

Tema:

EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL
CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU
POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES.**

**AUTOR:
MICHAEL ROBINSON AROCA AGUALONGO**

**DIRECTOR:
CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito, septiembre 2020

Michael Robhinson Aroca Agualongo

EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2020
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Michael Robhinson Aroca Agualongo (Y'1993-M'5). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio “Técnico Miguel de Santiago” de la ciudad de Quito. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Evaluar el comportamiento de pérdida de potencia eléctrica en el estado transitorio, estimando el costo económico que se ve reflejado en la facturación mensual de la industria. marocag@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986-SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo Cristian Cristóbal Cuji Cuji declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES”, realizado por Michael Robhinson Aroca Agualongo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, 15 septiembre 2020



.....
Cristian Cristóbal Cuji Cuji


Cédula de identidad: 171800222-1

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Michael Robhinson Aroca Agualongo, con documento de identificación N°172252359-2, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Nombre: Michael Robhinson Aroca Agualongo.

Cédula: 172252359-2

Fecha: Quito, 15 septiembre 2020

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	2
2	MARCO TEÓRICO	2
2.1	Descripción de los Sistemas de Conversión Trifásicas Industriales	2
2.2	Características del Horno de Arco Eléctrico	3
2.3	Sistemas de Control Integral	3
2.4	Análisis Energético	5
3	RESULTADOS	7
3.1	Descripción del Caso de Estudio	7
3.2	Resultados del Laboratorio	7
3.3	Modelamiento Sistema de Control Integral	8
3.4	Modelado Método Cano-Plata	9
3.5	Función de Transferencia	11
3.6	Análisis de Resultados	11
4	CONCLUSIONES	13
4.1	Trabajos Futuros	14
5	REFERENCIAS.....	14
5.1	Matriz de Estado del Arte	17
5.2	Resumen de Indicadores	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Descripción del Proceso Industrial – Horno de Arco Eléctrico.....	2
Figura 2. Horno de Arco Eléctrico.....	3
Figura 3. Diagrama de Bloque del Control Integral.....	4
Figura 4. Onda Típica del Control Integral.....	4
Figura 5. Diagrama Fasorial Simplificado del Horno de Arco Eléctrico.....	5
Figura 6. Reducción del Circuito del Horno de Arco Eléctrico.....	5
Figura 7. Circuito Equivalente al Horno de Arco Eléctrico.....	6
Figura 8. Curva Típica de Voltaje-Corriente de un Arco Eléctrico.....	6
Figura 9. Metodología a Desarrollar.....	7
Figura 10. Control Integral 95% ON y 5% OFF.....	7
Figura 11. Control Integral 60% ON y 40% OFF.....	8
Figura 12. Control Integral 50% ON y 50% OFF.....	8
Figura 13. Control Integral 30% ON y 70% OFF.....	8
Figura 14. Sinusoidales Resultantes del Control Integral.....	8
Figura 16. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S1.....	9
Figura 17. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S1.....	9
Figura 18. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S2.....	10
Figura 19. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S2.....	10
Figura 20. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S3.....	10
Figura 21. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S3.....	10
Figura 22. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S4.....	10
Figura 23. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S4.....	10
Figura 24. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S1.....	11
Figura 25. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S2.....	11
Figura 26. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S3.....	11
Figura 27. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S4.....	11
Figura 28. Temática de Estado del Arte.....	24
Figura 29. Formulación del Problema de Estado del Arte.....	25
Figura 30. Solución Propuesta de Estado del Arte.....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ciclos de Trabajo Porcentuales.....	9
Tabla 2. Valores Porcentuales del Periodo.	9
Tabla 3. Resultados de la Potencia Eléctrica.	11
Tabla 4. Tiempos de Reacción al Control Integral	12
Tabla 5. Potencia en el Estado Transitorio.....	12
Tabla 6. Costo de la Pérdida de Potencia Eléctrica.....	12
Tabla 7. Porcentaje de Trabajo.	12
Tabla 8. Pérdida de Potencia Eléctrica.....	12
Tabla 9. Potencia Eléctrica Consumida en el Periodo de Tiempo	13
Tabla 10. Eficiencia del Proceso.....	13
Tabla 11. Costo de kWh del Proceso Ideal.	13
Tabla 12. Costo Económico de Pérdidas de Potencia Eléctrica.....	13
Tabla 13. Costo Total del Proceso	13
Tabla 14. Matriz de Estado del Arte	17

EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES.

Resumen

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de pérdida de potencia eléctrica en base de los estados transitorios asociados al análisis de los convertidores AC/AC con el control integral. La utilización del modelo Cano-plata y el diseño del control por ciclos de trabajo, se implementan en el laboratorio con la finalidad de analizar los tiempos de reacción del estado transitorio y contrastar con el modelo ideal mediante el software Matlab y ATPDraw. Para aplicar las ecuaciones diferenciales y la función de transferencia que logra predecir las pérdidas de potencia eléctrica en los estados transitorios del sistema.

Palabras Clave: Control de Fase, Costos, Modelamiento, Potencia Eléctrica, Simulación, Transitorios Electromagnéticos.

Abstract

The results obtained from the electrical power loss evaluation based on the transient states associated with the analysis of the AC / AC converters with the integral control are presented below. The use of the Cano- Plata model and the design of the control by work cycles are implemented in the laboratory in order to analyze the reaction times of the transient state and contrast with the ideal model using Matlab and ATPDraw software. For apply the differential equations and the transfer function that is able to predict the losses of electrical power in the transient states of the system.

Keywords: Phase Control, Costs, Modeling, Electric Power, Simulation, Electromagnetic transients.

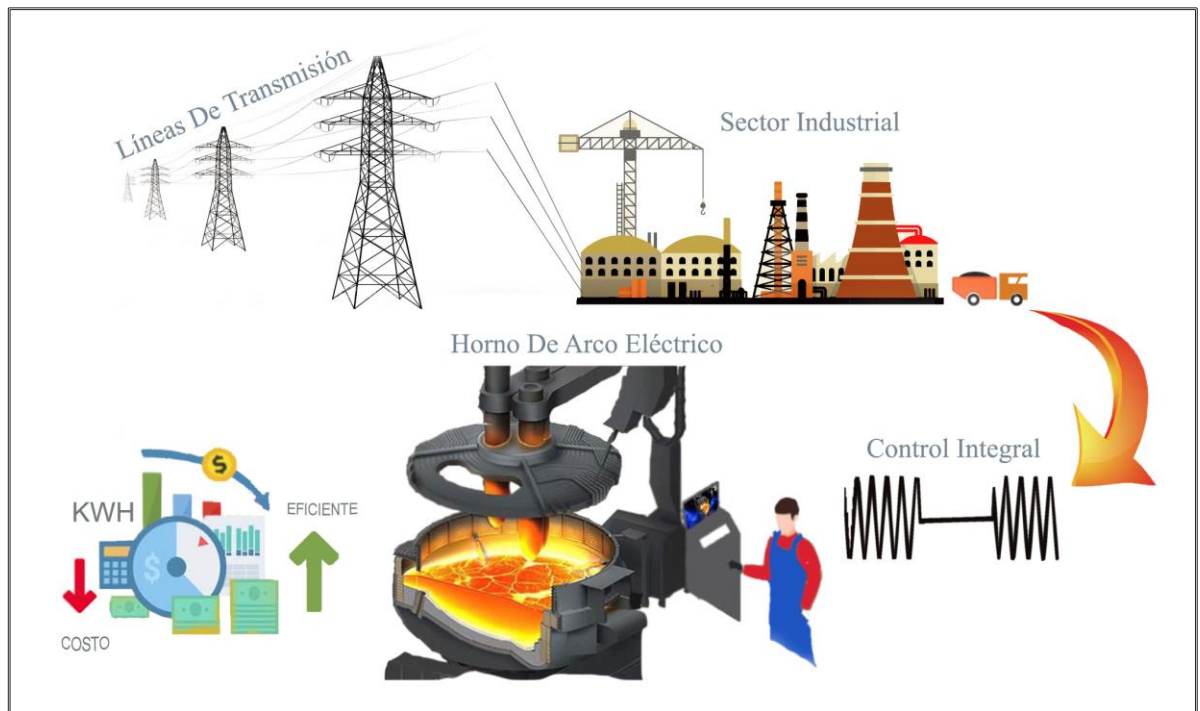


Figura. 1 Descripción del Proceso Industrial – Horno de Arco Eléctrico.

1 INTRODUCCIÓN

Las instalaciones eléctricas en la actualidad cuentan con diversas cargas entre ellas: motores, iluminación, instrumentación, arco eléctrico, etc. [1]. Los sistemas de arco eléctrico en especial son el eje temático central del presente tema de investigación por sus nuevas aplicaciones, innovación y eficiencia [2]. Logra generar inquietudes en los puntos de vista económico y pérdidas de potencia eléctrica, entre otras [3].

Los convertidores AC-AC con el control integral, son parte de la investigación para analizar el estado transitorio del sistema, con un controlador que es directamente proporcional a la integral de la señal de error, por lo que en este tipo varía en función de la desviación de la salida y del tiempo en el que se mantiene [4], [5], para mejorar los semiciclos de conducción con una energía específica, a fin de tener eficiencia energética [6], [7], mediante la implementación del modelo

de estudio Cano-Plata, en donde se evidencia las características típicas de un horno de arco eléctrico industrial, el cual se basa en la tensión y corriente [8].

La velocidad de respuesta del sistema de control, dependerá del valor de la pendiente de la rampa de acción integral del muestreo [9], [10], [11]; en donde se puede identificar la reacción a los tiempos de apertura y cierre, aplicado en el modelo y análisis del laboratorio, a más, de determinar las pérdidas de potencia eléctrica en el estado transitorio, se nota la reducción del eventual costo en la facturación [12], [13].

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de los Sistemas de Conversión Trifásicas Industriales

Estos conversores permiten controlar el flujo de potencia del valor RMS de la tensión de AC que se entrega a una carga variable, para la ejecución de este controlador se utiliza de dos formas [14] - [7].

A. Control de apertura y cierre.

Los tiristores se encienden en el cruce por cero del voltaje de entrada y se desconectan por unos ciclos. El control se aplica en una mayor inercia mecánica, velocidad y calefacción industrial [15].

B. Control de ángulo de fase.

Los tiristores permiten la conducción del voltaje de entrada, durante una parte de cada uno de los ciclos. El flujo de potencia está controlado con el retraso del ángulo de disparo de los tiristores hacia la carga. La variación de la tensión RMS de salida está limitada por el rango 70% y 100%. El voltaje de salida y la corriente de entrada son asimétricas [15].

Depende de la potencia entregada, estos convertidores se pueden dividir [16]:

- Control de fase directa
- Control de fase inverso
- Control de fase simétrico
- Control de fase diferencial
- Control por ciclo integral
- Troceador AC

2.2 Características del Horno de Arco Eléctrico

La característica del horno de arco eléctrico industriales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) son las temperaturas excesivas causadas por el electrodo y el metal, supera los 1000°C para la fundición y refinación de metales, tiene una actividad de 2 a 3 horas que se divide en dos etapas [17], [18], [19]:

- Fundición.
- Afino.

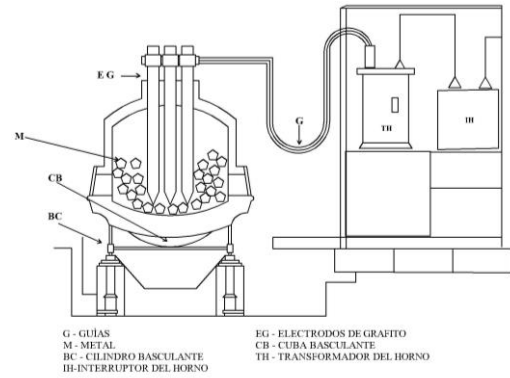


Figura 2. Horno de Arco Eléctrico.

A. Etapa de Fundición

La fundición, es una etapa donde la bóveda se llena de metal, mismo que será fundido por altas temperaturas [20], [21]. Para lograr, el horno cuenta con un par de electrodos [18]. Al comenzar se tiene una mayor variación de la potencia activa (P) y reactiva (Q).

Todo ese proceso ocurre por efecto de un arco eléctrico inestable [22].

B. Etapa del Afino

El afino, es un proceso de transformación físico químico para mejorar su composición, del material fundido [23].

Por efecto de un factor de potencia del 0.9 existe una disminución de las variaciones en la potencia activa (P) y reactiva (Q) debido al burbujeo del material [24].

2.3 Sistemas de Control Integral

La característica del circuito digital controlado se ajusta rápida y automáticamente; el ángulo de ajuste del triac para la eliminación del componente de CC indeseable en la corriente de cargas RL[25]-[5].

Otra característica del circuito es la conducción inicial, se inicia con un ángulo de disparo de 90°, lo que resulta en primeros picos suprimidos en la ráfagas de conducción [26], [27].

La rapidez de cambio en la respuesta entre la salida del controlador $u(t)$, el control es proporcional al error $e(t)$, es decir [28]:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (1)$$

O bien,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Donde:

K_i Es la ganancia del control integral

$e(t)$ Error

Una vez aplicada la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \quad (3)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

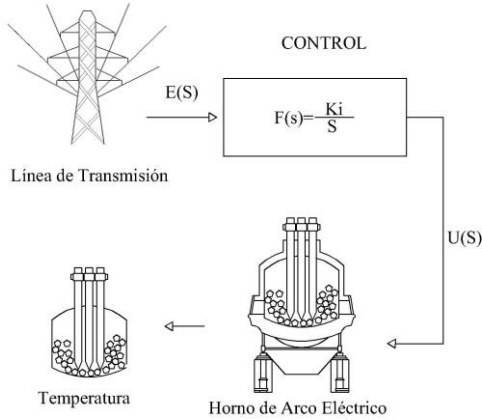


Figura 3. Diagrama de Bloque del Control Integral.

A. Control por ciclo integral

El convertidor AC/AC con el control de ángulo de fase o ciclo integral, se interpreta en un tiempo T_m para el encendido y T_n para el apagado, con una integral de ciclos tanto como m y n referidos en la Figura 4 [29], [30].

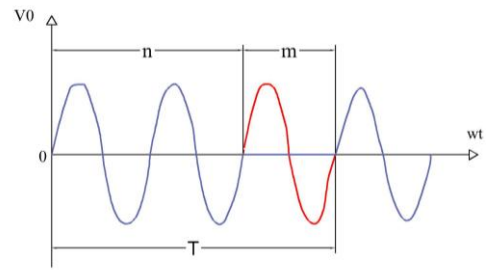


Figura 4. Onda Típica del Control Integral.

El control con el número de ciclos a ser analizados en este documento, se demuestra en la [30].

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$T = \frac{100}{60} \quad (7)$$

$$T = 1.667s \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (9)$$

$$\omega = 2 * 3.14 * 60 \quad (10)$$

$$\omega = 376.8Hz \quad (11)$$

[30].

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$T = \frac{100}{60} \quad (7)$$

$$T = 1.667s \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (9)$$

$$\omega = 2 * 3.14 * 60 \quad (10)$$

$$\omega = 376.8Hz \quad (11)$$

Donde:

f Es la frecuencia
 T Es el periodo
 Ω Frecuencia angular

$$P = Vf * I * \cos(\theta) \quad (13)$$

$$r * I = Vf * \sin(\theta) \quad (14)$$

2.4 Análisis Energético

Para el estudio de los hornos de arco eléctrico industriales se requiere aproximadamente 440kWh de energía eléctrica para fundir una tonelada métrica de acero; mientras que para una de chatarra de acero se utiliza 300kWh establecida como punto de fusión de 1520 °C / 2768°F, lo cual se ve reflejado en costo monetario sobre la facturación [31], [32].

De donde se obtiene para monofásica:

$$P = \frac{Vf^2}{2 * r} * \sin(\theta) \quad (15)$$

Para trifásico

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\theta) \quad (16)$$

A. Factor de potencia del horno de arco eléctrico

La tensión de arco eléctrico dependerá del factor de potencia del horno trifásico [18].

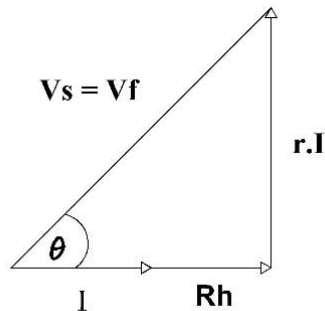


Figura 5. Diagrama Fasorial Simplificado del Horno de Arco Eléctrico.

Tener un bajo factor de potencia ayudaría a la eficiencia y estabilidad del arco eléctrico, con una reducción a los costos de operación [33], [34].

Se despeja las componentes de la Figura 5 y

Figura 6

Figura 5

Figura 6 se tiene:

$$Rh = Vf \cos(\theta) \quad (12)$$

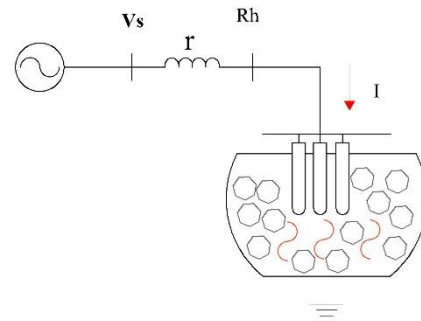


Figura 6. Reducción del Circuito del Horno de Arco Eléctrico.

La potencia entregada al horno de arco eléctrico es máxima, relativo al factor de potencia de 0.707 correspondiente a $\theta = 45^0$ grados. Es una carga puramente resistiva con un desplazamiento angular de casi cero entre la tensión y la corriente [35].

El circuito de la

Figura 6 representa las variables a representar en la simulación, ayudados con el software ATPDraw referidas en la Figura 7.

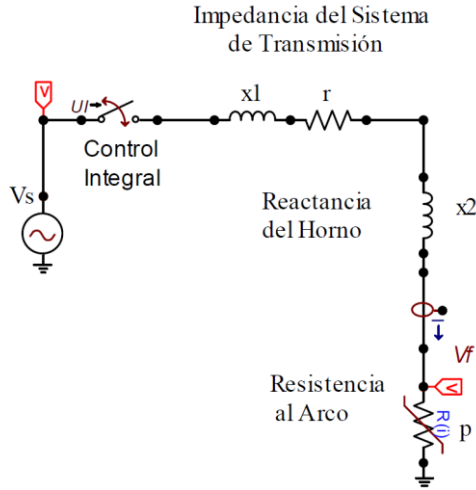


Figura 7. Circuito Equivalente al Horno de Arco Eléctrico.

Donde:

- V_s Es la tensión del transformador del horno secundario
- $R(i)$ Electrodo de vanguardia
- R La resistencia del arco eléctrico
- R_2 Pendiente del segmento AB
- x Reactancia de fase (consiste en la reactancia del reactor y el transformador)
- p Es constante durante el ciclo del arco

B. Método Cano-Plata

El valor de complejidad brinda distintas aplicaciones y el grado de simplificación que se decide asumir en el mismo, con el comportamiento real del horno de arco eléctrico industrial; se valida dentro de los parámetros dados del método Cano-Plata, se basa en una aproximación lineal por parte de la tensión y corriente característica de la carga [36].

Es decir, que la particularidad se altera de modo que la potencia consumida por la carga es denominada por el usuario. Así el modelo de carga investigado explica los cambios en las situaciones de trabajo del horno de arco eléctrico industrial [37], [38].

El área bajo la curva en la Figura 8. Curva Típica de Voltaje-Corriente de un Arco Eléctrico. es la potencia consumida por la carga y la resistencia del arco R_1 , puede calcularse como se muestra en la Ecuación (17).

$$R_1 = \frac{V_{ig}^2}{P + \frac{V_{ig}^2}{R_2} - \frac{V_{ex}^2}{R_2}} \quad (17)$$

$$i_1 = \frac{V_{ig}}{R_1} \quad (18)$$

$$i_2 = V_{ex} - V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (19)$$

$$V \begin{cases} iR_1 & 0 \leq |i| \leq i_1 \\ iR_2 + V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) & i_1 \leq |i| \leq i_2 \\ (i_1 - i_2)e^{-\left(|Pr_o| \cdot \left(\frac{t}{\tau_a}\right)\right)} & \frac{d|i(t)|}{dt} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

Donde:

- V Es el voltaje
- i Es la corriente
- R_1 Pendiente del segmento OA
- R_2 Pendiente del segmento AB
- V_{ig} Tensión de ignición
- V_{ex} Tensión de extinción
- i_1 Corriente de ignición
- i_2 Corriente de extinción

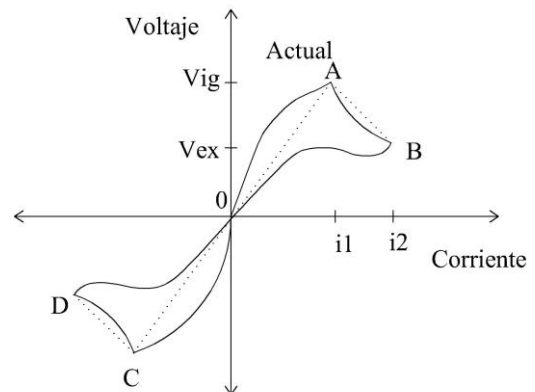


Figura 8. Curva Típica de Voltaje-Corriente de un Arco Eléctrico.

En los tiempos D y A se efectúan las descargas y en los puntos C y B se

extingue el arco. Durante el intervalo comprendido entre los puntos C y A existen descargas inestables, parte de estas curvas, puede derivarse la característica voltaje/corriente [39].

Para el modelo se diseña con los datos de la constante de la longitud del arco, el voltaje $V_{arc}(t)$ toma valores que depende de la magnitud de la corriente instantánea $I_{arc}(t)$. Representa la tensión con la Ecuación (21) [39].

$$V_{arc}(t) = V_{arco} + \frac{c}{(D + I_{arc}(t))} \quad (21)$$

Donde:

$V_{arc}(t)$ Tensión del arco eléctrico

$I_{arc}(t)$ Corriente del arco eléctrico

V_{arco} Tensión del arco cuando su corriente aumenta

C Potencial del arco

D Tensión instantánea del arco eléctrico

3 RESULTADOS

3.1 Descripción del Caso de Estudio

A continuación, se muestra los pasos a seguir para desarrollar la investigación.

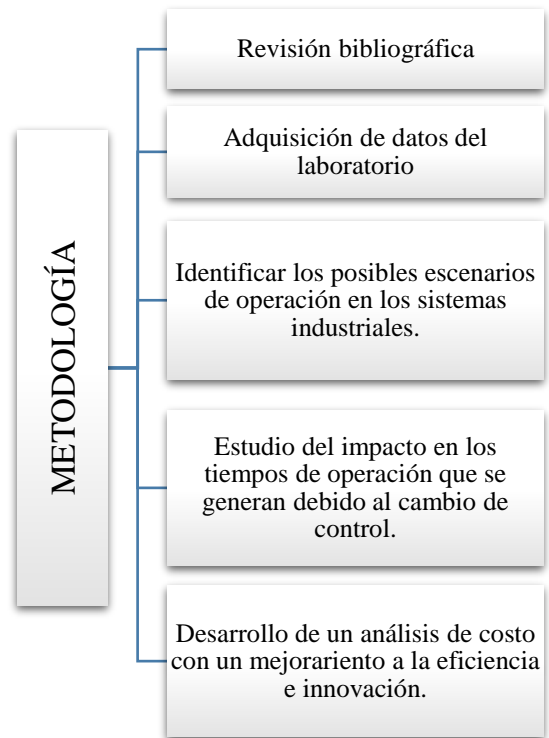


Figura 9. Metodología a Desarrollar

3.2 Resultados del Laboratorio

Para el modelo ideal de nuestro sistema de control integral se analizará: en un proceso de 3 horas, con un periodo de 1,6667s a 100 ciclos de trabajo y se determina el comportamiento del estado transitorio del sistema.

Los datos del control integral reflejados en la Tabla 2, son desarrollados en el laboratorio, con resultados expresados en las siguientes figuras.

La Figura 10 representa el escenario S1 con un resultado en el tiempo de encendido de 1,5833s y de apagado 0,0833s.

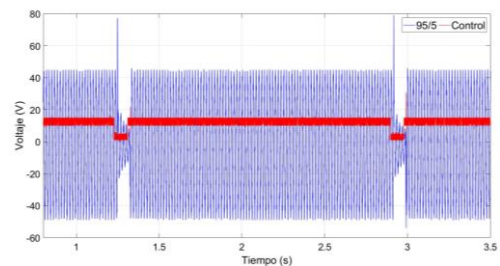


Figura 10. Control Integral 95% ON y 5% OFF.

La Figura 11 representa el escenario S2 con un resultado en el tiempo de encendido de 1s y de apagado 0,6667s.

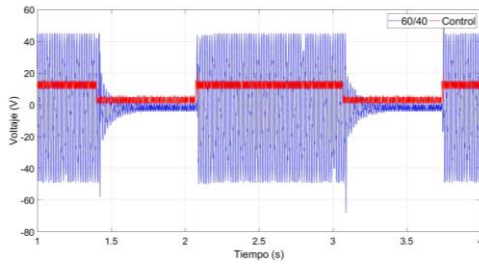


Figura 11. Control Integral 60% ON y 40% OFF.

La Figura 12 representa el escenario S3 con un resultado en el tiempo de encendido de 0,8333s y de apagado 0,8333s.

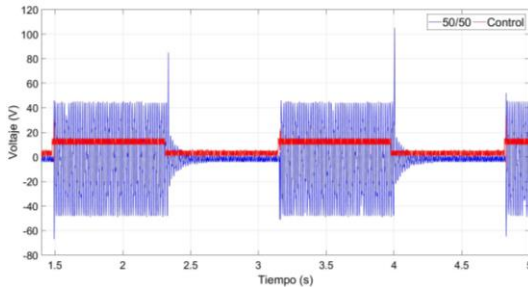


Figura 12. Control Integral 50% ON y 50% OFF.

La Figura 13 representa el escenario S4 con un resultado en el tiempo de encendido de 0,5s y de apagado 1,1667s.

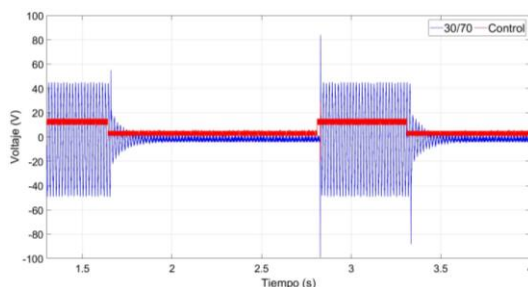


Figura 13. Control Integral 30% ON y 70% OFF.

Los resultados de las figuras fueron extraídos del análisis en el laboratorio, para evidenciar el comportamiento del sistema aplicado el control integral en todos los escenarios propuestos.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** evidencia el cambio de los 4 escenarios planteados, se

tiene un periodo de análisis de 1.6667s con una escala de x10 en la tensión, con la observación general de la reacción al control que posteriormente se reflejará en las pérdidas de potencia eléctrica.

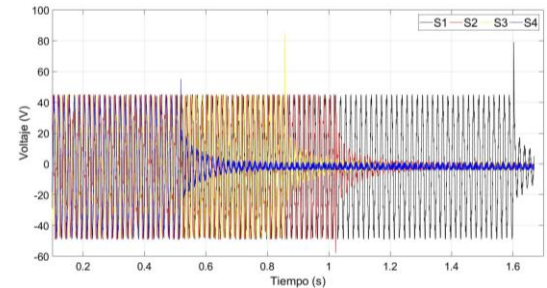


Figura 14. Sinusoidales Resultantes del Control Integral.

3.3 Modelamiento Sistema de Control Integral

Para el modelamiento del control integral se determina los datos con la [30].

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$T = \frac{100}{60} \quad (7)$$

$$T = 1.667s \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (9)$$

$$\omega = 2 * 3.14 * 60 \quad (10)$$

$$\omega = 376.8Hz \quad (11)$$

, se utiliza los parámetros de ejecución como la frecuencia de 60Hz en un numero de 100 ciclos de trabajo.

El análisis para determinar los ciclos de trabajo se tomó en cuenta el 100%, con valores porcentuales en 5 ciclos, donde interpreta que uno se desprecia referido a la entrega de potencia eléctrica con resultados de baja eficiencia del sistema.

Para nuestros casos nos basamos en los 4 primeros ciclos de trabajo: para el primer escenario se tomara en cuenta un 25%, el segundo el 100%, el tercero 50% y finalmente el cuarto con el 50%, con los valores porcentuales de apagado que se ve reflejado en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclos de Trabajo Porcentuales.

Ciclos de trabajo	El rango de ciclos de apagado	Porcentaje de apagado para el análisis
1	1% - 20%	5%
2	21% - 40%	40%
3	41% - 60%	50%
4	61% - 80%	70%
5	81% - 100%	

Los escenarios se modelarán a un periodo de 1,6667s denotándose los valores porcentuales tanto del encendido como el apagado del sistema que se evidencia en la Tabla 2.

Los valores correspondientes a cada porcentaje en el periodo del tiempo, se aplicará para el sistema de control integral con los escenarios ya antes mencionados.

Tabla 2. Valores Porcentuales del Periodo.

Escenario	n ON	m OFF	n ON(s)	m OFF(s)
S1	95%	5%	1,5833	0,0833
S2	60%	40%	1	0,6667
S3	50%	50%	0,8333	0,8333
S4	30%	70%	0,5	1,1667

3.4 Modelado Método Cano-Plata

Para la modelación ideal se tomó datos correspondientes al funcionamiento de un horno de arco eléctrico industrial, que conlleva un proceso de 3 horas, en el cual obtiene una fundición de una tonelada de acero que se requiere aproximadamente una potencia eléctrica de 440kWh.

Con la modelación se aplica el método Cano-plata y a la vez el control integral, interpreta un análisis con los siguientes datos:

- Periodo de 6667s.
- Potencia de arco de 146.67kW.
- Corriente de 5kA.
- Índice de modulación de 0.2.

La simulación se incorporará una tensión umbral de la longitud de arco a 200v, este sistema tiene un acople de red a 0.01Ω y 1mH, con los bloques existentes del Matlab.

La Figura 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa la corriente y la tensión de una fase del circuito, respecto al escenario S1, mientras que en la Figura 16 se puede visualizar el modelo Cano-plata de la Curva típica de Tensión-Corriente.

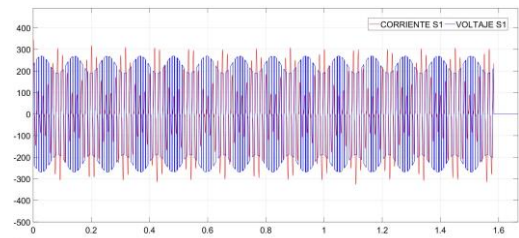


Figura 15. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S1.

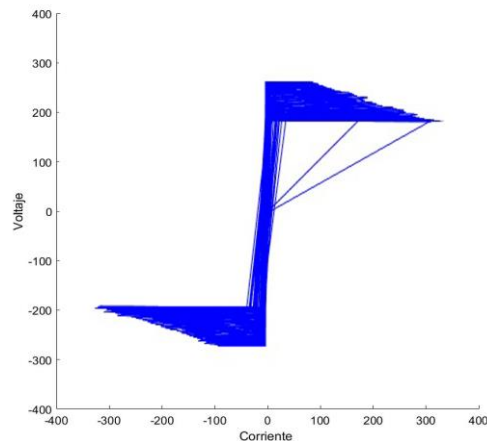


Figura 16. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S1.

La Figura 17 refleja los porcentajes referidos al 60% en encendido y 40% de apagado idealmente con su curva característica del método Cano-Plata en la Figura 18.

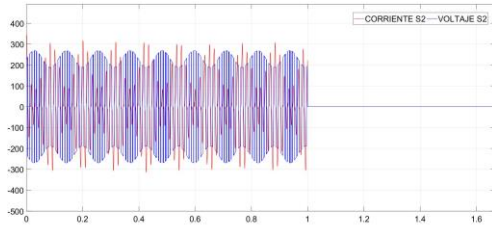


Figura 17. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S2.

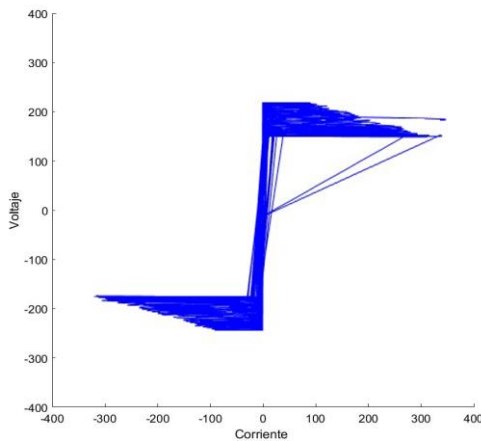


Figura 18. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S2.

La Figura 19 refleja los porcentajes referidos al 50% en encendido y 50% de apagado idealmente con su curva característica del método Cano-Plata en la Figura 20.

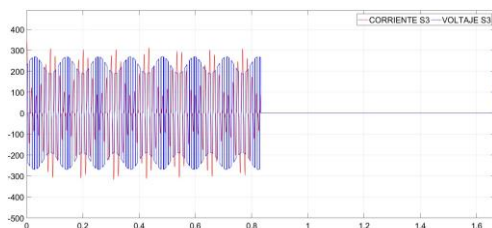


Figura 19. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S3.

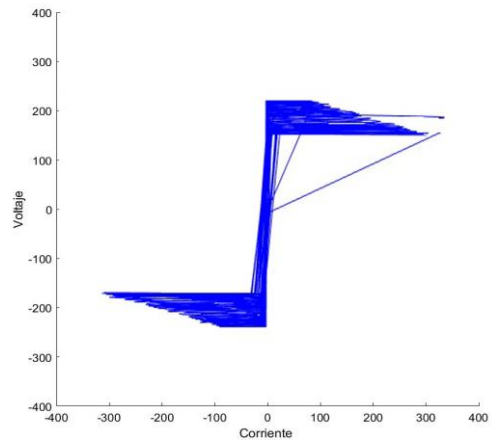


Figura 20. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S3.

La Figura 22 refleja los porcentajes referidos al 50% en encendido y 50% de apagado idealmente con su curva característica del método Cano-Plata en la Figura 22.

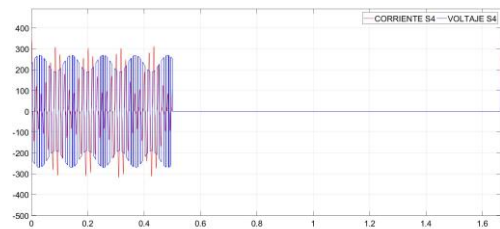


Figura 21. Simulación Horno de Arco Eléctrico Escenario S4.

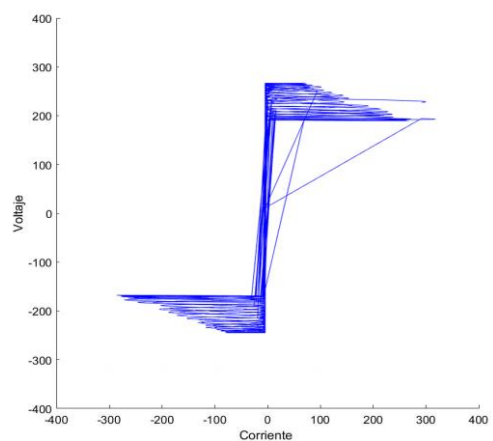


Figura 22. Curva Típica Voltaje-Corriente Escenario S4.

Todos los datos obtenidos de la simulación fueron en un tiempo de muestreo de 0.004s con un periodo de

1.6667s, notablemente se aprecia en las curvas típicas de Voltaje-Corriente la verificación de los cambios de situación del trabajo del horno de arco eléctrico industrial por el control integral.

3.5 Función de Transferencia

Con los datos posteriormente analizados del laboratorio y el modelamiento, se obtiene la función de transferencia con el apoyo del Software Matlab, en los escenarios propuestos con tiempo de muestra de 0.004s y un espectro de 0.06s.

$$FT\{f(t)\} = FT(s) \quad (22)$$

La Figura 23 representa el sistema sobreamortiguado que da como resultado la función de transferencia.

$$FT\{f(t)\} = \frac{1.002s^2 + 264.3s + 3053}{s^2 + 269.7s + 1593} \quad (23)$$

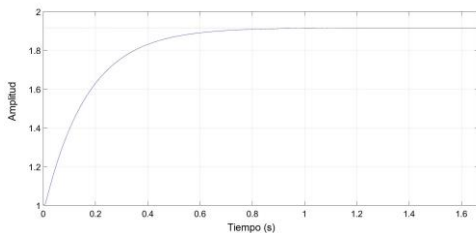


Figura 23. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S1.

La Figura 24 representa el sistema subamortiguado que da como resultado la función de transferencia.

$$FT\{f(t)\} = \frac{1.003s^2 + 137.7s + 17600}{s^2 + 269.7s + 77900} \quad (24)$$

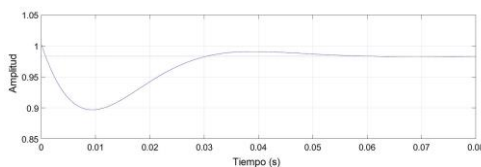


Figura 24. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S2.

La Figura 25 representa el sistema sobreamortiguado que da como resultado la función de transferencia.

$$FT\{f(t)\} = \frac{1.052s^2 + 30370s + 64520}{s^2 + 31340s + 475400} \quad (25)$$

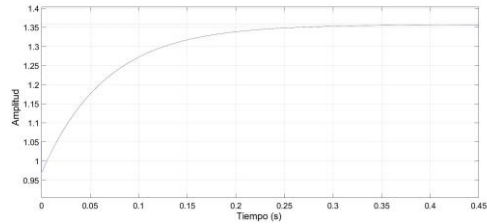


Figura 25. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S3.

La Figura 26 representa el sistema sobreamortiguado que da como resultado la función de transferencia.

$$FT\{f(t)\} = \frac{1.8s^2 - 4.6 \times 10^{11}s + 5 \times 10^{12}}{s^2 + 2.5 \times 10^{11}s + 3.1 \times 10^{13}} \quad (26)$$

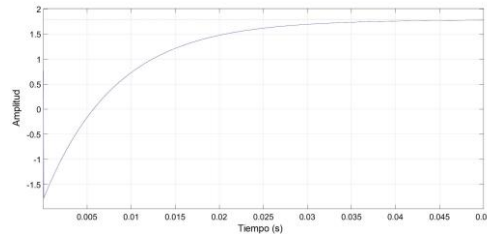


Figura 26. Sistema Lineal de la Función de Transferencia S4.

3.6 Análisis de Resultados

Al momento de analizar se toma en cuenta el dato de la potencia eléctrica, tanto en el laboratorio que es de 18.13kWh y el modelamiento de 476.55kWh sin el control integral, en un tiempo de 3 horas de trabajo.

Tabla 3. Resultados de la Potencia Eléctrica.

Escenario	Potencia en el laboratorio kWh		Potencia en modelo kWh	
	ON	OFF	ON	OFF
S1	16.46	1.67	399.65	76.89
S2	10.09	8.045	250.82	225.72
S3	9.01	9.11	208.45	268.10
S4	4.64	13.49	119.50	357.05

Los resultados del análisis en la Tabla 3 aplicados al control integral en los 4 escenarios propuestos, se tiene como resultado en el escenario S4 una pérdida

de potencia eléctrica de 357.05kWh, en el lapso del apagado que no es eficiente para el sistema.

La reacción en el estado transitorio del control integral se analiza en un periodo de 3 horas, referidos a un proceso de fundición de una tonelada de acero, se ve el resultado con un muestreo de 0.025s, en el lapso de un periodo de 100 ciclos de trabajo, se evidencia en la Tabla 4. Los valores representan a los tiempos de reacción al control.

Tabla 4. Tiempos de Reacción al Control Integral.

Escenario	Tiempo de reacción al control integral ON(s)	Tiempo de reacción al control integral OFF(s)
S1	162	842.4
S2	205.2	1166.4
S3	183.6	1177.2
S4	194.4	1080

Referidos a los resultados de la Tabla 4 se analiza las pérdidas de potencia eléctrica en el estado transitorio del sistema, interpretados en la Tabla 5.

Tabla 5. Potencia en el Estado Transitorio.

Escenario	Potencia en el estado transitorio ON(kWh)	Potencia en el estado transitorio OFF(kWh)
S1	0.246	1.284
S2	0,1917	1.09
S3	0.153	0.983
S4	0.083	0.464

Con la referencia del pliego tarifario nacional se predice un eventual costo de la pérdida de potencia eléctrica en el estado transitorio, analizado con un periodo de 1.6667s referidos en la Tabla 6. Aplicado el costo del 1kWh a \$0.089 con la demanda horaria de la Empresa Eléctrica Quito S.A. en las horas de 07H00 hasta 22h00 [40].

Tabla 6. Costo de la Pérdida de Potencia Eléctrica.

Escenario	Costo total USD
S1	0.136
S2	0.114
S3	0.101
S4	0.048

La comparación del modelamiento y el laboratorio ideales son analizados, con el muestreo de los ciclos de trabajo y la potencia eléctrica transmitida en esos periodos de tiempo, con la referencia sin el control integral para lograr así una comparación, mediante el modelo Canoplate se puede evidenciar los cambios del control integral en la curva típica del voltaje – corriente, así también incluimos la función de transferencia como aporte en los tiempos que se toma en responder el sistema en cada ciclo de trabajo.

Tabla 7. Porcentaje de Trabajo.

Escenario	Trabajo Ideal	Modelamiento	Laboratorio
S1	95%	84%	91%
S2	60%	53%	56%
S3	50%	44%	50%
S4	30%	25%	26%

La

Tabla 7 se puede evidenciar que en el análisis del laboratorio no se obtiene el porcentaje ideal que se postula en los 4 escenarios de trabajo, en lo cual tiende a tener pérdida de potencias eléctrica que se denota los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8. Pérdida de Potencia Eléctrica.

Escenario	Laboratorio (kWh)	Modelamiento (kWh)
S1	0,7313	46,8505
S2	0,7323	30,7959
S3	0,0504	26,0927
S4	0,6815	19,6121

El resultado de la Tabla 9 es relevante a todo el proceso aplicado el control integral, como punto de vista de una comparación del escenario S1, entrega

una potencia eléctrica de 16.46kW en comparación del modelo que es 399.65kWh.

Tabla 9. Potencia Eléctrica Consumida en el Periodo de Tiempo.

Escenario	Laboratorio (kWh)	Modelamiento (kWh)
S1	16.46	399.65
S2	10.09	250.82
S3	9.01	208.45
S4	4.64	119.50

Como punto de vista se calcula la eficiencia del proceso, tanto en el análisis del laboratorio como el modelo referidos en la Tabla 10.

Tabla 10. Eficiencia del Proceso.

Escenario	Laboratorio	Modelamiento
S1	91%	84%
S2	56%	53%
S3	50%	44%
S4	26%	25%

El costo de cada proceso, relevante al dato obtenido del análisis en el laboratorio y el modelamiento con el plan tarifario de demanda horaria se representa en la Tabla 11. Muestra los valores a ser facturados, referido al costo que produce las pérdidas de potencia eléctrica del sistema.

Tabla 11. Costo de kWh del Proceso Ideal.

Escenario	Laboratorio (USD)	Modelamiento (USD)
Sin control	1.61	42.41
S1	1.46	35.56
S2	0.89	22.32
S3	0.80	18.55
S4	0.41	10.63

Con los valores de la Tabla 8 se puede representar el costo que equivale las pérdida de potencia eléctrica en el sistema reflejadas en la Tabla 12.

Tabla 12. Costo Económico de Pérdidas de Potencia Eléctrica.

Escenario	Laboratorio (USD)	Modelamiento (USD)
S1	0,0650	4,1697
S2	0,0652	2,7408
S3	0,0045	2,3223
S4	0,0607	1,7455

En la Tabla 13 se evidencia en el análisis del laboratorio y el modelamiento el costo total que conlleva un proceso de 3 horas.

Tabla 13. Costo Total del Proceso.

Escenario	Laboratorio (USD)	Modelamiento (USD)
Sin control	1.61	42.41
S1	1,530	39,739
S2	0,963	25,064
S3	0,8071	20,874
S4	0,473	12,381

4 CONCLUSIONES

El presente trabajo tiene como finalidad contribuir a las industrias que utilizan los hornos de arco eléctrico para que realicen un mejor control en la energía consumida, lo cual conlleva a la reducción de los costos, por lo tanto, las industrias pueden considerar proyectos futuros para la prevención de posibles pérdidas de potencia eléctrica o la toma de decisiones de cambio con respecto a la implementación de nuevas tecnologías.

La investigación realizada al horno de arco eléctrico industrial, añade un valor importante al estudio de las afectaciones en la red de distribución, por la inyección de armónicos durante su funcionamiento lo cual conlleva a tener pérdidas de potencia eléctricas, con afectación a los sistemas eléctricos de potencia; en nuestro estudio aplicado el control integral se puede evidenciar un 7% afectación en los transitorios.

Los resultados de la simulación del horno de arco eléctrico industrial en el

estado transitorio, representados con un control integral del 95% de encendido, factor de potencia de 0.7 entregado al sistema una potencia eléctrica de 399.65kWh, con una pérdida de potencia eléctrica en el estado transitorio de 46.85kWh, tiene un costo de \$4.16 por cada proceso de fundición de una tonelada de acero, lo cual se convierte en el escenario con más eficiencia del análisis.

El modelo del estado transitorio permite realizar la estimación con software Matlab y ATPDraw de las funciones de transferencia y analizar el tiempo de reacción al control integral. Se obtiene en el análisis un trabajo de 84% de un horno de arco eléctrico con un tiempo de 1004.4s/ 16.74min al sistema de control por cada proceso.

Los escenarios desarrollados para esta estimación del control integral en sistemas industriales, se pueden aplicar al caso de cualquier industria. El sistema ideal con el control integral sin pérdidas de potencia eléctrica y con una eficiencia de 94% entrega una potencia al sistema de 446.50kWh con una reducción de 30.04kWh, tiene una disminución del costo de facturación de cada proceso de \$2.67, esto permite determinar la eficiencia de un sistema con una reducción a la facturación económica de la industria.

4.1 Trabajos Futuros

Un posible trabajo a futuro es el análisis en la parte dinámica del sistema de los hornos de arco eléctrico industriales, asociados a los convertidores AC/AC con el control integral, en el desarrollo de los índices de distorsión armónico y efecto flicker al sistema interconectado.

5 REFERENCIAS

[1] M. Piazza, M. Ometto, F. Bianco, and D. Patrizio, "EAF process

- optimization through a modular automation system and an adaptive control strategy," *Metall. Ital.*, vol. 108, no. 9, pp. 21–30, 2016.
- [2] Christian Alfonso Villada León, "Sistema conversor ac-ac de alta frecuencia con corrección de factor de potencia," 2009.
- [3] P. J. Jiménez-ceciliano, "Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero," no. 506, 2014.
- [4] C. V. V. Reddy, R. D. Kulkarni, P. Rautela, and S. T. Mohamed, "Design and simulation of integral cycle control based thyristor controller for power quality improvement.," *2018 4th Int. Conf. Converg. Technol. I2CT 2018*, pp. 1–6, 2018.
- [5] J. Oliver, "Diseño e implementación de un prototipo de planta con un control de nivel por presión hidrostática, comunicación remota y monitoreado mediante el software.," *Hilos Tensados*, vol. 1, no., pp. 1–476, 2018.
- [6] K. F. Sanabria, M. A. Mantilla, and J. F. Petit, "Análisis comparativo entre técnicas de control predictivo para convertidores matriciales AC-AC," no. November 2017, pp. 1–7, 2017.
- [7] J. L. C.-L. Lidia del R. Castro-Cepeda, "Implementación de un conversor AC/AC mediante un variador de frecuencia aplicado al control de temperatura en una termoformador de plástico." 2018.
- [8] Y. Xia, Z. Shi, Y. Li, Y. Feng, and Z. Xu, "Dynamic analysis and control measures of distribution network voltage with electric arc furnace.," *2019 IEEE Int. Conf. Power Data Sci. ICPDS 2019*, no.

- 2, pp. 85–90, 2019.
- [9] S. Juan and M. Alberto Pérez Ing Analía Pérez Hidalgo Bioing Elisa Pérez Berenguer, “Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo.,” p. 1, 2008.
- [10] L. A. Rodríguez Umaña, “Modelo del control de nivel y caudal de líquido en un depósito cilíndrico usando la herramienta Simulink de Matlab,” *Dialnet*, vol. 9, no. 1, pp. 7–8, 2013.
- [11] R. Fonseca, “Análisis de estabilidad transitoria en sistemas de mini aero generación.,” *Tesis*, pp. 1–100, 2017.
- [12] S. García, M. Héctor, and G. Jorge, “Transitorios electromecánicos en sistemas de potencia industriales Electromechanical transients in industrial power systems,” 2015.
- [13] Andr. V.-R. Denice Jeaneth RomeRo-López, “Modelo de incentivos para la reducción de pérdidas de energía eléctrica en Colombia,” *Rev. la Maest. en Derecho Económico*, vol. 6, no. 6, pp. 221–257, 2013.
- [14] B. B. García, “Diseño y validación del control digital de un inversor de potencia en ejes de referencia síncronos conectado a red.,” 2011.
- [15] Alba Nelly Calderón Hernández, “Análisis de los convertidores de electrónica de potencia a través de una interfaz de Matlab.,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 8, no. 1, pp. 28–48, 2017.
- [16] J. A. S. Elías, “Actualización de los módulos de control de convertidores estáticos de energía AC-AC, mediante una pc: control de fase diferencial, troceador ac y control de fase directo.,” 2009.
- [17] B. M. C. Salcedo, “Procesos de chatarrización de materiales metálicos producto del mantenimiento automotriz en la ciudad de Cuenca.,” 2015.
- [18] Raúl Santiago Villafuerte Novoa, “Modelación, simulación y determinación de índices de distorsión armónica y efecto flicker, en el sistema nacional de transmisión, causados por la conexión de hornos de arco, aplicado al caso de Novacero s.a.,” 2008.
- [19] Jesús Rendón F. Francisco Rojas H. Ervis Díaz. Adra Rodríguez C., “Estudio de la eficiencia eléctrica en los hornos de arco eléctrico sumergido de sidor en función de la pérdida de calor a través de su refractario de trabajo y la longitud de arco.” 2016.
- [20] Juan Piñuela Noval, “Estudio sobre el aumento de potencia de un horno eléctrico de femn afinado.,” 2019.
- [21] Á. López, M. Alexánder, H. Baena, C. Alberto, M. Durango, and J. James, “Calibración de los parámetros de un modelo de horno de arco eléctrico empleando simulación y redes neuronales.,” 2014.
- [22] Carlos Alberto Caiza Collaguazo, “Diseño y simulación de una máquina para demoler el ducto de vaciado del horno de arco eléctrico de la empresa acería del Ecuador compañía anónima Adelca.,” 2017.
- [23] J. Jesser, D. Christian, and A. Mauricio, “Estimación de los parámetros de un modelo de un horno de arco eléctrico usando máxima verosimilitud.,” 2012.
- [24] L. Zhang, W. Kang, and X. Zhang, “A practical electric arc furnace model for computer simulation.,” *Energy Power Eng.*, vol. 09, no. 04, pp. 445–451, 2017.
- [25] K. A. Nigim and G. T. Heydt,

- “Power quality improvement using integral-PWM control in an AC/AC voltage converter,” vol. 63, pp. 65–71, 2002.
- [26] ARIFUR RAHMAN, “A digital self-compensating method for integral- cycle power control of rl loads.,” vol. I, no. 2, pp. 49–52, 1980.
- [27] M. T. Lazim, “Power frequency converter based on integral-cycle triggering mode of thyristors with multi-control periods,” *Electr. Power Components Syst.*, vol. 41, no. 12, pp. 1173–1187, 2013.
- [28] R. Hernandez, *Introduccion a los sistemas de control*. 2010.
- [29] D. V Khakhkhar, “Design and simulation of novel integral switching cycle control for heating load.,” vol. 5, pp. 41–44, 2013.
- [30] M. Narayanan, “A review of all possible control strategies for ac voltage controller.,” vol. 3, no. 1, 2016.
- [31] Yunieski Sánchez Hernández Tutor: Ing. Horeb González Chaviano, “Modelación de hornos de arco eléctrico,” 2011.
- [32] Jonathan Mateos Carmona, “Análisis y optimización de costes en una planta de procesado y producción de acero.,” 2010.
- [33] N. Cortes and H. Valladares, “Estudio de los efectos en el factor de potencia y en el contenido armónico producido por el montaje de un generador fotovoltaico en una instalación eléctrica,” 2017.
- [34] P. D. E. Titulación, J. Alfredo, Z. Mora, J. Carlos, and L. García, “Simulación y automatización del control de potencia reactiva para mejoramiento del factor de potencia.,” 2018.
- [35] Y. A. Mobarak, “Arc furnace loads voltage stability,” no. May 2007, 2017.
- [36] E. A. C. Plata and H. E. Tacca, “Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP,” 2005.
- [37] G. R. Estrada-Villa, “Evaluación del modelo de arco eléctrico para estimar niveles de flicker.,” 2014.
- [38] legougui iman, “Simulation d’un four à arc électrique triphasé,” 2017.
- [39] catalina gonzález castaño, “Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker,” 2016.
- [40] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución,” *Resolución Nro. ARCONEL - 002/19*, vol. 18, 2019.

5.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 14. Matriz de Estado del Arte

EVALUACIÓN DE PERDIDA DE POTENCIA ELÉCTRICA POR EL CONTROL INTEGRAL EN UN SISTEMA DE CONVERSIÓN AC/AC Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA SISTEMAS INDUSTRIALES EFICIENTES																									
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN								
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	Control de sistemas industriales	Sistemas eléctricos de potencia	Comportamiento en el estado transitorio	Simulación en el software Matlab y ATPDraw	Afectación al sistema reflejados al costo	Sistema de control	Característica del horno de arco eléctrico	Acumulación y registro de datos	Consideraciones sobre costos	Estado dinámico del sistema	Efectos producidos por el control	Variación de las características de producción en los hornos de arco eléctrico	Afectaciones a la red de alimentación al sistema	Mejoramiento en el control del sistema	Reguladores de corriente voltaje	Ventajas y desventajas en el estado transitorio	Consumo de potencia eléctrico al sistema	Operación del horno de arco eléctrico	Mejoramiento de eficiencia al sistema industrial	Aplicación de un control	Reconocer las pérdidas de potencia eléctrica del	Reducir costo de producción
1	2016	EAF process optimization through a modular automation system and an adaptive control strategy	8					☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
2	2009	Sistema conversor ac-ac de alta frecuencia con corrección de factor de potencia	41	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒			☒		☒		☒		☒		☒		

3	2014	Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero	9	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
4	2018	Design and simulation of integral cycle control based thyristor controller for power quality improvement	11		✗	✗		✗		✗	✗		✗		✗	✗	✗		✗	✗		
5	2018	Diseño e implementación de un prototipo de planta con un control de nivel por presión hidrostática, comunicación remota y monitoreado mediante el software	17	✗	✗	✗	✗	✗			✗				✗	✗					✗	✗
6	2017	Análisis comparativo entre técnicas de control predictivo para convertidores matriciales AC-AC	14	✗			✗	✗		✗	✗				✗	✗		✗				✗
7	2018	Implementación de un convertor AC/AC mediante un variador de frecuencia aplicado al control de temperatura en una termoformador de plástico	13	✗	✗		✗	✗		✗	✗				✗	✗					✗	✗
8	2019	Dynamic analysis and control measures of distribution network voltage with electric arc furnace	11	✗	✗			✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗		✗

9	2008	Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo	7	✗	✗	✗		✗		✗			✗								✗			
10	2013	Modelo del control de nivel y caudal de líquido en un depósito cilíndrico usando la herramienta Simulink de Matlab	3	✗	✗	✗	✗	✗		✗			✗								✗			
11	2017	Análisis de estabilidad transitoria en sistemas de mini acero generación	26	✗	✗	✗		✗		✗					✗	✗					✗			
12	2015	Transitorios electromecánicos en sistemas de potencia industriales Electromechanical transients in industrial power systems	16	✗	✗	✗		✗		✗				✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	
13	2013	Modelo de incentivos para la reducción de pérdidas de energía eléctrica en Colombia	17		✗		✗			✗					✗						✗		✗	✗
14	2011	Diseño y validación del control digital de un inversor de potencia en ejes de referencia síncronos conectado a red	30	✗	✗		✗		✗		✗			✗	✗	✗					✗	✗		
15	2017	Análisis de los convertidores de electrónica de potencia a través de una interfaz de Matlab	14	✗	✗		✗		✗		✗			✗	✗						✗	✗		

16	2009	Actualización de los módulos de control de convertidores estáticos de energía AC-AC, mediante una pc: control de fase diferencial, troceador ac y control de fase directo	11	✗	✗		✗		✗		✗	✗			✗	✗		✗	✗					
17	2015	Procesos de chatarrización de materiales metálicos producto del mantenimiento automotriz en la ciudad de Cuenca	12				✗		✗	✗	✗			✗					✗					✗
18	2008	Modelación, simulación y determinación de índices de distorsión armónica y efecto flicker, en el sistema nacional de transmisión, causados por la conexión de hornos de arco, aplicado al caso de Novacero s.a.	46		✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗
19	2016	Estudio de la eficiencia eléctrica en los hornos de arco eléctrico sumergido de sidor en función de la pérdida de calor a través de su refractario de trabajo y la longitud de arco	12	✗	✗			✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗			✗

20	2019	Estudio sobre el aumento de potencia de un horno eléctrico de femn afinado	11	✗	✗	✗			✗	✗	✗			✗		✗	✗		✗	✗			
21	2014	Calibración de los parámetros de un modelo de horno de arco eléctrico empleando simulación y redes neuronales	21		✗		✗			✗	✗					✗			✗	✗			
22	2017	Diseño y simulación de una máquina para demoler el ducto de vaciado del horno de arco eléctrico de la empresa acería del Ecuador compañía anónima Adelca	20	✗	✗					✗				✗							✗		
23	2012	Estimación de los parámetros de un modelo de un horno de arco eléctrico usando máxima verosimilitud	16		✗		✗		✗	✗	✗			✗			✗		✗	✗	✗		
24	2017	A practical electric arc furnace model for computer simulation	7	✗	✗		✗		✗	✗	✗					✗			✗	✗	✗	✗	
25	2002	Power quality improvement using integral-PWM control in an AC/AC voltage converter	12	✗	✗	✗			✗		✗	✗			✗	✗	✗				✗	✗	✗
26	1980	A digital self-compensating method for integral-cycle power control of rl loads	8	✗	✗	✗			✗		✗	✗			✗	✗	✗				✗	✗	✗

27	2013	Power frequency converter based on integral-cycle triggering mode of thyristors with multi-control periods	17	✗	✗	✗		✗	✗		✗	✗			✗	✗	✗			✗	✗	✗	
28	2010	Introducción a los sistemas de control.	58	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗			✗						✗	✗	
29	2013	Design and simulation of novel integral switching cycle control for heating load	8		✗	✗	✗		✗		✗				✗	✗	✗				✗	✗	
30	2016	A review of all possible control strategies for ac voltage controller	6				✗		✗			✗			✗	✗					✗		
31	2011	Modelación de hornos de arco eléctrico	14		✗		✗		✗	✗		✗		✗	✗		✗	✗	✗				
32	2010	Análisis y optimización de costes en una planta de procesado y producción de acero	20		✗			✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗	✗			✗
33	2017	Estudio de los efectos en el factor de potencia y en el contenido armónico producido por el montaje de un generador fotovoltaico en una instalación eléctrica	17	✗	✗			✗	✗		✗	✗			✗	✗			✗		✗	✗	✗
34	2018	Simulación y automatización del control de potencia reactiva para mejoramiento del factor de potencia	14	✗	✗			✗	✗		✗	✗			✗	✗			✗		✗	✗	✗
35	2017	Arc furnace loads voltage stability	15		✗				✗	✗		✗		✗	✗		✗	✗					

36	2005	Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP	14		✗					✗	✗		✗			✗		✗	✗						
37	2014	Evaluación del modelo de arco eléctrico para estimar niveles de flicker	68		✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		
38	2017	Simulation d'un four à arc électrique triphasé soutenu	28		✗	✗	✗		✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗			✗	✗			
39	2016	Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker	13			✗	✗		✗				✗	✗		✗			✗	✗		✗			
40	2019	Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución						✗															✗		
		CANTIDAD		23	34	18	18	11	30	18	33	6	30	20	16	12	25	34	11	22	16	28	23	16	9

5.2 Resumen de Indicadores

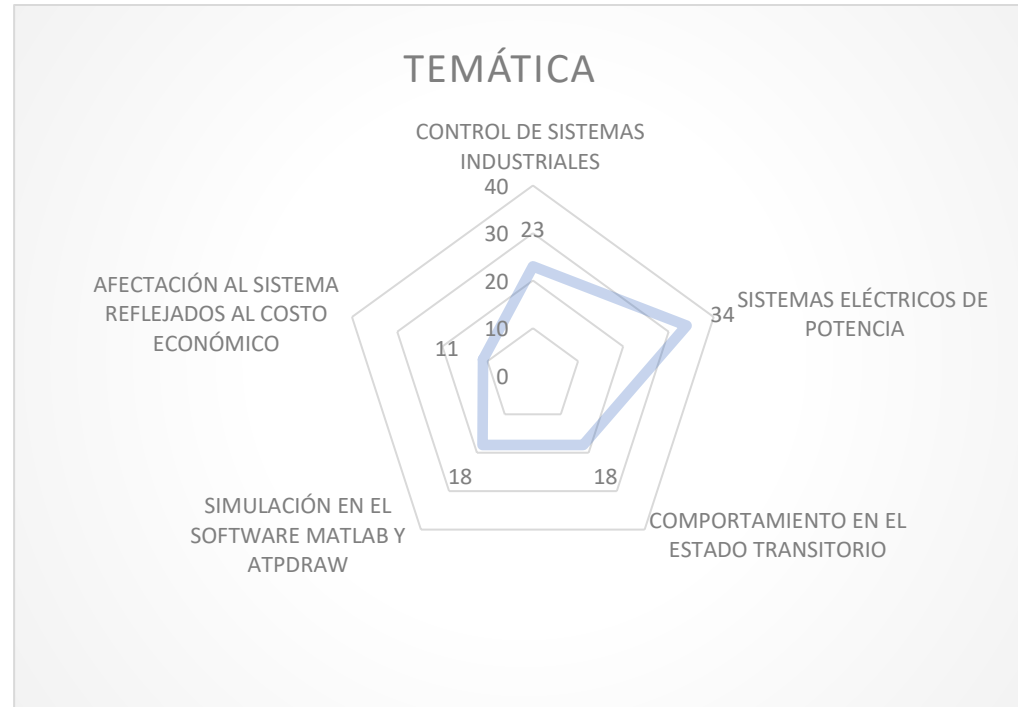


Figura 27. Temática de Estado del Arte

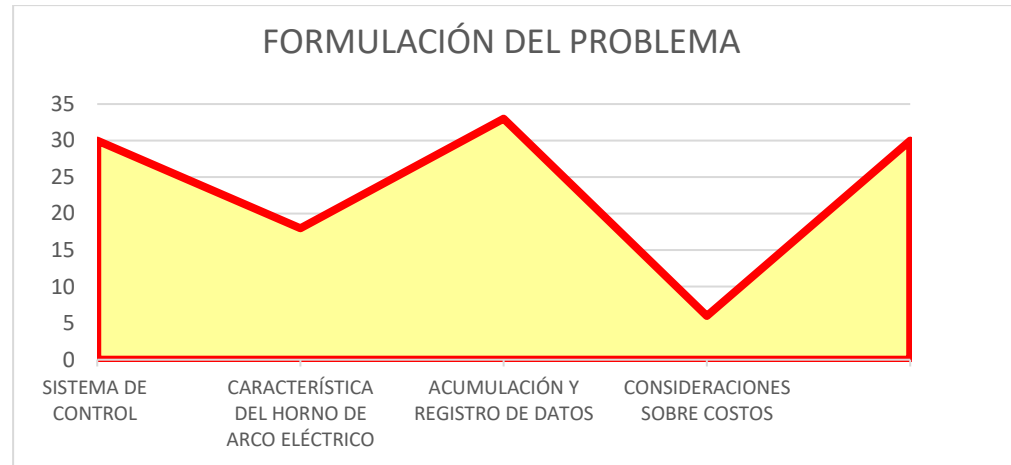


Figura 28. Formulación del Problema de Estado del Arte

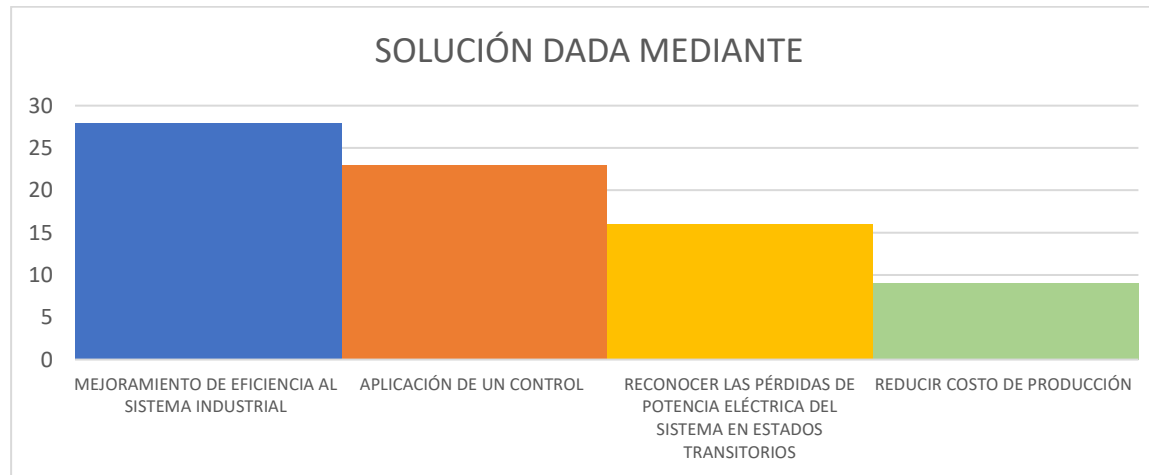


Figura 29. Solución Propuesta de Estado del Arte