

Evaluation of Energy Efficiency of the Electric System to Improve IDEN Performance Indicators at the "La Cordillera" Farm in the Mejía Canton, Pichincha Province

Evaluación de Eficiencia Energética del Sistema Eléctrico para Mejorar los Indicadores de Desempeño IDEN en la Finca "La Cordillera" Perteneciente al Cantón Mejía, Provincia de Pichincha

 P.W. Potes¹

 D.D. Jiménez¹

 X.A. Proaño¹

 G.N. Pesantez¹

¹ Dirección de Posgrado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador
E-mail: paul.potes1@utc.edu.ec; diego.jimenez1@utc.edu.ec; xavier.proano@utc.edu.ec; gabriel.pesantes3889@utc.edu.ec

Abstract

The "La Cordillera" farm had electrical installations with voltage drops, low power factor, lack of lighting studies and non-existence single-line diagram. The research sought to evaluate the efficiency of the livestock industry to improve energy performance indicators. First, the most representative carrier was identified between electricity, LPG or gasoline through the Pareto diagram, followed by the behavior of electricity consumption during the period 2018 – 2020, likewise the energy audit carried out through the network analyzer, amperimetric clamp, luxmeter, highlighted the inefficient use of electrical energy as lighting. The LED lighting system based on presence sensors used 15 lamps, in order to meet the primary criteria of light quality, save 124.60 kW·h annually, in addition to reaching VEEI values of 1.04 W/(m²·lx), likewise; the contactor-driven fixed reactive compensation allowed increasing the PF from 0.76 to 0.976, at the same time, it decreased the loadability of the single-phase transformer by 21.66%, thus, the IDEN were improved by obtaining results of 9,470 kW·h/yr, 0.0517 kW·h/L, 1,815.435 kg CO₂/yr. The change from residential to non-demand commercial tariff achieved the annual monetary savings of 220.44 USD. Finally, the economic analysis reflected the profitability of the project as the net present value was 51.34 USD, internal rate return of 8.38% higher than the interest rate of 7.48% and benefit/cost ratio of 1.04.

Index terms— Energy audit, energetic carrier, energy efficiency, IDEN, power factor, VEEI.

Resumen

La finca "La Cordillera" presentó instalaciones eléctricas con caídas de voltaje, bajo factor de potencia, ausencia de estudios lumínicos e inexistencia del diagrama unifilar. La investigación buscó evaluar la eficiencia de la industria ganadera para mejorar los indicadores de desempeño energético. Primero se identificó el portador más representativo entre la electricidad, GLP o gasolina a través del diagrama de Pareto, seguido del comportamiento del consumo eléctrico durante el período 2018 – 2020, de igual forma la auditoría energética efectuada mediante el analizador de redes, pinza amperimétrica, luxómetro, resaltó el uso ineficiente de la energía eléctrica como lumínica. El sistema de iluminación LED a base de sensores de presencia empleó 15 lámparas, a fin de cumplir los criterios primordiales de la calidad lumínica, economizar anualmente 124,60 kW·h, además de llegar a valores del VEEI de 1,04 W/(m²·lx), igualmente; la compensación reactiva fija accionada por contactor permitió incrementar el FP de 0,76 a 0,976, a la vez, disminuyó la cargabilidad del transformador monofásico en 21,66%, así, los IDEN fueron mejorados al obtener resultados de 9,470 kW·h/año, 0,0517 kW·h/L, 1.815,435 kg CO₂/año. El cambio de tarifa residencial a comercial sin demanda alcanzó el ahorro monetario anual de 220,44 USD. Finalmente, el análisis económico reflejó la rentabilidad del proyecto pues el valor actual neto fue de 51,34 USD, la tasa interna de retorno de 8,38% mayor que el tipo de interés del 7,48% y relación beneficio/costo de 1,04.

Palabras clave— Auditoría energética, portador energético, eficiencia energética, IDEN, factor de potencia, VEEI

Recibido: 05-04-2022, Aprobado tras revisión: 08-07-2022

Forma sugerida de citación: Potes, P.; Jiménez, D.; Proaño, X.; Pesantez, G. (2022). "Evaluación de Eficiencia Energética del Sistema Eléctrico para Mejorar los Indicadores de Desempeño IDEN en la Finca "La Cordillera" Perteneciente al Cantón Mejía, Provincia de Pichincha". Revista Técnica "energía". No. 19, Issue I, Pp. 120-131

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.508>

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la eficiencia energética permite establecer los indicadores de desempeño (IDEn) y plantear soluciones óptimas desde el punto de vista técnico-económico, lo cual, aporta al desarrollo sostenible con un impacto positivo en el cuidado del medio ambiente [1].

De acuerdo a [2], [3], las industrias lecheras que poseen una mejor eficiencia disponen de menores costos por electricidad y reducción de las huellas ambientales, conjuntamente con la mejora de la productividad, rentabilidad de los sistemas agrícolas. Los resultados indicaron un ahorro del 23% al 35% de energía mediante la aplicación de auditorías energéticas, junto a la utilización de más fuentes renovables como la implementación de paneles fotovoltaicos [2], [3].

Al mejorar los índices de gestión el consumo de energía disminuirá, esto resulta beneficioso para el propietario de la finca “La Cordillera”, debido a la necesidad de hacer un uso racional de la electricidad mediante medidas positivas que permitan reducir los impactos ambientales y egresos de dinero sin afectar la calidad del producto [4].

Durante la producción lechera se requieren equipos como motores, electrobombas autocebantes, tanque de enfriamiento, bomba de leche, cuyo proceso representa el 96,54% del uso de electricidad anual, a fin de facilitar la recolección y calidad del lácteo. Los operadores de leche tienen la necesidad de hacer uso eficiente de la energía eléctrica para mejorar su rentabilidad, pero carecen de estudios, asesoría o una correcta planificación [2]. Por ende, si las instalaciones de la industria no están en óptimas condiciones, resulta un excesivo consumo energético lo que causa el incremento de los egresos de dinero [3].

Actualmente, la finca presenta el transformador cercano a su cargabilidad máxima debido a las cargas inductivas que provocan un bajo factor de potencia, tiene instalaciones eléctricas con caídas de voltaje, inexistencia del diagrama unifilar, ausencia de mantenimientos preventivos a luminarias, protecciones sobredimensionadas, conductores sin cargas conectadas y empalmes inadecuados, pues, ante la presencia de cortocircuitos los equipos sufren daños, esto produce gastos de reparación o sustitución innecesaria.

Por otra parte, el establo no dispone del estudio lumínico que garantice niveles de iluminación adecuados (Tabla 7) para el desarrollo de la actividad láctea, confort visual, y primordialmente, seguridad industrial como salud ocupacional del personal técnico. Por tanto, resulta importante realizar una evaluación de eficiencia energética con la finalidad de mejorar los indicadores IDEn.

El presente documento es constituido de la siguiente manera. Primero, se visualiza la auditoría energética

mediante la utilización del analizador de redes Fluke 435 Serie II, pinza amperimétrica Fluke 376 FC como del luxómetro Digi-Sense 20250-00, con el objetivo de proponer acciones orientadas a la mejora de los indicadores de desempeño IDEn, las cuales fueron evaluadas técnica-económicamente. Finalmente, el artículo contiene las conclusiones y recomendaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1. Proceso para la auditoría energética

El proceso de la auditoría energética conforme a la norma ISO 50002 consta de las etapas mostradas en la Fig. 1 [5].

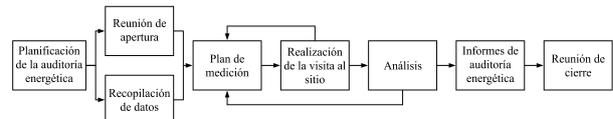


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de la AE de acuerdo a la norma ISO 50002

2.2. Obtención de parámetros eléctricos mediante el analizador de redes

El método para seleccionar del analizador de redes y obtener los datos se visualiza en la Fig. 2.

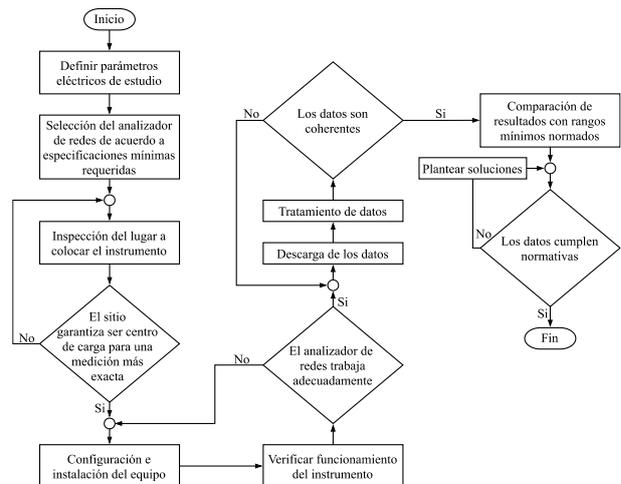


Figura 2: Metodología para la obtención de parámetros eléctricos mediante el analizador de redes

2.2.1 Selección del analizador de redes

En conformidad con la norma IEC 61000-4-30 la clase A tiene mayor precisión en las mediciones, por tanto, se elige el analizador de redes Fluke 435 serie II para obtener datos con mayor exactitud y verificar el cumplimiento de las normativas, pues además el equipo cuenta con el certificado de calibración [6], [7], [8].

2.2.2 Configuración e instalación del equipo

Las mediciones promedio de voltaje, potencias, factor de potencia y armónicos de la finca "La Cordillera", fueron registradas cada 5 minutos mediante el analizador de redes Fluke 435 series II durante un



período comprendido entre el 27/03/2021 al 02/04/2021, conforme al proceso establecido en la Regulación No. ARCERNR 002/20 que menciona un lapso de evaluación no inferior a 7 días continuos [9].

2.3. Procedimiento para la medición de la iluminación

La metodología empleada para la medición de la iluminación se muestra en la Fig. 3.

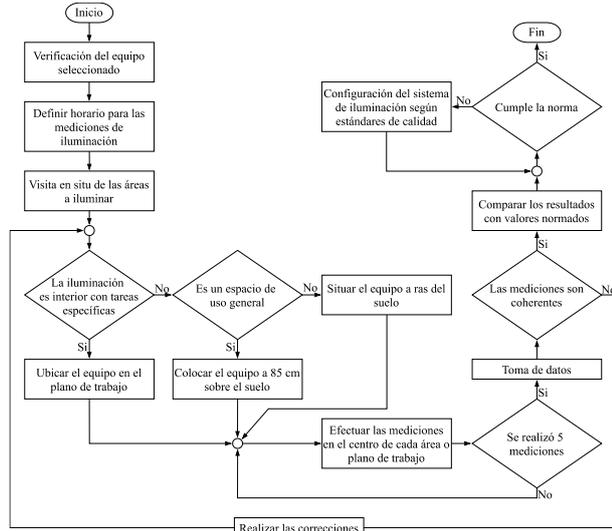


Figura 3: Metodología para la medición de la iluminación

2.3.1 Selección del luxómetro

Con la finalidad de seleccionar el luxómetro adecuado según los requerimientos del estudio, se considera como parámetros mínimos el rango de medición entre 0,5 hasta 500 lux, una resolución mejor o igual a 0,1 lux, precisión superior o equivalente al 5% [10], [11].

Conforme a lo mencionado anteriormente, se elige el luxómetro Digi-Sense 20250-00 por cumplir con las características, lo cual, garantiza un error mínimo durante la toma de datos de la iluminancia junto a una alta resolución de 0,01 lux [10], [11].

2.4. Metodología para la calidad de energía eléctrica

2.4.1 Nivel de voltaje

La calidad del nivel de voltaje se determina con la ecuación (1) [9].

$$\Delta V_k = \left(\frac{V_k - V_N}{V_N} \right) (100\%) \quad (1)$$

donde ΔV_k es la variación del voltaje de suministro con respecto al nominal en el punto k (%), V_k el voltaje de suministro en el punto k, establecido como la media de las mediciones registradas (por lo menos cada 3 segundos) durante un período de 10 minutos (V) y V_N el voltaje nominal en el punto k (V) [9].

En la Tabla 1 se visualiza el rango aceptable de acuerdo al nivel de voltaje [9].

Tabla 1: Rangos aceptables para la calidad de nivel de voltaje

Nivel de voltaje	Rango aceptable
Alto voltaje [Grupo 1 (> 40 kV y ≤ 138 kV) y Grupo 2 (> 138 kV)]	± 5,0%
Medio voltaje (> 0,6 kV y ≤ 40 kV)	± 6,0%
Bajo voltaje (≤ 0,6 kV)	± 8,0%

2.4.2 Distorsión armónica de voltaje

La Tabla 2 muestra los porcentajes límites de distorsión armónica total e individual de voltaje en el punto de acoplamiento común (PCC) [9], [12].

Tabla 2: Rangos máximos de distorsión de voltaje

Nivel de voltaje en el PCC	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica total [THD] (%)
Bajo voltaje (≤ 0,6 kV)	5,0	8,0
Medio voltaje (> 0,6 kV y ≤ 40 kV)	3,0	5,0
Alto voltaje [Grupo 1 (> 40 kV y ≤ 138 kV)]	1,5	2,5

2.4.3 Distorsión armónica de corriente

Los porcentajes límites de distorsión armónica individual (h) y de demanda total (TDD) de corriente se visualiza en la Tabla 3 [9], [12].

Tabla 3: Límites de distorsión de corriente para sistemas desde 120 V a 69 kV

Distorsión máxima de corriente armónica en porcentaje de I_L				
Orden armónico individual (armónicos impares)				
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	12,0

Donde:
 I_{sc} : máxima corriente de cortocircuito en el PCC.
 I_L : máxima corriente de carga demandada [componente de frecuencia fundamental (60 Hz)].

3. AUDITORÍA ENERGÉTICA

3.1. Ubicación geográfica

La presente investigación se realiza en la finca "La Cordillera" situada en la principal 101 (Fig. 4), zona rural el Pongo de la parroquia de Alóag, Cantón Mejía, Provincia de Pichincha [13].



Figura 4: Localización geográfica de la finca "La Cordillera"



3.2. Comportamiento de la energía y producción en la finca “La Cordillera”

Fue necesario identificar el portador energético representativo y evaluar el comportamiento del consumo eléctrico con respecto a la producción lechera mediante la adquisición de información durante un año. Debido a que el propietario de la finca desea reducir los egresos de dinero sin perjudicar la calidad del producto, se procede a analizar económicamente los gastos en energía.

De acuerdo a la Fig. 5, durante el período abril 2020 – marzo 2021 el egreso de dinero por pago de energía eléctrica representa el 88,09%, debido a lo cual, la investigación se enfocó en el consumo de electricidad.

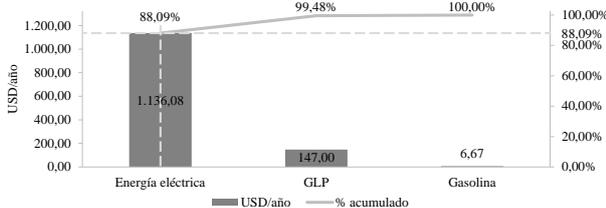


Figura 5: Portador energético económicamente representativo

La Fig. 6 visualiza el crecimiento del consumo de electricidad durante el 2018 – 2020, entre este período se incrementó la demanda energética en un 34,24%, debido al aumento de la producción lechera conjuntamente con el uso eléctrico inadecuado.

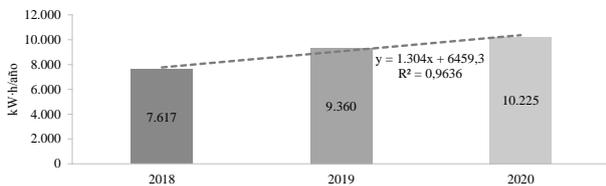


Figura 6: Consumo energético histórico de la finca en el período 2018 – 2020

El coeficiente R^2 de 0,9628 (Fig. 7) indica la existencia de una relación entre la variable dependiente (consumo de electricidad) e independiente (producción lechera) en el período agosto 2020 – julio 2021, sin embargo, se presentan pérdidas de energía no asociadas de 126,16 kW·h/mes, equivalentes al 15,39% de la demanda energética media (819,75 kW·h/mes) debido a la ineficiencia del sistema eléctrico.

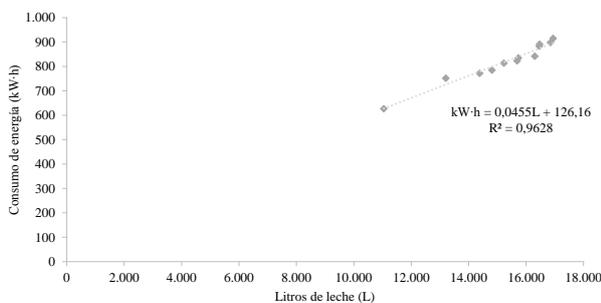


Figura 7: Línea base conforme el consumo de energía (kW·h) y producción lechera (L)



3.3. Calidad de energía eléctrica

Para la obtención de los parámetros eléctricos se utilizó el analizador de redes Fluke 435-II, conectado en el tablero principal de la acometida durante 7 días continuos con registro de muestras cada 5 minutos [9].

3.3.1 Análisis de los niveles de voltaje

Con la finalidad de analizar los niveles de voltaje se considera los nominales, fase – fase (240 V) y fase – neutro (120 V). La finca “La Cordillera” al ser suministrada en baja tensión, no debe sobrepasar el $\pm 8,00\%$ para tener un rango aceptable de variación [9].

Las Figs. 8 y 9, muestran que las variaciones de voltaje tanto de fase – fase como fase – neutro máximas existentes el día sábado a las 22:00 h, se encuentran dentro del rango tolerable del $\pm 8\%$ con respecto a los nominales, además no existe sobrevoltajes (1,10 – 1,20 p.u) o subvoltajes (0,80 – 0,90 p.u) [14].

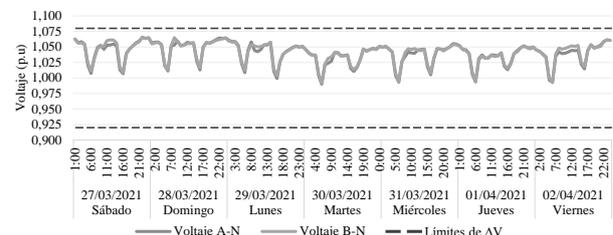


Figura 8: Variación del voltaje fase – neutro

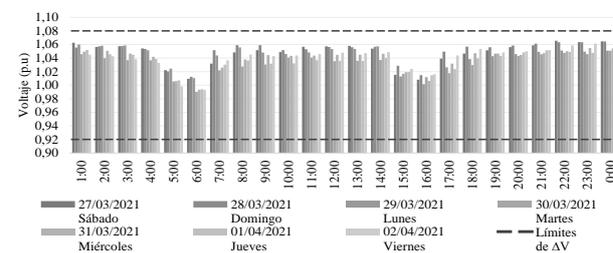


Figura 9: Variación del voltaje fase – fase

3.3.2 Factor de potencia

La finca tiene un factor de potencia promedio de 0,76 durante las horas de consumo (véase Fig. 10), donde los días martes y jueves a las 15:00 registran un FP de 0,60 a causa del motor eléctrico, que conforme al ARCERNNR está por debajo del límite de 0,92 [15].

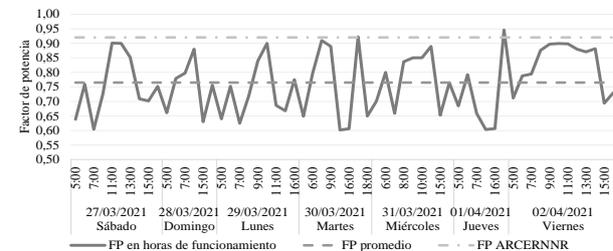


Figura 10: Factor de potencia en periodos de consumo

3.3.3 Demanda eléctrica

De acuerdo a la Fig. 11, durante las 6:00 del día viernes es apreciada una demanda aparente máxima de

9,05 kVA equivalentes al 90,50% de la potencia nominal del transformador, lo cual ante futuros incrementos de carga se requerirá uno de mayor capacidad.

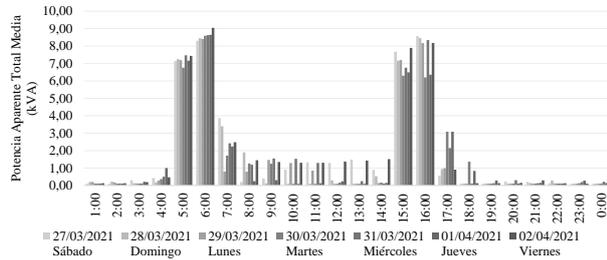


Figura 11: Potencia aparente promedio semanal de la finca "La Cordillera"

La mayor productividad láctea se produjo el día viernes, donde fue registrada una demanda máxima de 7,13 kW a las 6:00, que en un intervalo de cinco minutos existió una potencia media de 7,59 kW durante las 05:45.

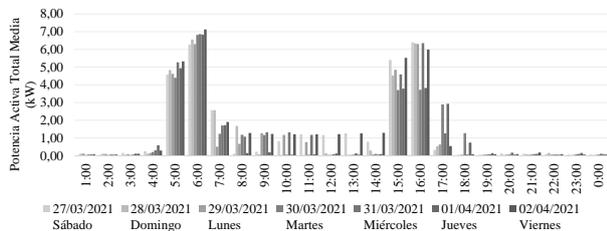


Figura 12: Demanda eléctrica promedio semanal de la finca "La Cordillera"

Según la Fig. 13, existe una potencia reactiva máxima de 5,69 kVAr el día sábado a las 16:00, que durante un intervalo de cinco minutos se registró 5,81 kVAr a las 15:45.

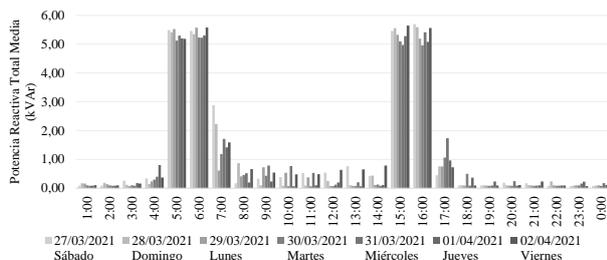


Figura 13: Potencia reactiva promedio semanal

3.3.4 Distorsión armónica de voltaje

Distorsión armónica individual

Dado que la industria láctea es alimentada en bajo voltaje y el punto de medición fue efectuado a 240 V, los armónicos individuales de tensión deben estar por debajo del 5,00% [9].

Los valores de la Fig. 14 visualizan una leve presencia de los armónicos homopolares múltiplos de tres, sin embargo, su comportamiento no sobrepasa el límite establecido por la regulación.

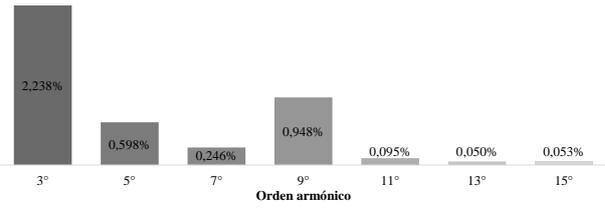


Figura 14: Representación porcentual de la distorsión armónica individual de voltaje

Distorsión armónica total (THD)

Mediante los datos registrados por el analizador de energía se obtiene los porcentajes del THD detallados a continuación, mismos que deben ser inferiores al 8,00%.

Tabla 4: Valores de la distorsión armónica total de voltaje

Descripción	Distorsión armónica total de voltaje (%)			Rango aceptable	
	THD _{A-N}	THD _{B-N}	THD promedio		
Mínimo	0,82	0,92	0,87	8,00%	✓
Medio	1,51	1,56	1,54	8,00%	✓
Máximo	2,51	2,54	2,53	8,00%	✓

El THD promedio máximo de las fases es del 2,53%, el cual resulta inferior al límite de la regulación.

3.3.5 Distorsión armónica de corriente

Distorsión armónica individual

Para determinar los límites de distorsión armónica, debe obtenerse la relación I_{SC}/I_L , por tanto, en primera instancia se calcula la corriente nominal monofásica mediante la ecuación 2 [16].

$$I_n = \frac{S_T}{V_n} \quad (2)$$

donde I_n es la corriente nominal monofásica (A), S_T la potencia aparente del transformador (kVA) y V_n el voltaje nominal entre fases (V).

$$I_n = \frac{10 \text{ kVA}}{240 \text{ V}} = 41,6667 \text{ A}$$

Luego es necesario determinar la corriente de cortocircuito con la expresión 3 [16].

$$I_{SC} = \frac{I_n}{X_{T \text{ p.u.}}} \quad (3)$$

donde $X_{T \text{ p.u.}}$ es la reactancia del transformador en por unidad (p.u). La relación I_{SC}/I_L se visualiza en la siguiente tabla:

Tabla 5: Valores de la relación I_{SC}/I_L

Descripción	$X_{T \text{ p.u.}}$	I_{SC} (A)	I_L (A)	I_{SC}/I_L
I_A	0,035	1.190,48	41,47	28,71
I_B	0,035	1.190,48	34,02	35,00

Los valores adquiridos muestran que la relación I_{SC}/I_L está en el rango $20 < 50$, por ende, el límite resulta



del 7,00% para los armónicos (h) comprendidos de $3 \leq h < 11$ y 3,50% correspondientes a $11 \leq h < 17$ [9], [12].

De acuerdo a la Fig. 15, el sistema eléctrico de la finca contiene una leve presencia del tercer armónico, característico en cargas monofásicas, no obstante, cumplen los límites establecidos por la regulación.

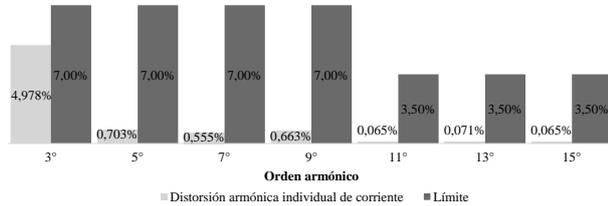


Figura 15: Representación porcentual de la distorsión armónica individual de corriente

Distorsión de demanda total (TDD)

Según la relación I_{SC}/I_L adquirida en la Tabla 5, el límite de la distorsión de demanda total corresponde al 8,00% [9], [12].

Tabla 6: Valores de la distorsión de demanda total

Descripción	Distorsión de demanda total (%)			Rango aceptable	
	TDD _A	TDD _B	TDD promedio		
Mínimo	0,28	0,04	0,16	8,00%	✓
Medio	1,08	1,23	1,16	8,00%	✓
Máximo	4,87	4,40	4,64	8,00%	✓

La TDD promedio máximo de las fases resulta del 4,64% la cual están por debajo del 8,00% establecido.

3.3.6 Flicker

Acorde a la regulación 002/20 se procede analizar la perturbación rápida de voltaje de corta duración (Pst) cuyo valor no debe exceder la unidad [9].

Durante el funcionamiento de la industria láctea existe un promedio máximo de 0,84 presentado el día viernes a las 5 am. En períodos de cinco minutos existen datos cercanos a 1 ocasionados por el arranque de las máquinas eléctricas. El análisis muestra que los valores cumplen el límite (véase Fig. 16).

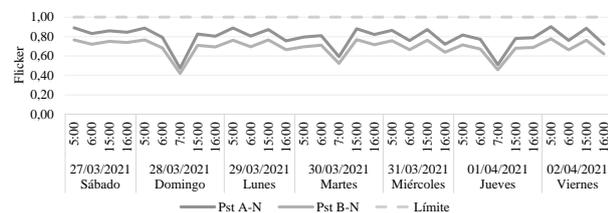


Figura 16: Flicker de corta duración en horas de producción lechera

3.4. Estado actual del sistema de iluminación

La Tabla 7 presenta los niveles mínimos de iluminación que se deben cumplir por área de trabajo conforme a lo estipulado en las normativas NTE INEN 1 154 e INEN 2248, Decreto Ejecutivo 2393 y prEN 12464-1 [17], [18], [19], [20].

Tabla 7: Niveles mínimos de iluminación

Área de trabajo	Iluminación (Lux)
Cuartos para leche.	50
Cuartos de lavado y esterilización.	150
Bodegas y almacenes (Materiales pequeños y estantes).	150
Plaza de estacionamiento.	30 – 100
Cuarto de máquinas.	100
Patio de espera.	20
Sala de ordeño.	50

3.4.1 Variación en las mediciones de iluminación

Conforme a la Fig. 17, las mediciones de iluminación efectuadas en el patio de espera durante 5 días presentan una variación de -2,26% a 0,75%, rango que se encuentra dentro del límite de precisión del equipo de medición de $\pm 3\%$ [10], [11].

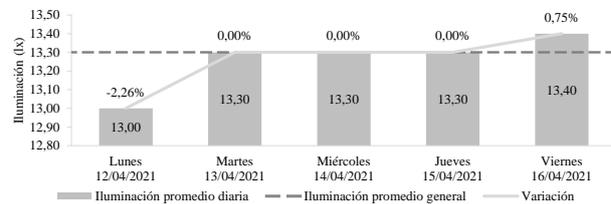


Figura 17: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio del patio de espera

En la sala de ordeño (véase Fig. 18) las mediciones de los niveles de iluminación presentan una variación de -1,12% a 1,96%, rango que se encuentra dentro del límite de precisión del luxómetro.

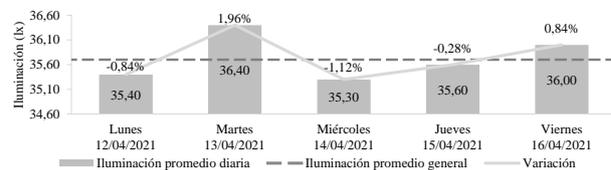


Figura 18: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio de la sala de ordeño

La iluminancia del cuarto de frío presenta una variación de -1,52% a 2,39%, misma que se encuentra dentro del límite de precisión del luxómetro de $\pm 3\%$.

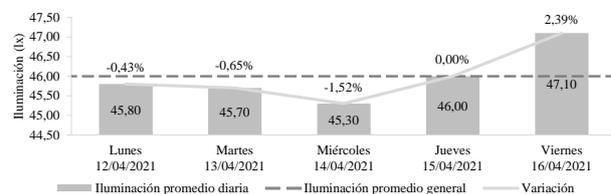


Figura 19: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio del cuarto de frío

Respecto a las mediciones de iluminación llevadas a cabo en la bodega de balanceado presentan una variación de -0,73% a 0,61%, rango que se encuentra dentro del límite de $\pm 3\%$.



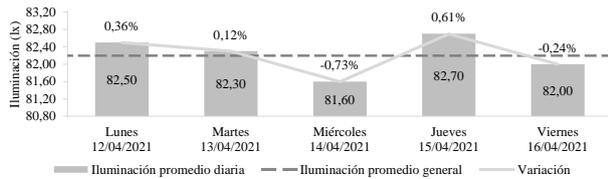


Figura 20: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio de la bodega de balanceado

El rango de la variación porcentual para la presente área de trabajo se sitúa entre -2,47% y 2,30%, resultados que están dentro del límite de precisión de $\pm 3\%$.

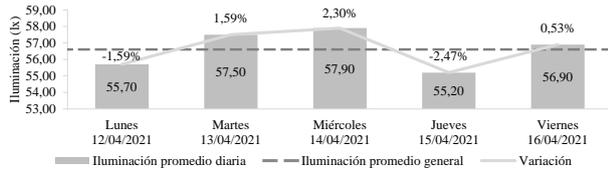


Figura 21: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio del cuarto de máquina

La variación porcentual del cuarto de máquinas se encuentra entre -0,94% y 1,25%, mismo que cumple con el límite de precisión de $\pm 3\%$.

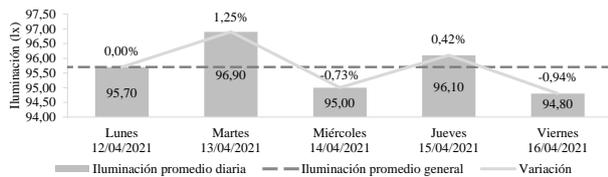


Figura 22: Comportamiento de la variación porcentual e iluminación promedio del cuarto de máquinas

3.4.2 Evaluación de los niveles de iluminación

Cumplimiento de los niveles de iluminación según normativa

Los niveles de iluminación de las áreas de trabajo no cumplen con los valores mínimos de iluminancia establecidos en el marco normativo, producto de la inadecuada altura de montaje, distribución de las lámparas, tipo de tecnología e inexistencia de mantenimiento preventivo.

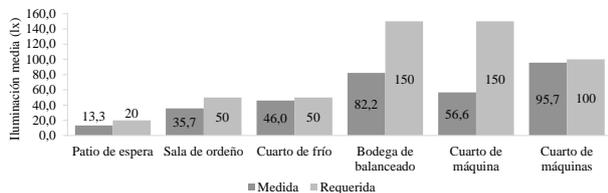


Figura 23: Comparativa de los niveles de iluminación medidos y normados

Representatividad de la simulación efectuada en DIALux evo

Para determinar la representatividad de la simulación se emplea como nivel de confianza 95% con un margen de error del $\pm 5\%$.

La Fig. 24 muestra la semejanza existente entre la iluminación promedio real con respecto a la obtenida mediante DIALux evo, donde presenta un error máximo del 1,58% en la bodega de balanceado sin superar el límite establecido del 5%.

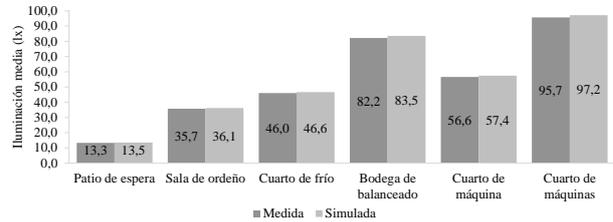


Figura 24: Comparativa de la iluminación promedio in situ y simulada



Figura 25: Sistema de iluminación actual de la finca "La Cordillera"

3.5. Simulación del sistema eléctrico actual

Con los datos obtenidos de la auditoría energética se realizó el diagrama unifilar de la finca "La Cordillera" en el software ETAP, donde el análisis de calidad de energía permitió reflejar el comportamiento de la demanda energética durante el flujo de carga, para simular el sistema actual.

La Tabla 8 y Fig. 26 visualizan los resultados del flujo de carga máxima, que tiene relación con los valores del día viernes a las 6:00 obtenidos en el tablero general del medidor (PCC).

Referente a la caída de voltaje existente hasta la electrobomba 2 es del 7,55%, valor que está por encima del límite del 5%, por otra parte, iluminación excede el 3% [21], [22].

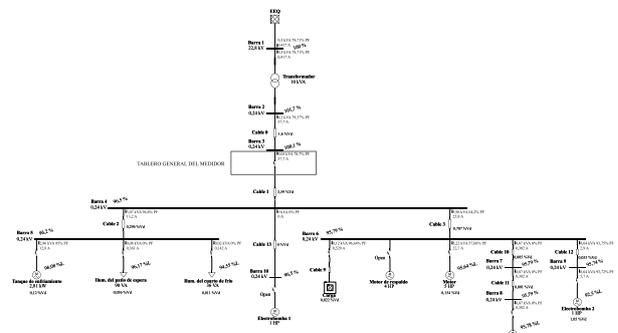


Figura 26: Flujo de carga del sistema eléctrico actual a demanda máxima



Tabla 8: Valores del flujo de carga a demanda máxima

Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	Potencia Aparente (kVA)	Factor de potencia (%)	Corriente (A)
7,13	5,59	9,05	78,70	37,70

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Sistema de iluminación LED con control de presencia

4.1.1 Distribución de luminarias

Se empleó un total de 15 luminarias LED para el diseño del sistema de iluminación (véase Fig. 27), con una eficiencia luminosa desde 118 lm/W hasta 141,5 lm/W, temperatura de color (CCT) de 4.000 K e índice de reproducción cromática (CRI) de 70 a 84.

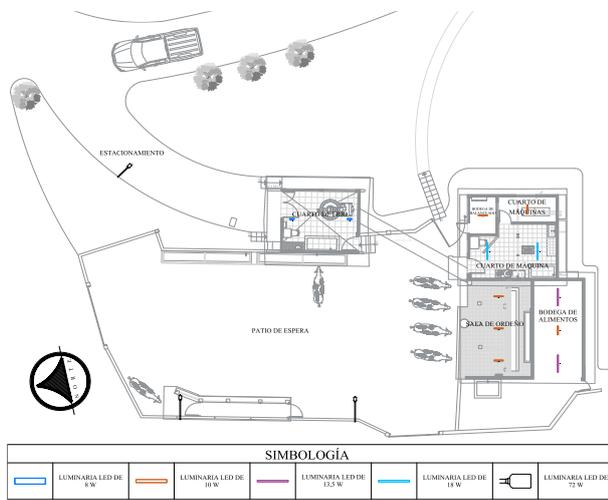


Figura 27: Distribución de las luminarias LED propuestas

4.1.2 Criterios primordiales de la calidad lumínica

La iluminación promedio conforme la Fig. 28 cumple los límites establecidos producto del adecuado diseño del ambiente visual, así, se garantiza la seguridad laboral, como el confort visual. En tal sentido las actividades laborales son llevadas a cabo de manera eficaz.



Figura 28: Sistema de iluminación LED con control de presencia

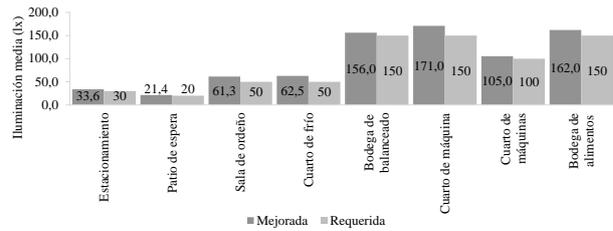


Figura 29: Niveles de iluminación del sistema LED

Para que el deslumbramiento exterior e interior sean considerados adecuados deben ser iguales o inferiores al criterio de aceptación establecido por área laboral, lo cual, se evidencia en la Fig. 30.

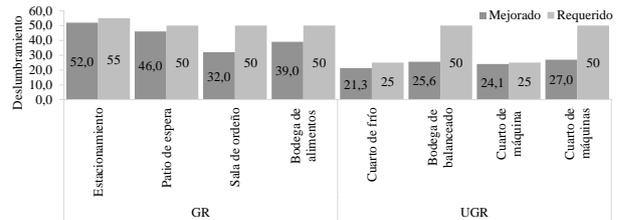


Figura 30: Límite de deslumbramiento del sistema de iluminación LED

La distribución de los niveles de iluminación por cada área de trabajo es uniformemente adecuada, al ser el índice de uniformidad indicado en la Fig. 31 superior al criterio de aceptación.

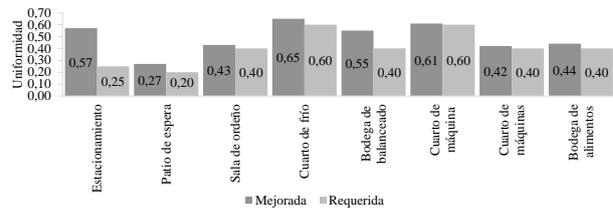


Figura 31: Índice de uniformidad del sistema de iluminación LED

4.1.3 Consumo energético

Sistema de iluminación actual

Actualmente, el consumo energético del sistema de iluminación de la industria láctea se sitúa en 340,27 kW·h al año, donde, el cuarto de máquinas con el 58,78% representa la participación mayoritaria por disponer de tecnología incandescente junto al amplio tiempo de utilización (ver Fig. 32).



Figura 32: Porcentaje relativo por área de trabajo en el sistema de iluminación actual

Sistema de iluminación LED con control de presencia

La energía consumida por el sistema de iluminación propuesto corresponde a 215,67 kW·h/año, donde, el

patio de espera con el 67,23% representa la participación mayoritaria al requerir de mayor capacidad instalada para cumplir los criterios primordiales de la calidad lumínica.

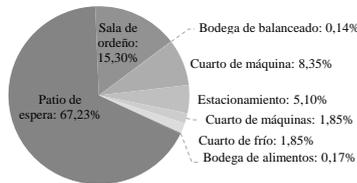


Figura 33: Porcentaje relativo por área de trabajo en el sistema de iluminación propuesto

Ahorro energético

Al considerar el consumo total del sistema de iluminación actual como propuesto de 340,27 kW·h/año y 215,67 kW·h/año respectivamente, se alcanza un ahorro de 124,60 kW·h/año.

Es decir, la utilización de equipos de control basados en sensores de presencia junto a la tecnología LED permite alcanzar un ahorro energético al año del 36,62%.

4.1.4 Eficiencia energética

Pérdidas máximas de potencia aceptadas en el balasto reactor

Actualmente, el patio de espera emplea tecnología de vapor de sodio a alta presión de 70 W para su iluminación, por lo tanto, las pérdidas máximas aceptadas en el balasto reactor corresponden a 11 W y su potencia nominal total sería 81 W [23].

Valor de eficiencia energética de la instalación (VEEI)

El valor de eficiencia energética de la instalación se determina mediante la ecuación 4 [24], [25], [26], [27].

$$VEEI = \frac{(P)(100)}{(S)(E_m)} \quad [W/(m^2 \cdot lx)] \quad (4)$$

donde, P es la potencia total instalada en lámparas más equipos auxiliares (W), S la superficie iluminada (m²) y E_m la iluminancia media horizontal mantenida (lx) [24].

Conforme la Fig. 34, el sistema de iluminación LED con control de presencia presenta mejor eficiencia energética respecto al estado actual, excepto por el patio de espera donde el VEEI tras la mejora es superior, lo cual, sucede al requerir una mayor potencia instalada en lámparas.

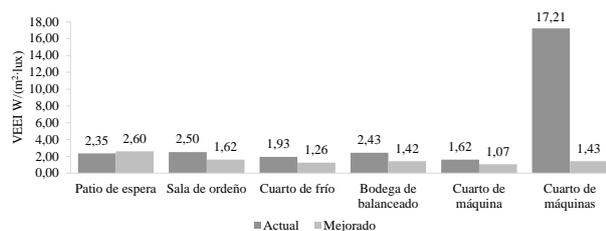


Figura 34: Eficiencia energética del sistema de iluminación

Según la Fig. 35, el sistema de iluminación LED mediante sensores de presencia cumple los límites establecidos del VEEI, inclusive en espacios exteriores como el estacionamiento su valor es inferior al criterio de aceptación (3,50 W/m²·lx < 5 W/m²·lx).

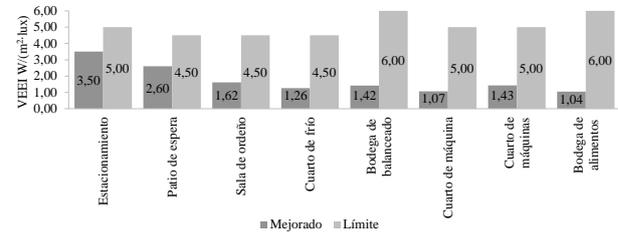


Figura 35: Cumplimiento de los límites establecidos del VEEI

4.2. Corrección del factor de potencia

El análisis de calidad de energía permitió conocer que la industria láctea tiene un bajo factor de potencia por las cargas inductivas. Para el dimensionamiento del banco de capacitores se considera el comportamiento de la demanda promedio semanal a igual del FP en horas de funcionamiento, cuyo FP deseado es de 0,95 (Tabla 9) [28].

Tabla 9: Valores de la potencia reactiva necesaria.

Hora	Potencia Activa (kW)	Factor de potencia (%)	Factor multiplicador	Q _c (kVar)
4:00 – 6:00	5,77	73,00	0,608	3,51
14:00 – 16:00	5,09	68,00	0,750	3,82

La Tabla 10 al igual que la Fig. 36 visualizan los resultados del flujo de carga máxima con la compensación reactiva y nuevo sistema lumínico donde opera el capacitor fijo accionado por contactor de 4 kVar (valor comercial).

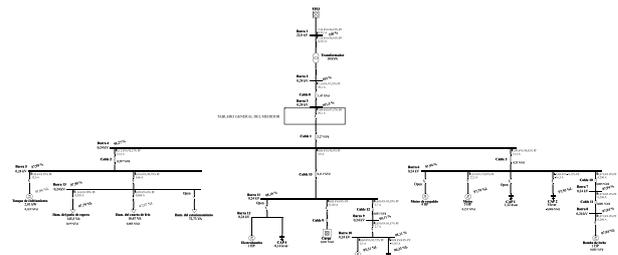


Figura 36: Flujo de carga del sistema eléctrico a demanda máxima con las mejoras

De acuerdo a los resultados, el factor de potencia es del 97,27% lo cual demuestra la inexistencia de inyección reactiva a la red. Además, la caída de voltaje existente hasta la electrobomba 2 del 4,69% está por debajo del límite del 5%, y la iluminación no excede el 3%.

Tabla 10: Valores del flujo de carga a demanda máxima con las mejoras

Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVar)	Potencia Aparente (kVA)	Factor de potencia (%)	Corriente (A)
6,90	1,65	7,09	97,27	29,10



El uso ineficiente de la energía originó una cargabilidad del 90,50% en el transformador, donde existió 7,13 kW y 5,58 kVAR el día viernes a las 6:00. A través de las mejoras, la potencia aparente es de 7,09 kVA lo que representa una disminución del 21,66%.

4.3. Replanteo del contrato de suministro eléctrico

La finca actualmente está dentro de la categoría residencial de bajo voltaje, por lo cual, la propuesta considera un cambio de contrato a BV comercial sin demanda.

El estudio permitió conocer la potencia máxima de la finca, de tal manera que la demanda declarada es de 7,59 kW, la cual resulta menor a 12 kW para ser abastecida por la empresa distribuida en el punto de entrega a bajo voltaje [15], [29].

De acuerdo al uso energético y a las características de la carga puede aplicarse a la tarifa de bajo voltaje comercial sin demanda, pues como requisito la potencia máxima debe ser inferior a 10 kW [15], [29].

Para cuantificar el ahorro monetario es considerado el consumo energético de agosto 2020 – julio 2021, cuya facturación actual es de 1.160,69 USD, mientras que la esperada de 940,25 USD, lo cual brinda un ahorro anual de 220,44 USD.

4.4. Disminución de pérdidas eléctricas

4.4.1 Pérdidas de potencia

Los resultados de la simulación en ETAP permitieron determinar que las pérdidas de potencia reducidas (P_{Rd}) son de 0,21 kW.

4.4.2 Pérdidas de energía

Las pérdidas de energía reducidas (E_p) resultaron de 242,214 kW·h/año que mediante el pliego tarifario y ecuación 5, se calcula el ahorro económico debido a su disminución. Al replantear el contrato de suministro eléctrico a comercial sin demanda, es considerado el valor de 0,104 USD/kW·h por reducir la energía eléctrica en el consumo mayor a 300 kW·h [15].

$$MA_p = (E_p)(CE) \tag{5}$$

donde MA_p es el monto anual ahorrado por pérdidas [USD] y CE el costo de la energía [USD/kW·h].

$$MA_p = (242,214 \text{ kW}\cdot\text{h/año})(0,104 \text{ USD/kW}\cdot\text{h})$$

$$MA_p = 25,19 \text{ USD/año}$$

4.5. Validación técnica-económica

Para determinar la rentabilidad de la inversión se utiliza las herramientas financieras denominadas Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Factor de Recuperación de Capital (FRC), Relación Beneficio/Costo (B/C) y el Período de Recuperación (PR) [30], [31], [32], [33].

Según el Banco Central del Ecuador la tasa pasiva referencial por plazo de 361 y más, es del 7,48% (dato referenciado el 06 de octubre del 2021) misma que será utilizada como el COK anual [34].

Para estimar la vida útil de los condensadores (V_{ut}), se toma en cuenta las 10.000 h de operación que brindan los capacitores y un uso diario estimado de 5 horas, por lo cual:

$$V_{ut} = \frac{10.000 \text{ h}}{(5 \text{ h/día})(365 \text{ días/año})}$$

$$V_{ut} = 5,48 \text{ años}$$

La Tabla 11 muestra de manera resumida los ahorros energéticos y económicos, los egresos anuales e inversión total requerida, donde VP1 representa al sistema de iluminación LED con control de presencia, VP2 es la compensación reactiva, VP3 el replanteo del contrato de suministro eléctrico.

Tabla 11: Balance económico de las propuestas de mejora

Propuesta	Ahorro energético (kW·h/año)	Ahorro económico (USD/año)	Inversión total (USD)	Egresos anuales (USD)
VP1	124,600	12,96	948,09	28,00
VP2	242,214	25,19	300,55	33,60
VP3	-	220,44	-	-
Total	366,814	258,59	1.248,64	61,60

El análisis financiero considera un plazo de 10 años debido a que la vida útil de las lámparas LED ronda los 23 años, pero debe tomarse en cuenta la reinversión de los condensadores (\$ 82,34) cada 6 años.

Tabla 12: Evaluación financiera de las propuestas de mejora

Inversión	\$ 1.248,64	Plazo	10 años	Tasa de interés anual del 7,48%	
Ingresos anuales	Valor Actual Neto	Tasa Interna de Retorno	Relación B/C	Período de Recuperación	
\$ 258,59	\$ 51,34	8,38%	1,04	9,464 años	

Al tener un VAN positivo y TIR mayor al COK, el proyecto resulta rentable, ya que por cada dólar invertido existe una ganancia neta de 4 centavos, donde la inversión total es recuperada en 9 años, 5 meses, 17,04 días.

4.5.1 Indicadores de desempeño energético con propuestas de mejora

Las diferentes propuestas analizadas en la presente investigación permitieron mejorar los indicadores IDEn actuales, cuyo factor de emisión de CO₂ es de 0,1917 kg CO₂/kW·h para proyectos de eficiencia energética [35]. A continuación, se visualiza el desempeño energético:

Tabla 13: Indicadores de desempeño energético actual vs mejora

Sistema eléctrico	Consumo eléctrico (kW·h/año)	Emisión de CO ₂ (kg CO ₂ /año)	Producción de leche (L/año)	Consumo energético por litro de leche producido (kW·h/L)
Actual	9.837,000	1.885,753	183.099	0,0537
Propuesto	9.470,186	1.815,435	183.099	0,0517
Ahorro	366,814	70,318	-	0,0020



4.5.2 Indicadores económicos con propuestas de mejora

En vista que el propietario de la finca deseó disminuir los egresos de dinero sin perjudicar la calidad del producto, se determina los indicadores económicos.

Tabla 14: Indicadores económicos actuales vs propuestos

Sistema eléctrico	Producción de leche (L/año)	Costo energético (USD/año)	Costo energético específico (ctvs./L)
Actual	183.099	1.160,69	0,634
Propuesto	183.099	902,10	0,493
Ahorro económico		258,59	0,141

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al emplear 15 lámparas LED de eficiencia luminosa entre 118 lm/W – 141,5 lm/W, el sistema de iluminación mediante control de presencia cumple los criterios primordiales de la calidad lumínica con un ahorro energético anual de 124,60 kW·h, pese a iluminar adicionalmente el estacionamiento y la bodega de alimentos.

La corrección del factor de potencia mediante compensación fija accionada por contactor y el sistema de iluminación LED con control de presencia, implicó la disminución de la cargabilidad del transformador monofásico en un 21,66%.

Con un costo de la energía según el pliego tarifario de 0,104 USD/kW·h, se alcanza anualmente el ahorro monetario de 25,19 USD por concepto de la disminución de las pérdidas energéticas equivalentes a 242,214 kW·h/año.

Los indicadores de desempeño IDEn como el consumo eléctrico presentaron una mejora de 9.837 kW·h/año a 9.470 kW·h/año, consecuentemente, el gasto de energía por litro de leche producido disminuyó de 0,0537 kW·h/L a 0,0517 kW·h/L y las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas fueron de 70,318 kg CO₂/año.

Se recomienda evaluar a largo plazo la factibilidad del dimensionamiento de un sistema solar térmico o fotovoltaico en la finca "La Cordillera", con la finalidad de sustituir el uso del GLP y alimentar las bombas autocebantes mediante energía renovable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] M. M. Josjjević *et al.*, "Ranking energy performance opportunities obtained with energy audit in dairies", *Thermal Sci.*, vol. 24, no. 5A, págs. 2865–2878, Feb. 2020, doi: 10.2298/TSCI191125100J.

[2] H. M. Abrar *et al.*, "Energy efficiency outlook of New Zealand dairy farming systems: An application of Data Envelopment Analysis (DEA) approach", *Energies*, vol. 13, no. 1, págs. 251–264, Ene. 2020, doi: 10.3390/en13010251.

[3] A. Moerkerken *et al.*, "Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: dilemmas for sustainability", *J. of Cleaner Prod.*, vol. 293, págs. 1–10, Abr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126095.

[4] L. P. de Lima *et al.*, "The energy mix and energy efficiency analysis for Brazilian dairy industry", *J. of Cleaner Prod.*, vol. 181, págs. 209–216, Abr. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.221.

[5] INEN, "Auditorías energéticas – Requisitos con orientación para su uso", 50002, Abril 19, 2016.

[6] S. Misak y L. Prokop, *Operation Characteristics of Renewable Energy Sources*, 1ra. ed. Cham, Suiza: Springer, 2017.

[7] A. Eberhard, *Power Quality*, 1ra. ed. India: InTech, 2011.

[8] P. Curtis, *Maintaining Mission Critical Systems in a 24/7 Environment*, 3ra. ed. Hoboken, Nueva Jersey: Wiley-IEEE Press, 2021.

[9] ARCERNNR, "Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica", 002/20, Noviembre 13, 2020.

[10] Cole-Parmer. (2014, Enero 24). Manual de usuario. Digi-Sense modelo 20250-00 [En línea]. Disponible en: <https://pim-resources.coleparmer.com/instruction-manual/digisense-20250-00-data-logging-light-meter-instruction-manual.pdf>

[11] J. Llopart, *MF1180_3 - Organización y gestión del montaje de las instalaciones eléctricas en el entorno de edificios y con fines especiales*, ed. 5.0. España: Elearning, 2015.

[12] IEEE, "Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems", Std 519, Junio 11, 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

[13] Google. (2020, Enero 08). Google Earth [En línea]. Disponible en: <https://earth.google.com/web/>

[14] IEEE, "Recommended practice for monitoring electric power quality", Std 1159, Agosto 13, 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.

[15] ARCERNNR, "Pliego Tarifario del Servicio Público de Energía Eléctrica. Período: Enero – Diciembre 2021", Noviembre 23, 2020.

[16] M. Sánchez, *Calidad de la energía eléctrica*, ed. Febrero. Puebla de Zaragoza, México: ITP, 2009.

[17] INEN, "Iluminación natural de edificios para fábricas y talleres. Requisitos", 1 154, Diciembre 07, 1984.

[18] INEN, "Accesibilidad de las personas al medio físico. Estacionamientos", 2248, Octubre 12, 2016.



- [19] Ministerio del Trabajo, “Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores”, 2393, Febrero 21, 2003.
- [20] CEN, “Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places”, prEN 12464-1, Julio 30, 2019.
- [21] J. González, M. Pareja y S. Terol, *Instalaciones de distribución*, 1ra. ed. Madrid, España: Editex, 2013.
- [22] NFPA, “Código eléctrico nacional”, 70, Agosto 24, 2016.
- [23] ARCERNR, “Prestación del servicio de alumbrado público general”, 006/20, Diciembre 30, 2020.
- [24] V. Márquez, J. González y J. González, *UF0567: Eficiencia energética en las instalaciones de iluminación interior y alumbrado exterior*, 1ra. ed. Andalucía, España: IC Editorial, 2013.
- [25] F. Fernández, *Instalaciones eléctricas en edificios de oficinas, comercios e industrias (MF0821)*, 1ra. ed. Barcelona, España: Cano Pina, 2015.
- [26] J. Sánchez y F. Cárcel, *Investigación de los factores incidentes en la eficiencia energética y mantenibilidad de los sistemas de iluminación interior de edificios*, 1ra. ed. Alcoy, España: 3Ciencias, 2015.
- [27] INEN, “Eficiencia energética en edificaciones. Requisitos”, 2 506, Junio 22, 2009.
- [28] J. Trashorras, *Configuración de instalaciones eléctricas*, 1ra. ed. Madrid, España: Paraninfo, 2013.
- [29] ARCONEL, “Distribución y comercialización de energía eléctrica”, 001/20, Junio 19, 2020.
- [30] P. Torres, *Instrumentos financieros básico: guía práctica, apuntes de clase y casos*, 1ra. ed. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2021.
- [31] S. Garrido y M. Romero, *Fundamentos de gestión de empresas*, 2da. ed. Madrid, España: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2021.
- [32] E. Bahílo, C. Pérez y G. Escribano, *Gestión financiera*, 2da. ed. Madrid, España: Paraninfo, 2019.
- [33] N. Moreno y L. Suárez, *Ingeniería económica*, 1ra. ed. Bucaramanga, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.
- [34] BCE. (2021, Octubre 01). Tasas de interés efectivas vigentes [En línea]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadistica/s/SectorMonFin/TasasInteres/TasasHistorico.htm>
- [35] CTFE, “Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador – Informe

2020”, Comisión Técnica de determinación de Factores de Emisión de Gases de efecto invernadero, Quito, Ecuador, Inf. Téc. 2021.



Paúl Potes Valencia.- Nació en Quito, Ecuador en 1996. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2019; y de Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2022. Sus campos de investigación están relacionados con Eficiencia Energética, Energías Renovables y Sostenibilidad Energética.



Diego David Jiménez.- Nació en Loja, Ecuador en 1994. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2019; y de Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2022. Sus áreas de interés son las Energías Renovables, Sistemas Eléctricos de Potencia, Protecciones Eléctricas y Líneas de Transmisión.



Xavier Proaño Maldonado.- Nació en Latacunga, Ecuador en 1985. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2010; y de Master en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2013. Sus campos de investigación se encuentran relacionados con Alto Voltaje, Energías Renovables, Protecciones Eléctricas y Sistemas Eléctricos de Potencia. Director de la Carrera de Electricidad en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la UTC, Ecuador.



Gabriel Napoleón Pesantez.- Nació en Cañar, Ecuador en 1988. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Universidad de Cuenca en 2013; y de Mestre em Engenharia Eletrotecnica ramo de Energia E Automação de la Universidad Politécnica de Leiria en 2017. Su campo de investigación está relacionado con los Sistemas Eléctricos de Distribución. Docente a tiempo completo de la Carrera de Electricidad en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la UTC, Ecuador.