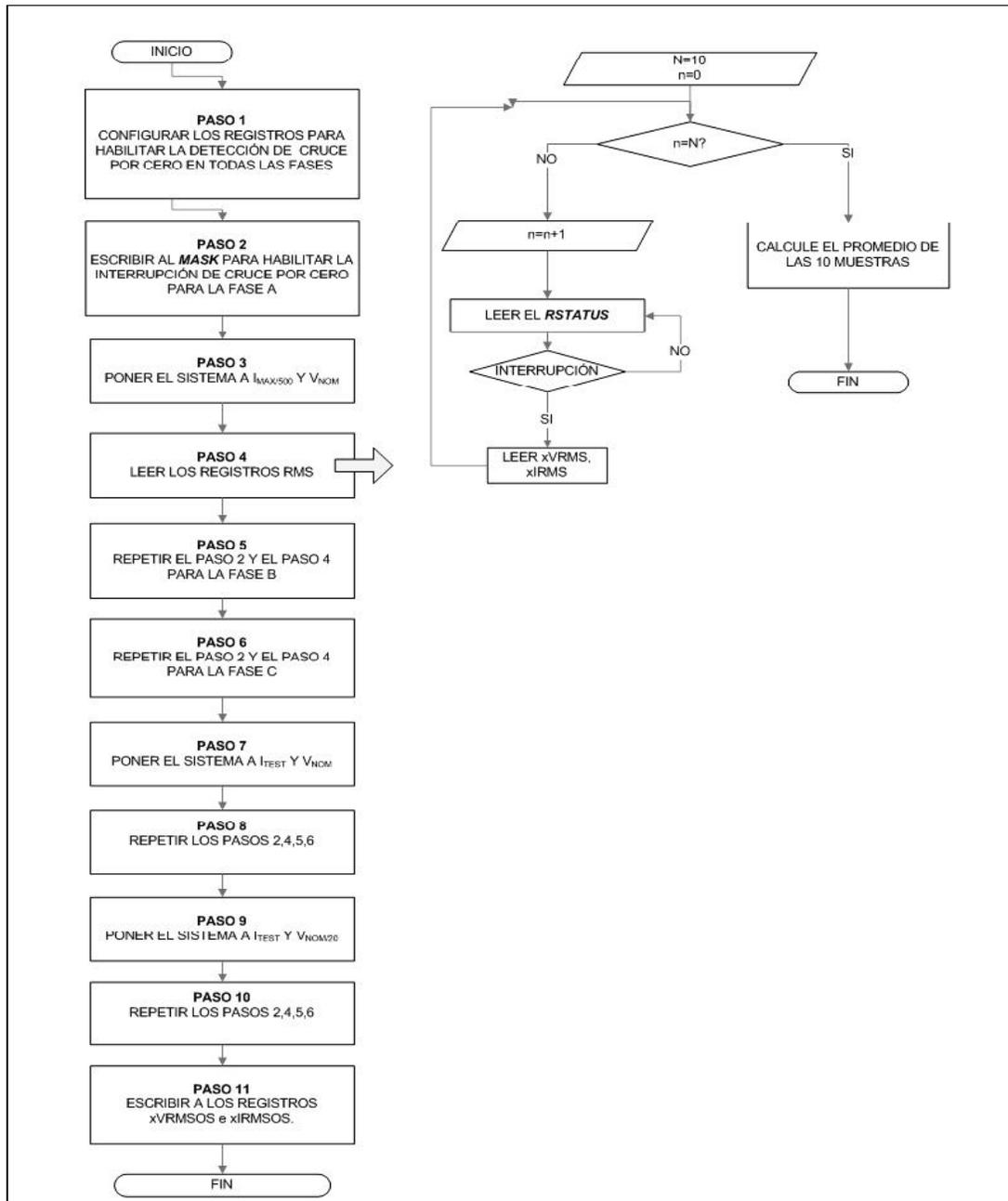
Donde, $I_{TEST-RMS}$ e $I_{MAX/X-RMS}$ son los valores de los registros *rms* sin corrección, para las entradas I_{TEST} e $I_{MAX/500}$ respectivamente.

Ecuación 59.

$$VRMSOS = \frac{1}{64} \times \frac{V_{NOM} \times V_{NOM/20-RMS} - V_{NOM/20} \times V_{NOM-RMS}}{V_{NOM/20} - V_{NOM}}$$

Donde, $V_{NOM-RMS}$ y $V_{NOM/20-RMS}$ son los valores de los registros *rms* sin corrección, para las entradas V_{NOM} y $V_{NOM/20}$ respectivamente.

Figura 35. Diagrama de flujo para la calibración del offset rms.



Fuente[Autores]

3.2.1.2. CALIBRACIÓN DE LA GANANCIA DE POTENCIA.

La calibración de ganancia de potencia se usa para determinar las constantes de medición ***Wh/LSB, VARh/LSB, VAh/LSB***.

A continuación en la figura 36 muestra el diagrama de flujo del programa usado para la calibración de la ganancia de potencia, después se describen los pasos que necesitan una explicación detallada.

PASO 12.

Las constantes de medición se hallan de las siguientes ecuaciones:

Para la medición de potencia activa:

Ecuación 60.

$$\frac{Wh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xWATTHR}$$

Para la medición de potencia reactiva:

Ecuación 61.

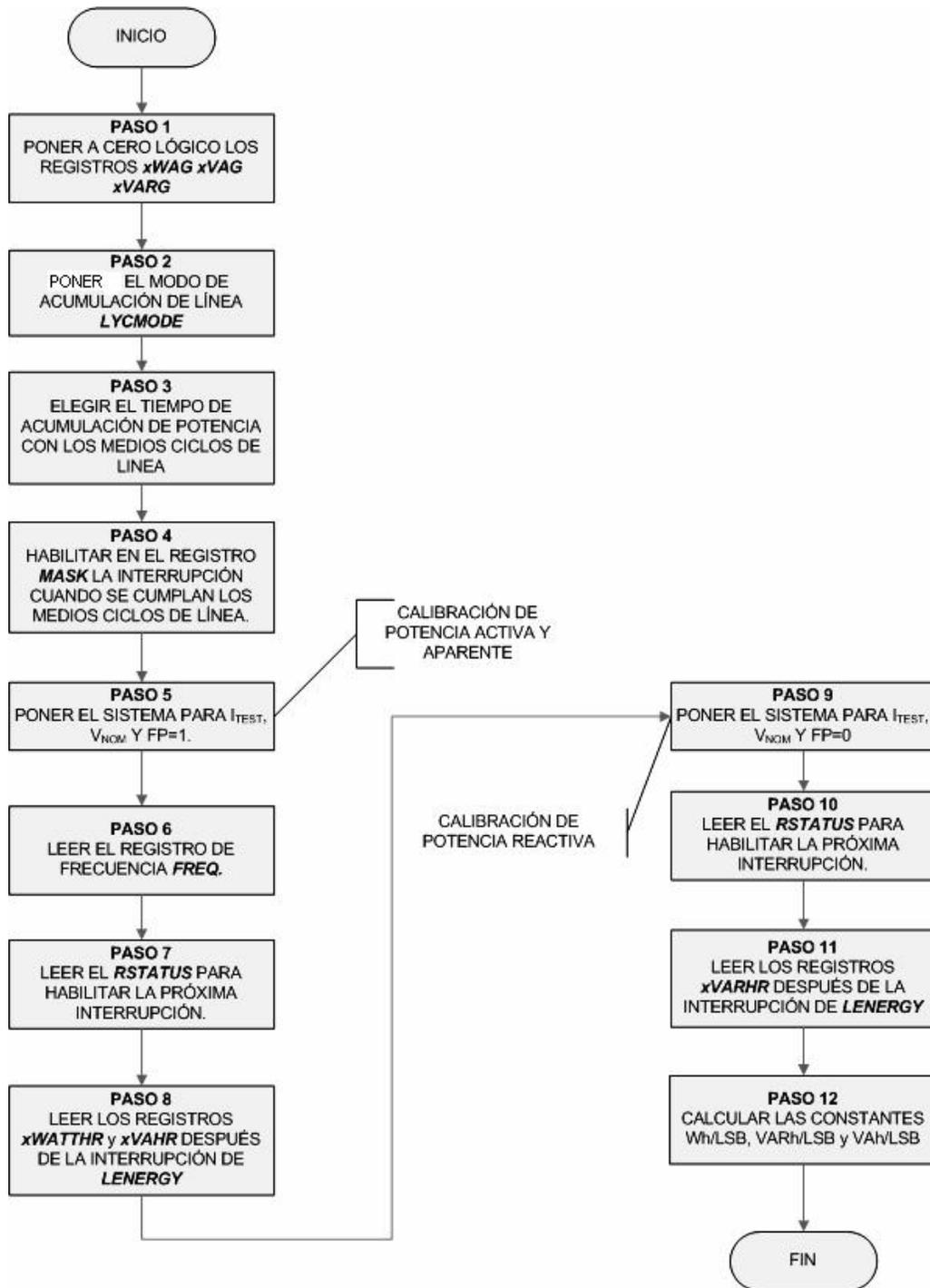
$$\frac{VAh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xVAHR}$$

Para la medición de potencia aparente:

Ecuación 62.

$$\frac{VARh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xVARHR}$$

Figura 36. Diagrama de flujo para la calibración de la ganancia de potencia.



Fuente[Autores]

PASO 12.

Las constantes de medición se hallan de las siguientes ecuaciones:

Para la medición de potencia activa:

Ecuación 60.

$$\frac{Wh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xWATTHR}$$

Para la medición de potencia reactiva:

Ecuación 61.

$$\frac{VAh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xVAHR}$$

Para la medición de potencia aparente:

Ecuación 62.

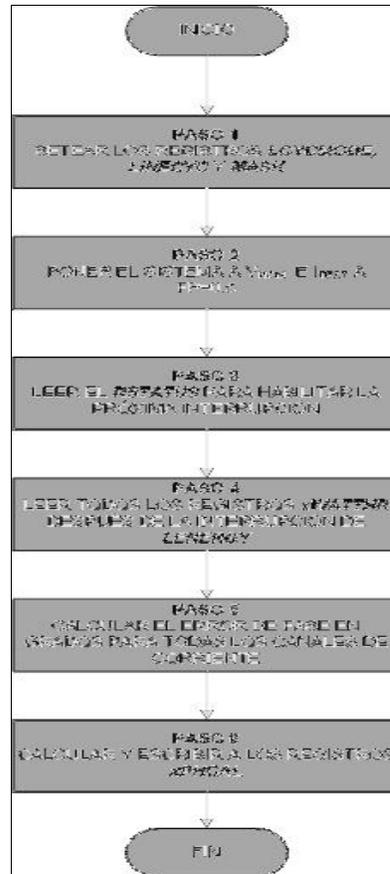
$$\frac{VARh}{LSB} = \frac{I_{TEST} \times V_{NOM} \times AccumTime}{3,600 \times xVARHR}$$

3.2.1.3. CALIBRACIÓN DE FASE.

El **ADE7758** incluye un registro de calibración de fase en los canales de corriente, en el que se incluyen pequeños retardos de tiempo de ancho variable, en dirección positiva o negativa para corregir pequeños desfases a la entrada de los mismos. Grandes desfases deben ser corregidos con el filtro *antialiasing* a la entrada de los canales de corriente.

La figura 37 muestra el diagrama de flujo del programa implementado en el microcontrolador para calibrar la fase de las señales de tensión y corriente.

Figura 37. Diagrama de flujo para la calibración de la ganancia de fase.



Fuente[Autores]

PASO 5.

Los registros $xWATTHR$ se leen y se comparan con ellos mismos a $PF=1$, para obtener un error que se calcula según la ecuación 63, se espera la interrupción para leer los registros $xWATTHR$.

Ecuación 63.

$$Error = \frac{xWATTHR_{PF=5} - \frac{xWATTHR_{PF=1}}{2}}{\frac{xWATTHR_{PF=1}}{2}}$$

El error de fase en grados se calcula según la ecuación:

Ecuación 64.

$$\text{Error de fase}(\circ) = -\text{Arcsin}\left(\frac{\text{Error}}{\sqrt{3}}\right)$$

PASO 6.

El valor a escribir a los registros **xPHCAL** se calcula según la ecuación:

Ecuación 65.

$$\frac{1}{\text{xPHCAL}} = \text{Arcsin}\left(\frac{\text{Error}}{\sqrt{3}}\right) \times \frac{9.6 \mu\text{s}}{2.4 \mu\text{s}} \times \frac{360^\circ}{\text{FREQ}[11:0]}$$

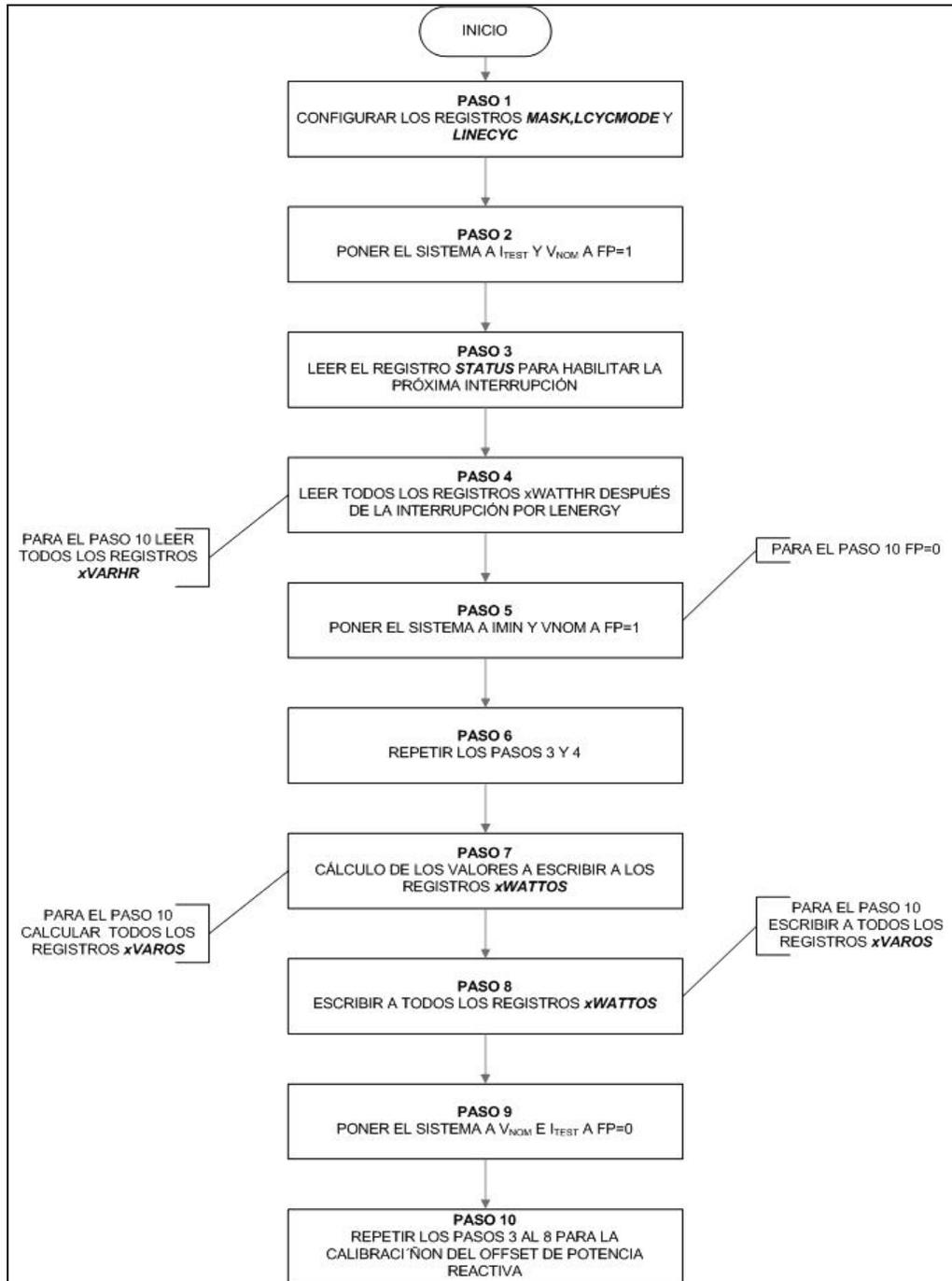
3.2.1.4. CALIBRACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE POTENCIA.

La calibración del *offset* de potencia debe ser usada para destacar el rendimiento del **ADE7758** sobre un rango dinámico de 1000 a 1. Esta se hace a un valor cercano a la corriente mínima. Cabe anotar que el ADE7758 sólo calibra *offset* de potencia activa y reactiva, el *offset* de potencia aparente se ajusta en la calibración del valor eficaz de corriente y tensión.

El ADE7758 tiene tres registros de calibración del *offset* de potencia activa **xWATTOS** y tres registros para la calibración del *offset* de potencia reactiva **xVAROS**; uno para cada fase de potencia.

En la figura 38 se muestra el diagrama de flujo para la calibración del *offset* de potencia en el **ADE7758**, a continuación de la grafica se explican los pasos que necesitan una descripción más detallada.

Figura 38. Diagrama de flujo para la calibración de la ganancia de potencia.



Fuente[Autores]

PASO 7.

El valor a escribir en los registros **xWATTOS** se calcula según las siguientes ecuaciones:

Ecuación 66.

$$Offset = \frac{xWATTHR_{I_{MIN}} \times I_{TEST} - xWATTHR_{I_{TEST}} \times I_{MIN}}{I_{MIN} - I_{TEST}}$$

Ecuación 67.

$$xWATTOS[11:0] = \frac{Offset \times 4}{AccumTime \times CLKIN} \times 2^{29}$$

Donde *AccumTime* está definido en la ecuación 60, **xWATTHR_{I_{TEST}}** es el valor en el registro de energía activa a *I_{TEST}*, y **xWATTHR_{I_{MIN}}** es el valor del registro de energía activa a *I_{MIN}*.

PASO 11.

El valor a escribir en los registros de energía reactiva **xVAROS** se calcula según las siguientes ecuaciones:

Ecuación 68.

$$Offset = \frac{xVARHR \times I_{TEST} - xVARHR \times I_{MIN}}{I_{MIN} - I_{TEST}}$$

Ecuación 69.

$$xVAROS[11:0] + \frac{Offset \times 4}{AccumTime \times CLKIN} \times 2^{29}$$