

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Reducción del consumo eléctrico para la independencia energética en la subestación del
Instituto Costarricense de Electricidad El Coco**



**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
con el grado académico de Licenciatura**

William Trigueros Silva

Cartago, Febrero de 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Reducción del consumo eléctrico para la independencia energética en la subestación del Instituto Costarricense de Electricidad El Coco, realizado por el señor William Andrés Trigueros Silva y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



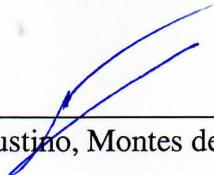
Ing. Leonardo, Rivas Arce

Profesor lector



Ing. Esteban, Baradín Méndez

Profesor lector



Ing. Faustino, Montes de Oca Murillo

Profesor asesor

Cartago, 06 de febrero de 2017

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



William Andrés Trigueros Silva

Cédula: 1-1446-0843

Resumen

En la actualidad el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se encuentra inmerso en una política de desarrollo de proyectos de generación eléctrica mediante el uso de fuentes renovables, con el fin de lograr la certificación de carbono neutralidad en todas sus empresas, esto dentro del llamado hecho por el gobierno de Costa Rica en el año 2007 para convertir a Costa Rica en un país carbono Neutral para el año 2021.

Debido a esto el Negocio de Transmisión del ICE, está estudiando la posibilidad de incursionar en el tema de la generación eléctrica mediante el uso de sistemas de energías limpias, para el consumo del servicio propio de la subestación El Coco.

En el desarrollo del proyecto se espera lograr la reducción en la facturación del servicio propio para que, la implementación del sistema de generación eléctrica sea aún más rentable. La reducción esperada es de al menos un 20% del consumo actual.

Esta reducción se plantea mediante la sustitución de equipos con baja eficiencia eléctrica, por unos más modernos y que posean una mayor, otra forma de generar un ahorro es mediante el control automático de procesos que en este momento son ineficientes, por ejemplo el enfriamiento forzado de los transformadores.

Al final del presente proyecto se logró demostrar matemáticamente un ahorro alrededor de un 70% del consumo actual, este ahorro es un aproximado y puede variar según sean el uso de los equipos que se diseñaron para lograr tal fin.

Palabras claves: Ahorro energético, eficiencia energética, variador de frecuencia, energías renovables, control automático.

Abstract

Today the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) is immersed in a policy of developed of electricity generation projects through the use of renewable sources, in order to achieve the carbon neutrality certification in all yours companies, this because the government of Costa Rica in 2007 make a call to turn Costa Rica into a carbon neutral country to 2021.

Due to this, the transmission business of ICE, is studying the possibility to generate electricity using clean energy systems, for the consumption of the own service of the substation El Coco.

In the development of this project its hope to achieve the reduction in the billing of the own service, so that the implementation of the electric generation system is even more profitable. The expected reduction is at least 20% of the current consumption.

This reduction is posed by the substitution of equipment with low electrical efficiency, by some more modern and have a greater, another way to save electricity is by the control automatic of inefficient process, for example the forced cooling of the transformers.

At the end of the present project it was possible to demonstrate a saving around 70% of the current consumption, this saving is an approximate and can vary according to the use of the equipment that are in use to this.

Keywords: Energy saving, energy efficiency, variable frequency drive, renewable energy, automatic control.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres William Trigueros Guevara e Isabel Silva Meza, por el apoyo que me han dado durante toda mi vida, por sus valiosos ejemplos de trabajo, honradez, valores éticos y morales y su amor incondicional. Por enseñarme las bases de vivir y estar siempre a mi lado apoyándome en mí caminar.

A mi hermana Isabel Cristina Trigueros Silva, por estar siempre a mi lado, a pesar de nuestros desacuerdos de niños, compañera inseparable del camino, que también me proporcionó la inmensa alegría de ser tío de la hermosa Dariana, luz que nos alumbra el camino, hace más fáciles nuestros días y con su bella sonrisa borra cualquier sinsabor.

Agradecimiento

Agradezco a toda mi familia: padres, abuelitas, tías y tíos, primos, que de diferentes formas han apoyado mi caminar, a mis amigos viejos y nuevos que han compartido mis aficiones, momentos buenos y no tan buenos, ratos de estudio y esparcimiento y que estoy seguro que hoy se sienten orgullosos y solidarios por el triunfo alcanzado.

A las empresas Siemens y Aires Beirute por su gran disposición y colaboración para que este trabajo fuera un éxito.

Al Instituto Costarricense de Electricidad, por confiar en que era posible realizar el estudio y darme la oportunidad de formar parte de su personal.

A los compañeros de la Subestación El Coco, de quienes aprendí mucho durante el tiempo que estuve laborando en el proyecto, gracias por la solidaridad, apoyo y grandes aportes.

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde aprendí, sufrí, reí, muchas horas no pudiendo dormir preparándome para exámenes o haciendo trabajos que presentar, teniendo que trabajar, pero les puedo decir que valió la pena, es un orgullo ser egresado de tan magna institución.

ÍNDICE GENERAL

Declaración de autenticidad.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Dedicatoria	vi
Agradecimiento	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE FIGURAS	xi
ÍNDICE TABLAS	xiv
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Entorno del proyecto	1
1.2. Definición del problema.....	4
1.2.1. Síntesis del problema	4
1.3. Enfoque de la solución	4
Capítulo 2. Meta y Objetivos	6
2.1. Meta.....	6
2.2. Objetivo general	6
2.3. Objetivo específicos	6
Capítulo 3. Marco teórico	7
3.1. Descripción del proceso a mejorar.....	7
3.2. Antecedentes bibliográficos.....	8
3.3. Descripción de los principales equipos y principios electrónicos relacionados con la solución del problema.....	8
3.3.1. Potencia.....	8

3.3.2. Energía	10
3.3.3. Aires acondicionados.....	10
3.3.4. Calefacciones	11
3.3.5. Ventiladores enfriamiento de los transformadores	12
3.3.6. Lámparas HID.....	13
3.3.7. Lámparas LED	13
3.3.8. Arduino	14
3.3.9. Fluke 337	15
3.3.10. Medidor ION Access 9610	16
3.3.11. Siprotec 6MD662.....	16
3.3.12. Variador de frecuencia.....	17
3.3.13. Control automático	18
3.3.14. Relé programable	18
3.3.15. SCADA.....	19
3.3.16. Tiristor	19
3.3.17. Transistor MOSFET	20
3.3.18. PWM.....	21
Capítulo 4. Procedimiento metodológico	23
4.1. Reconocimiento y definición del problema	23
4.2. Obtención y análisis de información.....	23
4.3. Diseño de la solución	24
Capítulo 5. Descripción detallada de la solución	26
5.1. Obtención del consumo de las cargas de la subestación	26
5.2. Posibles soluciones al problema.....	32
5.2.1. Calefacciones	32
5.2.2. Iluminación subestación y perimetral	33
5.2.3. Aires acondicionados.....	34

5.2.4. Ventiladores de los transformadores.....	36
5.3. Solución seleccionada	36
5.3.1. Calefacciones	36
5.3.2. Iluminación subestación y perimetral	38
5.3.3. Aires acondicionados	40
5.3.4. Ventiladores de los transformadores.....	44
5.3.5. Otras posibles reducciones.....	60
5.4. Estudio de la rentabilidad del proyecto	61
5.4.1. Calefacciones	63
5.4.2. Iluminación subestación y perimetral	66
5.4.3. Aires acondicionados.....	68
5.4.4. Ventiladores de los transformadores.....	70
5.4.5. Rentabilidad del proyecto total	72
Capítulo 6. Análisis de resultados	76
6.1. Conclusiones.	78
6.2. Recomendaciones.....	79
Referencias bibliográficas	80
Apéndice A.....	82
Apéndice A.2. Diagramas de flujo de los programas realizados para la obtención de datos con el Arduino.	82
Apéndice A.3. Planos eléctricos.....	83
Apéndice A.4. Distribución de la iluminación en la subestación El Coco.	96
Anexo B	98
Anexo B.1. Hoja de datos de la lámpara a utilizar	98

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Costos de operación y mantenimiento estimados para el Plan de Expansión de Transmisión 2015-2025.	2
Figura 3.1. Triángulo de potencias.	9
Figura 3.2. Aire acondicionado presente en el cuarto de control.	11
Figura 3.3. Ejemplo de una calefacción de 45W.	12
Figura 3.4. Ventilador de enfriamiento de los transformadores.	12
Figura 3.5. Lámpara HID para alumbrado de exteriores.	13
Figura 3.6. Lámpara LED de alta intensidad para alumbrado público.	14
Figura 3.7. Placa Arduino UNO.	15
Figura 3.8. Multímetro Fluke 337.	15
Figura 3.9. Medidor ION Access 9610.	16
Figura 3.10. Siprotec 6MD662.	17
Figura 3.11. Funcionamiento de un variador de frecuencia.	17
Figura 3.12. Aspecto de un relé programable.	19
Figura 3.13. (a) Símbolo electrónico del tiristor. (b) Ejemplos de tiristores comerciales para diferentes rangos de tensiones.	20
Figura 3.14. Diagrama de un transistor MOSFET.	21
Figura 3.15. Ejemplos de ondas para diversos ciclos de trabajo de un PWM.	22
Figura 5.1. Distribución de las cargas presentes en la subestación.	27
Figura 5.2. Potencia instantánea en la fase A del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.	30
Figura 5.3. Potencia instantánea en la fase B del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.	31
Figura 5.4. Potencia instantánea en la fase C del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.	31
Figura 5.5. Potencia real, reactiva y aparente total del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.	32

Figura 5.6. Medición de la temperatura de la sala de control en la subestación El Coco, del día 12 al 16 de agosto del 2016.	34
Figura 5.7. Medición de temperatura en la Sala de control en la subestación El Coco, apagando el aire acondicionado del 19 al 20 de setiembre del 2016.	35
Figura 5.8. Esquema de conexión del sistema, para el control de las calefacciones.	38
Figura 5.9. Esquema de conexión del sistema, para el control de las luminarias.	40
Figura 5.10. Condiciones de la carga térmica actual en la subestación El Coco.	42
Figura 5.11. Condiciones de la carga térmica ideal (siguiendo las recomendaciones) en la subestación El Coco.	43
Figura 5.12. Diagrama de bloques de un variador de frecuencias.	45
Figura 5.13. Curva del par inducido en el motor de inducción para la relación Voltaje-Frecuencia constante.	46
Figura 5.14. Formas de onda de un rectificador de onda completa trifásico.	47
Figura 5.15. Circuito rectificador de onda completa.	48
Figura 5.16. Circuito del filtro y acople CD.	50
Figura 5.17. Circuito inversor CD-CA.	51
Figura 5.18. (a) Circuito inversor CD-CA equivalente. (b) Secuencia de funcionamiento de los transistores MOSFET.	52
Figura 5.19. Circuito de control.	53
Figura 5.20. Circuito de acople.	54
Figura 5.21. Simulación de las tres fases de salida del inversor CD-CA, con una tensión de 5V en la salida del potenciómetro.	54
Figura 5.22. Simulación de las tres fases de salida del inversor CD-CA, con una tensión de 3V en la salida del potenciómetro.	55
Figura 5.23. Diagrama de flujo del control automático para el control de los ventiladores de los transformadores.	56
Figura 5.24. Diagrama de lazo abierto del sistema de control.	57
Figura 5.25. Ejemplo de balastro electrónico y tubo LED.	61
Figura 6.1. Comparación del consumo actual y el esperado para la subestación El Coco.	77

Figura A.1. Diagrama de flujo del programa para la programación del microcontrolador Arduino.	82
Figura A.2. Plano unifilar del tablero AC 208V, para el control de las calefacciones del lado de baja tensión.	84
Figura A.3. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones A, para el control de 5 módulos del lado de baja tensión.	85
Figura A.4. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones B, para el control de 5 módulos del lado de baja tensión.	86
Figura A.5. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones C, para el control de 6 módulos del lado de baja tensión.	87
Figura A.6. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, para el control de las calefacciones del lado de alta tensión.	88
Figura A.7. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones transformadores, para el control de 6 módulos del lado de alta tensión.	89
Figura A.8. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones transmisión, para el control de 3 módulos del lado de alta tensión.	90
Figura A.9. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, etapa de control de la iluminación del lado de alta tensión y el alumbrado perimetral.	92
Figura A.10. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, etapa de potencia para el control de la iluminación del lado de alta tensión y el alumbrado perimetral.	93
Figura A.11. Plano unifilar del tablero control alumbrado 34.5kV, etapa de control de la iluminación del lado de baja tensión.	94
Figura A.12. Plano unifilar del tablero control alumbrado 34.5kV, etapa de potencia para el control de la iluminación del lado de baja tensión.	95
Figura A.13. Distribución actual de las luminarias.	96
Figura A.14. Distribución de la iluminación utilizando los sensores de movimiento.	97
Figura B.1. Datos técnicos lámpara LED recomendada.	98

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1. Facturación del servicio propio de la subestación El Coco.	2
Tabla 3.1. Ecuaciones para el cálculo de los diferentes tipos de potencias.	10
Tabla 5.1. Mediciones de voltaje y corriente para las diferentes cargas del sistema y el cálculo de la potencia.	27
Tabla 5.2. Energía demandada por las cargas diariamente.	28
Tabla 5.3. Resumen del consumo energético diario para las diversas cargas de la subestación El Coco.	28
Tabla 5.4. Resumen de la tensión de línea obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.....	29
Tabla 5.5. Resumen de la corriente obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.....	29
Tabla 5.6. Resumen de la potencia real instantánea obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.....	30
Tabla 5.7. Resumen de los datos obtenidos para la medición de temperatura y humedad.	33
Tabla 5.8. Características del motor a controlar.	45
Tabla 5.9. Cálculo de los tiempos de encendido de los tiristores de la Figura 5.14 con ayuda de la Ecuación (5.2).	48
Tabla 5.10. Secuencia de encendido de los tiristores.....	52
Tabla 5.11. Ahorro en los motores de los ventiladores según el porcentaje de caudal seleccionado para el transformador 2.	58
Tabla 5.12. Ahorro en los motores de los ventiladores según el porcentaje de caudal seleccionado para el transformador 3.	59
Tabla 5.13. Comparación del diseño del VFD propio con el diseño brindado por la empresa Siemens.....	59
Tabla 5.14. Materiales necesarios para la instalación del control de las calefacciones.	64
Tabla 5.15. Cálculo de los flujos para el control de las calefacciones.....	65
Tabla 5.16. Indicadores económicos para el control de las calefacciones.....	65
Tabla 5.17. Inversión inicial del equipo para el control de la iluminación.....	66

Tabla 5.18. Materiales necesarios para la instalación del control de la iluminación.....	66
Tabla 5.19. Cálculo de los flujos para el control de la iluminación.....	67
Tabla 5.20. Indicadores económicos para el control de la iluminación.....	67
Tabla 5.21. Cálculo de los flujos para la sustitución del aire acondicionado.	69
Tabla 5.22. Indicadores económicos para la sustitución del equipo de aire acondicionado.	69
Tabla 5.23. Cálculo de los materiales adicionales necesarios para la instalación del centro de control de los ventiladores de enfriamiento de los transformadores.	70
Tabla 5.24. Cálculo de los flujos para la implementación del centro de control de los ventiladores de los transformadores.	71
Tabla 5.25. Indicadores económicos para la implementación del centro de control de los ventiladores de los transformadores.	71
Tabla 5.26. Inversión inicial total del proyecto para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.....	72
Tabla 5.27. Recopilación de los materiales adicionales para la implementación del proyecto de la reducción del consumo eléctrico en la subestación El Coco.....	73
Tabla 5.28. Resumen del ahorro esperado en la subestación El Coco.....	73
Tabla 5.29. Cálculo de los flujos para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.	75
Tabla 5.30. Indicadores económicos para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.	75
Tabla 6.1. Estimación del ahorro total del proyecto de la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.....	76

Capítulo 1. Introducción

1.1. Entorno del proyecto

El presente proyecto se realizará en conjunto con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en la subestación El Coco en Villa Bonita de Alajuela, ésta se encarga de la transformación y distribución de la energía proveniente de la planta La Garita, en este sitio aproximadamente se transforman 33.9 MWh, diarios para el consumo residencial, comercial e industrial, entre las que podemos citar RECOPE, Tecno Parque, el Autódromo La Guácima, La Tropicana, el área Catedral, La Maravilla y Dulce Nombre.

En la actualidad el ICE se encuentra realizando una fuerte inversión en el desarrollo de varios proyectos en aras de aumentar la capacidad de transporte y la operación segura del sistema. En el Plan de Expansión de la Transmisión 2015 – 2025, 2015, p.3 señala: “Con respecto de los costos operativos, el pico de inversión del período 2015 – 2017 incrementa más marcadamente los costos operativos del sistema de transmisión”. Del extracto anterior podemos observar que el costo de mantener dicho negocio es sumamente elevado y con inversiones a futuro aumentará aún más, esto queda en evidencia en la Figura 1.1.

La propuesta realizada por el Ingeniero David Chavarría Zamora, encargado del proyecto, consiste en que se desea lograr la independencia energética, esto quiere decir que requieren producir la electricidad que demanda dicha subestación para la transformación y distribución, mediante el uso de energías limpias, como lo son el uso de paneles solares, generadores eólicos, entre otros.

Esta electricidad limpia es producida con sistemas que no producen residuos contaminantes al ambiente y utilizan fuentes naturales para su producción, por ejemplo agua, luz solar, viento y calor.

Como primer factor para lograr dicha independencia, se debe de reducir el consumo energético actual, se estima que actualmente ronda los 12.6MW al mes, esto con el fin de

generar menos electricidad por dichos métodos, además que al lograr esta reducción el proyecto será más rentable.

Año	Demanda proyectada en potencia (MW)	Demanda proyectada en energía (GWh)	Costos incrementales de operación del sistema de transmisión (millones USD @2015)	
			Costos de operación y mantenimiento (*)	Costo total acumulado
2015	1606	10262	5.5	5.5
2016	1644	10668	10.8	16.3
2017	1686	10996	14.1	30.3
2018	1737	11385	15.2	45.5
2019	1795	11823	15.8	61.4
2020	1859	12304	18.8	80.2
2021	1933	12859	22.2	102.3
2022	2011	13443	26.6	129.0
2023	2092	14054	33.3	162.2
2024	2176	14961	39.0	201.2
2025	2263	15350	40.2	241.4
2026	2353	16032	---	---

(*) Valorado a un 6% del costo de inversión anual respectivo más el costo del año anterior

Figura 1.1. Costos de operación y mantenimiento estimados para el Plan de Expansión de Transmisión 2015-2025.

Tabla 1.1. Facturación del servicio propio de la subestación El Coco.

Mes	Energía(kWh)	Monto Facturado (Colones)
nov-15	10,445	1,362,340.00
dic-15	12,116	1,507,265.00
ene-16	12,952	1,556,995.00
feb-16	12,952	1,547,680.00
mar-16	11,796	1,465,305.00
abr-16	14,606	1,683,835.00
may-16	14,116	1,649,920.00
jun-16	12,240	1,506,955.00

Según datos mostrados en la Tabla 1.1 el consumo mínimo de la subestación fue de 10,445 kWh en el mes de noviembre 2015 esto representa un gasto de ¢1,362.340, por el pago de la

energía consumida. Si este gasto no se diera y además tomamos en cuenta que dicha energía se puede vender a alguna otra industria, el ICE obtendría un beneficio adicional.

El monto que sería posible obtener, por vender la energía que actualmente consume el servicio propio de cada subestación ya se vuelve una cantidad considerable, tomando en cuenta que si cada subestación consume lo mismo que la de El Coco, tendríamos un ahorro de más de ¢81 millones al mes, si trasladamos estos datos a nivel anual podemos hablar de un ahorro cercano a los \$2 millones, lo cual podrían ser utilizados para generar nuevos negocios.

Esta disminución en el consumo se puede lograr de diferentes maneras, entre ellas podemos citar el cambio de bombillas de alto consumo por bombillas LED, sustitución de equipos de alto consumo por otros más modernos que posean una mejor eficiencia energética (aires acondicionados, ventiladores, entre otros).

Otra acción que se puede tomar para alcanzar la meta de la reducción del consumo eléctrico, es realizar un control automático para aumentar la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo en la subestación, por ejemplo controlar el proceso de enfriamiento de los transformadores.

Cabe mencionar que se debe calcular el consumo exacto de los equipos presentes en la subestación y posteriormente crear las recomendaciones y algunas simulaciones para demostrar la reducción en al menos un 20% del actual.

Como se ha mencionado anteriormente la reducción se logrará sustituyendo las luminarias de la subestación así como de los talleres y oficinas, también se planea sustituir los aires acondicionados por otros más eficientes y de menor consumo, por otra parte se debe de reducir el consumo de los ventiladores de los tres transformadores que se encuentran presentes, esto mediante el uso de variadores de frecuencia, arranques escalonados o un control automático según sea la demanda del transformador.

1.2. Definición del problema

Actualmente la subestación del ICE, El Coco, utiliza la red nacional de electricidad para la transformación y distribución de la misma, de ésta se alimentan los equipos que se encuentran presentes en la subestación, este proceso se desea cambiar para que dicha demanda sea producida con una energía limpia, de ahí la necesidad de efectuar el cálculo del consumo para lograr el fin propuesto, esta generación de energía debe de ser de una fuente limpia y que se pueda generar en la misma planta.

Se espera poder disminuir el consumo del sitio en un 20% para poder implementar uno de los métodos de generación antes mencionados, por las condiciones del clima de la zona se podría implementar con paneles solares.

Actualmente se conoce el consumo total de la subestación, pero se desconoce el consumo eléctrico de los equipos utilizados presentes, por lo cual se tiene que determinar mediante el uso de equipos de medición proporcionados por el ICE.

Una vez que se conozca el consumo de estos equipos debemos de determinar las mejores soluciones para disminuir el consumo eléctrico, ya sea mediante el uso de equipos más eficientes, así como la automatización de ciertos procesos.

1.2.1. Síntesis del problema

Lograr, mediante este estudio, determinar la viabilidad de cómo reducir el consumo eléctrico, en la subestación El Coco en Villa Bonita de Alajuela, para la distribución y transformación de la energía.

1.3. Enfoque de la solución

Para solventar la problemática se va a realizar un estudio del consumo eléctrico de la subestación, para conocer exactamente cuál es el total de la energía demandada por cada equipo y en cuáles se presenta el mayor consumo, y así poder determinar las posibles soluciones para el ahorro energético.

Después de conocer los datos anteriormente mencionados se procederá a investigar cuál es la mejor solución para reducir el consumo de la subestación en más de un 20%.

Entre estas soluciones podemos citar el cambio de: luminarias, equipos electrónicos antiguos y de alto consumo, así como el diseño de sistemas de control que ayuden con dicho propósito. El dispositivo a diseñar se hará utilizando algún simulador de circuitos eléctricos, el cual se utilizará para demostrar su funcionamiento.

Otra posible solución podría estar en utilizar diversos dispositivos existentes actualmente en el mercado, que pueden ayudar a solventar el problema, de acuerdo a los requerimientos, estos pueden ser utilizados en su forma original o se adaptarán para un mejor acople a las necesidades del ICE, en este último caso, se hace necesario una etapa de diseño para acoplar algunos de estos dispositivos a las necesidades particulares de la Institución y así lograr su correcto funcionamiento.

Capítulo 2. Meta y Objetivos

2.1. Meta

El Ingeniero a cargo, obtendrá la información necesaria para lograr una reducción de al menos un 20% del consumo eléctrico actual de la subestación del ICE El Coco, esto con el uso de dispositivos de menor consumo eléctrico y el diseño de sistemas de control para la disminución del consumo energético en ciertos procesos durante la transformación y distribución de la electricidad.

2.2. Objetivo general

- Reducir en la subestación El Coco el consumo eléctrico, mediante el uso de equipos de bajo consumo y el control de los procesos.

2.3. Objetivos específicos

- Determinar el consumo eléctrico de los diversos elementos y la potencia total de la subestación el Coco.
- Emitir un plan con las recomendaciones pertinentes para la reducción del consumo de la planta, mediante el uso de cálculos matemáticos.
- Diseñar un dispositivo de control para evitar el desperdicio eléctrico en algunos de los equipos que se encuentran en la planta.
- Comparar el diseño propuesto del dispositivo de control con las opciones que ofrece el mercado.
- Realizar el estudio económico del retorno de la inversión necesaria.

Capítulo 3. Marco teórico

En el diseño de la solución planteada al problema que originó este proyecto intervienen varios conceptos cuya comprensión es de suma importancia para que el lector asuma con claridad la propuesta realizada para la futura implementación del proyecto diseñado.

3.1. Descripción del proceso a mejorar.

El enorme daño que ha provocado el ser humano a la naturaleza como producto del uso irracional y desmedido de los recursos naturales en el desarrollo de sus actividades exige que se tomen medidas prontas para incentivar el proceso de recuperación de la misma. Así de esta forma, el área de protección y medición del ICE ha decidido incursionar dentro de esta nueva corriente que promueve el uso de fuentes renovables de energía en la generación de energía eléctrica para que de esta forma se cuente con un mecanismo que contribuya al cuidado del ambiente mediante y el ahorro energético.

Para lograr el objetivo mencionado anteriormente se contará con un sistema que haga uso de la energía solar para la generación de energía eléctrica. La electricidad obtenida como producto de la futura implementación del sistema diseñado permitirá obtener beneficios económicos para el ICE ya que se daría una disminución en la cantidad de energía eléctrica facturada y que es consumida en las sesenta subestaciones alrededor del país, como plan piloto se inicia en la Regional El Coco.

Vale la pena mencionar que nunca antes se han realizado estudios similares para la reducción energética en la subestación, por lo que el mismo vendría a convertirse en un aporte muy significativo en cuanto a las pretensiones de ahorro económico y energético que se persiguen dentro de la institución.

Debido a que Costa Rica está aún incursionando de manera muy discreta en la generación de energía eléctrica por medio del aprovechamiento de la energía solar y a que el uso de estas tecnologías es relativamente nuevo, la implementación de los sistemas fotovoltaicos representa una inversión bastante considerable pero a su vez ésta genera muchos beneficios

para las personas involucradas y principalmente para el ambiente, por lo que es muy importante impulsar el uso de ésta y otras fuentes renovables de generación de energía eléctrica pensando en que el plazo de recuperación de la inversión es lento pero que se están generando muchos beneficios adicionales para el dueño del sistema y para la naturaleza, la reducción del consumo ayudará a que la inversión en paneles solares sea mucho menor y que traiga más beneficios para el ICE.

3.2. Antecedentes bibliográficos.

Con respecto a la adquisición de la información necesaria para el desarrollo del proyecto, se realizó una ardua investigación basada en documentos encontrados en diversas páginas de internet. Dichos documentos en su mayoría correspondían a informes presentados en páginas web de universidades y empresas dedicadas a la fabricación y distribución de los diversos elementos necesarios para la reducción del consumo eléctrico.

A su vez, en la fase de investigación se contó con la valiosa ayuda de varios ingenieros y expertos en la materia, por lo que con esto se logró tener una muy buena orientación y guía en cuanto a los objetivos trazados para el proyecto.

3.3. Descripción de los principales equipos y principios electrónicos relacionados con la solución del problema.

Esta sección presenta algunos de los conceptos y términos más importantes que permitirán una mejor comprensión de la solución planteada y que le proporcionarán al lector el conocimiento básico para la reducción del consumo eléctrico en equipos similares a los presentes en la subestación.

3.3.1. Potencia

Es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado, la unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio (Watt).

Cuando una corriente eléctrica fluye en cualquier circuito, puede transferir energía al hacer un trabajo mecánico o termodinámico. Los dispositivos convierten la energía eléctrica de muchas maneras útiles, como calor, luz, movimiento, sonido o procesos químicos.

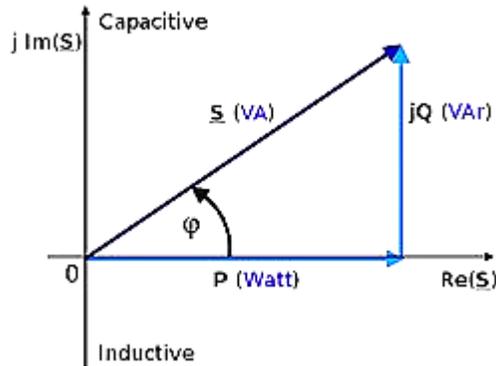


Figura 3.1. Triángulo de potencias.

Existen diferentes tipos de potencia, que los explicaremos a continuación:

- Potencia en corriente continua: Cuando se trata de corriente continua (CC) la potencia eléctrica desarrollada en un cierto instante por un dispositivo de dos terminales, es el producto de la diferencia de potencial entre dichos terminales y la intensidad de corriente que pasa a través del dispositivo.
- Potencia aparente: La potencia compleja de un circuito eléctrico de corriente alterna (cuya magnitud se conoce como potencia aparente y se identifica con la letra S), es la suma (vectorial) de la potencia que disipa dicho circuito y se transforma en calor o trabajo y la potencia utilizada para la formación de los campos eléctrico y magnético de sus componentes. Esto significa que la potencia aparente representa la potencia total desarrollada en un circuito con impedancia Z .
- Potencia activa: Es la potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es, por lo tanto, la realmente consumida por los

circuitos y, en consecuencia, cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda.

- Potencia reactiva: Esta potencia no se consume ni se genera, en circuitos lineales solo aparece cuando existen bobinas o condensadores.

Tabla 3.1. Ecuaciones para el cálculo de los diferentes tipos de potencias.

Nombre	Fórmula
Potencia CC	$P = V \cdot I [W]$
Potencia aparente	$S = I^* \cdot V = \sqrt{P^2 + Q^2} [VA]$
Potencia activa	$P = I \cdot V \cdot \cos(\phi) [W]$
Potencia reactiva	$Q = I \cdot V \cdot \sin(\phi) [VAr]$

3.3.2. Energía

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía lumínica, mecánica y térmica. La energía se mide en unidades de potencia por unidad de tiempo (kWh).

3.3.3. Aires acondicionados

Entendemos por aire acondicionado al sistema de refrigeración del aire que se utiliza de modo doméstico o industrial para refrescar los ambientes cuando las temperaturas del ambiente son muy altas y calurosas. El aire acondicionado, si bien hace referencia al aire en sí, es un aparato que se instala en casas, locales y demás espacios cerrados con el objetivo de proveer de aire fresco que se renueva permanentemente. A pesar de ser un aparato de gran utilidad para el confort diario, sus efectos pueden ser a veces adversos no sólo en la salud de

los individuos sino también en el medio ambiente en general debido a su expulsión constante de aire caliente hacia afuera y la alta demanda energética de estos.

El aire acondicionado funciona a partir de la puesta en circulación del aire de un espacio cerrado. Esta puesta en circulación suma, además, la variación que se genera en la temperatura y en la humedad a partir de la entrada de aire frío y de la salida del aire más caliente o cálido.



Figura 3.2. Aire acondicionado presente en el cuarto de control.

3.3.4. Calefacciones

Una calefacción es el método o sistema, mediante el cual se aporta calor a alguien o algo con el fin de mantener o elevar su temperatura. En la subestación se utilizan las calefacciones para la eliminación de la humedad que se genera dentro de las cajas de control presentes en el exterior de la subestación. Estas calefacciones son simplemente una resistencia conectada a la alimentación eléctrica, y un disipador de calor para que emita esta energía al interior de dichos dispositivos.

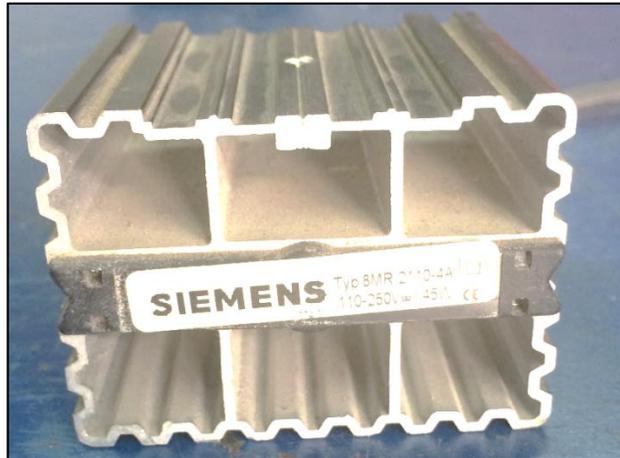


Figura 3.3. Ejemplo de una calefacción de 45W.

3.3.5. Ventiladores enfriamiento de los transformadores

Un ventilador es una máquina de fluido, más exactamente una turbo máquina que transmite energía para generar la presión necesaria con la que mantener un flujo continuo de aire. Se utiliza para usos muy diversos como: ventilación de ambientes, refrescamiento de máquinas u objetos o para mover gases, por una red de conductos.

Un ventilador es una máquina que absorbe energía eléctrica, la transforma en mecánica y la transfiere a un gas, proporcionándole un incremento de presión, que se convierte en un flujo de aire direccionado. En la subestación se cuenta con 37 ventiladores para el enfriamiento del aceite de los transformadores estos son de alta potencia.



Figura 3.4. Ventilador de enfriamiento de los transformadores.

3.3.6. Lámparas HID

Las luminarias HID (Alta Intensidad de Descarga, por sus siglas en inglés) han sido utilizadas desde hace muchos años para iluminar vialidades, parques, fachadas de edificios, naves industriales y cualquier tipo de iluminación exterior e interior.

Como las otras lámparas eléctricas de descarga de gas, la luz se genera pasando un arco eléctrico a través de una mezcla de gases. En una lámpara de haluro metálico, el tubo compacto donde se forma el arco contiene una mezcla de argón, mercurio y una variedad de haluros metálicos. Las mezclas de haluros metálicos afecta la naturaleza de la luz producida, variando la temperatura del color y su intensidad.



Figura 3.5. Lámpara HID para alumbrado de exteriores.

3.3.7. Lámparas LED

Una lámpara de led es una lámpara de estado sólido que usa leds (diodos emisores de luz, por sus siglas en inglés) como fuente lumínica. Actualmente las lámparas de led se pueden usar para cualquier aplicación comercial, desde el alumbrado decorativo hasta el de viales y jardines, presentando ciertas ventajas, entre las que destacan su considerable ahorro energético, arranque instantáneo, aguante a los encendidos y apagados continuos y su mayor vida útil, pero también con ciertos inconvenientes como su elevado costo inicial.



Figura 3.6. Lámpara LED de alta intensidad para alumbrado público.

Los diodos funcionan con energía eléctrica de corriente continua (CC), de modo que las lámparas de led deben incluir circuitos internos para operar desde el voltaje en corriente alterna (CA). Los ledes se dañan a altas temperaturas, por lo que las lámparas de led tienen elementos de gestión del calor, tales como disipadores y aletas de refrigeración. Las lámparas de led tienen una vida útil larga y una gran eficiencia energética.

3.3.8. Arduino

Arduino es una compañía de hardware libre y una comunidad tecnológica que diseña y manufactura placas de desarrollo de hardware y software, compuesta respectivamente por circuitos impresos que integran un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE), en donde se programa cada placa. Se enfoca en acercar y facilitar el uso de la electrónica y programación de sistemas embebidos en proyectos multidisciplinarios. Toda la plataforma, tanto para sus componentes de hardware como de software, son liberados bajo licencia de código abierto que permite libertad de acceso a los mismos.

En este proyecto se utiliza un Arduino UNO para la realización de pruebas, por ejemplo medir la temperatura y humedad de ciertos entornos, esta información obtenida se utiliza para la toma de decisiones para la reducción del consumo.

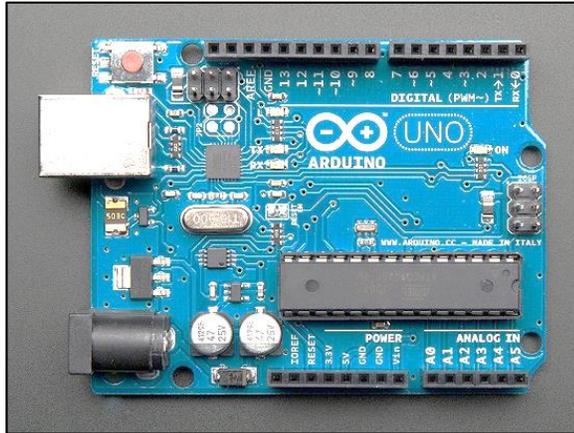


Figura 3.7. Placa Arduino UNO.

3.3.9. Fluke 337

Es un multímetro que posee la particularidad de tener un gancho con el que se pueden medir el flujo eléctrico, sin desconectar el sistema. Este puede medir en corriente alterna como directa tensiones, corrientes y resistencia, además puede almacenar los valores picos.



Figura 3.8. Multímetro Fluke 337.

3.3.10. Medidor ION Access 9610



Figura 3.9. Medidor ION Access 9610.

Este medidor cuenta con muchas mediciones que se pueden utilizar en diferentes áreas, sirve tanto para sistemas trifásicos como monofásicos. Trae mediciones por defecto de corriente, voltaje, potencia activa, pasiva y reactiva, factor de potencia, y cuenta con la medición de energía total entregada a la carga. Estos datos se pueden ver en pantalla o se puede programar el dispositivo para verlos y almacenarlos en una computadora.

3.3.11. Siprotec 6MD662

Este dispositivo es una unidad de control y protección para los sistemas presentes en la subestación. Este posee el sistema de alarmas y eventos es utilizado para saber si hay algún inconveniente en un equipo o cuando un equipo está en funcionamiento. Tiene múltiples entradas para determinar diferentes problemas ya sea por voltaje o corriente.



Figura 3.10. Siprotec 6MD662.

3.3.12. Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia (VFD, del inglés: Variable Frequency Drive) es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de AC por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Este cambio en la frecuencia se convierte en un cambio en la corriente de alimentación del motor, lo que nos provoca una disminución de la potencia.

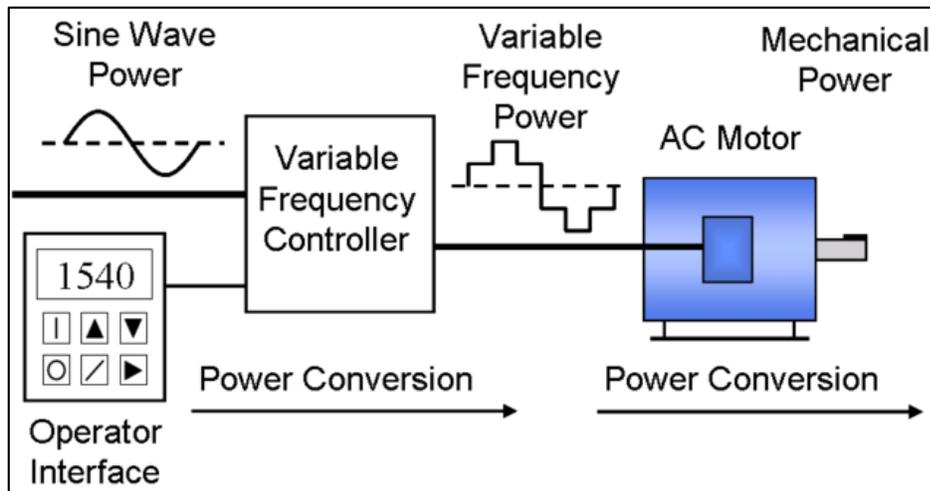


Figura 3.11. Funcionamiento de un variador de frecuencia.

El principio de funcionamiento del variador de velocidad consiste en convertir el voltaje de CA a un voltaje de CD por medio de un puente rectificador trifásico compuesto por seis diodos para posteriormente convertir ese mismo voltaje de CD a un voltaje de CA por medio de un puente inversor trifásico compuesto por 6 tiristores los cuales controlan el voltaje de CA variando su frecuencia. La configuración típica de un variador de velocidad de 6 pulsos es como la que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los componentes del variador de velocidad son un puente rectificador trifásico y un convertidor PWM creado con tiristores.

El funcionamiento de un VFD se basa en la Ecuación (3.1), en la cual F es la frecuencia de la red eléctrica y P es la cantidad de polos del motor, y RPM son las revoluciones del motor.

$$RPM = 120 \frac{F}{P} \quad (3.1)$$

3.3.13. Control automático

La teoría de control se utiliza para diseñar sistemas físicos que tengan un comportamiento deseado. En la práctica se utilizan sensores a la salida del dispositivo que está siendo controlado y para que las mediciones hechas se utilicen en la retroalimentación a los actuadores de entrada a fin de hacer las correcciones que lleven el sistema a un estado deseado. Cuando un dispositivo se diseña para que funcione sin necesidad de la intervención humana directa en la realización de las correcciones se denomina control automático. De naturaleza multidisciplinaria, las actividades de la ingeniería de control se enfocan principalmente en la implantación de sistemas de control derivados del modelamiento matemático de sistemas de diversa índole.

3.3.14. Relé programable

El relé o relevador es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se

acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835.

Actualmente existen relés programables, los cuales se pueden programar desde una computadora, según las entradas y obtener distintas salidas, estos pueden utilizarse para diferentes aplicaciones, desde la automatización de procesos, hasta el control de la iluminación de un sitio.

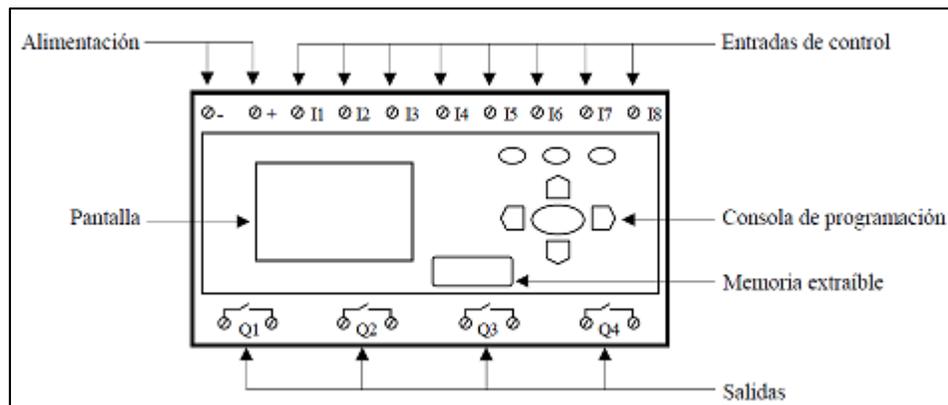


Figura 3.12. Aspecto de un relé programable.

3.3.15. SCADA

El Supervisory Control And Data Acquisition (en español Supervisión, Control y Adquisición de Datos, SCADA) es un software que corre en una computadora que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

3.3.16. Tiristor

Son dispositivos de tres terminales, denominados ánodo, cátodo y compuerta. Este es un componente electrónico fabricado con materiales semiconductores que utiliza una

realimentación interna para realizar una conmutación. Son un estilo de diodo, ya que solo dejan que la corriente fluya en un sentido y son muy utilizados para el control de sistemas de potencia esto porque son similares a un interruptor mecánico, ya que deja fluir o bloquea por completo la corriente entre sus terminales.

El tiristor conduce siempre que la tensión del ánodo sea mayor a la del cátodo (como en el caso de los diodos) y que además haya una pequeña corriente circulando desde el terminal de la compuerta al cátodo.

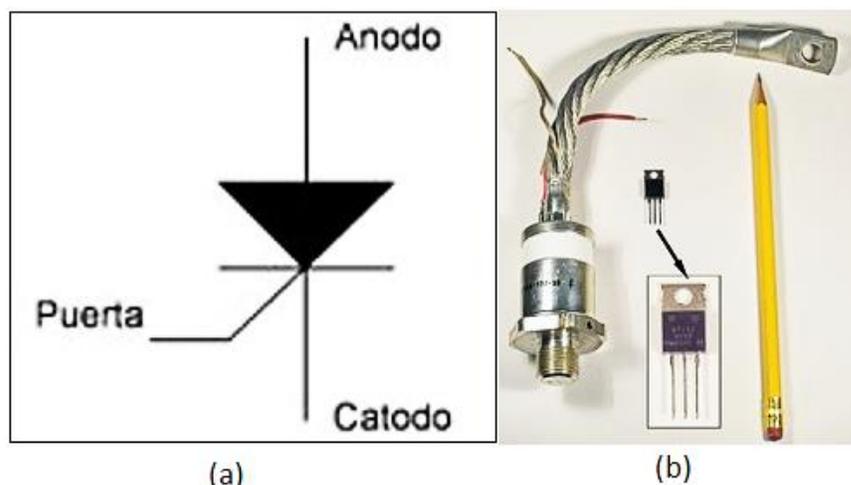


Figura 3.13. (a) Simbolo electrónico del tiristor. (b) Ejemplos de tiristores comerciales para diferentes rangos de tensiones.

3.3.17. Transistor MOSFET

Un transistor es dispositivo de al menos tres terminales, en el que una terminal controla el flujo de corriente entre las otras dos, la palabra transistor proviene de las palabras en inglés transfer y resistor (transferencia y resistencia).

Un transistor MOSFET se basa en el principio de efecto de campo, usa un campo eléctrico para controlar el flujo de corriente entre dos de sus terminales. Su nombre proviene de las iniciales de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (en español metal oxido semiconductor campo eléctrico transistor).

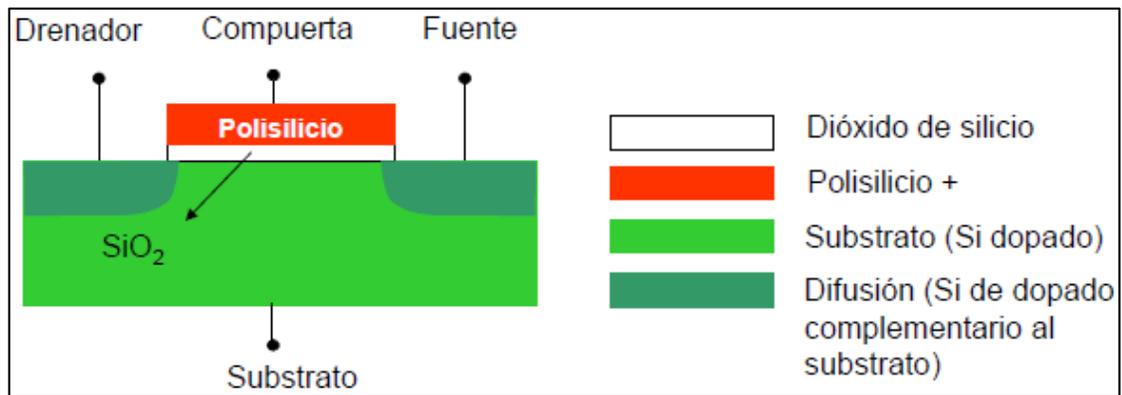


Figura 3.14. Diagrama de un transistor MOSFET.

3.3.18. PWM

La modulación por ancho de pulsos (PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El PWM es utilizado en muchas aplicaciones, una de ellas para regular la velocidad de giro de motores eléctricos de inducción o asíncronos. Esta técnica mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica.

El ciclo de trabajo de esta modulación, es el tiempo que la señal está en alto para un periodo de la función.

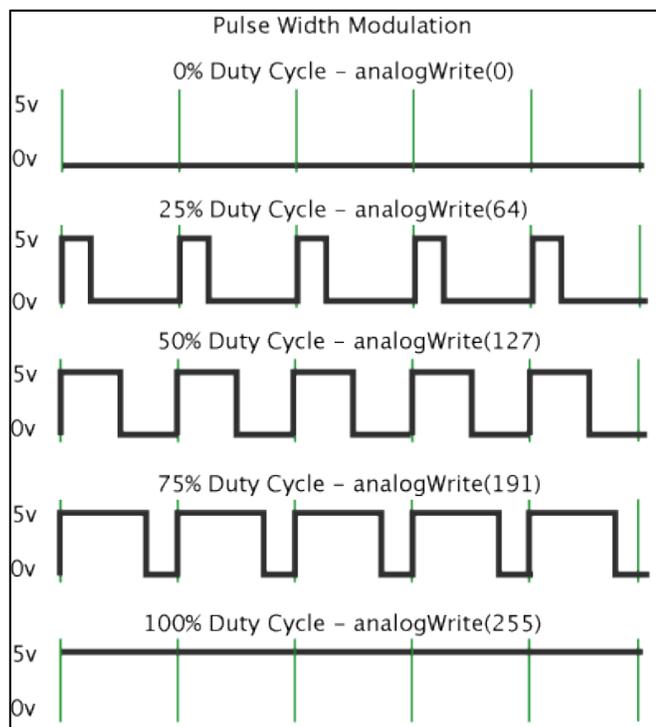


Figura 3.15. Ejemplos de ondas para diversos ciclos de trabajo de un PWM.

Capítulo 4. Procedimiento metodológico

El presente capítulo incluye una descripción del proceso que se siguió en el desarrollo del proyecto acerca de la disminución del consumo eléctrico de la subestación El Coco del ICE.

4.1. Reconocimiento y definición del problema

La identificación del problema existente y que dio paso al desarrollo de este proyecto se definió gracias a una primera entrevista realizada al Ing. David Chavarría Zamora. En la misma, el Ingeniero planteó la necesidad de la reducción del consumo de la subestación, para una posterior implementación de una fuente de energía renovable.

Uno de los temas más importantes con que debía contar el proyecto desarrollado, según la propuesta del Ingeniero, consistía en la determinación del tiempo de recuperación estimado para la inversión requerida en la implementación del proyecto. Esto debido a que los sistemas que hacen uso de este tipo de tecnología, requieren de una inversión bastante considerable, ya que la implementación de estos proyectos, a nivel nacional, está dando sus primeros pasos.

La idea principal en la propuesta del proyecto es determinar, mediante un estudio, las variables que influyen en la recuperación de la inversión requerida así como las que propician el gasto. Esto con la finalidad de buscar las mejores alternativas en cuanto a precios, calidad y garantía de los materiales y que permitan la obtención de un producto final que cumpla con las expectativas buscadas en la subestación.

4.2. Obtención y análisis de información

La información necesaria para el desarrollo del proyecto se recopiló gracias a la investigación realizada en medios electrónicos contenidos en diferentes páginas web. Las páginas consultadas correspondieron, en su gran mayoría, a páginas de diversas universidades y empresas, extranjeras y nacionales, dedicadas a la comercialización y distribución de los diferentes elementos necesarios en este proyecto. A estas últimas, se les solicitó una cotización para los principales materiales requeridos en el proyecto como lo son las luminarias, aires

acondicionados, entre otros, esto con la finalidad de lograr tener una base para la realización del estudio económico del proyecto.

Para la determinación de las mediciones realizadas se contó con la ayuda de algunos compañeros de trabajo, principalmente del personal técnico del área eléctrica y del departamento de Protección y Medición de la Regional.

4.3. Diseño de la solución

Para la realización del diseño propuesto y que es presentado en este documento se contemplaron varios aspectos importantes, los cuales se proceden a explicar a continuación:

El primer paso que se siguió fue la búsqueda de información que permitiera obtener las bases para el desarrollo del proyecto. Luego de esto se procedió a evaluar la información recabada y seleccionarla de acuerdo a su similitud con el proyecto propuesto.

El siguiente paso consistió en el trabajo de campo. Con este se pudieron obtener las mediciones de potencia requeridas para el diseño del sistema. Las mismas se realizaron por medio de la utilización de un multímetro digital Fluke 337. Con este instrumento se puede medir la tensión y además podemos saber la corriente eléctrica sin necesidad de efectuar ninguna desconexión, ya que estas mediciones se realizan mediante el campo eléctrico producido.

Con la obtención de las mediciones de la potencia de los diferentes equipos se pudo comparar con el consumo actual facturado para el servicio propio de la subestación. En esta etapa se inició con la investigación de las posibles reducciones a los diferentes equipos, así como las posibles soluciones planteadas para la reducción del consumo de los ventiladores de los transformadores, entre ellas podemos citar la utilización de un variador de frecuencia comercial, un diseño de un sistema de arranque escalonado o un control automático.

Pasada esta etapa, se procedió a solicitar las diversas cotizaciones de los elementos que se considera posible sustituirlos por su poca eficiencia y antigüedad, esto con el fin de sustituirlos por sistemas modernos y de una mayor eficiencia eléctrica.

Finalmente se procedió a diseñar un sistema de control automático para los ventiladores de los transformadores y sus posteriores simulaciones para verificar el funcionamiento del mismo. Se escogió esta opción, por la fácil implementación, además de la versatilidad que se le puede dar.

Capítulo 5. Descripción detallada de la solución

En este capítulo se da una descripción detallada del diseño propuesto para dar solución al problema que originó el proyecto. Se explicarán los pasos que se siguieron para la determinación del proceso de dimensionamiento del sistema, las características de los equipos y componentes estipulados en el diseño, algunos ya se mencionaron en el Capítulo 3.

5.1. Obtención del consumo de las cargas de la subestación

Para iniciar con el proyecto se procedió a determinar las cargas del sistema, para así determinar los principales puntos donde se pudiera reducir el consumo. Esta labor requirió de mucho cuidado y de muchas mediciones por las diferentes cargas a medir. Estas se midieron con un multímetro con amperímetro de gancho, el nombrado en el Capítulo 3. , se utilizó para determinar la tensión y la corriente de los equipos, para después calcular las potencias con dichos valores. Para determinar el consumo del aire acondicionado se utilizó un medidor Ion Access 9610 mostrado en el Capítulo 3.

Para determinar el tiempo de funcionamiento de los ventiladores de los transformadores se utilizó el Siprotec 6MD662, en el cual se guardaba un evento cada vez que los ventiladores se enciendan o se apaguen, con este método determinamos la cantidad de horas diarias que funcionan.

En la Tabla 5.1 podemos observar las mediciones de corriente y voltaje para las diferentes cargas ubicadas en la subestación, así como el valor de potencia calculado a partir de los valores medidos. En la Figura 5.1 obtenemos una gráfica con la distribución de los valores de potencia obtenidos de la Tabla 5.1.

En dicha grafica podemos observar que la carga que más potencia consume son los dos aires acondicionados cuando están en la fase de enfriamiento, seguido de los ventiladores del transformador 1, la iluminación de la subestación, las calefacciones y los ventiladores de los otros dos transformadores.

Tabla 5.1. Mediciones de voltaje y corriente para las diferentes cargas del sistema y el cálculo de la potencia.

Equipo	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Potencia (kW)
Aire acond. alto consumo	48,80	209,00	10.199,20	10,20
Aire acond. bajo consumo	1,70	209,00	355,30	0,36
Calefacciones 110	45,95	122,00	5.605,90	5,61
Calefacciones 220	4,34	224,00	972,16	0,97
Iluminación emergencia	28,10	120,00	3.372,00	3,37
Iluminación perimetral	23,80	120,00	2.856,00	2,86
Iluminación subestación	54,90	120,00	6.588,00	6,59
Transformador 1	79,20	118,30	9.358,89	9,36
Transformador 2	51,80	119,10	6.169,30	6,17
Transformador 3	51,90	119,40	6.185,04	6,19
Ventilador banco baterías	4,00	209,00	836,00	0,84
Total	394,49	1.689,80	52.497,79	52,50

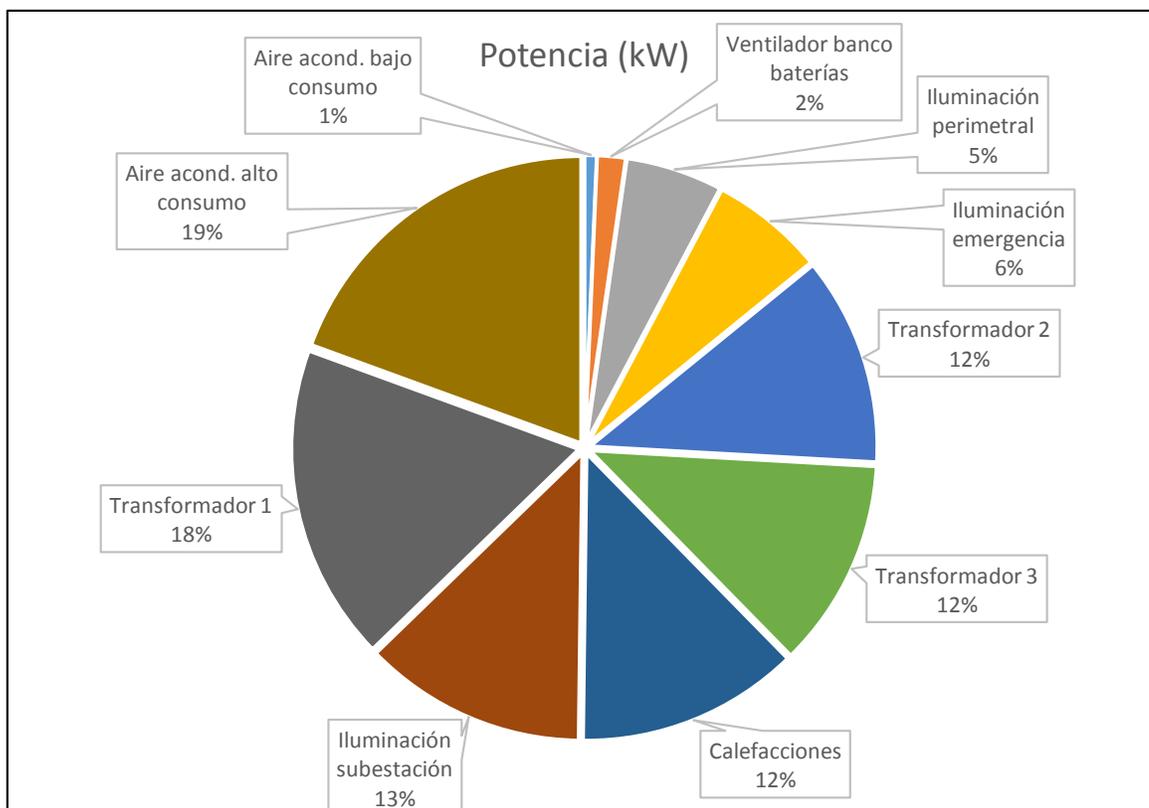


Figura 5.1. Distribución de las cargas presentes en la subestación.

Tabla 5.2. Energía demandada por las cargas diariamente.

Equipo	Potencia (kW)	Horas uso	Energía (kWh)
Transformador 1	9,36	0,00	0,00
Iluminación emergencia	3,37	0,00	0,00
Ventilador banco baterías	0,84	1,50	1,25
Aire acond. alto consumo	10,20	5,28	53,85
Aire acond. bajo consumo	0,36	18,72	6,65
Transformador 2	6,17	4,50	27,76
Iluminación perimetral	2,86	12,00	34,27
Transformador 3	6,19	7,50	46,39
Iluminación subestación	6,59	12,00	79,06
Calefacciones	6,58	24,00	157,87
Total	52,50	85,50	407,11

En la Tabla 5.2 observamos la potencia de cada carga medida de la subestación, así como la cantidad de horas de uso del equipo al día. Lo interesante de esta tabla es que podemos determinar que los equipos que presentan una demanda mayor de forma individual no necesariamente son los que presentan un mayor consumo diario.

Podemos mencionar que las calefacciones son el equipo que más energía está demandando, seguido de la iluminación interna de la subestación y el aire acondicionado, después de estos se colocan los ventiladores del transformador 3.

Tabla 5.3. Resumen del consumo energético diario para las diversas cargas de la subestación El Coco.

Equipo	Energía (kWh)
Iluminación emergencia	0,00
Ventilador banco baterías	1,25
Aire acondicionado	34,41
Transformadores	88,12
Iluminación	125,44
Calefacciones	157,87
Total	407,11

En la Tabla 5.3 realizamos un resumen del consumo de las diversas cargas, las cuales agrupamos según el tipo de carga, observamos que las calefacciones siguen siendo las que presentan un mayor consumo, seguido de la iluminación interna y perimetral de la subestación, en tercer lugar están los ventiladores de los transformadores y por último los aires acondicionados.

Se procedió luego a medir el servicio propio de la subestación esto con la ayuda de un medidor ion, estas mediciones fueron realizadas del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016, se midió el voltaje, la corriente y las diferentes potencias para cada línea. Estas mediciones se realizaron con el fin de ver el comportamiento de la carga durante todo el día.

Tabla 5.4. Resumen de la tensión de línea obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

Tensión de línea (V)				
	A	B	C	Promedio
Máximo	123,16	123,85	124,50	123,84
Mínimo	118,76	119,93	120,26	119,65
Promedio	121,49	122,29	122,38	122,06

Tabla 5.5. Resumen de la corriente obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

Corriente de línea (A)				
	A	B	C	Promedio
Máximo	320,84	343,55	327,48	330,63
Mínimo	19,79	51,53	41,43	37,58
Promedio	68,89	123,15	106,25	99,43

De la Tabla 5.4 observamos que la tensión varía desde los 118V hasta los 124V, estas variaciones se deben a los cambios en la carga durante el día, pero su promedio ronda los 122V. Por su parte en la Tabla 5.5 tenemos que la corriente varía desde los 19A hasta los 343A, sin embargo su promedio ronda los 100A. Los valores máximos de corriente son muy elevados, pero no son constantes, esto quiere decir que se presentan en los arranques de los equipos, y después estos consumen menos y por eso el promedio es mucho más bajo.

La Tabla 5.6 la obtuvimos a partir de los datos de tensión y corriente medidos con el medidor ion, esta es la potencia real instantánea, debido a la misma situación de la corriente se da para este caso, la potencia instantánea es mayor debido a los picos de corriente cuando inician los equipos, aunque la potencia promedio es mucho menor. En la Figura 5.2, Figura 5.3 y la Figura 5.4 observamos las gráficas de las potencias instantáneas para cada fase del servicio propio, podemos determinar en qué momentos se dan estos picos de corriente que mencionamos anteriormente.

Tabla 5.6. Resumen de la potencia real instantánea obtenida para el servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

Potencia real instantánea (kW)				
	A	B	C	Promedio
Máximo	38912,57	41654,64	39838,92	40135,38
Mínimo	2400,17	6232,88	5046,36	4559,80
Promedio	8365,50	15051,59	12995,43	12137,51

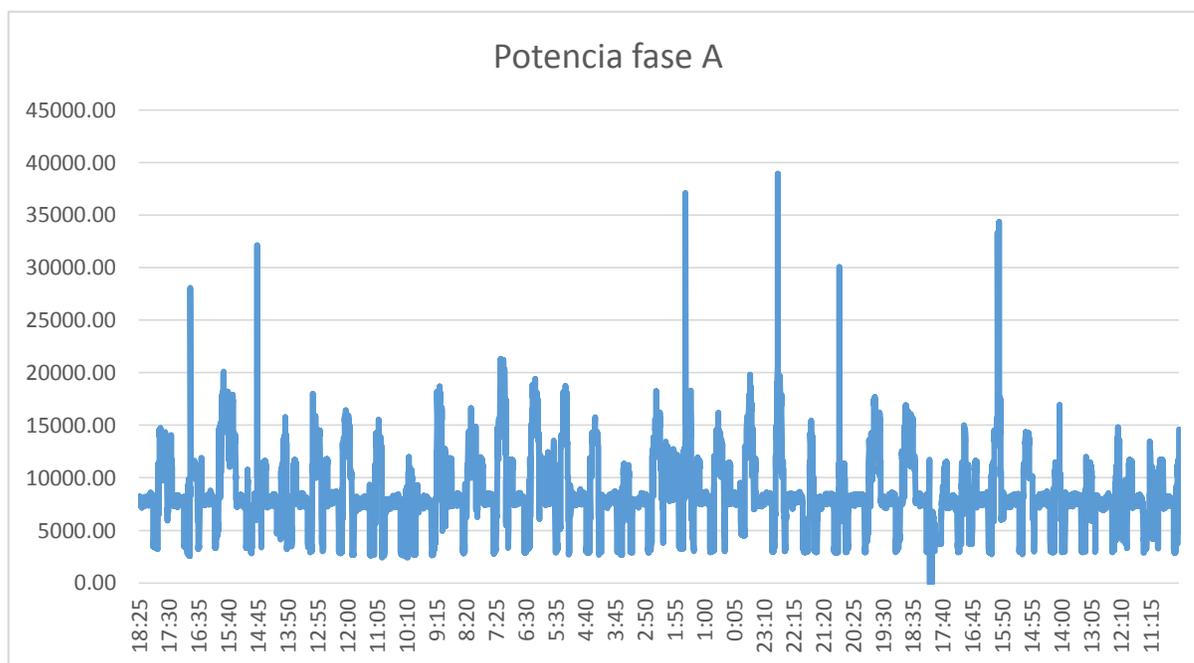


Figura 5.2. Potencia instantánea en la fase A del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

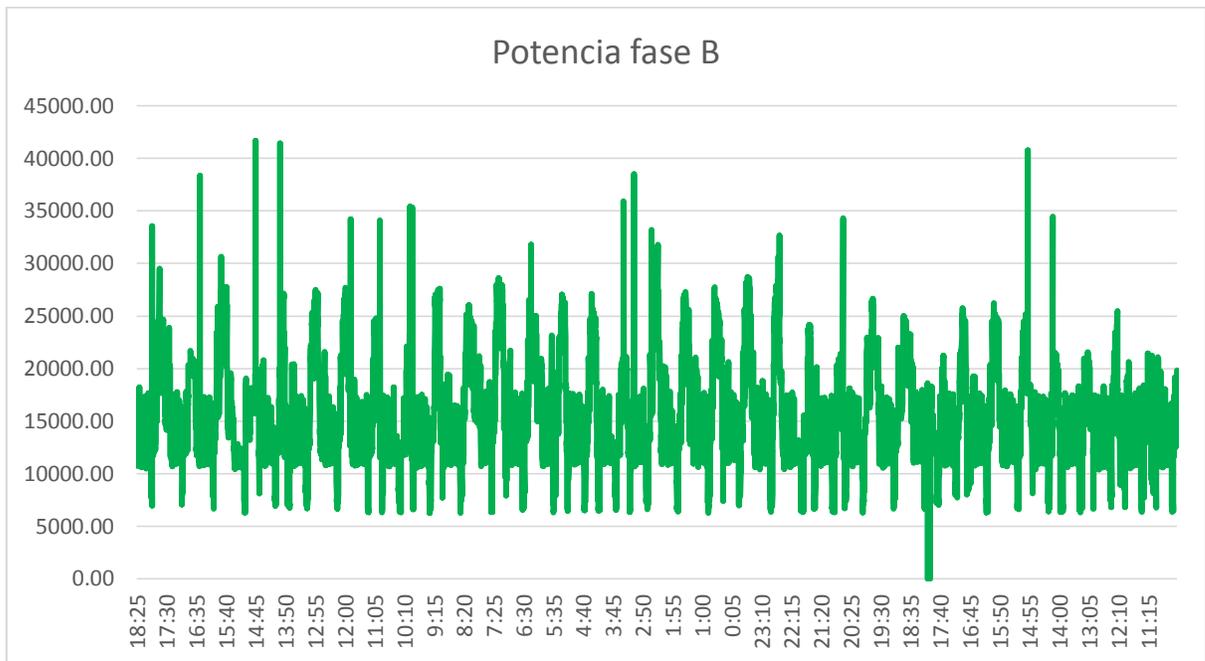


Figura 5.3. Potencia instantánea en la fase B del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

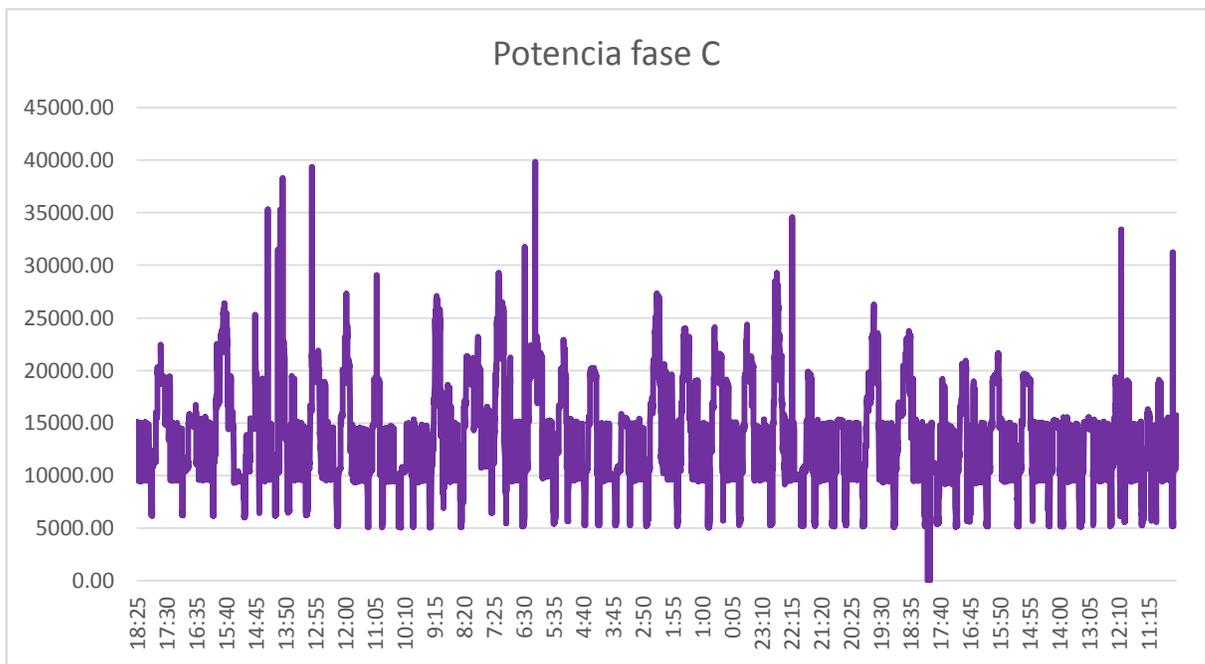


Figura 5.4. Potencia instantánea en la fase C del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

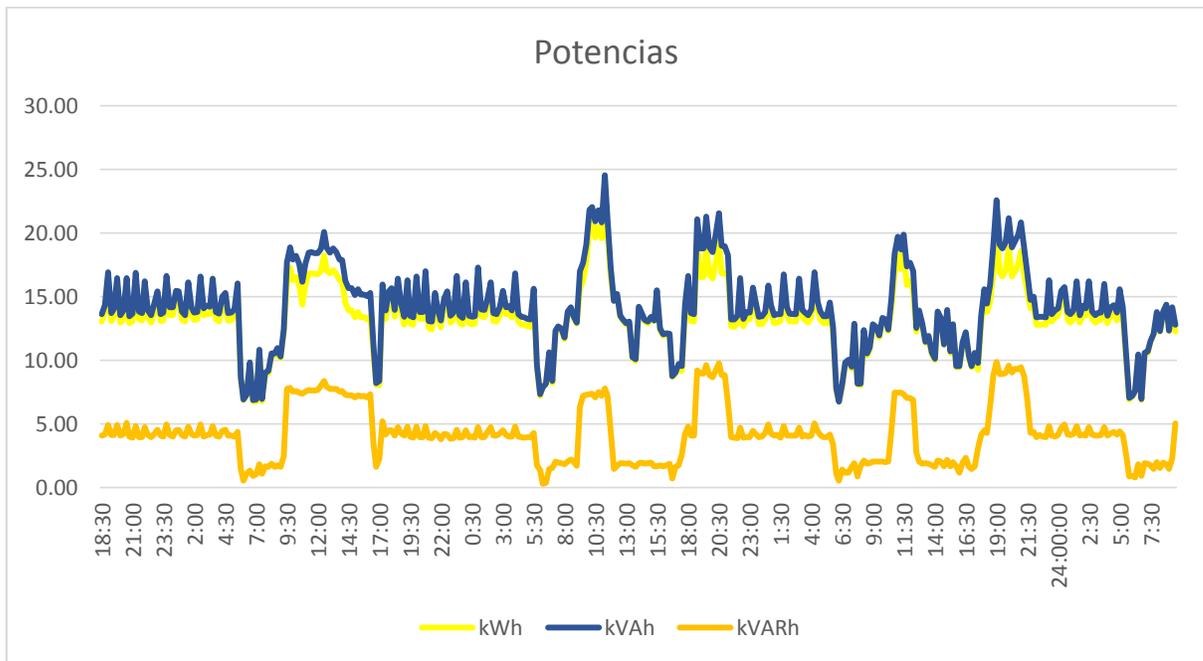


Figura 5.5. Potencia real, reactiva y aparente total del servicio propio en corriente alterna, del 16 de setiembre al 20 de octubre del 2016.

En la Figura 5.5 observamos la gráfica de la energía consumida por la subestación, donde tenemos la activa, la reactiva y la real.

5.2. Posibles soluciones al problema.

La solución para el ahorro energético se divide en cuatro grandes áreas que detallaremos a continuación, éstas están basadas en las cargas que poseen un mayor consumo diario presentados en la Tabla 5.3.

5.2.1. Calefacciones

Como se mencionó en el Capítulo 3, estas son utilizadas para eliminar la humedad dentro de los diferentes dispositivos y cajas presentes en la subestación. Para determinar la necesidad de esta carga, se procedió a diseñar un medidor de temperatura y humedad mediante el uso de la plataforma Arduino y el sensor DHT11, el diagrama de flujo que se utilizó para la programación de este microcontrolador se encuentra en la Figura A.1.

Este sistema recopiló datos desde el 3 al 7 y del 7 al 10 de octubre del 2016 en dos cajas de derivación de 34.5kV, una con la calefacción encendida y la otra apagada, para ver la variación al no presentar este sistema, los datos obtenidos se resumieron y son mostrados en la Tabla 5.7.

Se separan las mediciones en dos rangos de fechas, porque el día 7 de octubre se recopilan los datos y se invirtieron los sensores entre las cuchillas, para validar que ambos sensores tuvieran una medición similar, para ambos casos.

De la Tabla 5.7 podemos observar que el uso de la calefacción aumenta la temperatura entre 1 y 2 grados Celsius máximo, por su parte la humedad relativa no presenta mayores variaciones en los valores máximos.

Tabla 5.7. Resumen de los datos obtenidos para la medición de temperatura y humedad.

Calefacción	Fecha	Temperatura			Humedad		
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Si	3 al 7-10-16	21	34	25,89	61	93	86,07
	7 al 10-10-16	21	32	24,45	57	90	82,87
No	3 al 7-10-16	19	35	24,99	47	92	81,86
	7 al 10-10-16	20	33	24,05	59	94	88,40

Como posibles soluciones se manejan la utilización de estas por horario fijo, esto quiere decir un tiempo predeterminado diario, la eliminación por completo de estas o la realización de un sistema de control automático, que las encienda de ser necesario.

5.2.2. Iluminación subestación y perimetral

La iluminación actual de la subestación es del tipo HID, se explica brevemente en el Capítulo 3. , la cual es una lámpara que posee una baja eficiencia, esto quiere decir que tiene un elevado consumo eléctrico pero un bajo aprovechamiento al momento de la conversión en radiación luminosa. En la subestación encontramos lámparas cuyo consumo rondan los 120W y 150W.

Como posible solución a este problema se plantea la sustitución por luminarias tipo LED las cuales poseen una mayor eficiencia, y por lo tanto un menor consumo eléctrico. Además se plantean como soluciones adicionales la utilización de sensores de movimiento, para encender las lámparas en caso de presencia de alguna persona y dejar fijas una cantidad menor a la actual, así obtendríamos un ahorro mucho mayor.

5.2.3. Aires acondicionados

Actualmente se cuentan con dos aires acondicionados como los mostrados en la Figura 3.2 de 60,000 BTU/h cada uno, estos aires se encuentran programados para que mantengan la temperatura ambiental a 23°C, se realizaron pruebas para determinar el funcionamiento de los mismos, midiendo la temperatura ambiental con ayuda de un microcontrolador Arduino y un sensor de temperatura DS18B20, el diagrama de flujo que se utilizó para la programación de este microcontrolador se encuentra en la Figura A.1.

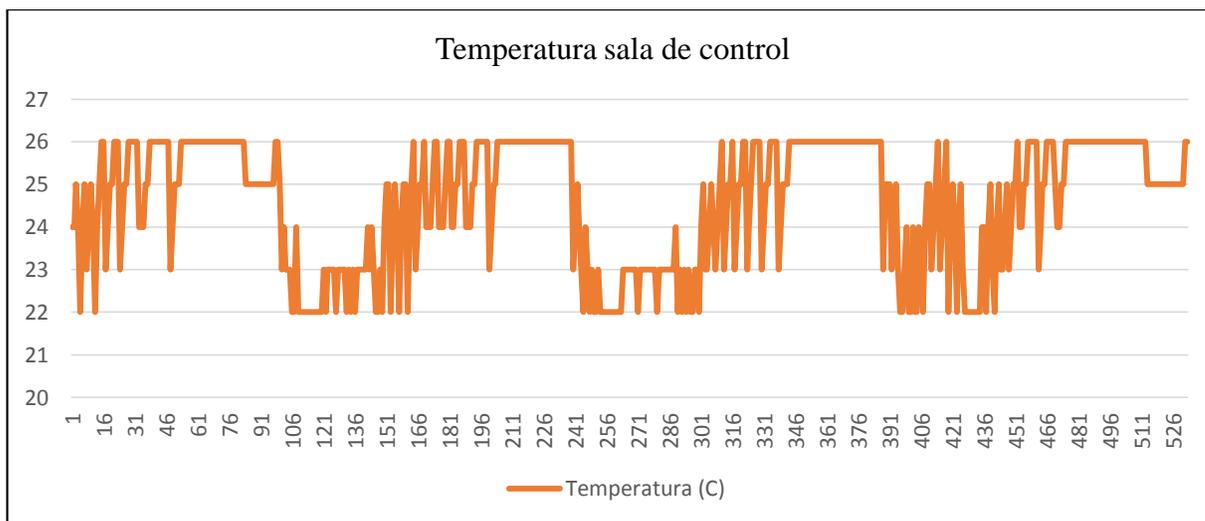


Figura 5.6. Medición de la temperatura de la sala de control en la subestación El Coco, del día 12 al 16 de agosto del 2016.

De igual forma se realizara una prueba de apagar el aire acondicionado durante una noche para obtener el dato de qué tanto varía la temperatura interna del recinto durante las horas nocturnas. En estas pruebas observamos que la temperatura varía mucho durante el día pero es muy constante durante las noches, debido a que no hay presencia de personas así como que la

temperatura externa es mucho menor a la diurna. En la Figura 5.6 se realizan las mediciones de temperatura cada diez minutos a partir de las 2:35 pm del día 12 de agosto del 2016, concluyendo el 16 de agosto a las 7:27 am. Podemos observar que se repite un patrón diario, donde durante el día varía mucho la temperatura pero por las noches se mantiene bastante constante.

En la Figura 5.7 observamos la medición de temperatura de la sala de control del 19 al 20 de setiembre del 2016, se inicia la medición con el aire acondicionado encendido a las 4:15 pm, luego a las 4:45 pm se procede a apagar ambos aires acondicionados. Después de esta hora podemos observar como la temperatura empieza a aumentar rápidamente, esto se debe a que la temperatura exterior es elevada y a la presencia de personas dentro de la sala de control. El aire acondicionado se volvió a encender el día 20 de setiembre al ser las 7:00 am y las pruebas concluyen a las 7:20 am.

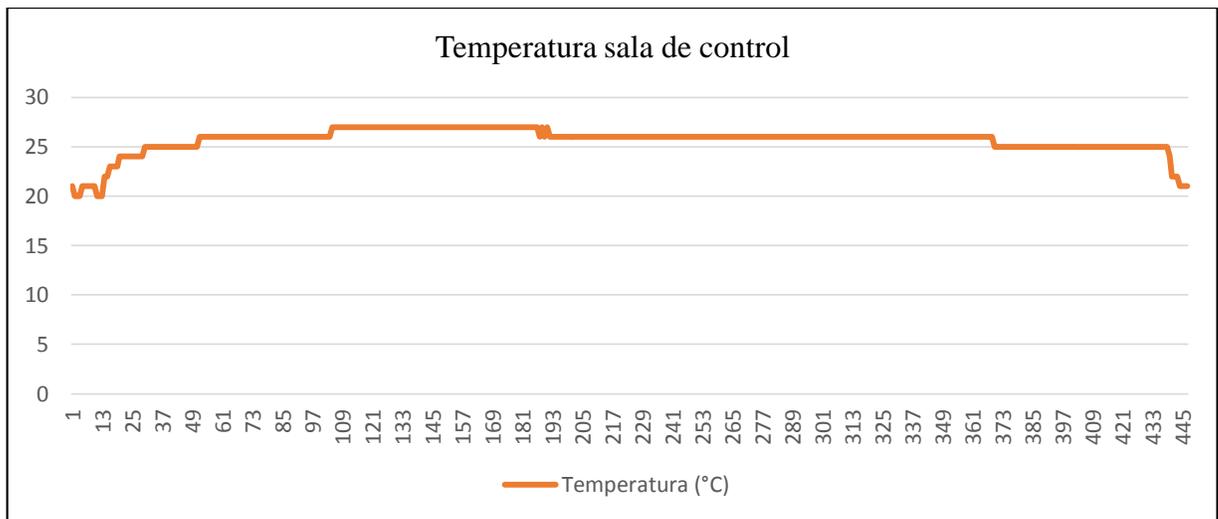


Figura 5.7. Medición de temperatura en la Sala de control en la subestación El Coco, apagando el aire acondicionado del 19 al 20 de setiembre del 2016.

Pero si comparamos las Figura 5.6 y Figura 5.7 podemos ver que en la prueba con el aire acondicionado encendido la temperatura máxima fue de 26°C mientras que para el caso sin aires acondicionados fue de 27°C, ambos casos el valor máximo se da en horas nocturnas, lo que nos dice que la temperatura de la sala en este lapso nocturno no se ve tan afectada por el aire acondicionado.

Como posibles soluciones planteadas tenemos la sustitución del equipo actual por uno de una tecnología más nueva, que sea más eficiente y de menor consumo, así como apagar el aire acondicionado una cantidad de horas fijas en las noches ya que el equipo presente en la sala no se va a ver afectado, también se podría pensar en tapar las ventanas para que haya una menor radiación directa que caliente el aire interno y provoque que este sistema tenga que trabajar más.

5.2.4. Ventiladores de los transformadores

En la subestación hay tres transformadores uno cuenta con trece ventiladores y los otros dos con doce ventiladores, estos son motores trifásicos de $\frac{1}{2}$ hp, de la Tabla 5.2 podemos observar el consumo de potencia de dichos ventiladores.

Estos ventiladores funcionan según la carga de transformación, ya que esta carga es proporcional a la temperatura del aceite utilizado para el enfriamiento. Estos ventiladores están diseñados para encenderse todos en conjunto.

Como posibles soluciones se plantean el uso de un arranque suave, para eliminar el pico de corriente al arranque, un variador de frecuencia, con el cual podríamos disminuir la velocidad del motor un poco, mientras que la potencia disminuye al doble de la realizada a la velocidad.

5.3. Solución seleccionada

La solución para el ahorro energético se presenta a continuación, siguiendo las mismas áreas del Capítulo 5.2. , en esta se menciona la solución seleccionada y el porqué de la misma, así como el ahorro calculado.

5.3.1. Calefacciones

De los datos obtenidos en la Tabla 5.7 podemos deducir que en la subestación El Coco no es necesario mantener las calefacciones encendidas durante todo el día, por lo tanto se decide encenderlas un tiempo fijo de dos horas diarias para eliminar cualquier rastro de humedad. Al tomar esta medida, estaremos utilizando solo 13kWh al día, lo que se transforma en un

consumo mensual de 395kWh totales y un ahorro de un 92% del consumo actual esto quiere decir que aproximadamente ahorramos 4300kWh al mes.

Para lograr este ahorro utilizaremos un sistema automático que las encienda y apague durante el periodo deseado, además que sea fácil de programar en caso de que se quiera cambiar la cantidad de horas diarias para la utilización.

Se plantea utilizar un relé programable, tipo LOGO 8 de Siemens o Zelio de Schneider, este es un dispositivo de fácil uso y programación. El cual se utilizara para encender las calefacciones por horario fijo, además de poder encender y apagar todas al mismo tiempo en caso de tener que realizar pruebas. Las ventajas de este dispositivo, es que de ser necesario se puede acoplar al SCADA.

En la Figura 5.8 tenemos como entradas dos botones los cuales sirven para encender o apagar todas las calefacciones, en caso de necesitar hacer una prueba. Y como salidas tenemos una conexión a cada una de las calefacciones. Las calefacciones se encenderán automáticamente dos horas diarias, mediante la programación que posee el relé, el cual en horas nocturnas encenderá todas las calefacciones en pequeños grupos por el tiempo programado.

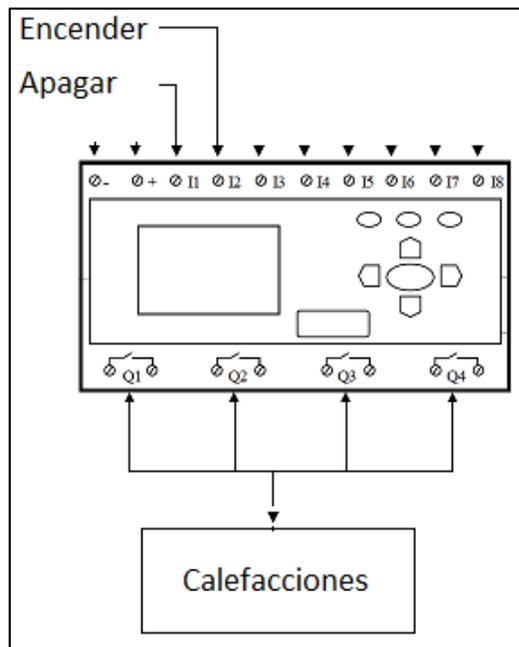


Figura 5.8. Esquema de conexión del sistema, para el control de las calefacciones.

5.3.2. Iluminación subestación y perimetral

Para dar una solución al tema de la iluminación se plantea no solo la sustitución de las luminarias actuales por lámparas tipo LED, sino que además se decide reducir la cantidad de estas que están encendidas fijas durante las noches.

Como primer punto de la reducción, es plantear la sustitución de las misma por unas más eficientes, por eso acudimos a empresas dedicadas a la venta de lámparas y conversando con los expertos nos dicen que la equivalencia de las lámparas actuales que rondan entre los 120W y los 150W, a la tecnología tipo LED es de una potencia de 44W a 54W. Esto sin disminuir la cantidad de lúmenes que entrega cada lámpara.

Con solo realizar la sustitución de todas por lámparas actuales por las de tipo LED de 44W, obtendríamos un consumo diario de 19kWh, y al mes serian 570kWh, con esta medida estaríamos ahorrando alrededor de un 80% del consumo actual lo que podemos representar como un ahorro de 2830kWh al mes.

En la Figura A.13, en el capítulo de apéndices, podemos observar la distribución actual de las lámparas en la subestación, las correspondientes al alumbrado público están dibujadas en amarillo, y las correspondientes a las lámparas de emergencia son las rojas.

Como un ahorro adicional se plantea encender quince de las luminarias, y las que permanecen apagadas encenderlas mediante el uso de sensores de movimiento, si hay presencia de personas en la zona. Con esta medida de reducción podríamos obtener un consumo total en el área de la iluminación de 240kWh al mes, alrededor de un 10% adicional a lo antes mencionado, para un ahorro total de 3100kWh al mes.

Cabe mencionar que estos 240kWh mensuales es el consumo mínimo, esto quiere decir que se daría solo si ninguna de las lámparas que poseen sensor de movimiento se enciende durante el mes, en caso que se enciendan en algún momento este consumo aumentaría un poco.

En la Figura A.14 podemos observar la distribución de las lámparas en la subestación, las que se mantendrían encendidas en horario nocturno se muestran en color amarillo, por su parte las de color negro son las que se encenderían mediante el uso de sensores, los sensores antes mencionados, las luminarias de emergencia son las rojas.

Es importante recordar que la vida útil de las lámparas LED ronda alrededor de las 35000 horas mientras que para las de sodio o mercurio es de unas 6000 horas, lo que también trae un beneficio ya que disminuye el costo por tener que sustituirlas.

Para el control de los sensores de movimiento se propone utilizar un relé programable como el utilizado para el control de las calefacciones, este dispositivo será el encargado de recibir la señal de los diversos sensores de movimiento y de encender las luminarias destinadas, la ventaja de este sistema es que solo necesitamos uno de estos para el control de todas las lámparas. El esquema general de este circuito se muestra en la Figura 5.9.

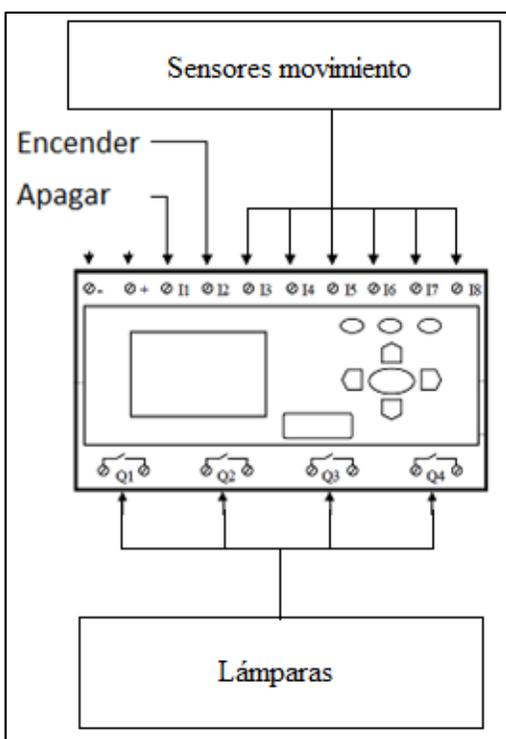


Figura 5.9. Esquema de conexión del sistema, para el control de las luminarias.

Otro factor en el que podemos ver una disminución del consumo es al ir reemplazando los reflectores utilizados en caso de averías nocturnas, que se encuentran actualmente, las cuales poseen un consumo muy alto debido a que cada una ronda entre los 250Wh y los 300Wh, estas podemos sustituirlas por las equivalentes LED que rondan los 75Wh por lo que obtendríamos un ahorro de un 75%. Cabe resaltar que en el caso de estas luminarias no es necesario su replazo inmediato, ya que son poco utilizadas. Se recomienda ir sustituyéndolas conforme se vayan dañando.

5.3.3. Aires acondicionados

Luego de realizar las pruebas mostradas anteriormente y con la ayuda de los expertos en aires acondicionados de la empresa Refrigeración Industrial Beirute S.A., los cuales nos ayudaron a determinar la carga térmica actual de la sala de control, así como nos generaron una serie de recomendaciones para así conocer cuál es el equipo más apropiado para esta aplicación.

Según el documento “Informe de cálculo de la carga térmica de acondicionamiento del aire de la sala de control de la subestación eléctrica El Coco” generado por el Ingeniero Anthony Pérez Saldaña, de la empresa antes mencionada, podemos observar que la carga térmica actual es de 76636 BTU/h, esto está detallado en la Figura 5.10, este cálculo es generado mediante el uso de un programa especial.

En este documento el ingeniero nos da una serie de recomendaciones para reducir dicha carga térmica, si se reduce necesitaremos un equipo de enfriamiento mucho más pequeño lo cual significa un menor consumo de potencia eléctrica.

Las recomendaciones generadas por el señor Pérez abarcan tres áreas en concreto que son: las ventanas, el cielo raso y los ductos de salida de cables desde la sala de control hacia la subestación.

En el área de las ventanas nos comenta que es mejor eliminarlas ya que es una carga térmica muy importante según lo visto en la Figura 5.10 es de 5350 BTU/h. Por su parte nos recomienda que se coloque un cielo raso ya que actualmente la sala no cuenta con esto y genera mucha ganancia de calor ya que el sol calienta las láminas y todo este calor es transmitido directamente al interior, si observamos la Figura 5.10 es la carga más significativa con 53296BTU/h.

Cargas térmicas	Carga sensible (BTU/hr)	Carga latente (BTU/hr)
Radiación solar por ventanas	2781	
Paredes	5108	-
Cielo	52442	-
Ventanas	2569	-
Puertas	1696	-
Cielorraso	854	-
Luces	3194	-
Equipo eléctrico	2303	-
Personas	490	410
Infiltraciones	1583	3206
TOTAL	73020	3616
CARGA TOTAL (BTU/hr)	76636	
CARGA TOTAL (TON)	6,3	

Figura 5.10. Condiciones de la carga térmica actual en la subestación El Coco.

La recomendación que nos da en el área de las infiltraciones es que se tapen las salidas de los cables hacia la subestación, a pesar que esta carga es pequeña en comparación a las anteriores, es de 4789BTU/h, es bueno realizar este sellado ya que el aire caliente del exterior entra a la sala y la calienta, lo que genera que el aire acondicionado tenga que trabajar más para compensar esta ganancia de calor.

Recordemos que el aire caliente es menos denso que el aire frío, por lo tanto el aire caliente entra en la sala y sube lo que desplaza el aire frío hacia afuera de la sala. Este sellado se puede realizar con goma espuma la cual disminuiría el traslado de calor y es fácil de quitar en caso de que se necesite realizar un trabajo en la zona.

Seguidamente se vuelve a realizar el estudio de la carga térmica, simulando que los cambios propuestos fueron realizados, esto lo ilustramos en la Figura 5.11, observamos que las cargas térmicas por ventanas e infiltraciones se redujeron a cero mientras que la del cielo raso se redujo a 29256BTU/h.

Cargas térmicas	Carga sensible (BTU/hr)	Carga latente (BTU/hr)
Radiación solar por ventanas	-	-
Paredes	6749	-
Cielo	28402	-
Ventanas	-	-
Puertas	1682	-
Cielorraso	854	-
Luces	3194	-
Equipo eléctrico	2303	-
Personas	490	410
Infiltraciones	-	-
TOTAL	43674	410
CARGA TOTAL (BTU/hr)	44084	
CARGA TOTAL (TON)	3,6	

Figura 5.11. Condiciones de la carga térmica ideal (siguiendo las recomendaciones) en la subestación El Coco.

De la Figura 5.10 y Figura 5.11 observamos que la carga térmica pasó de 6.3 a 3.6 toneladas de refrigeración, con el simple hecho de acatar estas recomendaciones. Esto quiere decir que es una disminución importante en la ganancia de calor de la sala de control.

Podemos llegar a la conclusión de que al realizar los cambios antes mencionados y además sustituir el sistema actual por uno más moderno podemos tener un ahorro considerable en el tema de los aires acondicionados.

En el informe del ingeniero Pérez nos menciona que es recomendable sustituir el equipo actual por uno más moderno, con la tecnología Inverter y un refrigerante R410A, esta modalidad puede reducir hasta un 15% el consumo, debido a que regula la velocidad del motor en vez de apagarlo por completo, el ahorro se da ya que la unidad no posee continuos arranques, los cuales generan altos consumos de corriente. También al regular la velocidad de giro ayuda a disminuir el consumo.

Entre los beneficios que posee este nuevo refrigerante tenemos que no contribuye con el debilitamiento de la capa de ozono y es mucho más eficiente, que su predecesor el R22, al ser más eficiente también reduce el consumo de electricidad de la unidad ya que extrae más fácil el calor de la sala.

Según el informe del ingeniero Pérez el equipo con la tecnología mencionada anteriormente puede ahorrar entre un 20% y un 50%, esto con el simple hecho de sustituir la unidad por una de la misma capacidad de enfriamiento a la actual.

Si tomamos el peor de los casos, un ahorro del 20%, estaríamos hablando de solo la sustitución el aire acondicionado actual por uno con la tecnología Inverter de capacidad de enfriamiento de 60000BTU/h igual a la del actual, tendríamos un ahorro cercano a los 365kWh mensuales.

Si con respecto a lo anteriormente mencionado tomamos en cuenta que el equipo que se recomienda en el informe del ingeniero Pérez es de una capacidad menor a la actual, de 24000BTU/h, podemos decir que el ahorro sería de hasta un 41% aproximadamente, esto quiere decir que si acatamos todas las recomendaciones podríamos generar un ahorro de unos 746kWh mensuales en esta área.

5.3.4. Ventiladores de los transformadores

Se procede a realizar el diseño de un variador de frecuencia para el control de los ventiladores de los transformadores, como se mencionó en el Capítulo 3. , este cuenta con la etapa del rectificador trifásico y el convertidor a PWM, a continuación explicaremos cada etapa y diseñaremos el variador para nuestro proyecto.

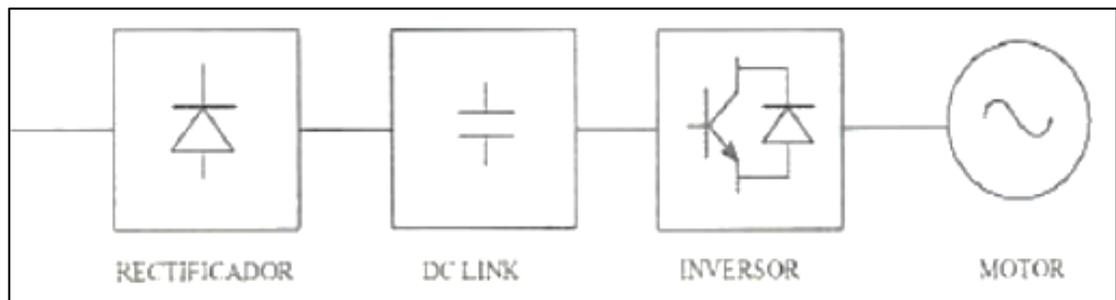


Figura 5.12. Diagrama de bloques de un variador de frecuencias.

El rectificador es el encargado de convertir en CD la corriente de la red, el DC link es una etapa de acople y el inversor convierte el voltaje CD en una corriente alterna de frecuencia controlada y variable. Cabe mencionar que en la etapa del inversor se integra una etapa de control la cual es la encargada de controlar la frecuencia deseada por el usuario.

El motor a controlar es el California Turbo CFM24J230BS, este tiene las características mostradas en la Tabla 5.8. Cabe resaltar que el CFM es una unidad de volumen, cubic feet per minute en español pie cubico por minuto, este determina la cantidad de un fluido que pasa por una sección determinada.

Tabla 5.8. Características del motor a controlar.

Ventilador trifásico	
Tensión (VAC)	208-230
Corriente funcionamiento (A)	1.8
Corriente inicio (A)	12
Factor de potencia	68
Potencia	1/2hp – 373W
RPM	1725
CFM	6790
Frecuencia (Hz)	60
Díámetro aspas (")	24

Para llevar a cabo la variación de velocidad de los diferentes motores de inducción, existen muchos métodos, pero se selecciona el de Voltaje-Frecuencia constante; el cual consiste en mantener una relación fija entre la magnitud del voltaje del estator del motor y la frecuencia eléctrica del mismo, con la finalidad de conservar el par constante a través del

rango de operación del motor. La curva del par inducido en el motor para una relación Voltaje-Frecuencia (V/f) constante en un motor de inducción se muestra en la Figura 5.13:

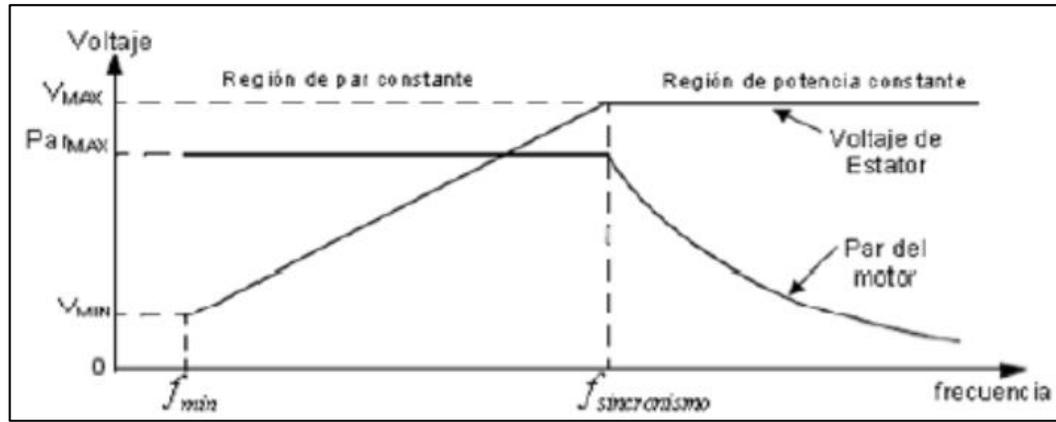


Figura 5.13. Curva del par inducido en el motor de inducción para la relación Voltaje-Frecuencia constante.

- Rectificador onda completa

La conversión de CA de la red de suministro eléctrico a un voltaje CD para la alimentación del puente inversor, debe realizarse mediante un rectificador trifásico no controlado con tiristores SCR en vez de diodos, para controlar la fase que deseamos conmutar en cada uno de estos elementos y así obtener una mejor señal CD a la salida de este bloque.

La secuencia de encendido de cada tiristor, se calcula tomando como referencia un periodo (T) determinado y teniendo en cuenta que la frecuencia (f) de funcionamiento del circuito de control de velocidad debe trabajar para una frecuencia máxima de 60Hz, se define mediante la Ecuación (5.1) el tiempo de duración de un ciclo de trabajo para el circuito, este es de 16.67ms.

$$T = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

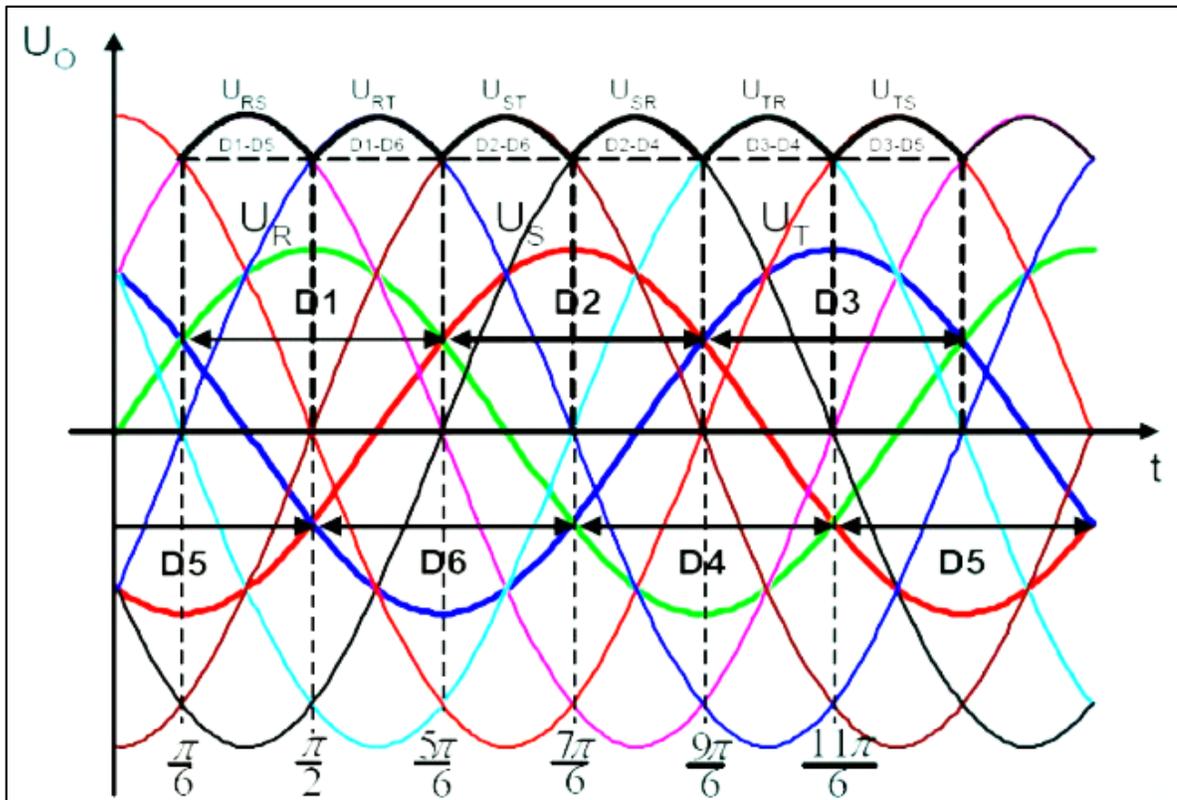


Figura 5.14. Formas de onda de un rectificador de onda completa trifásico.

Además sabemos que $T = 2\pi$, con esto y con la Figura 5.14 podemos encontrar el tiempo de funcionamiento de cada tiristor. Lo que debemos de lograr es obtener la curva negra de la Figura 5.14 a la salida de este bloque, esto lo obtenemos con la Ecuación (5.2).

$$t = rad * \frac{T}{2\pi} \quad (5.2)$$

Tabla 5.9. Cálculo de los tiempos de encendido de los tiristores de la Figura 5.14 con ayuda de la Ecuación (5.2).

Tiristores encendidos	Radianes	Tiempo (ms)
D1 y D5	$\pi/6$	1.389
D1 y D6	$\pi/3$	4.167
D2 y D6	$5\pi/6$	6.944
D2 y D4	$7\pi/6$	9.722
D3 y D4	$9\pi/6$	12.500
D3 y D5	$11\pi/6$	15.278

Para el diseño de esta etapa se utilizan tiristores S6010LS3, estos soportan hasta $600V_{RMS}$ y $10A_{RMS}$, los cuales están por encima de los valores utilizados para el motor utilizado y descrito en la Tabla 5.8.

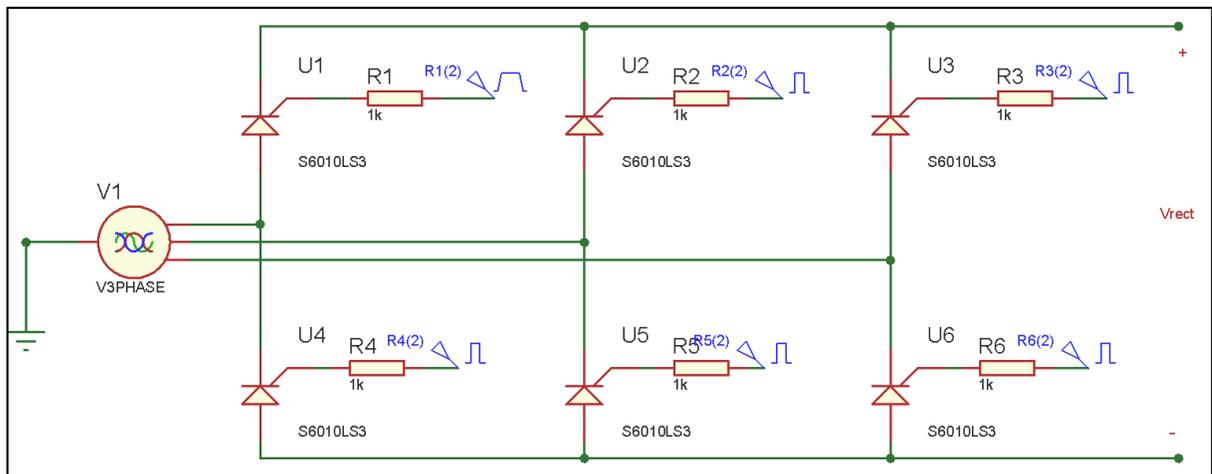


Figura 5.15. Circuito rectificador de onda completa.

- Acople DC

La etapa de acople o DC link se encarga de rectificar la señal de salida del conversor CD a CA, ya que esta es un voltaje pulsante como la línea negra de la Figura 5.14, para este fin se utiliza un filtro capacitivo, además este filtro sirve para contrarrestar el factor de potencia (FP) de la carga, en este caso un motor de inducción con las características mostradas en la Tabla 5.8.

$$FP = \frac{P}{|S|} = \cos(\angle V - \angle I) = \cos(\phi) = \cos(\angle Z) \quad (5.3)$$

Donde Z es la impedancia de la carga, en nuestro caso el motor. Como se observa en la Tabla 5.8 el FP para nuestro ventilador es de 0.68, esto nos genera un desfase entre la tensión y la corriente de 47.16°, calculándolo con la Ecuación (5.4). Calculando este desfase en unidades de tiempo, obtenemos que es de 2.183ms.

$$\phi = \cos^{-1}(FP) \quad (5.4)$$

Calculando la carga eléctrica en la carga con la ayuda de la Ecuación (5.5), esto porque el área bajo la curva de la gráfica de voltaje versus corriente en la carga, representa la carga eléctrica (Q). Con los datos de la Tabla 5.8 y el tiempo calculado con la Ecuación (5.4), cabe recordar que la unidad de medida son los Coulomb (C), obtenemos Q=1.965mC.

$$Q = \frac{I * t_{desfase.}}{2} \quad (5.5)$$

$$C = \frac{Q}{V} \quad (5.6)$$

Para calcular el valor del capacitor necesitado para este filtro se utiliza la Ecuación (5.6), recordando las unidades de capacitancia son los Faradios (F), para este cálculo obtenemos C=9.446μF.

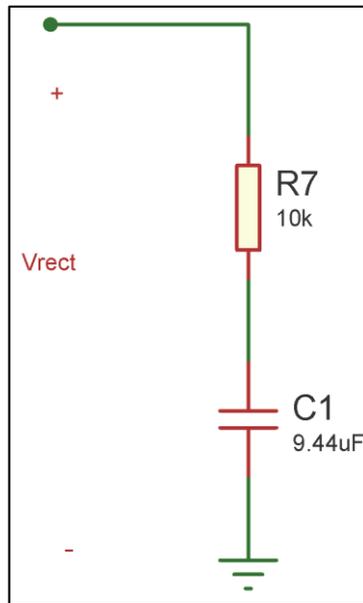


Figura 5.16. Circuito del filtro y acople CD.

- Inversor CD-CA

Para el diseño de esta etapa es importante conocer los valores de tensión y corriente de la carga, o sea nuestro motor, tanto los valores de arranque como los de estado final, estos los observamos en la Tabla 5.8. De dicha tabla observamos que la corriente pico es de 12A por fase, lo que quiere decir que la salida de este inversor debe de soportar al menos esa corriente.

Para esta etapa se utilizarán MOSFET de potencia, estos deben de garantizar una corriente mayor a los 12A y una tensión a la salida mayor a los 208V. En los datos de la ficha técnica MOSFET FDH20N40 observamos que la corriente máxima es de 20A y el voltaje es de 400V DC.

En esta etapa los MOSFET son controlados desde la etapa de control, y según sea la secuencia de encendido así será la frecuencia y voltaje obtenidos a la salida, hay que recordar que la entrada de la compuerta del transistor se controla con 12V.

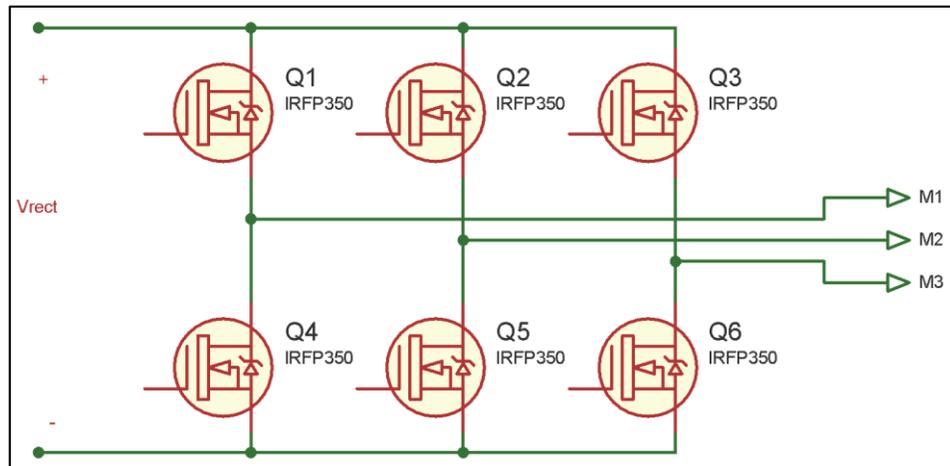


Figura 5.17. Circuito inversor CD-CA.

- Control

En esta etapa se procede al diseño de las salidas de control para las etapas anteriores, se diseña el encendido y apagado de los tiristores, y los acoples entre la etapa de control y potencia. De la Figura 5.17, observamos la secuencia de encendido de los tiristores, donde tenemos que variar el ancho del pulso para que varié la frecuencia de la señal de salida de la etapa de inversión.

De la Figura 5.18 podemos deducir la Tabla 5.10 con la secuencia de encendido y apagado de los tiristores, donde el 1 significa encendido y el 0 apagado. Dicha secuencia es programada en lenguaje ensamblador en un PIC16F866. Además se utiliza un ATMEGA8535 el cual es utilizado para el control del PWM.

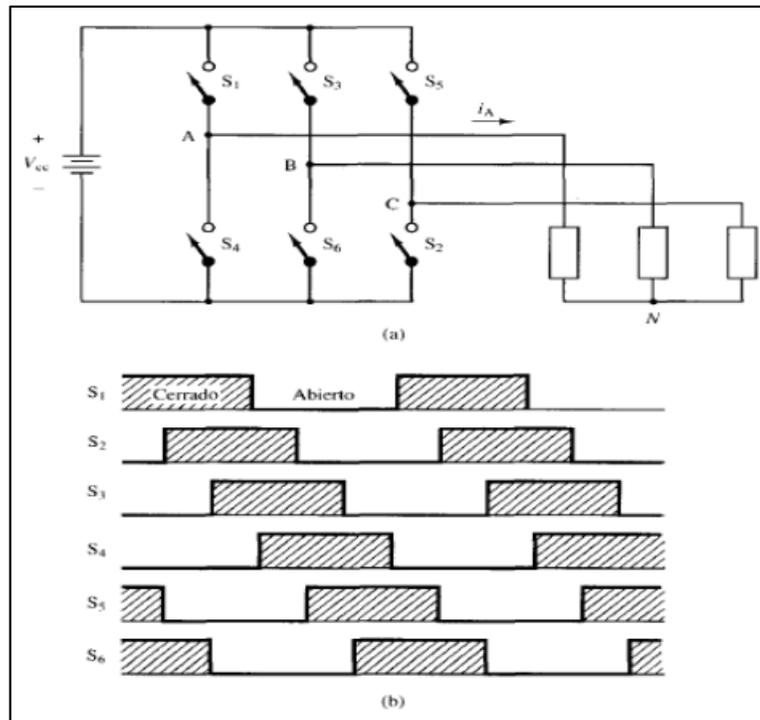


Figura 5.18. (a) Circuito inversor CD-CA equivalente. (b) Secuencia de funcionamiento de los transistores MOSFET.

Tabla 5.10. Secuencia de encendido de los tiristores.

Estado	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0	1	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0	1
2	1	1	1	0	0	0
3	0	1	1	1	0	0
4	0	0	1	1	1	0
5	0	0	0	1	1	1

El circuito de control lo observamos en la Figura 5.19, esta etapa falta adicionarle la etapa de acople entre el control y la parte de potencia, esta etapa es diseñada con transistores, esto evita que se quemé el control por un problema en la etapa de potencia.

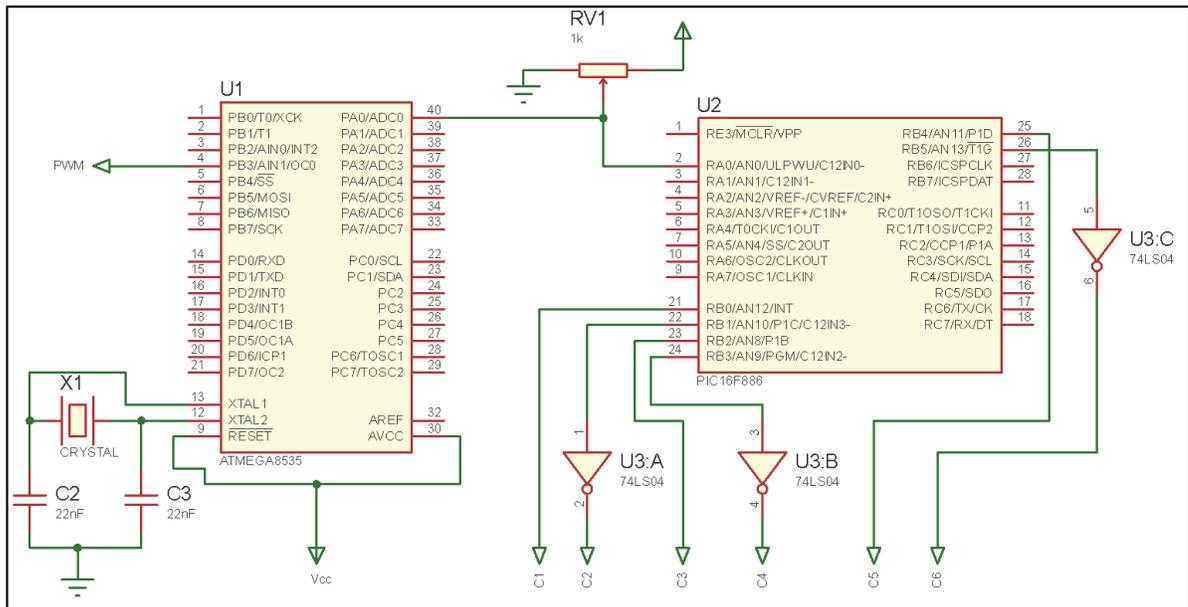


Figura 5.19. Circuito de control.

El funcionamiento de esta etapa la podemos resumir en que al variar el potenciómetro RV1, de la Figura 5.19, hay un cambio en la tensión de entrada al PIC y al ATMEGA, y ellos internamente leen este valor y cambian la frecuencia de trabajo de los MOSFET de la etapa inversora, así como ciclo de trabajo del PWM haciendo variar el voltaje sobre la carga.

La etapa de acople o predriver como se mencionó anteriormente es la encargada de proteger el control, en esta etapa también se agregan las compuertas AND encargadas de crear la señal final de control, compuesta por la señal PWM y la salida de control. Este circuito lo mostramos en la Figura 5.20, es importante saber que poseemos un circuito como el mostrado por cada una de las señales de control, en total son seis circuitos iguales.

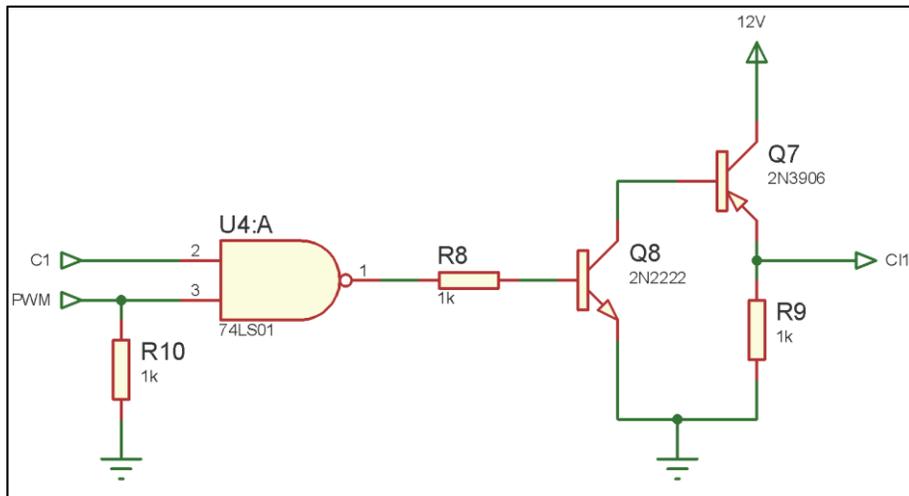


Figura 5.20. Circuito de acople.

A continuación mostraremos el funcionamiento del circuito, mediante simulaciones realizadas en Proteus 8.

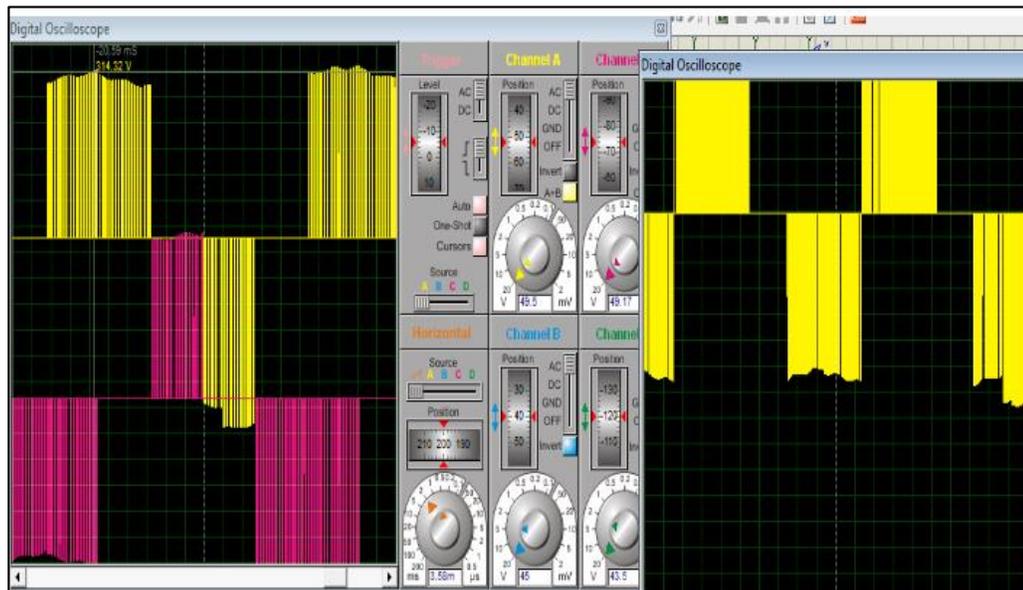


Figura 5.21. Simulación de las tres fases de salida del inversor CD-CA, con una tensión de 5V en la salida del potenciómetro.

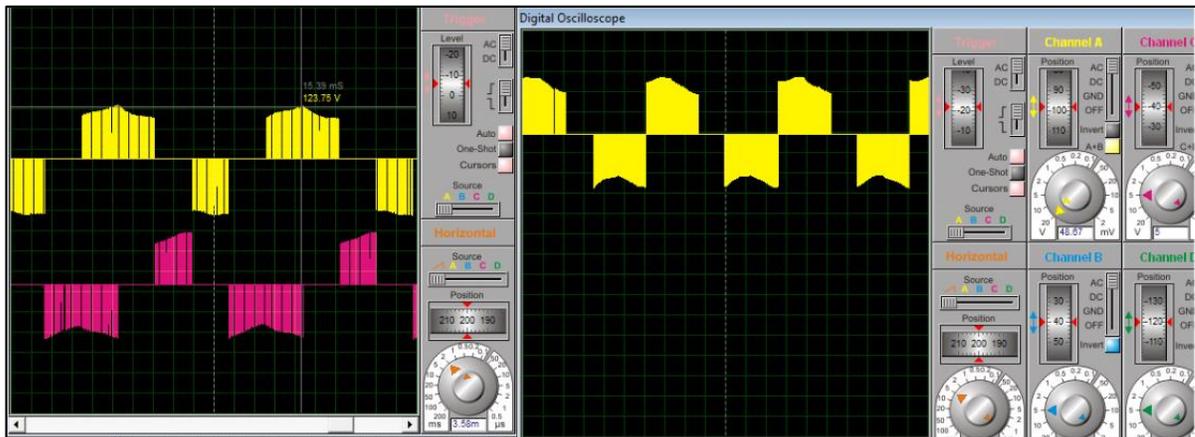


Figura 5.22. Simulación de las tres fases de salida del inversor CD-CA, con una tensión de 3V en la salida del potenciómetro.

De las simulaciones anteriores podemos observar que al variar el valor del potenciómetro, obtenemos un cambio en la tensión de salida hacia el motor, así como un cambio en la frecuencia de la señal que obtenemos.

Ahora veremos los beneficios de un sistema comercial sobre el diseñado anteriormente, este sistema comercial fue diseñado por los ingenieros de la empresa Siemens, los cuales nos proponen un sistema de tres variadores de frecuencia y un sistema de control.

Las ventajas de este sistema se mencionan a continuación: está compuesto por un arrancador suave el cual elimina los picos excesivos de corriente al inicio de operación, a este sistema se le añade un sistema de control inteligente, el cual basa su funcionamiento en la temperatura del aceite del transformador. Otra ventaja que posee este sistema es el de poder integrarlo al SCADA o algún otro medio de control, también el de poder ver el funcionamiento de los ventiladores.

El sistema de control funciona de la siguiente manera: según sea la temperatura del aceite se encienden los ventiladores en grupos de cuatro, hasta llegar a encender los doce ventiladores del transformador si la temperatura se está elevando mucho, de igual manera si la temperatura disminuye lo suficiente un bloque de ventiladores se apaga, hasta el punto en que no sea necesario el enfriamiento forzado.

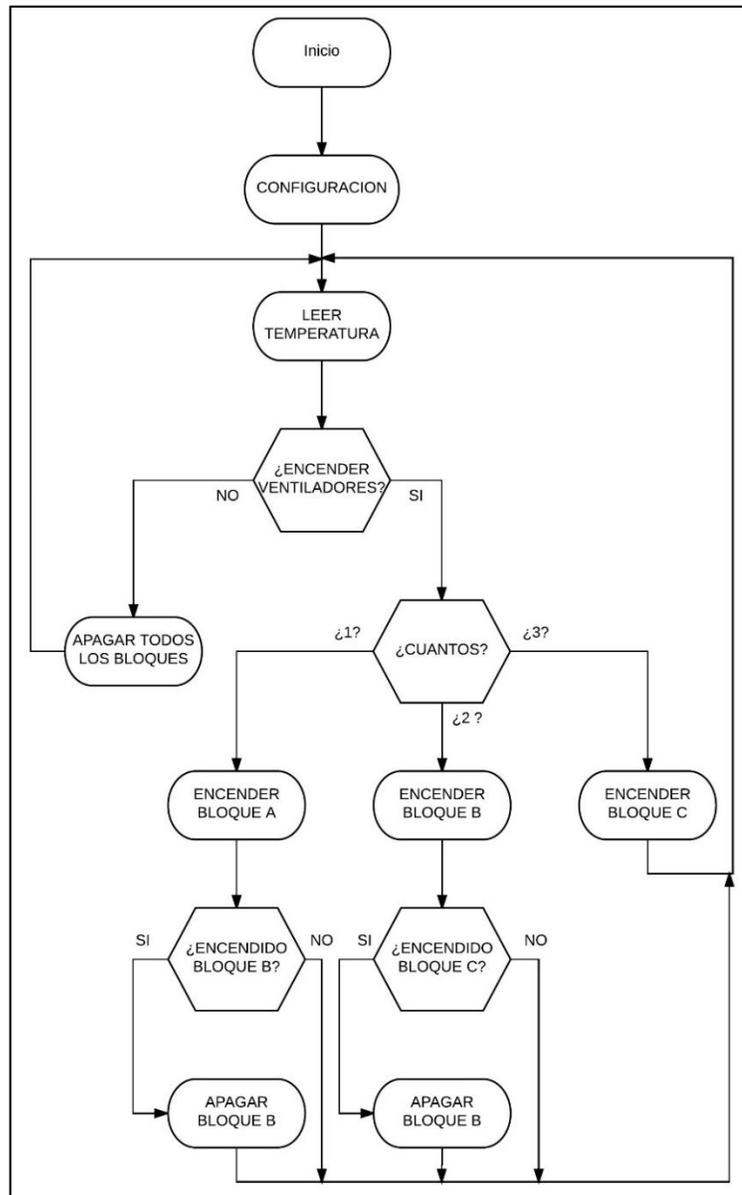


Figura 5.23. Diagrama de flujo del control automático para el control de los ventiladores de los transformadores.

En la Figura 5.23 observamos el diagrama de flujo de lo que tiene que realizar el control automático, donde se verifica la temperatura del aceite y se decide si es necesario encender los ventiladores o no, si es necesario, se encienden los bloques necesarios según la temperatura actual, y si dicha temperatura varia vuelve a comparar y enciende o apaga los bloques necesario.

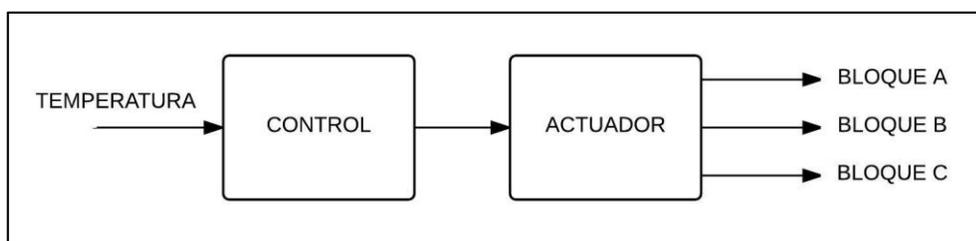


Figura 5.24. Diagrama de lazo abierto del sistema de control.

En la Figura 5.24 observamos los principales bloques del sistema de control, en el cual el control es el encargado de leer la temperatura y decidir cuantos ventiladores son necesarios para la temperatura actual, por su parte el bloque de actuadores son los encargados de encender y apagar los bloques de ventiladores que determinó el modulo anterior.

El control de temperatura se hace a lazo cerrado, lo cual hace que el sistema sea eficiente y cumpla con el propósito de aumentar el ahorro energético en la subestación.

Este sistema fue generado con la ayuda de personeros de Siemens, los cuales determinaron los equipos a utilizar, según las necesidades que les indicamos en una visita que realizaron a la subestación. Con esta información plantearon el uso de variadores de frecuencia V20 de 3HP para controlar cuatro de los ventiladores con cada uno de estos dispositivos.

Un Simatic s7-1200 como unidad de control, esta es la encargada de leer la temperatura y encender los variadores de frecuencia, este bloque se le adiciona un módulo de comunicación 1242-5 para una comunicación del tipo Profibus, y así poder enlazarla al SCADA o a otro sistema del ICE.

Entre los beneficios ofrecidos para este sistema según los personeros de Siemens tenemos los siguientes: arranque suave, ahorro energético por utilizar los ventiladores a menor frecuencia, información sobre el monitoreo del sistema (arranques, control de temperatura, fallas de arranque, contador de energía, entre otros). Además este sistema le da una estabilidad eléctrica a los motores, lo que provoca que fallen menos por los cambios en la red eléctrica, esto quiere decir que el VFD trae muchos beneficios adicionales que no solo implican el ahorro de electricidad.

Como parte del ahorro, el mismo variador trae una función ECO (de ecológica), esta función lo que hace es que si la velocidad del motor está estable por un tiempo el VFD varía el valor del voltaje para realizar un pequeño ahorro energético. Este dispositivo posee además la opción de conectarse a paneles solares directamente, y el mismo decide si toma el suministro desde el panel o desde la red eléctrica según sea la generación de la celda fotovoltaica.

El ahorro en esta área no se puede calcular exactamente, debido a que la temperatura del aceite del transformador va a depender de la carga de transformación y de la temperatura ambiental. En la Tabla 5.11 y la Tabla 5.12 se muestra el ahorro que se obtendría según sea el caudal al que trabajen dichos motores.

Como ejemplo para el cálculo de un posible ahorro se toma como referencia que los ventiladores van a trabajar la misma cantidad de horas pero con un caudal menor al actual por ejemplo si trabajaran al 90% del caudal tendríamos un ahorro de 730kWh mensuales entre ambos transformadores. Si el caso fuera a un 80% del caudal el ahorro mensual ascendería a más de 1100kWh y a un 70% del caudal tendríamos cerca de 1500kWh ahorrados.

El transformador 1 no se toma en cuenta ya que como se dijo anteriormente este tiene tan baja carga que no está necesitando de enfriamiento forzado, pero si en algún momento se le aumenta la carga se puede implementar el mismo sistema.

Tabla 5.11. Ahorro en los motores de los ventiladores según el porcentaje de caudal seleccionado para el transformador 2.

Caudal	Consumo aproximado (kW)	Ahorro por motor (kW)	Ahorro 12 motores (kW)	Por día (kWh)	Por mes (kWh)
100%	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00
90%	0,40	0,17	2,04	9,18	275,40
80%	0,30	0,27	3,24	14,58	437,40
70%	0,23	0,34	4,08	18,36	550,80

Tabla 5.12. Ahorro en los motores de los ventiladores según el porcentaje de caudal seleccionado para el transformador 3.

Caudal	Consumo aproximado (kW)	Ahorro por motor (kW)	Ahorro 12 motores (kW)	Por día (kWh)	Por mes (kWh)
100%	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00
90%	0,40	0,17	2,04	15,30	459,00
80%	0,30	0,27	3,24	24,30	729,00
70%	0,23	0,34	4,08	30,60	918,00

Como se mencionó anteriormente es difícil estimar cuánto será el ahorro total en esta área, debido a que según la temperatura se van a encender los ventiladores en bloques de cuatro y a una frecuencia menor, según determine el sistema de control.

Por esta razón es muy difícil determinar exactamente cuánto será el ahorro, pero sí podemos determinar un ahorro aproximado, si tomamos en cuenta que los ventiladores van a trabajar la misma cantidad de horas con un caudal de un 80% del actual, en este caso tendríamos un ahorro de 928kWh mensuales lo que equivale a unos ¢112,643.51.

Tabla 5.13. Comparación del diseño del VFD propio con el diseño brindado por la empresa Siemens.

Operación	Diseño propio	Diseño comercial
Arranque suave	Si	Si
Frecuencia variable	Si	Si
Control por temperatura	No	Si
Control de arranques	No	Si
Programación remota	No	Si
Monitoreo fallas	No	Si
Estabilidad condiciones motores	No	Si
Modo ECO	No	Si
Monitoreo arranques	No	Si
Contador de energía	No	Si
Tensión constante	No	Si
Pruebas en funcionamiento	No	Si
Costo promedio	Alrededor de ¢2 millones	Más de ¢4 millones

Después de comparar ambos sistemas, decidimos utilizar el diseño de la empresa Siemens ya que este sistema trae muchos más beneficios para el ICE que el diseño propuesto por el suscrito, a pesar de ser un poco más costoso. Recordemos que el diseño creado por mi persona debe de pasar por una serie de pruebas y de rediseños antes de poder ser instalado en los motores de los ventiladores, y estos procesos pueden tardar mucho tiempo y costar además mucho más dinero.

Por su parte el diseño comercial, únicamente se debe programar y proceder a la instalación, es mucho más rápido su montaje y ya se le han hecho muchas pruebas de funcionamiento.

Todas las funciones adicionales que posee el diseño de la empresa Siemens es lo que nos hace decidir que a pesar de su elevado costo es la mejor solución para la reducción del consumo de los ventiladores de los transformadores.

5.3.5. Otras posibles reducciones

En este apartado vamos a mencionar algunas otras acciones que podemos realizar para disminuir aún más el consumo eléctrico de la subestación, se anuncian por aparte porque no son tan influyentes como las antes mencionadas, pero puede ser importante tomarlas en cuenta a futuro.

En el área de la iluminación de oficinas, talleres y sala de control se pueden sustituir los balastos actuales por balastos electrónicos y los tubos fluorescentes por su equivalente en LED. Este tipo de balastro aumenta la eficiencia de la lámpara, además que posee un consumo menor de electricidad. Por su parte los tubos led pueden llegar a consumir menos de la mitad de lo que consume un tubo fluorescente convencional, lo cual no deja de ser un ahorro considerable, además de una mayor vida útil, que ronda las cincuenta mil horas en comparación de las diez mil del fluorescente.

Otro ahorro que se puede considerar es el de sustituir los aires actuales de las oficinas por otros más eficientes y que se adecuen más a las necesidades actuales, y que posean

características similares como las mencionadas para el aire acondicionado de la sala de control (con tecnología Inverter y refrigerante R410A).



Figura 5.25. Ejemplo de balastro electrónico y tubo LED.

5.4. Estudio de la rentabilidad del proyecto

Para lograr determinar la rentabilidad de este proyecto se deben tomar en cuenta varios aspectos que influyen el cálculo del tiempo estimado para la recuperación de la inversión requerida en la implementación del proyecto.

Como primer aspecto a considerar se debe contemplar los gastos asociados a la posible implementación del sistema. Para la determinación de los mismos se solicitaron cotizaciones a diversas empresas, con la finalidad de que se contara con varias alternativas para la compra de los equipos requeridos y, de esta forma, poder realizar la escogencia de la empresa que propusiera las de mejores condiciones económicas.

Podemos iniciar definiendo los principales factores y fórmulas que determinaran la viabilidad de las diferentes inversiones.

El periodo de recuperación (PR) representa el tiempo necesario para recuperar su inversión inicial, es decir, mide cuánto tarda en años una inversión de capital para que sus flujos de efectivo recuperen el monto invertido. Se calcula como se muestra en la Ecuación

$$PR = \# \text{ periodos antes de cubrirlo} + \frac{\text{monto sin cubrir}}{\text{flujo del periodo}} \quad (5.7)$$

El valor actual neto (VAN) expresa la ganancia neta que genera un proyecto o inversión de capital después de cubrir el monto invertido. El VAN descuenta todos los flujos estimados futuros a valor actual con la tasa del costo de capital, a cuyo valor presente de flujos (VPF) es restada la inversión inicial, para indicar la ganancia neta actual nominal.

$$VAN = VPF - inversión\ inicial \quad (5.8)$$

La tasa interna de retorno (TIR) representa el porcentaje promedio de rendimiento por periodo que genera un proyecto sobre su inversión, además representa aquella tasa que hace que el VAN sea igual a cero, este se calcula en un procesador matemático, ya que es un método iterativo.

El costo beneficio (CB) expresa la contribución de ganancia que genera un proyecto sobre el monto invertido, es decir, indica cuanto representa el VAN sobre la inversión inicial. Este mide la contribución de ganancia porcentual o unitaria sobre el monto invertido y, por lo tanto, es el método adecuado para comparar proyectos con inversiones diferentes.

$$CB = \frac{VAN}{I_0} \quad (5.9)$$

El valor actual neto anualizado (VANA) representa la ganancia promedio anual que genera una inversión capital, o sea toma el VAN (que es una ganancia total) y la distribuye en ganancias promedio por periodo, similar a calcular una cuota financiera para un valor presente en n periodos y considerando el costo de capital como la tasa de interés.

$$VANA = \frac{VAN}{FVP\ de\ n\ periodos} \quad (5.10)$$

La depreciación la calcularemos de forma lineal, donde tomaremos la inversión inicial y la distribuiremos equitativamente durante el total de años de vida útil del artículo seleccionado.

Ahora que definimos los principales medios de comparación económica procedemos a calcular los beneficios de cada sección del proyecto, por lo tanto lo separaremos en las cuatro soluciones mencionadas en el punto 5.2. , esto con el fin de ver la rentabilidad de cada parte del proyecto, y luego procederemos a realizar uno global. Esta división la hacemos considerando si a futuro se quiere implementar el proyecto por etapas o todo el conjunto.

5.4.1. Calefacciones

Como se mencionó en el apartado 5.3.1. se utilizarán los relés programables, en nuestro caso se diseñó utilizando cinco de estos con el fin de reducir costos y pérdidas eléctricas por el extenso cableado.

Cabe recalcar que el diseño creado se basa en que todas las calefacciones se pueden conectar a 220V, en caso de que las actuales no tengan esta facilidad se deberán de sustituir, esto para crear un estándar en la conexión de las mismas, así como también para disminuir el consumo eléctrico y reducir las pérdidas en el cable de cobre.

En el 6.2. Apéndice A.3.1. se muestran los planos unifilares de la conexión de los equipos para el control de las calefacciones, así como el equipo eléctrico necesario para dicho fin. Como se mencionó anteriormente se necesitarán cinco relés programables marca Logo que poseen un costo de ¢81,595.00 cada uno, para un total de ¢407,970.00, esta sería la inversión inicial en nuevo equipo, sumado a esto necesitamos una serie de materiales que ya posee la institución, estos se muestran en la Tabla 5.14 con su respectivo costo aproximado según el sistema de inventarios internos del ICE.

El cálculo de la energía ahorrada lo obtenemos de la resta entre el consumo actual y el esperado, este último lo sacamos multiplicando el consumo total actual por hora, por la nueva cantidad de horas que trabajarían las calefacciones en este caso sería por dos según lo mencionado en la sección 5.3.1. , este ahorro sería de ¢6,320,517.00 anuales.

Tabla 5.14. Materiales necesarios para la instalación del control de las calefacciones.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Interruptor térmico 30A	2	4.500,00	9.000,00
Interruptor térmico 25A	2	4.300,00	8.600,00
Interruptor térmico 15A	1	3.900,00	3.900,00
Interruptor térmico 5A	25	6.800,00	170.000,00
Interruptor térmico 2A	3	4.000,00	12.000,00
Cable #14 2 hilos	730	1.155,00	843.150,00
Caja metálica	5	327.400,00	1.637.000,00
Regletas	130	550,00	71.500,00
Sostenedor regletas	20	450,00	9.000,00
Convertidor medios	5	45.000,00	225.000,00
Otros materiales	1	50.000,00	50.000,00
Total ¢			3.039.150,00

De la Tabla 5.15 y Tabla 5.16 podemos observar que la inversión se recupera en 9 meses y 10 días, y también determinamos que en un periodo de ocho años se obtiene un ahorro total de más de ¢50 millones y una recuperación de más de ¢30 millones.

Tabla 5.15. Cálculo de los flujos para el control de las calefacciones.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro energía	0	6.320.517	6.320.517	6.320.517	6.320.517	6.320.517	6.320.517	6.320.517	6.320.517
Depreciación	0	(50.996)	(50.996)	(50.996)	(50.996)	(50.996)	(50.996)	(50.996)	(50.996)
Utilidad antes impuestos	0	6.269.521	6.269.521	6.269.521	6.269.521	6.269.521	6.269.521	6.269.521	6.269.521
Impuesto 30%	0	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)	(1.880.856)
(+) Depreciación	0	50.996	50.996	50.996	50.996	50.996	50.996	50.996	50.996
Flujo neto	(3.447.120)	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661
Flujo descontado	0	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661	4.439.661
Flujo acumulado	0	4.439.661	8.879.322	13.318.982	17.758.643	22.198.304	26.637.965	31.077.626	35.517.286
Recuperación	(3.447.120)	992.541	5.432.202	9.871.863	14.311.524	18.751.184	23.190.845	27.630.506	32.070.167

Tabla 5.16. Indicadores económicos para el control de las calefacciones.

VAN	€32.070.166,79
TIR	129%
CB	7.860,92
VANAE	€4.008.770,85
CBA	116,29
PDR	0,78
PDR	9 meses y 10 días

5.4.2. Iluminación subestación y perimetral

Como se mencionó en el apartado 5.3.1. para el control de la iluminación se utilizarán dos relés programables, esto para no variar el cableado actual de la subestación en el área de la iluminación.

En el 6.2. Apéndice A.3.2. se muestran los planos unifilares de la conexión de los equipos para el control de la iluminación interna y perimetral de la subestación, así como el equipo eléctrico necesario para dicho fin. La inversión inicial del equipo nuevo se muestra en la Tabla 5.17 y el costo de los demás artículos necesarios para la instalación se muestra en la Tabla 5.18.

Tabla 5.17. Inversión inicial del equipo para el control de la iluminación.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Lámparas	36	63.565,89	2.288.372,04
Logo	2	81.593,91	163.187,82
Sensores lineales 100m	2	74.663,73	149.327,47
Sensores lineales 60m	2	55.308,11	110.616,22
Sensores lineales 30m	4	45.842,27	183.369,08
Sensores movimiento	9	44.684,35	402.159,12
Total ¢			3.297.031,75

Tabla 5.18. Materiales necesarios para la instalación del control de la iluminación.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Interruptor térmico 2A	6	4.000,00	24.000,00
Interruptor térmico 1A	9	4.000,00	36.000,00
Interruptor térmico 1A mono	9	4.000,00	36.000,00
Contactores	7	10.000,00	70.000,00
Regletas	54	550,00	29.700,00
Sostenedor regletas	10	450,00	4.500,00
Cable 3 hilos	1115	1.500,00	1.672.500,00
Convertidor medios	2	45.000,00	90.000,00
Otros materiales	1	100.000,00	100.000,00
Total ¢			2.062.700,00

Tabla 5.19. Cálculo de los flujos para el control de la iluminación.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro energía	0	4.595.824	4.595.824	4.595.824	4.595.824	4.595.824	4.595.824	4.595.824	4.595.824
Depreciación	0	(412.129)	(412.129)	(412.129)	(412.129)	(412.129)	(412.129)	(412.129)	(412.129)
Utilidad antes impuestos	0	4.183.695	4.183.695	4.183.695	4.183.695	4.183.695	4.183.695	4.183.695	4.183.695
Impuesto 30%	0	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)	(1.255.109)
(+) Depreciación	0	412.129	412.129	412.129	412.129	412.129	412.129	412.129	412.129
Flujo neto	(5.359.732)	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716
Flujo descontado	0	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716	3.340.716
Flujo acumulado	0	3.340.716	6.681.431	10.022.147	13.362.863	16.703.578	20.044.294	23.385.010	26.725.725
Recuperación	(5.359.732)	(2.019.016)	1.321.700	4.662.415	8.003.131	11.343.847	14.684.562	18.025.278	21.365.994

Tabla 5.20. Indicadores económicos para el control de la iluminación.

VAN	€21.365.994
TIR	61%
CB	398,64
VANAE	€2.670.749
CBA	116,71
PDR	1,60
PDR	1 año, 7 meses y 8 días

El cálculo de la energía ahorrada lo obtenemos de la resta entre el consumo actual y el esperado, este último lo sacamos multiplicando el consumo individual por el total de horas a trabajar, este ahorro sería de ¢4,595,824.00 anuales aproximadamente.

De la Tabla 5.19 y Tabla 5.20 podemos observar que la inversión se recupera en 1 año, 7 meses y 8 días, y también determinamos que en un periodo de ocho años se obtiene un ahorro total de más de ¢36 millones y una recuperación de más de ¢21 millones.

5.4.3. Aires acondicionados

Como se mencionó en la sección 5.3.3. se reemplazarán los dos aires acondicionados por unos de 24000BTU/h cuyo costo total con la instalación de los mismos es de ¢1,810.000.00, además es necesario realizar trabajos en la sala de control siguiendo las recomendaciones que nos da el ingeniero Pérez en su informe, estos gastos se calculan en unos ¢4,000,000.00 aproximadamente.

El cálculo del ahorro total se realizó según la hoja de datos del equipo cotizado, suministrada por la empresa Aires Beirute, este ahorro se calculó con la diferencia entre el consumo actual y el esperado con el nuevo equipo y las mejoras a la sala de control, aproximadamente es de poco más de 1 millón de colones anualmente.

De la Tabla 5.21 y Tabla 5.22 podemos observar que la inversión se recupera en 7 años y 2 días, y también determinamos que en un periodo de ocho años se obtiene un ahorro total que ronda los ¢8.7 millones y una recuperación de unos ¢800,000.00.

Tabla 5.21. Cálculo de los flujos para la sustitución del aire acondicionado.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro energía	0	1.087.426	1.087.426	1.087.426	1.087.426	1.087.426	1.087.426	1.087.426	1.087.426
Depreciación	0	(226.250)	(226.250)	(226.250)	(226.250)	(226.250)	(226.250)	(226.250)	(226.250)
Utilidad antes impuestos	0	861.176	861.176	861.176	861.176	861.176	861.176	861.176	861.176
Impuesto 30%	0	(258.353)	(258.353)	(258.353)	(258.353)	(258.353)	(258.353)	(258.353)	(258.353)
(+) Depreciación	0	226.250	226.250	226.250	226.250	226.250	226.250	226.250	226.250
Flujo neto	(5.810.000)	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074
Flujo descontado	0	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074	829.074
Flujo acumulado	0	829.074	1.658.147	2.487.221	3.316.294	4.145.368	4.974.441	5.803.515	6.632.588
Recuperación	(5.810.000)	(4.980.926)	(4.151.853)	(3.322.779)	(2.493.706)	(1.664.632)	(835.559)	(6.485)	822.588

Tabla 5.22. Indicadores económicos para la sustitución del equipo de aire acondicionado.

VAN	€822.588,33
TIR	3%
CB	45,45
VANAE	€102.823,54
CBA	1,77
PDR	7,01
PDR	7 años 2 días

5.4.4. Ventiladores de los transformadores

Como se mencionó en la sección 5.3.4. se utilizará el diseño propuesto por la empresa Siemens, el cual tiene un costo de ¢4,202,846.66 por cada transformador, para un total de ¢8,405,693.32, sumado a este equipo, se tiene que instalar un cable de fibra de vidrio para la transmisión de los datos desde los VFD hasta el SCADA, así como el cable para conectar el centro de control a los motores de los ventiladores, este costo se calcula en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Cálculo de los materiales adicionales necesarios para la instalación del centro de control de los ventiladores de enfriamiento de los transformadores.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Cable de fibra de vidrio	90	1.565,00	140.850,00
Cable	30	2.000,00	60.000,00
Total ¢			200.850,00

El cálculo del ahorro total se realizó según lo mencionado en la sección 5.3.4. y se estimó en ¢1,351,722.11 anualmente. De la Tabla 5.24 y Tabla 5.25 podemos observar que la inversión se recupera en 6 años, 9 meses y 26 días, y también determinamos que en un periodo de ocho años se obtiene un ahorro total que ronda los ¢10.8 millones y una recuperación que ronda el ¢1,484,000.00.

Tabla 5.24. Cálculo de los flujos para la implementación del centro de control de los ventiladores de los transformadores.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro energía	0	1.351.722	1.351.722	1.351.722	1.351.722	1.351.722	1.351.722	1.351.722	1.351.722
Depreciación	0	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)	(1.050.712)
Utilidad antes impuestos	0	301.010	301.010	301.010	301.010	301.010	301.010	301.010	301.010
Impuesto 30%	0	(90.303)	(90.303)	(90.303)	(90.303)	(90.303)	(90.303)	(90.303)	(90.303)
(+) Depreciación	0	1.050.712	1.050.712	1.050.712	1.050.712	1.050.712	1.050.712	1.050.712	1.050.712
Flujo neto	(8.606.543)	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419
Flujo descontado	0	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419	1.261.419
Flujo acumulado	0	1.261.419	2.522.838	3.784.257	5.045.676	6.307.095	7.568.514	8.829.933	10.091.352
Recuperación	(8.606.543)	(7.345.124)	(6.083.705)	(4.822.286)	(3.560.867)	(2.299.448)	(1.038.029)	223.390	1.484.808

Tabla 5.25. Indicadores económicos para la implementación del centro de control de los ventiladores de los transformadores.

VAN	€1.484.808,48
TIR	4%
CB	17,66
VANAE	€185.601,06
CBA	2,16
PDR	6,82
PDR	6 años, 9 meses y 26 días

5.4.5. Rentabilidad del proyecto total

Ya que se analizó el proyecto en cada una de sus etapas, ahora se procede a realizar el análisis global, esto con el fin de ver la rentabilidad como un conjunto. En la Tabla 5.26 se muestra la inversión inicial para la realización del proyecto, observamos que se requiere un monto cercano a los ¢14 millones para compra del equipo nuevo.

Tabla 5.26. Inversión inicial total del proyecto para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Logo	7	81.593,91	571.157,37
Lámparas	36	63.565,89	2.288.372,04
Sensores lineales 100m	2	74.663,73	149.327,47
Sensores lineales 60m	2	55.308,11	110.616,22
Sensores lineales 30m	4	45.842,27	183.369,08
Sensores movimiento	9	44.684,35	402.159,12
Centro de control de motores	2	4.202.846,66	8.405.693,32
Aire acondicionado	1	1.810.000,00	1.810.000,00
Total ¢			13.920.694,62

Además de la inversión inicial mostrada en la tabla anterior se necesita los materiales adicionales mostrados en la Tabla 5.14, Tabla 5.18 y Tabla 5.23, estos mismos materiales se encuentran resumidos en la Tabla 5.27, en dicha tabla observamos que se requieren materiales adicionales por un monto de poco más de ¢5.3 millones, esto sin tomar en cuenta los cambios a la sala de control, que se estimaron en ¢4 millones.

Por lo tanto podemos estimar la inversión inicial total en ¢23,223,395.00, este monto incluye los equipos nuevos, los materiales adicionales y las mejoras a la sala de control. Después de determinar esta inversión podemos pasar a realizar el cálculo de los indicadores económicos para el proyecto total estos cálculos se muestran en la Tabla 5.29 y la Tabla 5.30.

Tabla 5.27. Recopilación de los materiales adicionales para la implementación del proyecto de la reducción del consumo eléctrico en la subestación El Coco.

Artículo	Cantidad	Precio	Total
Interruptor térmico 30A	2	4.500,00	9.000,00
Interruptor térmico 25A	2	4.300,00	8.600,00
Interruptor térmico 15A	1	3.900,00	3.900,00
Interruptor térmico 5A	25	6.800,00	170.000,00
Interruptor térmico 2A	9	4.000,00	36.000,00
Interruptor térmico 1A	9	4.000,00	36.000,00
Interruptor térmico 1A mono	9	4.000,00	36.000,00
Cable 2 hilos	730	1.155,00	843.150,00
Cable 3 hilos	1115	1.500,00	1.672.500,00
Fibra	90	1.565,00	140.850,00
Cable	30	2.000,00	60.000,00
Caja metálica	5	327.400,00	1.637.000,00
Regletas	184	550,00	101.200,00
Sostenedor regletas	30	450,00	13.500,00
Convertidor medios	5	45.000,00	225.000,00
Contactores	7	10.000,00	70.000,00
Convertidor medios	2	45.000,00	90.000,00
Otros materiales	1	150.000,00	150.000,00
Total ¢			5.302.700,00

Tabla 5.28. Resumen del ahorro esperado en la subestación El Coco.

Equipo	Ahorro
Calefacciones	6.320.517,05
Iluminación	4.598.968,84
Ventiladores transformadores	1.351.722,11
Aire acondicionado	1.087.426,49
Total ¢	
13.358.634,48	

El cálculo del ahorro total se observa en la Tabla 5.28 y se estimó en ¢13,358,634.48 anualmente. De la Tabla 5.29 y la Tabla 5.30 podemos observar que la inversión se recupera en 2 años, 4 meses y 6 días, y también determinamos que en un periodo de ocho años se

obtiene un ahorro total de más de ¢106.8 millones y una recuperación de más de ¢55.7 millones.

Tabla 5.29. Cálculo de los flujos para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ahorro energía	0	13.358.634	13.358.634	13.358.634	13.358.634	13.358.634	13.358.634	13.358.634	13.358.634
Depreciación	0	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)	(1.740.087)
Utilidad antes impuestos	0	11.618.548	11.618.548	11.618.548	11.618.548	11.618.548	11.618.548	11.618.548	11.618.548
Impuesto 30%	0	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)	(3.485.564)
(+) Depreciación	0	1.740.087	1.740.087	1.740.087	1.740.087	1.740.087	1.740.087	1.740.087	1.740.087
Flujo neto	(23.223.395)	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070
Flujo descontado	0	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070	9.873.070
Flujo acumulado	0	9.873.070	19.746.140	29.619.211	39.492.281	49.365.351	59.238.421	69.111.491	78.984.561
Recuperación	(23.223.395)	(13.350.324)	(3.477.254)	6.395.816	16.268.886	26.141.956	36.015.027	45.888.097	55.761.167

Tabla 5.30. Indicadores económicos para la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.

VAN	€55.761.166,94
TIR	40%
CB	240,11
VANAE	€6.970.145,87
CBA	30,01
PDR	2,35
PDR	2 años, 4 meses y 6 días

Capítulo 6. Análisis de resultados

En este capítulo se presentarán algunos resultados que se calcularon para la implementación del proyecto diseñado. Pero ante todo, se debe de tomar en cuenta que los resultados que se presentan en este capítulo no son los exactos, debido a que no se consideran pérdidas en los materiales, así como lo mencionado en la sección 5.3.4. del cálculo aproximado del ahorro debido al tipo de control de los ventiladores de enfriamiento de los transformadores.

De acuerdo a los cálculos realizados en la sección 5.4.5. se mencionó que la inversión se recuperará en 2,35 años lo que quiere decir que el sistema va a seguir generando ahorros que se pueden ver como ganancias durante el resto de la vida útil de los equipos utilizados. En dicha sección los cálculos se realizaron a 8 años tomando en cuenta que esa es la vida útil de las lámparas tipo LED, pero los demás equipos tienen vidas útiles mucho mayores, lo que hace que el proyecto sea aún más rentable.

Tabla 6.1. Estimación del ahorro total del proyecto de la reducción del consumo eléctrico de la subestación El Coco.

Equipo	Energía mes (kWh)	Ahorro mes (kWh)	Ahorro %	Ahorro mensual (¢)	Ahorro anual (¢)
Iluminación emergencia	0,00	0,00	0%	0	0
Ventilador banco baterías	50,16	0,00	0%	0	0
Aire acondicionado	1.815,09	746,95	41%	90.619	1.087.426
Transformadores	2.224,49	928,49	42%	112.644	1.351.722
Iluminación	3.399,84	3.159,00	93%	383.247	4.598.969
Calefacciones	4.736,20	4.341,52	92%	526.710	6.320.517
Total	12.225,78	9.175,95	75%	1.113.220	13.358.634

En la Tabla 6.1 podemos observar la reducción esperada para la subestación acatando todas las recomendaciones dadas en el Capítulo 5. , el ahorro máximo esperado es de un 75% del recibo actual, lo que equivale a unos 9.1kWh y esto se transforma a más de ¢1.1 millones de colones de ahorro al mes y unos ¢13.3 millones anuales.

Por lo mostrado en la Tabla 5.29, Tabla 5.30 y Tabla 6.1 se puede decir que el proyecto es rentable, ya que su implementación va a traer no solo el beneficio económico en la reducción de la facturación eléctrica del servicio propio de la subestación, sino que también la electricidad no consumida en la subestación va a poder ser vendida a otros comercios o residencias, lo que traería mayores ganancias al ICE.

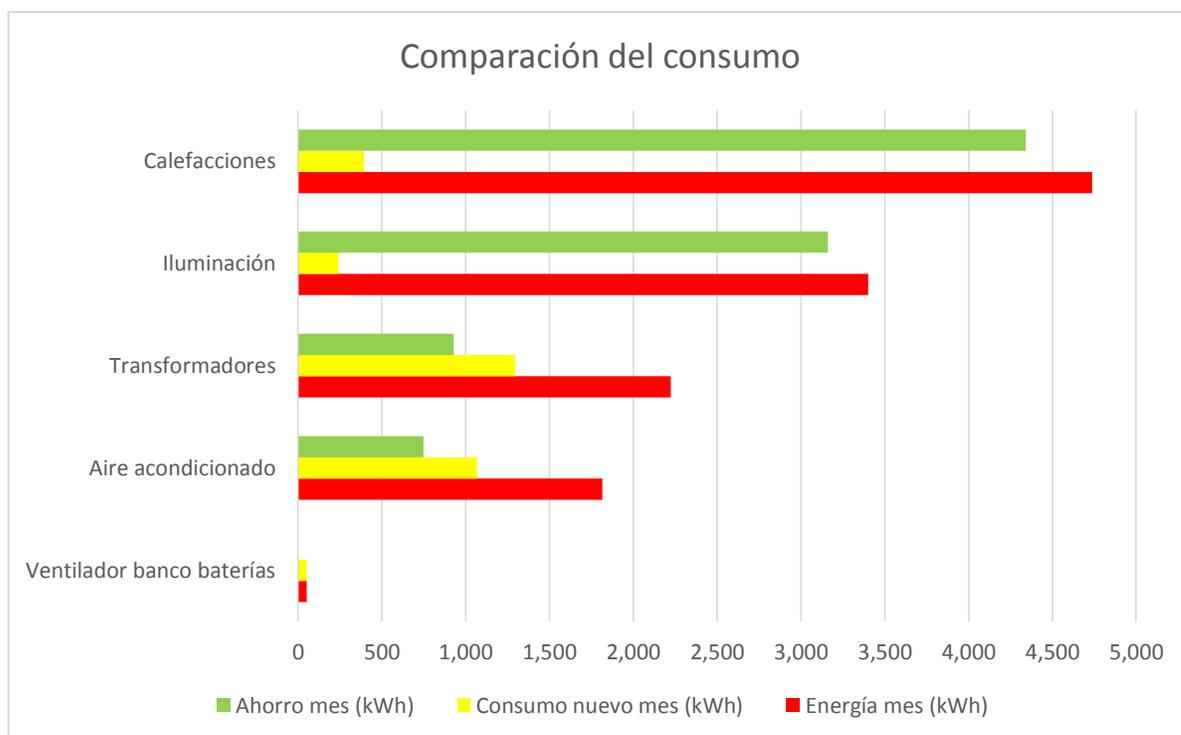


Figura 6.1. Comparación del consumo actual y el esperado para la subestación El Coco.

De la Figura 6.1 podemos observar el consumo actual (barra color rojo), el consumo esperado (barra color amarillo) y el ahorro obtenido (color verde). Se nota que los ahorros en iluminación y calefacciones son sumamente altos, lo cual es la principal causa de ese elevado ahorro que se espera obtener.

Se pueden ir realizando las mejoras de forma paulatina y así no realizar la inversión total de inmediato, y así podemos ir visualizando el ahorro obtenido sin la necesidad e invertir el monto total. Después de la inversión inicial no hace falta seguir invirtiendo grandes sumas de dinero para mantener el ahorro, solo sustituir equipos cuando estos fallen, al fin de su vida útil.

6.1. Conclusiones.

- Se logra demostrar un ahorro mayor al 20% acatando los cambios mencionados en el presente proyecto, utilizando equipos más eficientes y de una mejor distribución de las cargas de la subestación.
- Se determinó el consumo eléctrico actual de la subestación El Coco, así como el de los diferentes equipos presentes.
- Se logró el diseño de un variador de frecuencia para el control de los ventiladores de los transformadores.
- El diseño comercial tiene mejores beneficios para el ICE que el diseñado en el presente proyecto.
- La inversión total para el proyecto se recupera en 2.35 años, y traerá beneficios económicos durante el resto de vida útil de los componentes del proyecto.
- La reducción genera un ahorro de más de ¢55.7 millones en un periodo de ocho años, ya descontando el costo de la inversión inicial.
- El presente proyecto resulta viable económicamente para la subestación El Coco, así como para los intereses del ICE.

6.2. Recomendaciones

Como factores a tomar en cuenta para la futura implementación, así como posibles mejoras del sistema, se realiza la siguiente serie de recomendaciones.

- Si se implementan algún tipo de energía limpia en la subestación, se recomienda utilizar la energía almacenada en el banco de baterías para alimentar la iluminación y las calefacciones durante la noche, así se aprovecha la misma y se recupera la carga de las mismas durante el día.
- Se puede implementar el sistema de control de la iluminación en el mismo diseño del control de las calefacciones, lo cual reduciría los costos iniciales, el inconveniente de realizar esto es que hay que cambiar el cableado actual del área de la iluminación.
- El diseño actual cuenta con el control por temperatura para dos de los tres transformadores presentes en la subestación, ya que el transformador uno tiene poca carga por lo que no enciende los ventiladores, en caso de aumentar la carga en el mismo, se recomienda implementar un sistema igual al de los otros dos transformadores.
- Se recomienda el cambio de los aires acondicionados e iluminación del área de oficinas, como se mencionó en la sección 5.3.5. esto traería un ahorro mayor.

Referencias bibliográficas

- [1] Andrade, G. (2016). *Contenido didáctico del curso: 299009-Telefonía*. Recuperado de: http://www.academia.edu/9353902/UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNAD_ESCUELA_DE_CIENCIAS_BASICAS_TECNOLOGIA_E_INGENIERIA_CONTENIDO_DIDACTICO_DEL_CUSO_299009_TELEFONIA
- [2] Benavent, J., Abellán, A. & Figueres, E. (2000). *Electrónica de Potencia, teoría y aplicaciones* (1era ed.).
- [3] California Turbo, Inc. *CFMaster* Recuperado de: http://www.californiaturbo.com/Images/CFM24J000CS_DS_g.pdf
- [4] Fiestas-Farfán, B. (2011). *Ahorro energético en el sistema eléctrico de la Universidad de Piura - campus Perú*: Universidad de Piura.
- [5] Grupo ICE (2015). *Plan de Expansión de la Transmisión 2015-2025* Recuperado de: <https://grupoice.com/wps/wcm/connect/abfc4f8f-49e7-4936-b0a6-66a8c0f23f5f/Plan%2Bde%2BExpansio%CC%81n%2Bde%2Bla%2BTransmisio%CC%81n%2B2015-2025%2Bnov2015.pdf?MOD=AJPERES&CVID=196A.oh>
- [6] Grupo ICE (2016). *Campos electromagnéticos de líneas de transmisión eléctrica y salud humana*. Recuperado de: <http://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/Electricidad/Proyectos%20Energ%C3%A9ticos/Campos%20electromagn%C3%A9ticos%20y%20salud%20humana>
- [7] Instruction Sheet. 6 inch remote and direct mount thermometers. (2002). Recuperado de: http://www.californiaturbo.com/Images/tot_inst.pdf
- [8] Labcenter Electronics (2012). *Proteus 8 Professional* (Versión 8.0) [Software]. Estados Unidos: Labcenter Electronics.

- [9] Mundo, I. *Controles eléctricos: unidad 4 relevador programable*. Recuperado de <http://controleselectricos32.blogspot.com/p/unidad-4-relevador-programable.html>
- [10] Pincolini, E. *Recomendaciones para el Ahorro de Energía en Motores Eléctricos* Argentina: Consultora en Instalaciones Eléctricas y Termomecánicas.
- [11] Pérez, A. (2016). *Anexo B.1. Informe de cálculo de la carga térmica de acondicionamiento del aire de la sala de control de la subestación eléctrica El Coco*. Alajuela: Refrigeración Industrial Beirute S.A.
- [12] Rashid. (2016). *Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones* (3ª ed.) México: Prentice Hall.
- [13] Rodríguez, D. *Mejore la eficiencia de su proceso: Últimas tecnologías para el control de su motor*.
- [14] Salvatori, M. (2003). *Diseño de un control de velocidad para motores de inducción por relación voltaje/frecuencia* Recuperado de: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/portada.html
- [15] Schneider Electric (2016). *ION8650 - Schneider Electric España* Recuperado de <http://www.schneider-electric.es/es/product-range/61053-ion8650/>
- [16] Siemens AG (2003). *Manual Logo!* Recuperado de https://cache.industry.siemens.com/dl/files/461/16527461/att_82567/v1/Logo_s.pdf
- [17] Terán, J. (2011). *Estructura de los PLC*. Recuperado de http://es.slideshare.net/johnomar/estructura-plc-6670334?next_slideshow=3
- [18] Vargas, L. (2013). *Métodos de valoración de inversión*.

Apéndice A.

Apéndice A.2. Diagramas de flujo de los programas realizados para la obtención de datos con el Arduino.

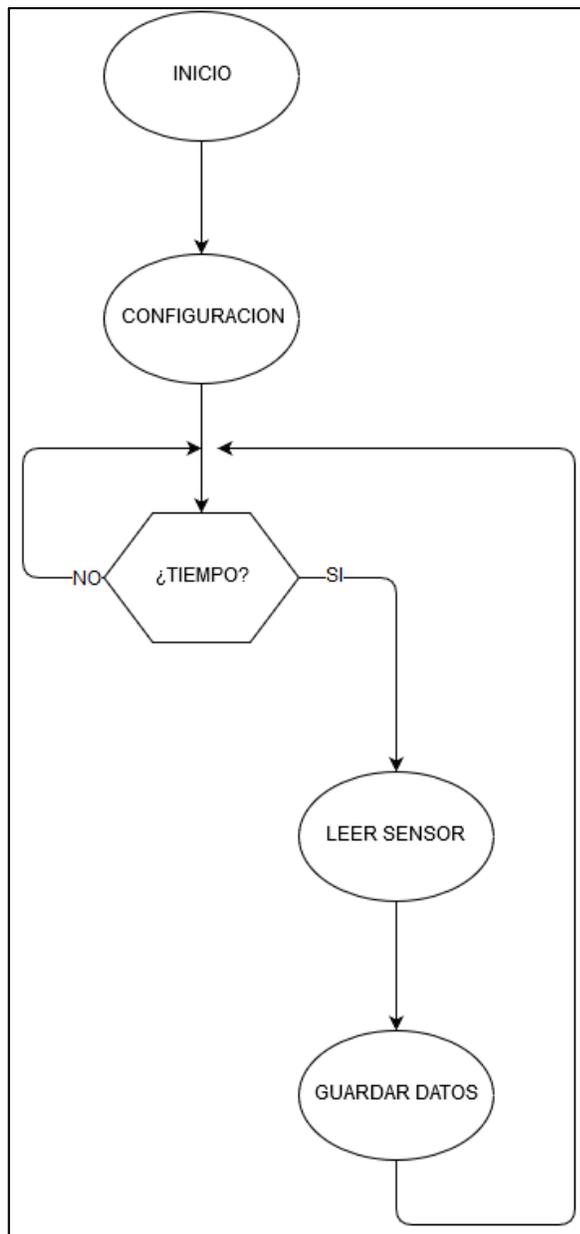


Figura A.1. Diagrama de flujo del programa para la programación del microcontrolador Arduino.

Apéndice A.3. Planos eléctricos.

Apéndice A.3.1. Planos para la instalación del control de las calefacciones

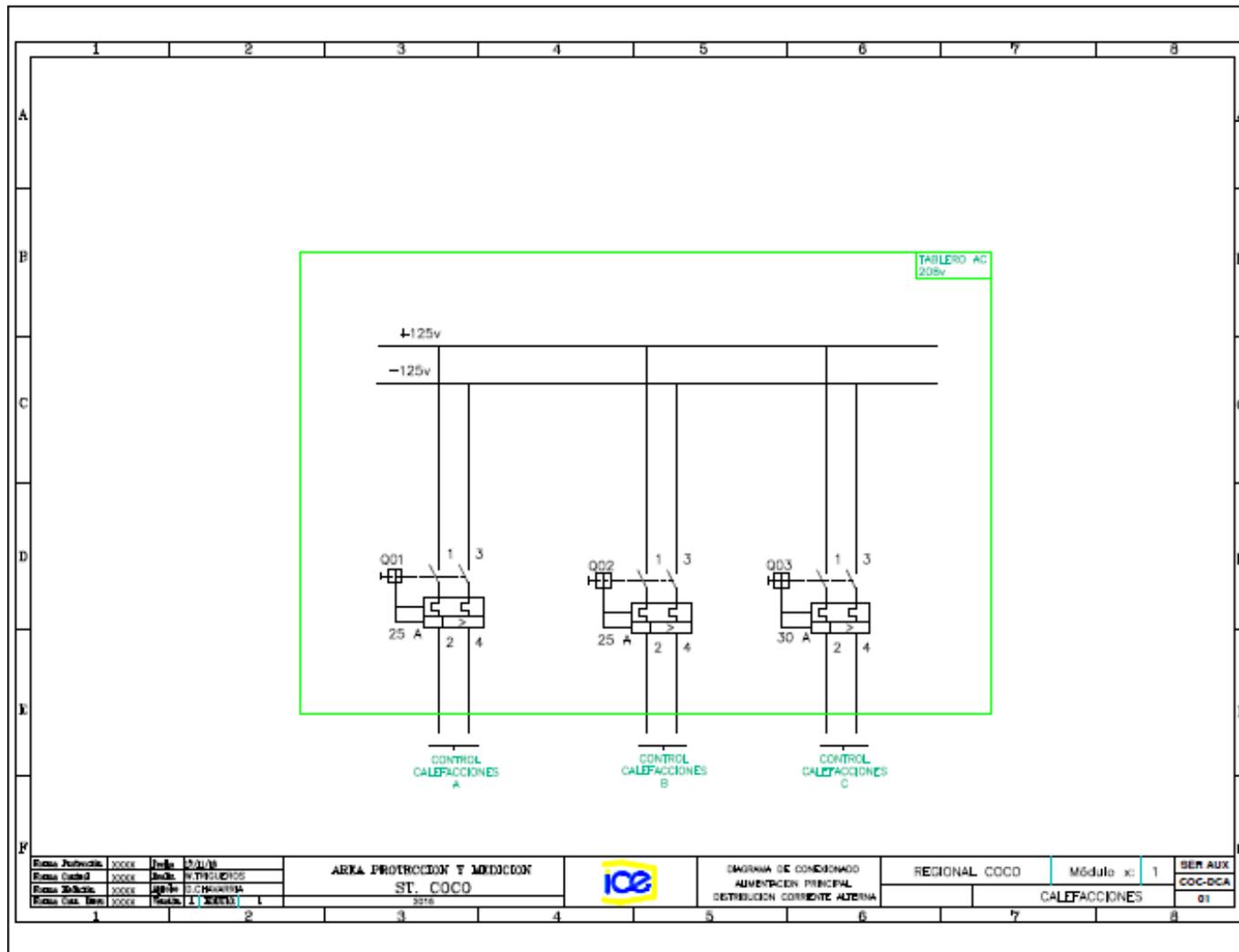


Figura A.2. Plano unifilar del tablero AC 208V, para el control de las calefacciones del lado de baja tensión.

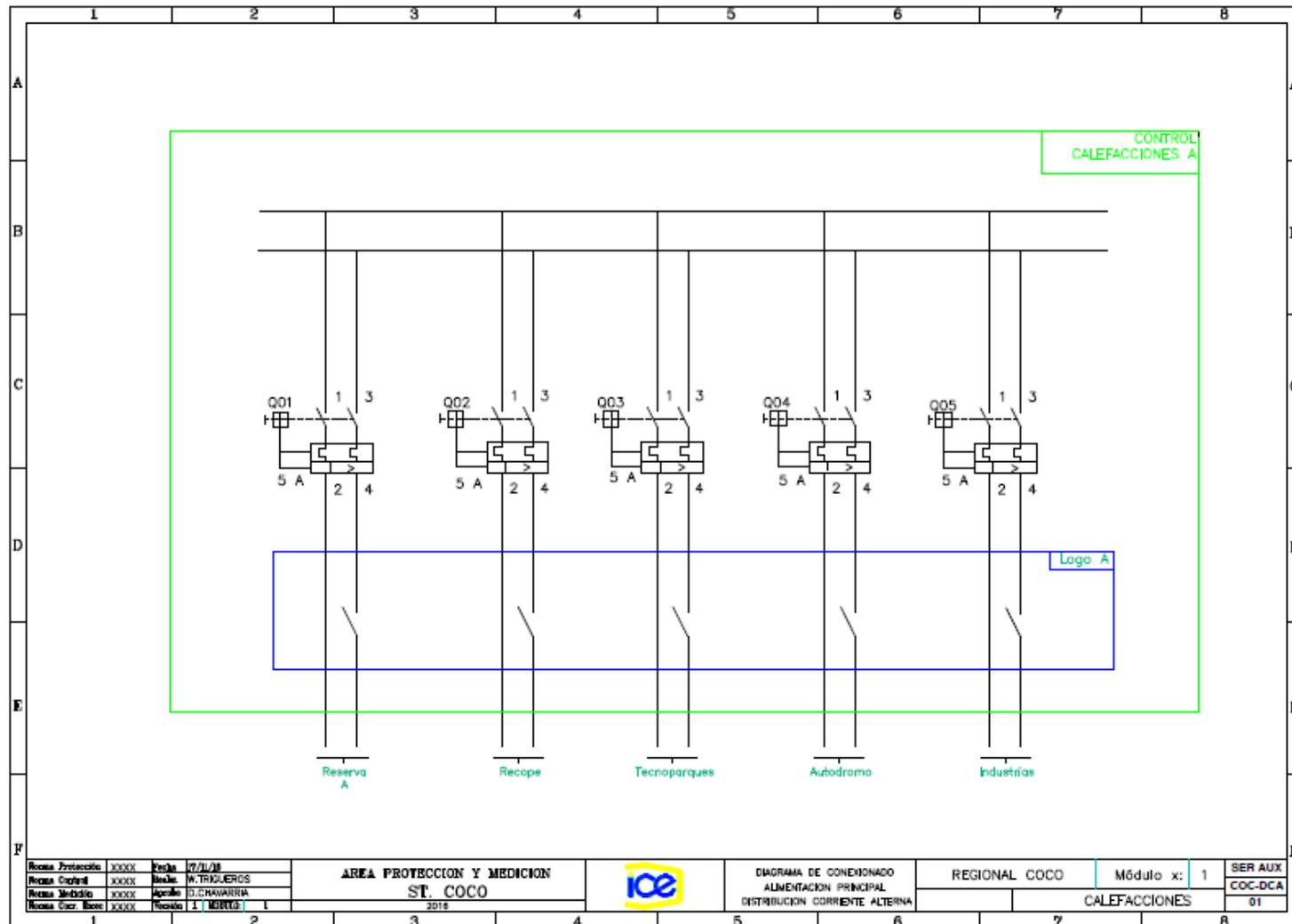


Figura A.3. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones A, para el control de 5 módulos del lado de baja tensión.

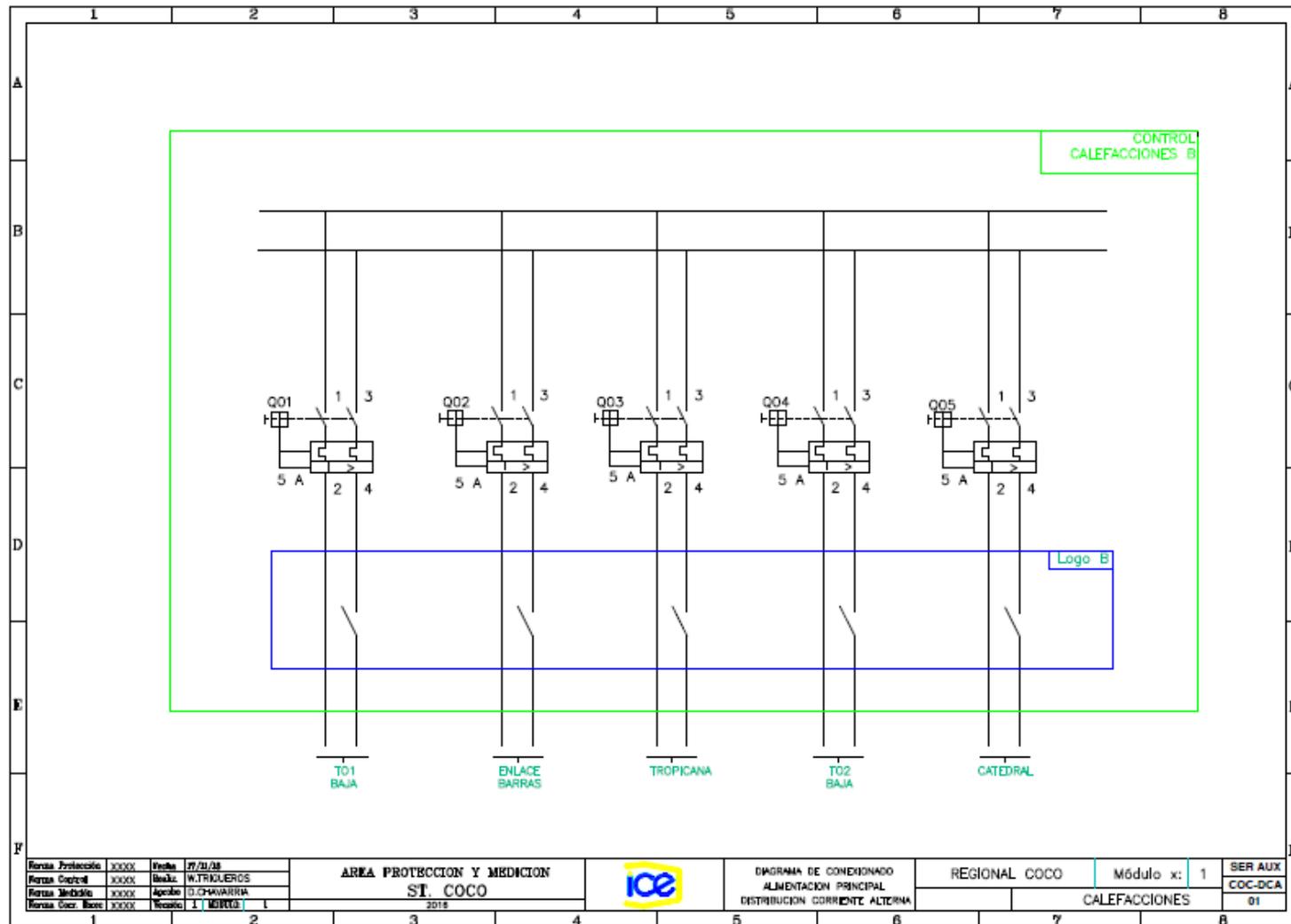


Figura A.4. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones B, para el control de 5 módulos del lado de baja tensión

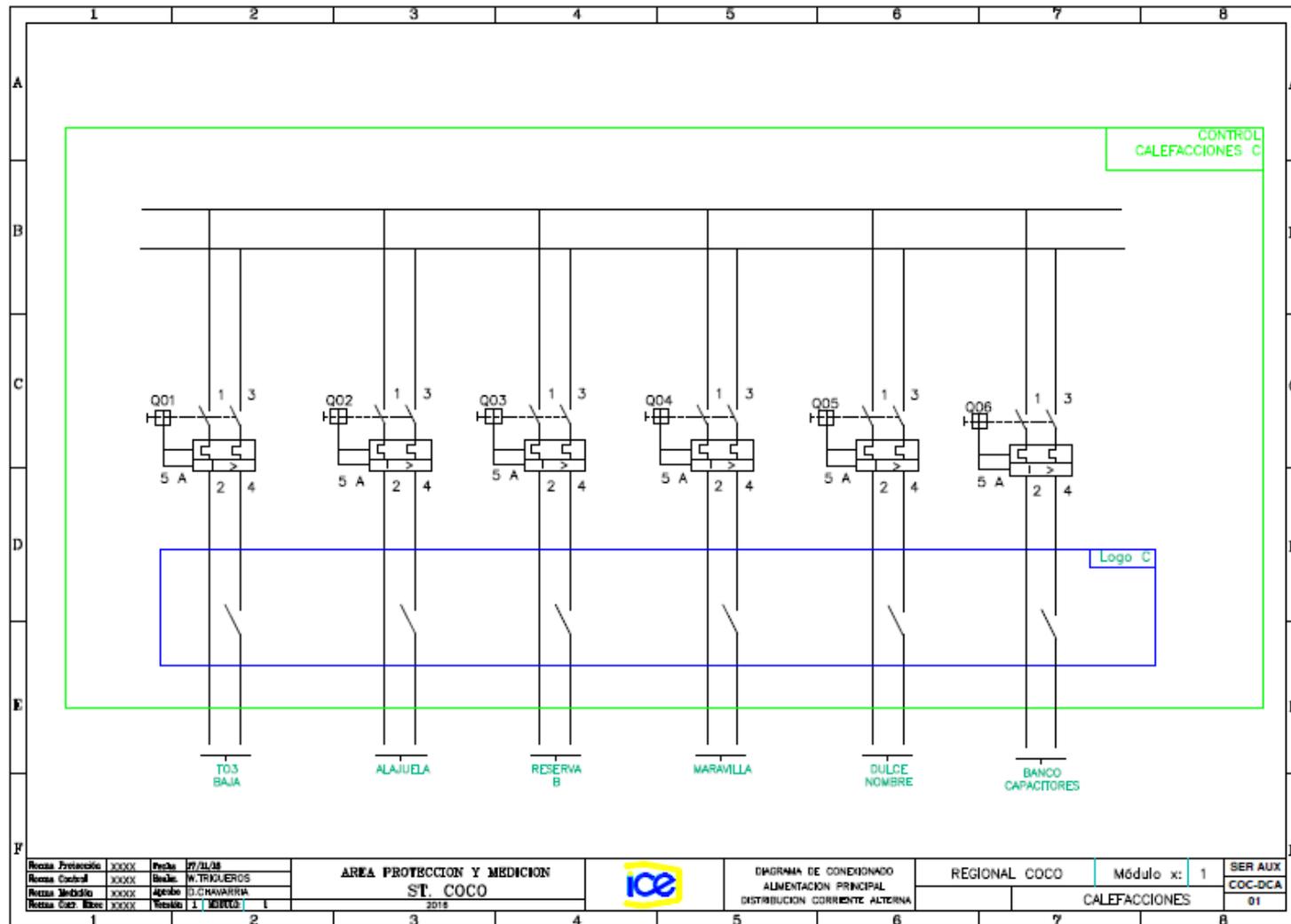


Figura A.5. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones C, para el control de 6 módulos del lado de baja tensión.

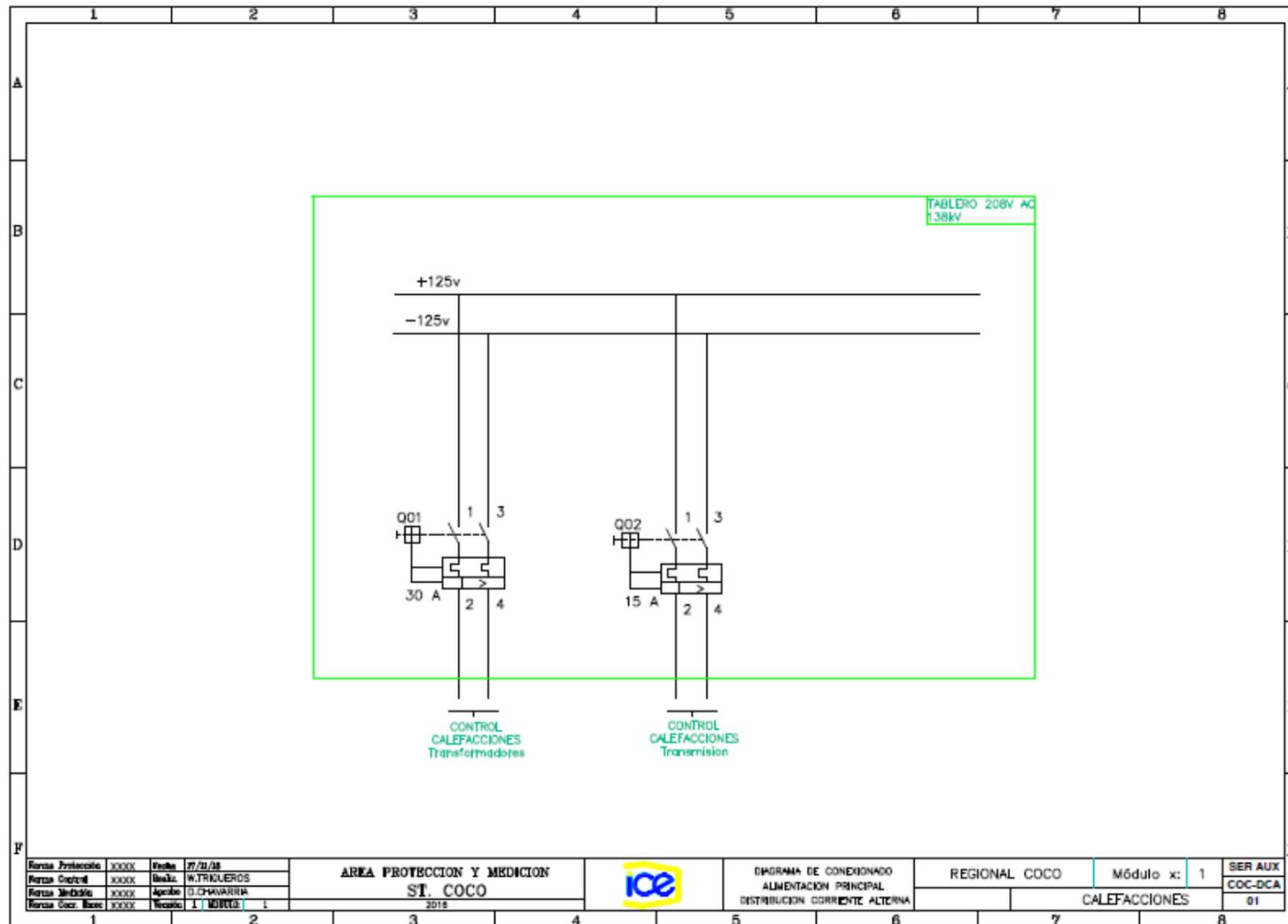


Figura A.6. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, para el control de las calefacciones del lado de alta tensión.

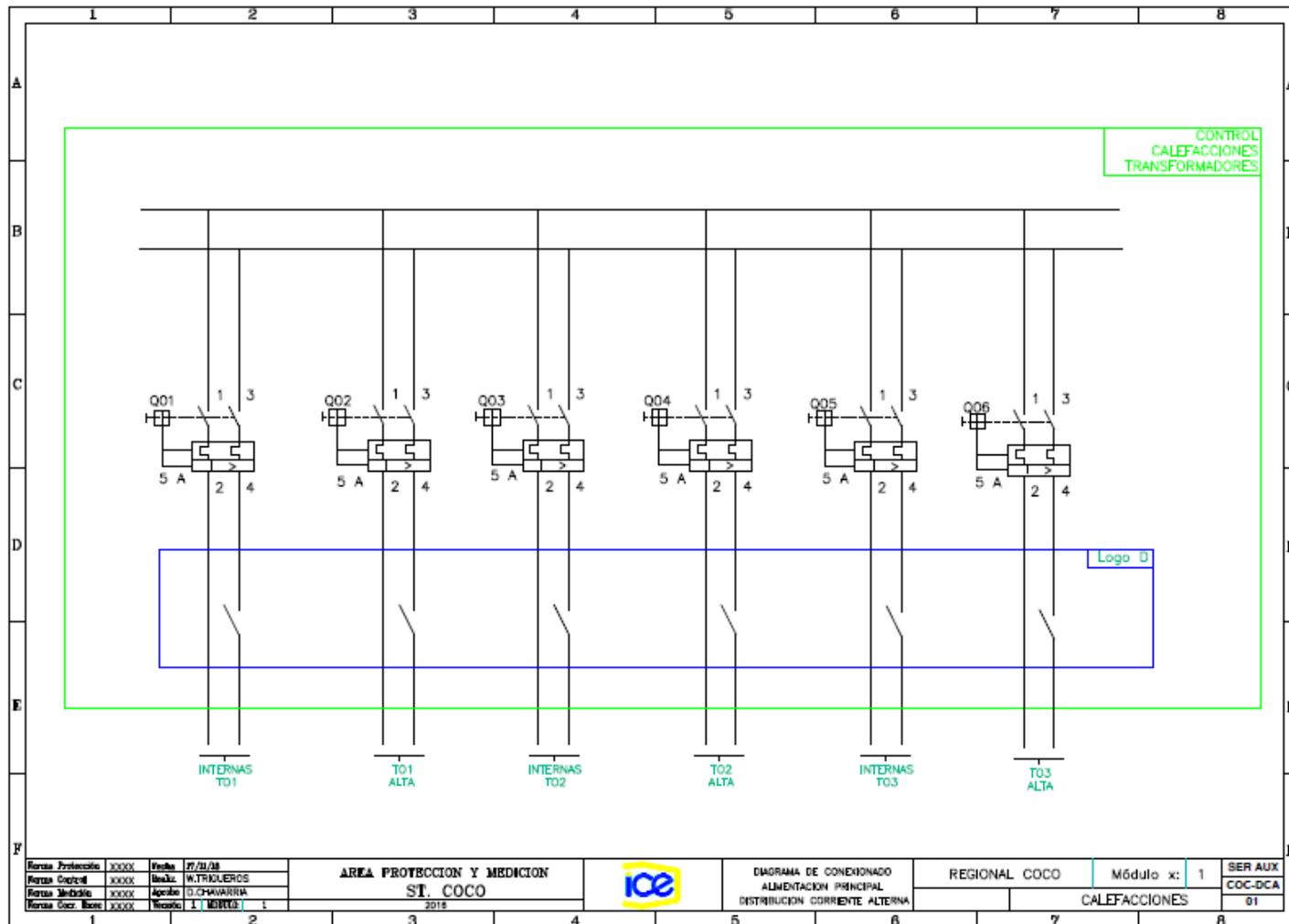


Figura A.7. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones transformadores, para el control de 6 módulos del lado de alta tensión.

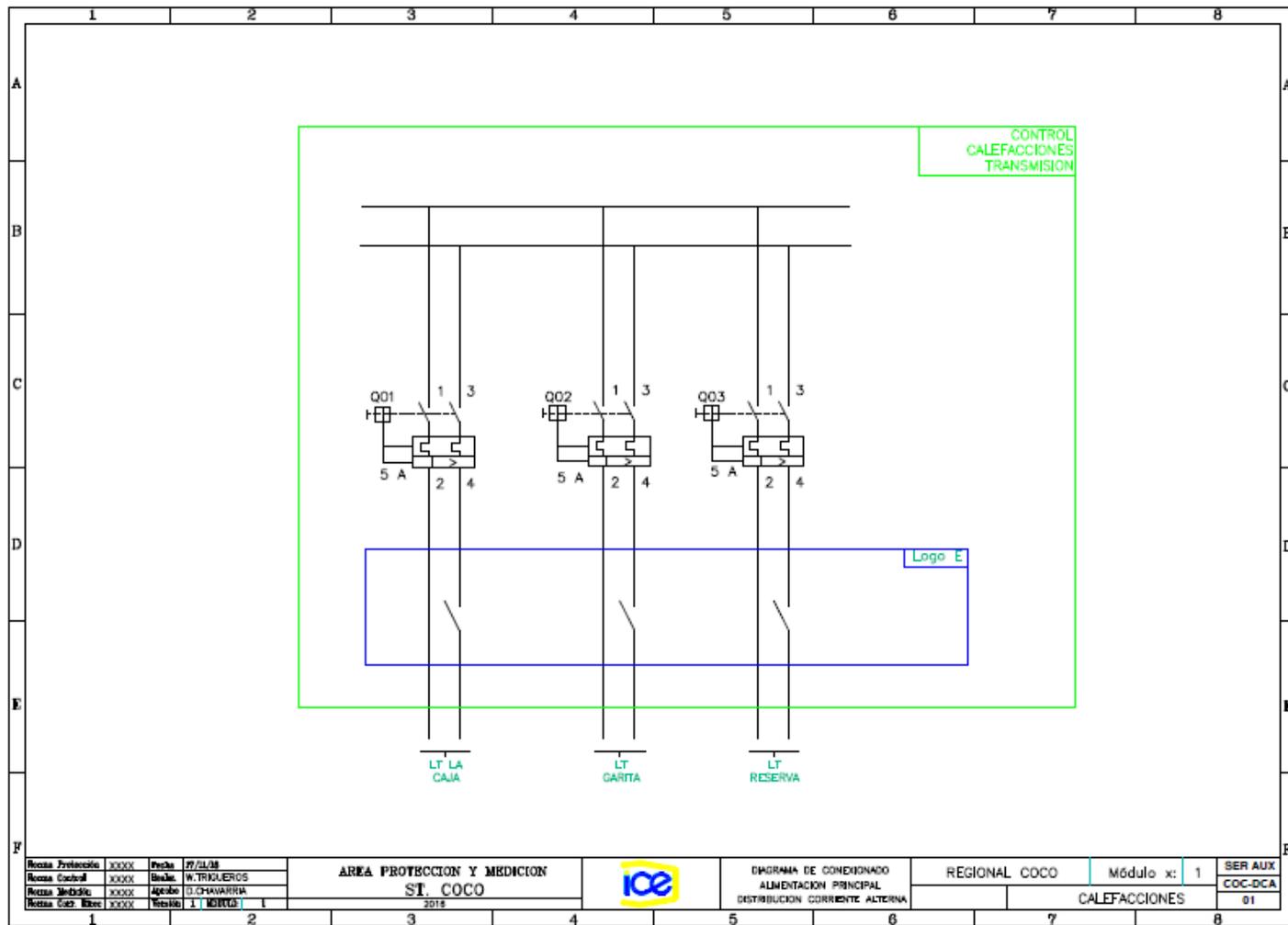


Figura A.8. Plano unifilar del tablero Control de calefacciones transmisión, para el control de 3 módulos del lado de alta tensión.

Apéndice A.3.2. Planos para la instalación del control de la iluminación interna y perimetral de la subestación.

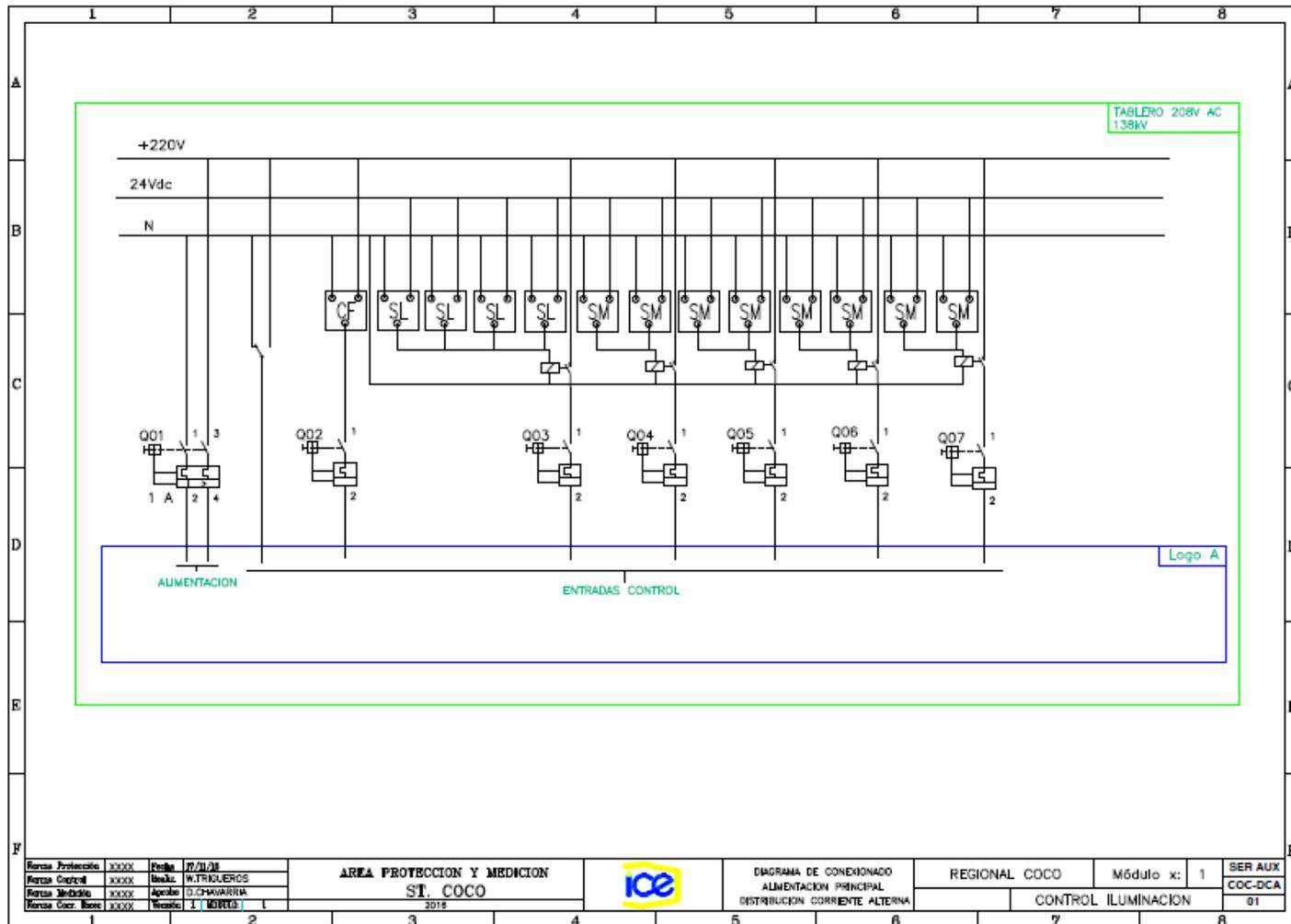


Figura A.9. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, etapa de control de la iluminación del lado de alta tensión y el alumbrado perimetral.

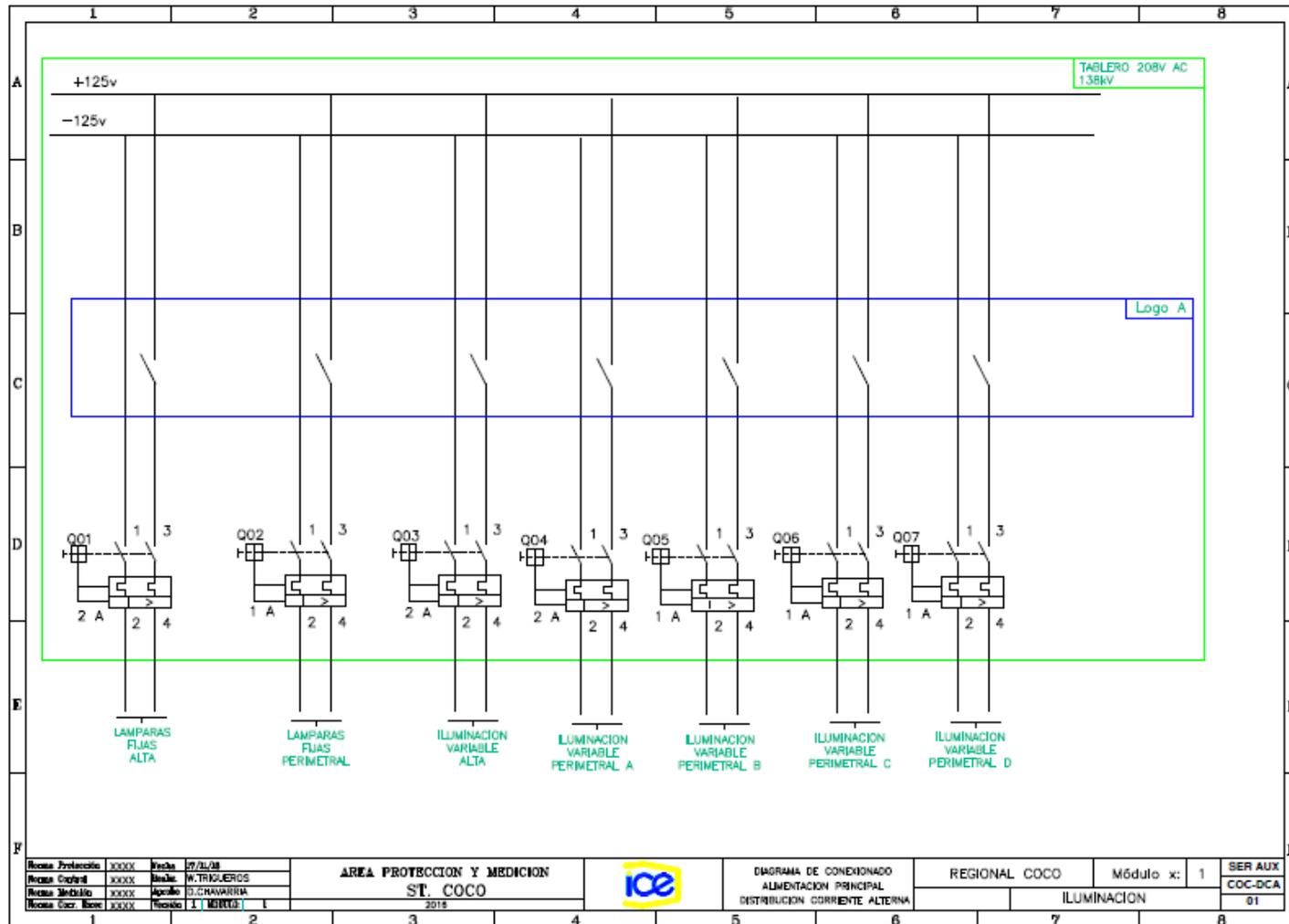


Figura A.10. Plano unifilar del tablero 208V AC 138kV, etapa de potencia para el control de la iluminación del lado de alta tensión y el alumbrado perimetral.

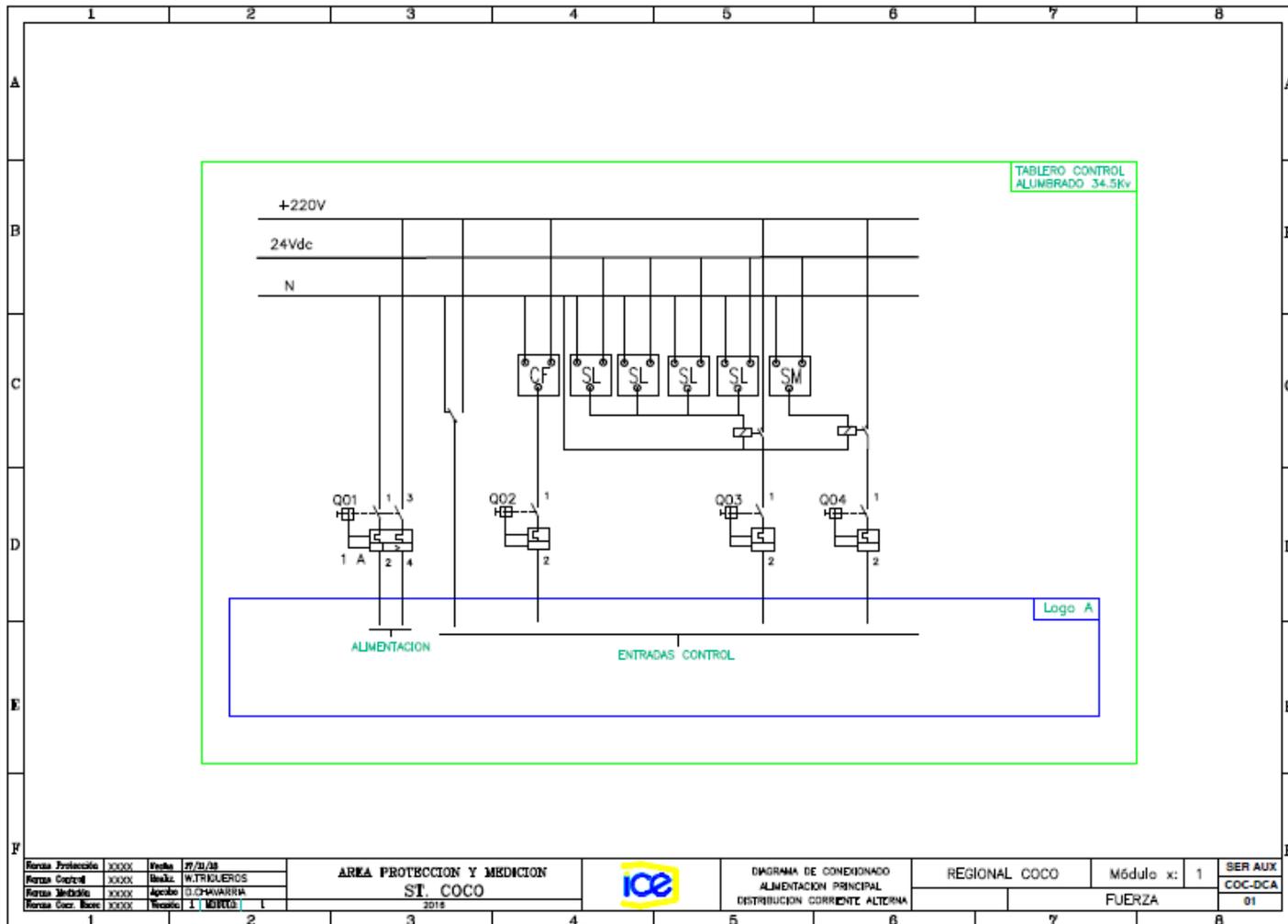


Figura A.11. Plano unifilar del tablero control alumbrado 34.5kV, etapa de control de la iluminación del lado de baja tensión.

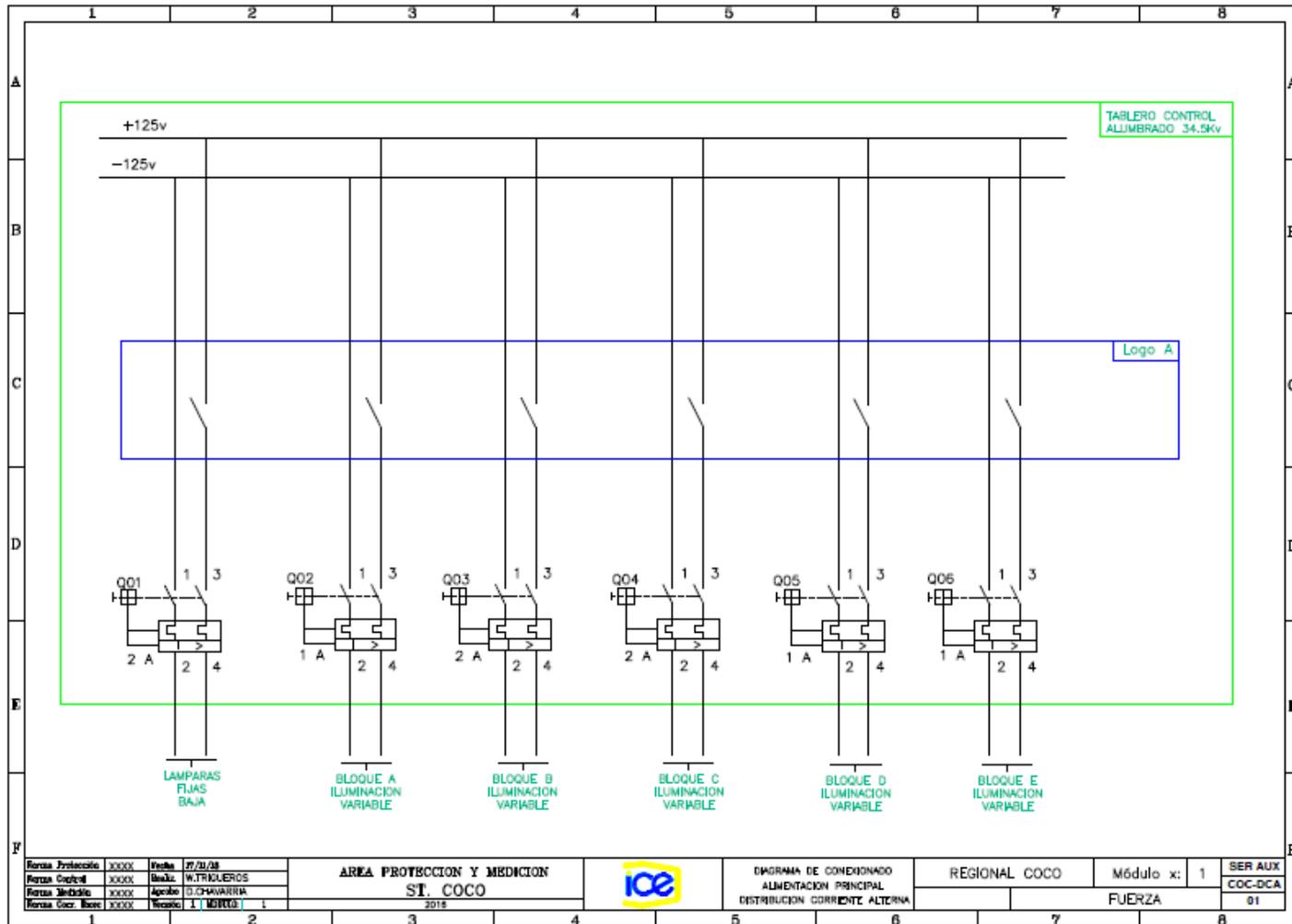


Figura A.12. Plano unifilar del tablero control alumbrado 34.5kV, etapa de potencia para el control de la iluminación del lado de baja tensión.

Apéndice A.4. Distribución de la iluminación en la subestación El Coco.

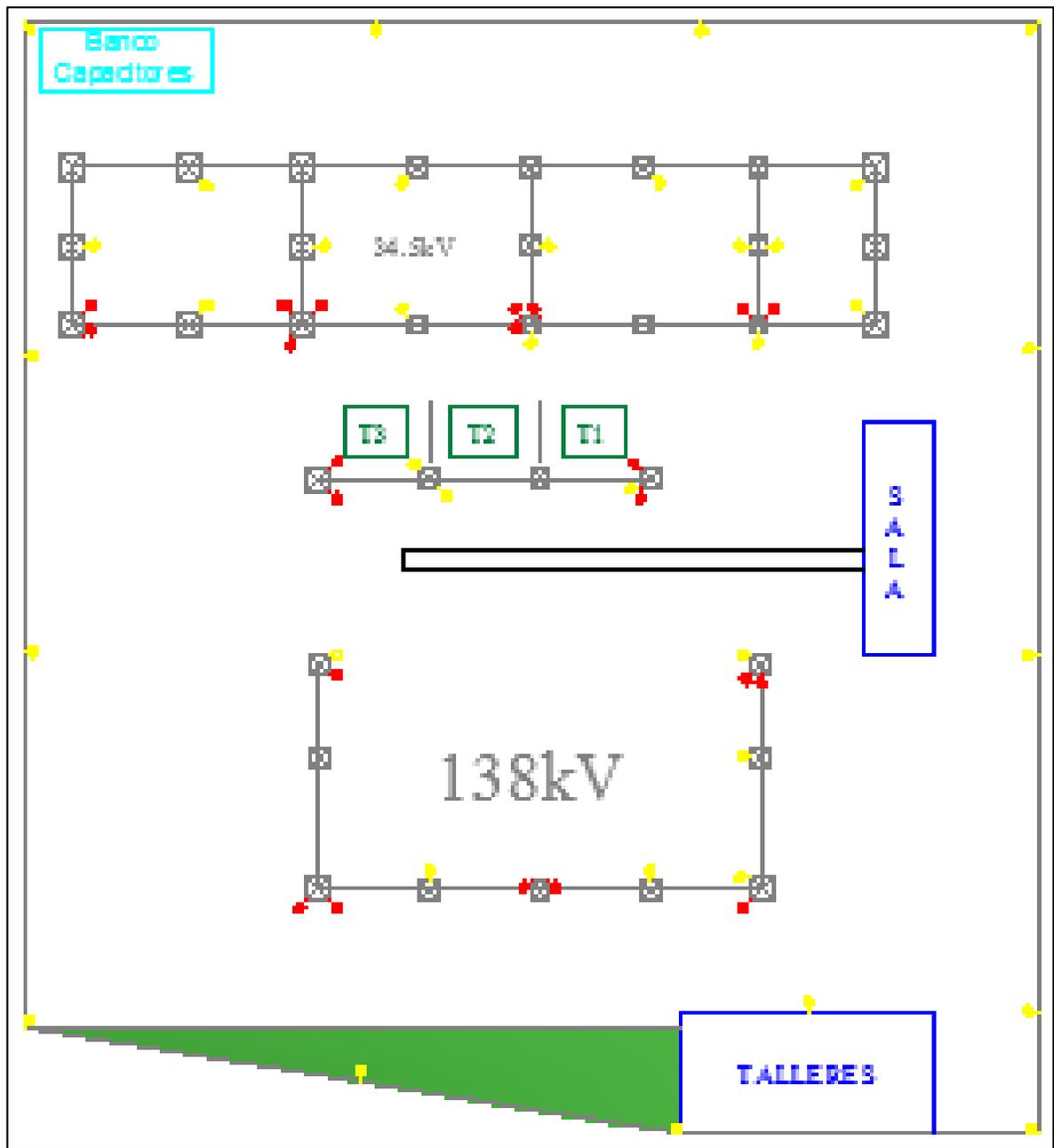


Figura A.13. Distribución actual de las luminarias.

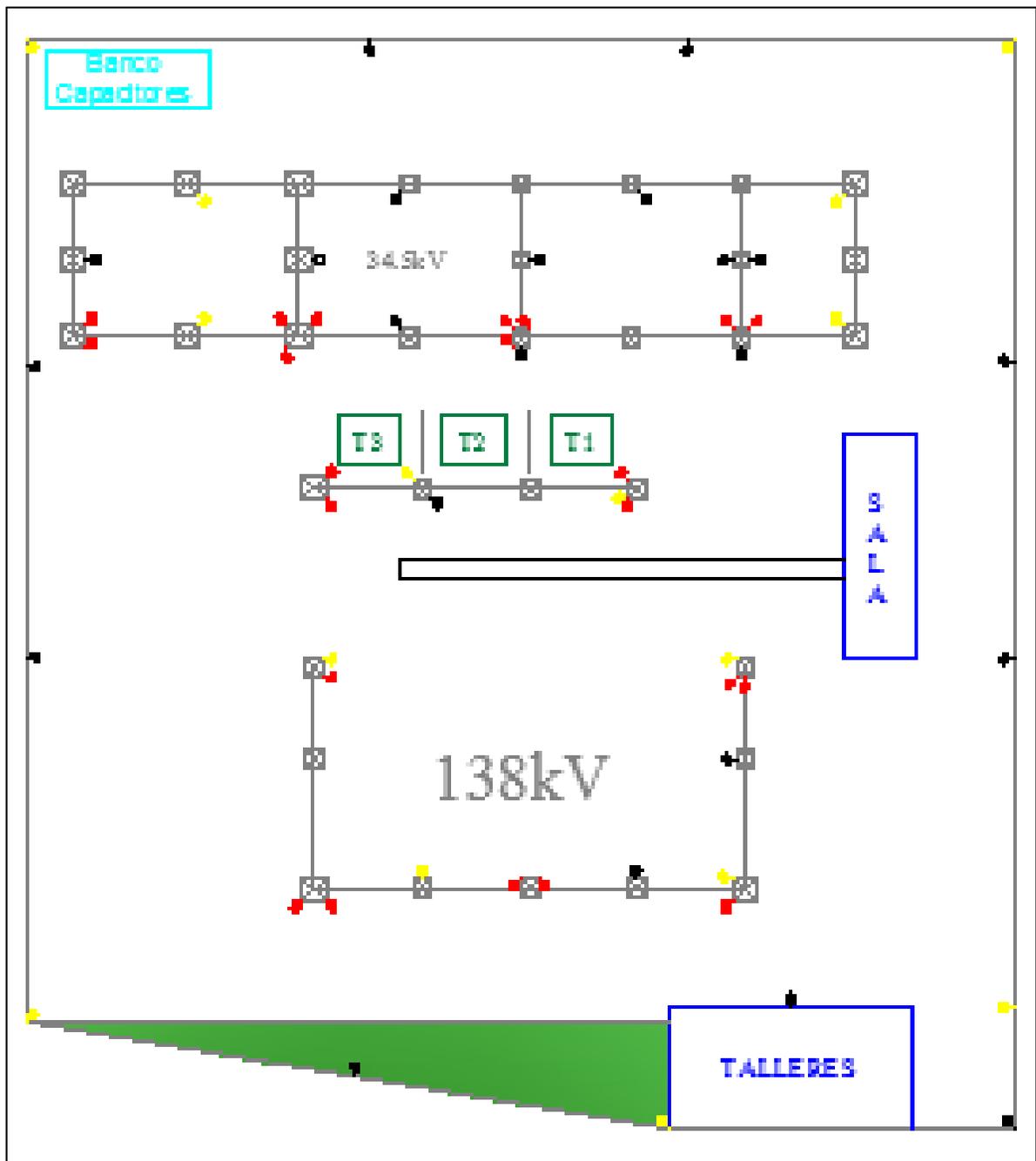


Figura A.14. Distribución de la iluminación utilizando los sensores de movimiento.

Anexo B

Anexo B.1. Hoja de datos de la lámpara a utilizar.



ILUKON
PROFESSIONAL LIGHTING

Security Light LED

Product Overview

Advances in LED technology allow us to create new exciting options for illumination. The benefits of ambient LED lighting are extraordinary compared to outdated fluorescent and more particular to High Intensity Discharge lighting systems

Ilukon Security Light LED Head Series is an environmentally friendly security luminaire that uses the most advanced LED technology to produce a comfortable and efficient light that significantly reduces operating costs and extends fixture life.

Ilukon Security Light LED Head Series can provide up to 70% energy savings over traditional HID products, also, long life and solid state electronics and LED light source mean another 80% savings in maintenance and related expenses.

Intended for security areas, storage yards, rural areas, area lighting, loading and receiving areas.

Product Specifications

- **44W LED** has equivalent lumen output as 175W mercury vapor, 100W High Pressure Sodium or 100W Metal Halide
- 4250 lumen output
- 35,000 hours life expectancy, 88% lumen maintenance
- Instant on and instant restrike
- 5000 cycles fail off electronic photocell
- More than 70 CRI greatly improves color quality
- UV resistance acrylic diffuser
- Full insulation LED driver
- 5 year warranty



Figura B.1. Datos técnicos lámpara LED recomendada.