



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS EN LA OPERACIÓN DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO ENERGÉTICO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA**

JORGE EDUARDO CHAMORRO GUACAPIÑA

jorge.chamorro@epn.edu.ec

DIRECTOR: PAÚL MARCELO POZO PALMA, Ph.D.

marcelo.pozo@epn.edu.ec

Quito, enero, 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JORGE EDUARDO CHAMORRO GUACAPIÑA**, bajo mi supervisión.

Paúl Marcelo Pozo Palma, Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Jorge Eduardo Chamorro Guacapiña**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jorge Eduardo Chamorro Guacapiña

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia de manera especial a mi esposa Esthelita, mi hijo Camilo y a mi madre Amada.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de prepararme, a la Escuela Politécnica Nacional por abrirme las puertas al conocimiento, a todos mis profesores y de manera especial al Dr. Marcelo Pozo por dirigir este trabajo.

ÍNDICE

Certificación	i
Declaración.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas.....	xi
Nomenclatura	xiii
Abreviaturas.....	xv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Hornos de arco eléctrico.....	3
1.2. El arco eléctrico	7
1.2.1. El arco eléctrico entre dos electrodos.....	7
1.2.2. El arco eléctrico en hornos de corriente alterna	9
1.3. Circuito equivalente del horno de arco.....	12
1.3.1. Estudio del circuito eléctrico.....	13
1.3.2. Máxima potencia de arco respecto a la corriente.....	18
1.3.3. Rendimiento eléctrico	19
1.4. Diagramas de funcionamiento.....	19
1.4.1. Curvas de Potencia	19
1.4.2. Reactancia Operacional	21
1.5. Eficiencia energética.....	22
1.5.1. Eficiencia energética en un horno de arco.....	22
1.5.2. Consumo de energía eléctrica	22
1.5.3. Estabilidad del arco eléctrico.....	23
1.6. Balance Energético.....	26
1.6.1. Quemadores	28
1.6.2. Lanzas de inyección de oxígeno.....	29
1.6.3. Fusión y recalentamiento del acero	30

1.6.4.	Calor perdido por los humos	30
1.6.5.	Pérdidas por la refrigeración	31
1.6.6.	Pérdidas eléctricas	31
1.6.7.	Pérdidas térmicas	32
1.6.8.	Consumo específico de energía.....	32
1.6.9.	Consumo de refractarios	33
1.6.10.	Consumo de electrodos	35
1.7.	Efectos eléctricos del EAF sobre las líneas	36
1.7.1.	Armónicos	36
1.7.2.	Flicker	36
1.8.	Etapas de operación	36
1.9.	Analizador de energía.....	37
2.	METODOLOGÍA.....	39
2.1.	Estudio previo del horno	39
2.1.1.	Cálculo de la reactancia total sinusoidal para cada tap changer	40
2.1.2.	Análisis de la curva de operación	53
2.1.3.	Cálculo de la resistencia del sistema y la resistencia de arco	55
2.2.	Implementación de nuevos perfiles	56
2.3.	Punto de equilibrio	64
2.4.	Estabilidad del arco.....	69
2.4.1.	Estabilidad del arco eléctrico mediante un modelamiento	69
2.4.2.	Modelamiento del arco eléctrico	72
2.4.3.	Estabilidad del arco eléctrico mediante el sistema de control.....	75
2.4.4.	Representación del sistema de control.....	76
2.5.	Consumo de electrodos por fuerzas electrodinámicas	79
2.6.	Programa eficiente de extracción de humos.....	80
2.7.	Simulación del horno	83
2.7.1.	Implementación del modelo en diagrama de bloques	83
2.7.2.	Representación del modelo en Simulink sin perturbación	85
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
3.1.	Consumo de energía por tipo de acero.....	89
3.2.	Ahorro de energía para nuevos perfiles	92
3.3.	Ahorro de energía mediante la automatización de la planta de humos	97
3.4.	Análisis del punto de equilibrio	98
3.4.1.	Análisis en condiciones actuales	98
3.4.2.	Análisis del fp con la implementación de nuevas técnicas.....	103
3.5.	Análisis de la estabilidad del arco	104

3.5.1.	Análisis mediante un modelamiento	105
3.5.2.	Análisis mediante el sistema de control.....	107
3.6.	Análisis y eficiencia del consumo de electrodos.....	108
3.6.1.	Análisis por fuerzas electrodinámicas.....	108
3.7.	Resultados de la simulación del horno de arco.	111
3.8.	Impacto energético del proyecto en el sistema Eléctrico Ecuatoriano	116
4.	CONCLUSIONES.....	117
	Referencias Bibliográficas	119
	ANEXOS	121
	Anexo I.....	121
	Anexo II.....	122
	Anexo III.....	123
	Anexo IV.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1a. Esquema del horno de arco eléctrico.....	3
Figura 1.1b. Carga metálica de chatarra	4
Figura 1.1c. Tap changer.....	6
Figura 1.2. El arco eléctrico entre dos electrodos.....	7
Figura 1.3. Caída de tensión en el arco.....	9
Figura 1.4. Esquema del arco en CA.....	10
Figura 1.5. Forma de onda de V y I en el arco	11
Figura 1.6. Circuito equivalente del horno de arco.....	12
Figura 1.7. Alimentación al horno desde la subestación.....	13
Figura 1.8. Alimentación al horno hasta el arco eléctrico.....	13
Figura 1.9. Esquema eléctrico simplificado por fase.....	14
Figura 1.10. Curvas de potencias y fp con reactancia constante.....	20
Figura 1.11. Curvas de potencias y fp a diferentes taps.....	21
Figura 1.12. Voltaje y Corriente en fase.....	24
Figura 1.13. Voltaje y Corriente desfasados	24
Figura 1.14. Balance Energético.....	26
Figura 1.15. Consumo eléctrico y tiempo de fusión.....	28
Figura 1.16. Disposición de quemadores y lanzas de O_2	29
Figura 1.17. Refractario en un horno de arco	34
Figura 1.18. Ladrillo refractario.....	34
Figura 1.19. Analizar de energía Fluke 435.....	37
Figura 2.1a. Área de operación.....	54
Figura 2.1b. Curva de funcionamiento.....	55
Figura 2.2. Funcionamiento del horno a un tap changer #1.....	64
Figura 2.3. Funcionamiento del horno a un tap changer #2.....	65
Figura 2.4. Funcionamiento del horno a un tap changer #3.....	65
Figura 2.5. Funcionamiento del horno a un tap changer #4.....	66
Figura 2.6. Funcionamiento del horno a un tap changer #5.....	66
Figura 2.7. Funcionamiento del horno a un tap changer #6.....	67
Figura 2.8. Funcionamiento del horno a un tap changer #7.....	67

Figura 2.9. Funcionamiento del horno a un tap changer #8.....	68
Figura 2.10. Funcionamiento del horno a un tap changer #9.....	68
Figura 2.11. Curva de voltajes.....	69
Figura 2.12. Punto de operación del arco.....	70
Figura 2.13. Cilindro de temperatura del arco.....	73
Figura 2.14. Ganancia ajustable.....	75
Figura 2.15. Diagrama de bloques sistema lazo cerrado.....	76
Figura 2.16a. Partes de una válvula proporcional.....	78
Figura 2.16b. Manifold de válvulas proporcionales.....	78
Figura 2.17. Fuerzas electrodinámicas entre electrodos.....	79
Figura 2.18. Diagrama de flujo operación planta de humos.....	82
Figura 2.19. Etapa de carga de chatarra en el horno.....	83
Figura 2.20. Diagrama de bloques modelo del horno.....	84
Figura 2.21. Voltaje del arco eléctrico en diagrama de bloques.....	84
Figura 2.22. Simulación del modelo del horno de arco.....	85
Figura 3.1. Horno de arco eléctrico Adelca	88
Figura 3.2. Tablero de control	89
Figura 3.3. Consumo de energía específica para diferentes tipos de aceros	90
Figura 3.4. Consumo de energía para diferentes tipos de aceros	91
Figura 3.5. Tiempos de fusión para diferentes tipos de aceros	91
Figura 3.6. Consumo de energía específica con nuevos perfiles	93
Figura 3.7. Consumo de energía con nuevos perfiles	93
Figura 3.8. Tiempo de fusión con nuevos perfiles	94
Figura 3.9. Comparación de consumo de energía técnica nuevos perfiles.....	96
Figura 3.10. Comparación de consumo de energía automatización Planta Humos... ..	98
Figura 3.11. Voltaje para dos cargas.....	99
Figura 3.12. Corriente para dos cargas.....	100
Figura 3.13. Factor de potencia para dos cargas.....	100
Figura 3.14. Potencias para dos cargas.....	101
Figura 3.15. Voltaje para cuatro cargas.....	102
Figura 3.16. Corriente para cuatro cargas.....	102
Figura 3.17. Factor de potencia para cuatro cargas.....	103

Figura 3.18. Potencias para cuatro cargas.....	103
Figura 3.19. Desestabilidad del arco en el afino.....	106
Figura 3.20. Estabilidad del arco en el afino.....	106
Figura 3.21. Desestabilidad del arco.....	108
Figura 3.22. Arco estable.....	108
Figura 3.23. Arco inestable en equipos de medida.....	108
Figura 3.24. Simulación voltaje de arco tap changer #1.....	111
Figura 3.25. Simulación voltaje de arco tap changer #2.....	112
Figura 3.26. Simulación voltaje de arco tap changer #3.....	112
Figura 3.27. Simulación voltaje de arco tap changer #4.....	113
Figura 3.28. Simulación voltaje de arco tap changer #5.....	113
Figura 3.29. Simulación voltaje de arco tap changer #6.....	114
Figura 3.30. Simulación voltaje de arco tap changer #7.....	114
Figura 3.31. Simulación voltaje de arco tap changer #8.....	115
Figura 3.32. Simulación voltaje de arco tap changer #9.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Reacciones con lanzas de oxígeno.....	30
Tabla 1.2. Etapas de fundición.....	37
Tabla 1.3. Especificaciones técnicas Fluke 435.....	38
Tabla 2.1. Reactancia para cada tap changer.....	53
Tabla 2.2. Reactancia del sistema.....	56
Tabla 2.3. Ejemplo de perfil de funcionamiento de un horno de arco.....	57
Tabla 2.4. Corrientes al 2.5% en diferentes tap changer.....	58
Tabla 2.5. Análisis de la curva 10.....	58
Tabla 2.6. Análisis de la curva 9.....	59
Tabla 2.7. Análisis de la curva 8.....	59
Tabla 2.8. Análisis de la curva 7.....	59
Tabla 2.9. Análisis de la curva 6.....	60
Tabla 2.10. Análisis de la curva 5.....	60
Tabla 2.11. Análisis de la curva 4.....	60
Tabla 2.12. Análisis de la curva 3.....	61
Tabla 2.13. Análisis de la curva 2.....	61
Tabla 2.14. Análisis de la curva 1.....	61
Tabla 2.15. Diseño de perfiles con diferentes longitudes de arco.....	62
Tabla 2.16. Diseño de perfiles con diferentes IER.....	63
Tabla 2.17. Diseño de perfiles con diferentes CE.....	63
Tabla 2.18. Parámetros de simulación para el tap changer #1.....	85
Tabla 2.19. Parámetros de simulación para el tap changer #2.....	86
Tabla 2.20. Parámetros de simulación para el tap changer #3.....	86
Tabla 2.21. Parámetros de simulación para el tap changer #4.....	86
Tabla 2.22. Parámetros de simulación para el tap changer #5.....	86
Tabla 2.23. Parámetros de simulación para el tap changer #6.....	87
Tabla 2.24. Parámetros de simulación para el tap changer #7.....	87
Tabla 2.25. Parámetros de simulación para el tap changer #8.....	87
Tabla 2.26. Parámetros de simulación para el tap changer #9.....	87
Tabla 3.1. Comparación de consumo energético.....	94
Tabla 3.2. Pliego tarifario para las Empresas Industriales Ecuatorianas	95

Tabla 3.3. Ahorro de energía por tipo de acero.....	96
Tabla 3.4. Consumo de energía mediante automatización de la Planta de Humos....	97
Tabla 3.5. Ahorro de energía por tipo de acero con automatización Planta Humos....	97
Tabla 3.6. Análisis del punto de equilibrio para dos cargas.....	98
Tabla 3.7. Análisis del punto de equilibrio para cuatro cargas.....	101
Tabla 3.8. Análisis del punto de equilibrio dos cargas nuevos perfiles.....	104
Tabla 3.9. Análisis del punto de equilibrio cuatro cargas nuevos perfiles.....	104
Tabla 3.10. Fuerzas que ocasionan ruptura fase 3.....	110
Tabla 3.11. Fuerzas compensadas.....	110

NOMENCLATURA

t	Tonelada
h	Hora
t/h	Tonelada/ hora
kWh	Kilo Watts hora
kWh/t	Kilo Watts hora/tonelada
\$/t	Dólares/tonelada
tap changer	Cambiador de bobinas en un transformador
P_a	Potencia de arco
V_a	Voltaje de arco
I	Corriente eléctrica
P_p	Potencia de pérdidas
R	Resistencia eléctrica del sistema
μm	Micrómetro
°C	Grado Celsius
A	Amperios
V_{ct}	Voltaje de cátodo
E_{arc}	Distribución de energía
V_{ad}	Voltaje de ánodo
L_{arc}	Longitud de arco
V_{am}	Voltaje de cebado
V_{ext}	Voltaje de extinción
R_a	Resistencia de arco
X	Reactancia
V_f	Voltaje de fase
X_{cc}	Reactancia de corto circuito
I_{op}	Corriente de operación
I_f	Corriente de fase
I_l	Corriente de línea
Z_{op}	Impedancia de operación
V_{Xop}	Voltaje de la reactancia de operación
V_{Rop}	Voltaje de la resistencia de operación

V_{Ra}	Voltaje de la resistencia de arco
V_R	Voltaje de la resistencia del sistema
V_{op}	Voltaje de operación
P_{op}	Potencia activa de operación
Q_{op}	Potencia reactiva de operación
S_{op}	Potencia aparente de operación
t_{off}	Tiempo de para en la fundición de una colada
t_{on}	Tiempo activo de fundición de una colada
E_T	Energía total
E_E	Energía eléctrica
E_T	Energía química
X_{op}	Reactancia operacional
F_{op}	Factor de reactancia operacional
P_m	Potencia eléctrica media consumida (kW)
n_e	Rendimiento eléctrico
τ	Tiempo del proceso en (h)
E_g	Energía generada por reacciones químicas
E_a	Energía absorbida por el acero líquido.
E_e	Energía absorbida por la escoria.
P_p	Potencia de pérdidas térmicas
E_h	Energía o entalpía de los humos a la salida del horno
fp	Factor de potencia
R_{op}	Resistencia de operación
Q	Energía del arco
p	Presión del gas de operación del horno
T_0	Temperatura del cilindro en el que atraviesa el arco eléctrico
T_1	Temperatura del medio
r	Radio del cilindro que forma el arco
g	Conductancia del arco
i_1, i_2	Corrientes instantáneas de los electrodos
μ	Permeabilidad magnética al vacío
L	Longitud de los conductores
d	Distancia entre conductores

ABREVIATURAS

PLC	Controlador lógico programable
HMI	Interfaz hombre máquina
CCM	Colada Continua
GLP	Gas licuado de petróleo
IER	Índice de erosión al refractario
EAF	Horno de arco eléctrico
VFP	EAF damper position
VCH	Canopy damper position

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolló el estudio e implementación de diferentes técnicas en la operación de un horno de arco eléctrico para disminuir el consumo energético y mejorar la eficiencia de operación.

El trabajo consistió en minimizar el consumo energético cambiando las configuraciones o perfiles de funcionamiento que modifican la tensión e intensidad, automatizando la operación de la planta de extracción de humos y cambiando las ganancias en el sistema de control.

Los resultados obtenidos fueron: ahorro en el consumo de energía, disminución del tiempo de fusión y se minimizó la ruptura de electrodos.

La implementación de los nuevos perfiles permitió obtener una reducción de 5,39% del consumo de energía para 30 t de acero, y se ha minimizado el tiempo de fusión en un 4% que representa 1,2 min por cada colada de acero equivalente a 900 t de aceros más producidos en un mes. El ahorro en dólares para 30 t producidas fue de 55,45 (\$/colada), si la producción mensual es de 25000 t el ahorro total es de 20830 (\$/mes).

El ahorro mediante la implementación del sistema eficiente de la planta de humos fue de 3,7 % equivalente a 12,8 (\$/colada) si la producción mensual es de 2500 t el ahorro total es de 10666 (\$/mes).

Palabras clave: eficiencia, energía, estabilidad, fundición de acero, horno de arco

ABSTRACT

In the present project, the study and implementation of different techniques in the operation of an electric arc furnace was developed, in order to reduce the energetic consumption and improve the operation efficiency. The work consisted in minimizing the energy consumption by changing the configurations or operating profiles that modify the voltage and intensity, automating the operation of the fume extraction plant, one changing of profits in the control system. The results obtained were savings the energy consumption, decrease of the fusion time and the breakdown of electrodes was minimized. The implementation of the new profiles allowed to obtain a reduction of 5,39% of the energy consumption for 30 tons of steel, and the fusion time has been minimized by 4%, which represents 1,2 min for each steel casting equivalent to 900 tons of steel more produced in one month. The saving in dollars for 30 tons produced was 55,45 (\$ / cast steel), if the monthly production is 25000 tons the total saving is 20830 (\$ / month). The savings by implementing the efficient system of the fume plant was 3,7% equivalent to 12,8 (\$ /cast steel), if the monthly production is 25000 tons the total saving is 10666 (\$ / month).

Keywords: efficiency, energy, stability, steel smelting, arc furnace

“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS EN LA OPERACIÓN DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA DISMINUIR EL CONSUMO ENERGÉTICO”

INTRODUCCIÓN

Los hornos de arco eléctrico desde sus inicios en los años 90, han constituido una fuente constante de investigación científica multidisciplinaria, en la cual día a día se han implementado mejoras en su funcionamiento, tanto en el área productiva, en el área energética, en el área eléctrica, mecánica, química, etc. Todas estas investigaciones se han realizado con el propósito de construir hornos más eficientes y mejorar los costos de producción. [1] [8]

En el marco energético de un país los hornos de arco son considerados como un consumidor energético de gran importancia, por el uso de la energía eléctrica que necesitan emplear para su operación. La energía eléctrica corresponde el rubro más alto que una empresa debe pagar para fundir el acero, de ahí la necesidad de implementar técnicas de ahorro energético. Incluso ciertas empresas productoras de acero se han visto en la necesidad de construir sus propias hidroeléctricas en cuencas hidrográficas del Oriente para ingresar al marco energético como generadoras y de esta manera minimizar el costo de la energía eléctrica que recibirían como consumidoras.

La necesidad de mejorar el control de ciertos parámetros que permiten definir la longitud de arco y la potencia del horno es muy importante para operar en las áreas de mayor eficiencia. En la actualidad los esfuerzos en los hornos desde el punto de vista energético es minimizar el consumo de energía antes que recuperar la energía perdida, sin embargo, los hornos modernos traen sistemas de recuperación de energía en forma de calor, que es retroalimentada a un precalentamiento de la chatarra que va a ingresar al horno. [14]

En el Ecuador, en la actualidad existen 4 hornos de arco eléctrico repartidos entre tres empresas fundidoras de acero: Adelca con dos hornos, Novacero con uno y Andec con uno. Los hornos se conectan al sistema eléctrico a las líneas de 138 kV y en 230 kV por lo tanto son considerados grandes consumidores, hay una responsabilidad energética de todas las empresas en implementar mejoras en los procesos y reducir los costos de producción para que los productos tengan mejor competitividad de precios y calidad en el mercado nacional e internacional.

El presente estudio es realizado en el Ecuador en el horno de arco eléctrico de 30 t que pertenece a la empresa Adelca.

Pregunta de Investigación

¿Se puede implementar técnicas en la operación de un horno de arco eléctrico para disminuir el consumo de energía eléctrica o determinar el punto de funcionamiento y operación óptimo para minimizar las pérdidas energéticas?

Objetivo general

Estudiar e implementar técnicas en la operación de un horno de arco eléctrico para disminuir el consumo energético.

Objetivos específicos

- Desarrollar una caracterización de funcionamiento de un horno de arco eléctrico.
- Determinar el consumo energético para diferentes mix de carga.
- Desarrollar diferentes condiciones y modelos de trabajo operacional.
- Implementar un sistema de control en función de las características de la carga.
- Establecer el punto de operación efectivo para transferir la máxima potencia.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Hornos de arco eléctrico

El principio de funcionamiento de los hornos de arco eléctrico se basa en transformar la energía eléctrica sea de carácter continuo o alterno en calor, para ser aplicada a la carga metálica, produciendo la elevación de temperatura hasta alcanzar el punto de fusión del acero. [1]

Los tipos de aceros que se funden en este horno son: aceros para herramientas con altas aleaciones para aumentar su dureza, aceros inoxidables, aceros termo resistentes, aceros resistentes a la oxidación a temperaturas elevadas y aceros para la construcción. [2] [8]

Para el funcionamiento de los hornos de arco de carácter alterno o continuo, la energía eléctrica proviene de una red trifásica en alta tensión, ingresa a una subestación y mediante un circuito eléctrico de potencia llega a los electrodos. El circuito eléctrico consta de una línea de entrada desde la subestación hacia un transformador principal, cables refrigerados por agua, tubos de cobre y un sistema de control comandado por un PLC para el movimiento de los electrodos [1], como se aprecia en la figura 1.1a.

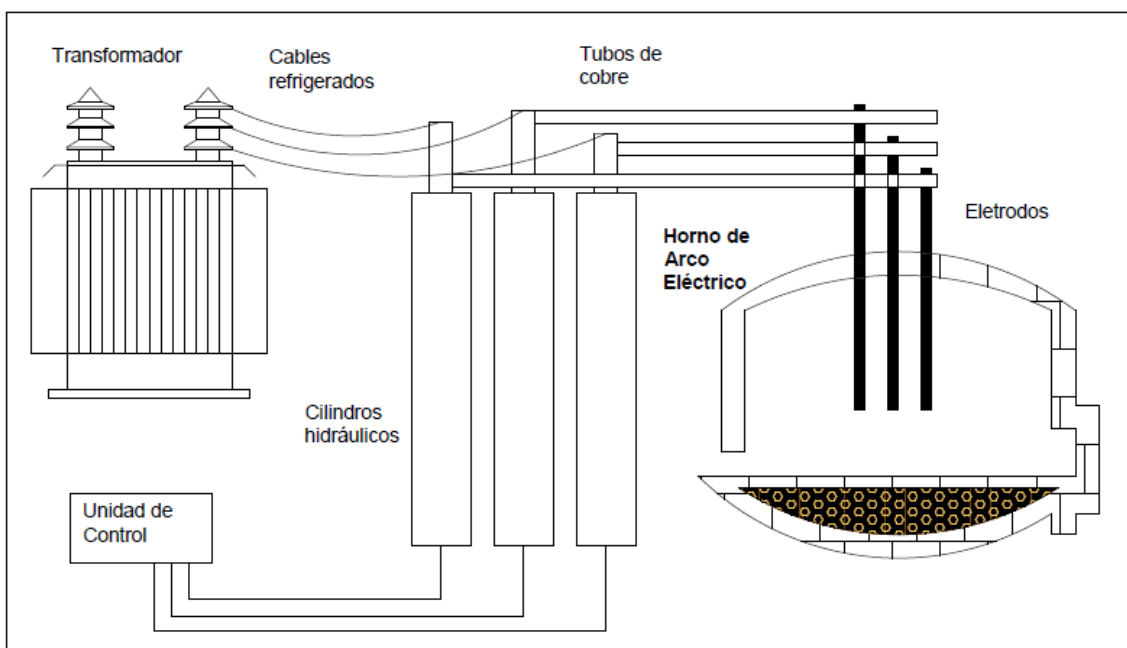


Figura 1.1a. Esquema del horno de arco eléctrico.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

El sistema de control trabaja comandado por un PLC que controla el movimiento de los electrodos mediante la regulación de la corriente eléctrica en cada fase al momento que la punta del electrodo entra en contacto con la carga metálica, el control se ejecuta directamente a tres válvulas proporcionales que permiten el accionamiento de tres cilindros hidráulicos para controlar la longitud de arco siendo esta la distancia entre la punta del electrodo y la carga metálica.

Los hornos de arco eléctrico tienen un sistema de enfriamiento por agua que regula la temperatura de los paneles que se encuentran alrededor del horno, el sistema de enfriamiento también refrigera los cables de poder y a los electrodos.



Figura 1.1b. Carga metálica de chatarra.
(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

En la operación de los hornos de arco eléctrico la carga metálica figura 1.1b, recibe la energía en forma de calor entregada por los arcos eléctricos generados entre las puntas de los electrodos y la carga metálica. La energía aumenta la temperatura de la carga metálica para provocar su fusión¹ esto ocurre en la primera etapa del proceso, en la segunda etapa la energía suministrada es usada para calentar la carga líquida hasta obtener la temperatura óptima de fusión que el proceso necesita. [3]

El estudiar los niveles de intensidad, tensión, factor de potencia y potencias de un horno de arco eléctrico en las curvas de operación ver figura 1.10, permite obtener las condiciones óptimas de funcionamiento del horno, siendo estas:

¹Fusión: El proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia, del estado sólido al estado líquido, por la acción del calor.

- Máxima productividad (t o t/h), desde el punto de vista eléctrico el objetivo es transmitir la mayor potencia a una determinada carga metálica para obtener la productividad deseada. [3]
- Máximo rendimiento (kWh/t), minimizar las pérdidas energéticas en relación a la potencia consumida. [1]
- Minimizar los costos de producción (\$/t), considerar el punto de operación óptimo del horno y no solo el ahorro energético sino también, el consumo de electrodos, consumo de refractarios, costos de energía química, costos de materia prima y la mano de obra. [1]

Desde el punto de vista eléctrico para simplificar el análisis del arco se lo considerara como una resistencia variable con una reactancia nula, la potencia generada en el arco es equivalente al producto de la tensión de arco por la corriente, ecuación 1.1. [3]

$$P_a = V_a * I \quad (1.1)$$

P_a = Potencia de arco

V_a = Voltaje de arco

I = Corriente por cada fase

La operación del horno de arco es de carácter poco común, para el funcionamiento basta definir un valor de potencia que permita alcanzar una producción deseada (t/h), y para obtener esta potencia se elige la combinación más adecuada de tensión de arco y corriente. [3]

En el funcionamiento del horno trabaja de tal manera que a tensiones altas en el arco la corriente disminuye y aumenta la longitud de arco, a tensiones bajas en el arco la corriente aumenta y disminuye la longitud de arco, por consiguiente, el funcionamiento a altas tensiones permite un bajo consumo de electrodos y a bajas tensiones la erosión de las paredes del horno o el consumo de refractario disminuye. [4]

Un factor importante en la elección de los valores de tensión es la dimensión del horno, así para potencias y tensiones de funcionamiento iguales el desgaste del refractario en las paredes del horno es inversamente proporcional a la distancia del electrodo a la pared. [3]

Al operar el horno con tensiones bajas y corrientes elevadas, se producen altas pérdidas en los conductores aumentando el consumo total de energía ecuación 1.2. Mientras que, si la tensión de trabajo es alta y la corriente baja el rendimiento eléctrico aumenta, pero el rendimiento térmico disminuye ya que se produce una mayor irradiación de calor en

las paredes del horno por efecto del aumento de la longitud de arco provocando perforación en los paneles refrigerados y por ende paradas inesperadas en la operación para realizar el cambio de los mismo.

$$P_p = I^2 * R \quad (1.2)$$

P_p = Potencia de pérdida

I = Corriente por cada fase

R = Resistencia total de todos los elementos y conductores

Cuando la relación “potencia /capacidad del horno” es baja el tiempo total de fusión de la carga metálica es alto, esto aumenta las pérdidas térmicas, aumenta el consumo específico de energía eléctrica, y provoca una desincronización en el proceso de una acería en especial con la colada continua CCM, al contrario cuando la relación “potencia /capacidad del horno” es alta es difícil operar el horno sin que se provoque desgastes en la paredes y aumento de la temperatura en los paneles refrigerados, para lo cual se debe buscar el punto de sincronización y operación óptimo. [3]

Los transformadores del horno de arco tienen incorporado un sistema tap changer que es utilizado para cambiar la relación de giro entre los devanados en un transformador, esta relación determina la tensión o voltaje en el secundario del transformador y es esencial para la estabilización de la tensión de la red en condiciones de carga variable. [15]

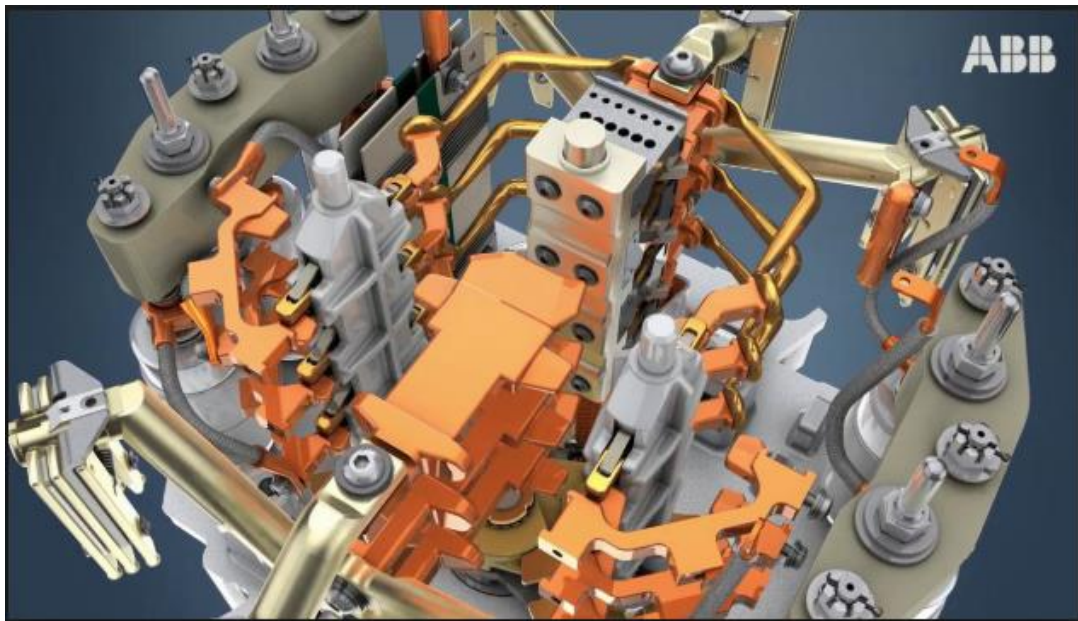


Figura 1.1c. Tap changer.

(Fuente: "Tap-changers and switches - Transformer insulation and components (Transformers) | ABB")

1.2. El arco eléctrico

1.2.1. El arco eléctrico entre dos electrodos

En la operación de un horno, el arco se considera como el paso continuo de una alta corriente eléctrica entre dos electrodos en un medio gaseoso ionizado². Uno de los electrodos en un instante actúa como cátodo (-) calentándose por el paso de corriente emitiendo electrones que se desplazan hacia el ánodo (+) bajo el efecto del campo eléctrico creado entre los dos electrodos. Por efecto del paso de los electrones las moléculas de gas se ionizan, se transforman en conductoras garantizando el paso de la corriente pese a que los electrodos se encuentran a una distancia considerable. [1]

Las moléculas ionizadas y aceleradas por el campo eléctrico chocan contra el cátodo provocando una emisión mayor de electrones.

El arco adopta la forma de barrica³ por efecto de la repulsión electromagnética que se produce en las corrientes paralelas entre el ánodo y cátodo.

El arco se origina en una parte del cátodo (mancha catódica) y termina en una parte del ánodo (mancha anódica). La densidad de corriente es mayor en las partes próximas al ánodo y cátodo que en el centro del arco como consecuencia de la repulsión que permite tener una mayor sección de paso. En el arco se distinguen tres zonas como se aprecia en la figura 1.2. [1]

- Zona catódica, en la que se produce una caída de tensión, que incluye la mancha catódica.
- Columna de arco con forma de tonel, en la que se produce una caída de tensión progresiva.
- Zona anódica, en la que se produce una caída de tensión anódica, que incluye la mancha anódica. [2]

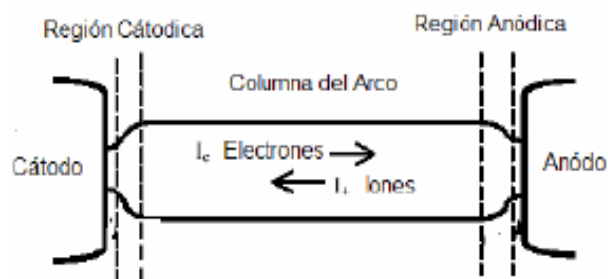


Figura 1.2. El arco eléctrico entre dos electrodos.
(Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)

² Gas ionizado: Es aquel cuyos átomos han perdido o ganado electrones debido a cargas eléctricas.

³ Barrica: Tonel, barril, cuba, envase cilíndrico.

Se produce una caída de tensión catódica del orden de 10 V con una longitud de 1 μm creando un campo eléctrico de $10^7 - 10^8$ V/m, siendo superior el potencial de salida de los electrones catódicos. El cebado del arco se realiza cuando se pone en contacto los electrodos y la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de cortocircuito calienta los electrodos y disminuye el potencial de salida del cátodo.

Cuando el arco está cebado los iones de gas bombardean el cátodo a alta velocidad lo que produce un calentamiento elevado que permite la emisión de electrones, la temperatura alcanzada en la mancha catódica toma un valor de 3700 °C para una densidad de corriente de 100 A/mm². [1]

En el centro o en la columna del arco el gas está altamente ionizado, con un número similar de cargas positivas y negativas, este conjunto se puede considerar prácticamente como neutro y denominarse plasma de arco. Los electrones que se mueven a altas velocidades son los responsables de la conducción eléctrica, mientras que los iones positivos compensan la carga de los electrones, la temperatura en la columna de arco como consecuencia de las colisiones entre partículas llega a tomar valores de 5700 °C. [1]

Por efecto de repulsión entre las líneas de corriente de la misma polaridad, la sección transversal del arco aumenta por lo tanto la intensidad de la corriente y la resistencia eléctrica tiende a disminuir, produciéndose una caída de tensión en el arco de 5 – 10 V/m. [1]

Mientras tanto el ánodo queda bombardeado por los electrones que provienen del cátodo a través de la columna del arco, alcanzando temperaturas entre 3700 – 4700 °C. En el ánodo como consecuencia de la emisión de electrones y por su elevada temperatura se produce una caída de tensión de dos a tres veces la del cátodo 20 – 30 V. [1]

Para determinar la longitud de arco se parte que la suma de las caídas de tensión en la región catódica, en la columna de arco y en la región anódica es la tensión mínima necesaria para mantener al arco como se aprecia en la figura 1.3. [5]

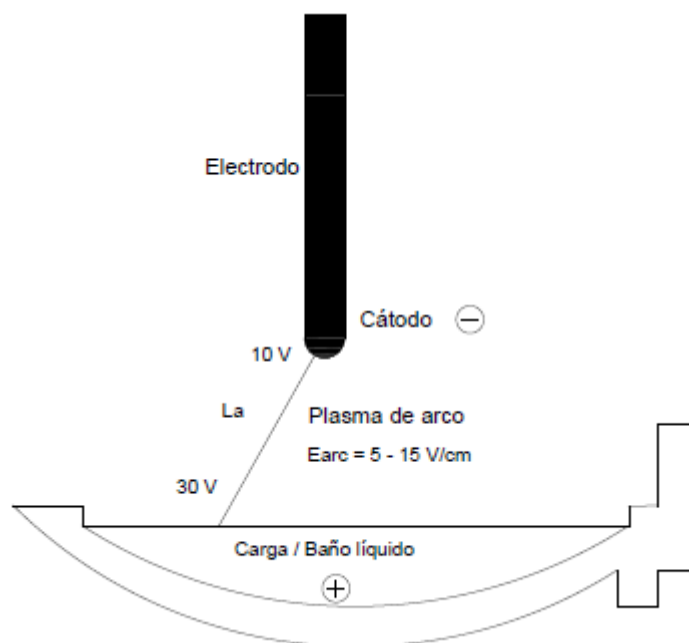


Figura 1.3. Caída de tensión en el arco.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

$$V_a = V_{ct} + E_{arc} * L_{arc} + V_{ad} \quad (1.3)$$

V_a = Voltaje de arco (V)

V_{ct} = Voltaje de cátodo = 10 V

E_{arc} = Distribución de energía (V/cm)

V_{ad} = Voltaje de ánodo = 30 V

L_{arc} = Longitud de arco (cm)

$$V_a = 10 V + E_{arc} * L_{arc} + 30 V$$

$$L_{arc} = \frac{V_a - V_{ad} - V_{ct}}{E_{arc}} \quad (1.4)$$

1.2.2. El arco eléctrico en hornos de corriente alterna

El esquema de la figura 1.4 representa la línea de alimentación de voltaje a la entrada del horno Vf (voltaje o tensión de fase) proveniente del secundario del transformador del horno, sobre un circuito de impedancia Z constituida por una resistencia R y una reactancia X, esta carga toma en cuenta la impedancia del cable refrigerado, tubos de cobre y los electrodos. Es importante considerar que la carga metálica y el baño están puestos a tierra, el arco salta entre los electrodos a través de la carga, por consiguiente, cada electrodo actúa como cátodo y ánodo.

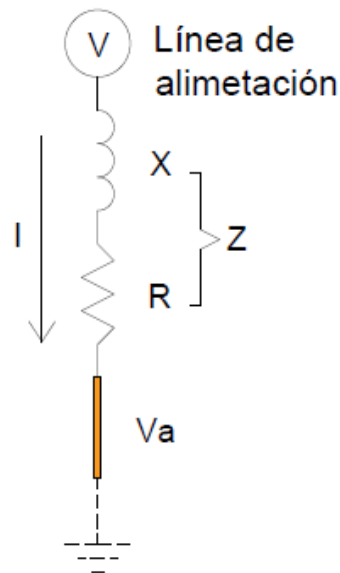


Figura 1.4. Esquema del arco en CA.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Considerando una tensión de alimentación sinusoidal V , el arco se ceba después de comenzar una alternancia al alcanzar el valor V_{am} (voltaje de cebado), después el voltaje cae a V_a (voltaje de arco), finalmente se extingue cuando el voltaje baja del valor V_{ext} (voltaje de extinción), esta secuencia se repite en el semiperiodo siguiente considerando que los electrodos y su distancia al baño sean siempre iguales, lo que en la práctica no ocurre. [1]

La corriente de arco presenta un desfase respecto a la tensión por efecto de los diferentes valores de impedancia Z , facilitando el cebado progresivo del arco como se aprecia en la figura 1.5. [1]

El arco eléctrico es una resistencia eléctrica que tiene algunas características poco comunes. La longitud de arco es proporcional a la tensión o voltaje de arco, el aire actúa como medio conductor, 1 V aproximadamente es equivalente a 1mm de longitud de arco. La corriente de arco para una determinada tensión de arco está definida por dos factores la tensión del transformador y por la reactancia del circuito, resumiendo lo antes mencionado si la longitud de arco es 100 mm, la tensión de arco será 100 V, pero la corriente puede tomar diferentes valores que dependen de la tensión aplicada y la reactancia del circuito. [2]

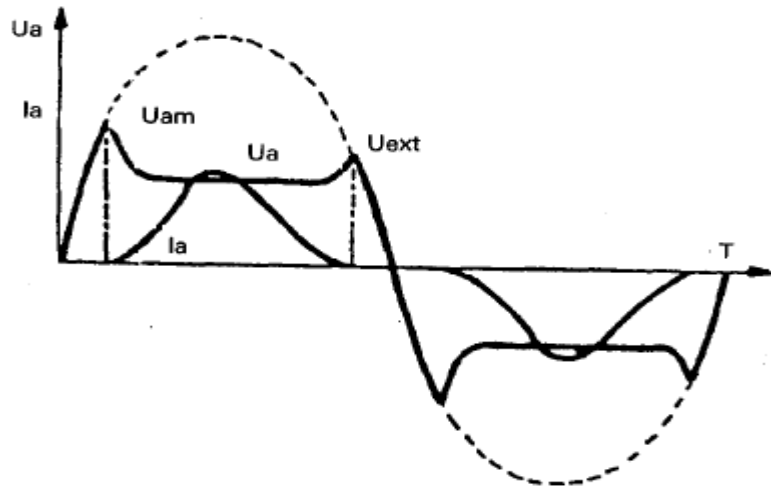


Figura 1.5. Forma de onda de V y I en el arco.
 (Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)

Una tensión V (voltaje de fase) al ser aplicada en un circuito como se aprecia en la figura 1.6 con una reactancia X , se hace circular una corriente I por un arco con tensión V_a , se ha determinado que cuando la tensión de arco V_a disminuye la corriente I aumenta, mientras la tensión de arco aumenta la corriente disminuye, esta característica contradice la ley de Ohm concluyendo que el arco actúa como una resistencia negativa.

El sistema de control en el horno regula la posición de los electrodos con respecto a la carga metálica, manteniendo una determinada corriente. De acuerdo al tap changer del transformador se aplica al circuito una tensión determinada, mediante la reactancia del circuito y la reactancia del arco el sistema regula hasta obtener un valor de corriente al que le corresponde una tensión de arco V_a y una resistencia de arco R_a las expresiones se aprecian en las ecuaciones 1.5 y 1.6 respectivamente.

$$V_a = V * \cos \phi \quad (1.5)$$

$$R_a = \frac{V_a}{I} \quad (1.6)$$

La chatarra es la materia prima del proceso y una carga al estar formada por diferentes tipos y densidades de chatarra como consecuencia en el proceso, la longitud de arco varía durante toda la fundición por lo tanto para mantener una longitud estable, el sistema de control regula la tensión de arco y por ende varía la longitud del arco, ya que el V_a es proporcional a la longitud de arco L_{arc} , ecuación 1.4.

1.3. Circuito equivalente del horno de arco

Los hornos de arco eléctrico que operan con corriente alterna, están constituidos por tres electrodos alimentados por una red de tensión trifásica, los electrodos están ubicados sobre la carga metálica conformada en su totalidad por chatarra. [3]

La carga eléctrica del circuito está formada por los tres arcos que se encuentran conectados en estrella con la carga metálica que actúa como neutro y puesta a tierra, el arco eléctrico salta entre los electrodos a través de la carga metálica actuando alternativamente cada electrodo a manera de cátodo y ánodo. [2]

El circuito eléctrico del horno está constituido por resistencias, reactancias inductivas, reactancias capacitivas, que determinan los siguientes parámetros de funcionamiento:

- La tensión e intensidad del arco.
- Las potencias en la entrada del circuito y en el arco eléctrico.
- El factor de potencia de funcionamiento.

En la figura 1.6 se representa un esquema eléctrico general del horno de arco.

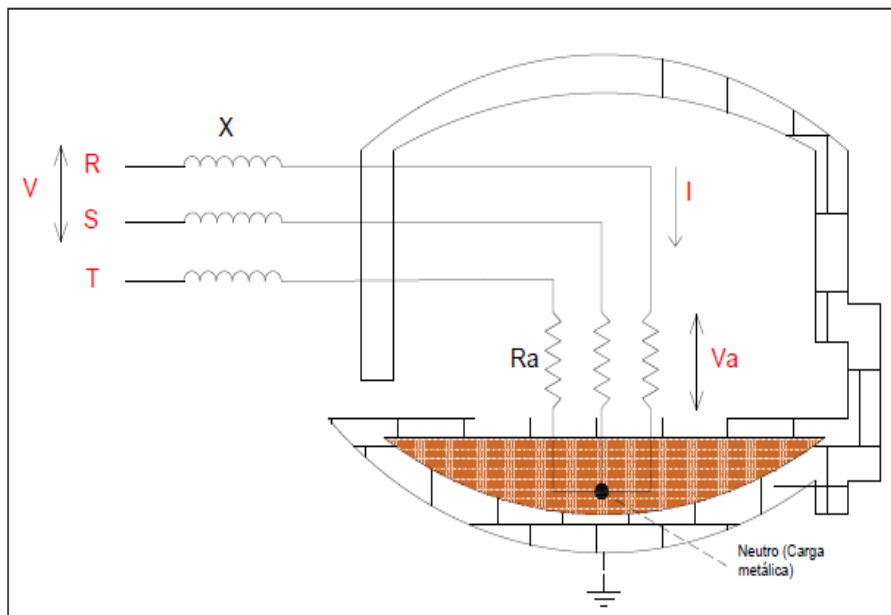


Figura 1.6. Circuito equivalente del horno de arco.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

V = Voltaje de fase, en vacío

X = Reactancia total del circuito

R_a = Resistencia de arco

V_a = Voltaje de arco

I = Corriente

1.3.1. Estudio del circuito eléctrico

En la figura 1.7 y 1.8 se representa el esquema de los componentes del circuito eléctrico de un horno de arco desde la sub estación eléctrica hasta el arco eléctrico, el voltaje de las barras principales antes de ingresar a la sub estación pasan a través de un seccionador principal con valores de voltaje normalmente de 138 kV, luego el voltaje pasa por un seccionador e interruptor secundario, ingresa a un transformador de 138/23 kV que se encuentra en la sub estación para luego dirigir el voltaje al seccionador, interruptor y al transformador del horno que tiene un tap changer para variar el voltaje en el secundario de acuerdo a los requerimientos del proceso.

Para desarrollar un estudio de la circuitería que interviene en un horno de arco se va a considerar las tres fases totalmente equilibradas, y estudiar el circuito por cada línea de forma monofásica. [4]

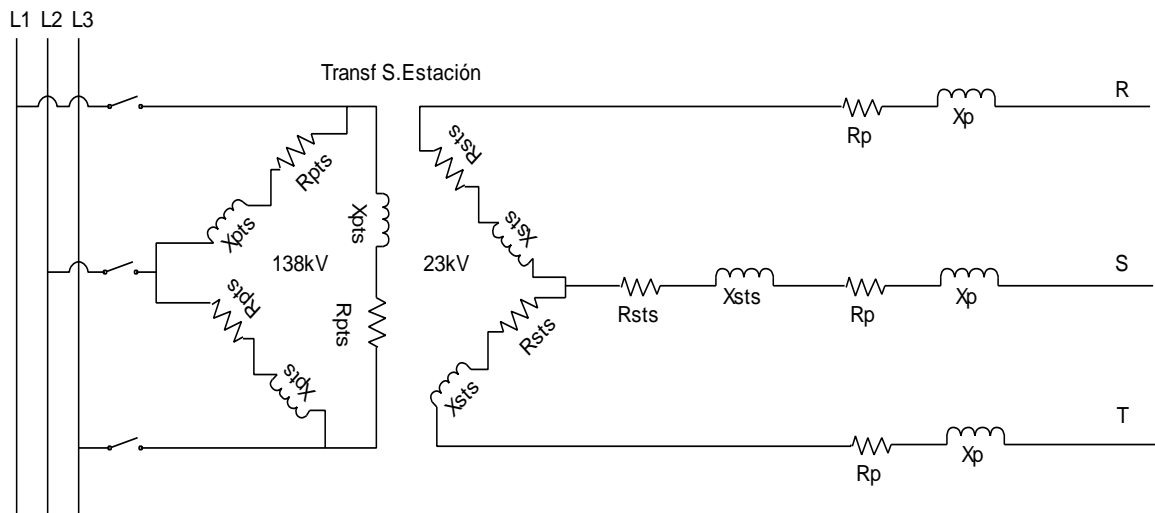


Figura 1.7. Alimentación al horno desde la subestación.
(Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)
Transf EAF

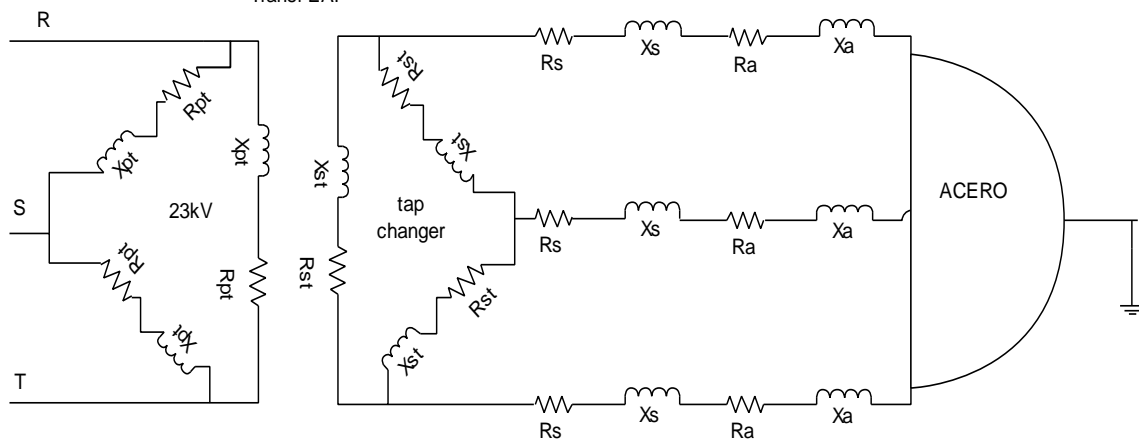


Figura 1.8. Alimentación al horno hasta el arco eléctrico.
(Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)

- R_{pts}, X_{pts} = Resistencia y Reactancia del primario del transformador de la subestación.
- R_{sts}, X_{sts} = Resistencia y Reactancia del secundario del transformador de la subestación.
- R_p, X_p = Resistencia y Reactancia del cableado desde subestación al transformador del horno.
- R_{pt}, X_{pt} = Resistencia y Reactancia del primario del transformador del horno.
- R_{st}, X_{st} = Resistencia y Reactancia del secundario del transformador del horno.
- R_s, X_s = Resistencia y Reactancia del cableado, tubos, accesorios hasta el arco.
- R_a, X_a = Resistencia y Reactancia del arco eléctrico.

En décadas anteriores los hornos de arco operaban con arcos cortos, bajas tensiones e intensidades elevadas, con la finalidad de sumergir el arco en la escoria para reducir el desgaste del refractario de las paredes laterales y la bóveda. Al introducir paneles y bóveda refrigerados por agua sin recubrimiento de refractarios, así como también la técnica de la escoria espumosa, estos avances han permitido utilizar altas potencias con arcos largos a tensiones altas y bajas intensidades, consiguiendo bajo consumo de electrodos, mayor factor de potencia medio y alto rendimiento eléctrico. [6]

Para el análisis del circuito se suele simplificar el esquema, considerando que el arco se comporta como una resistencia variable con una reactancia nula, referido al secundario del transformador como se representa en la figura 1.9.

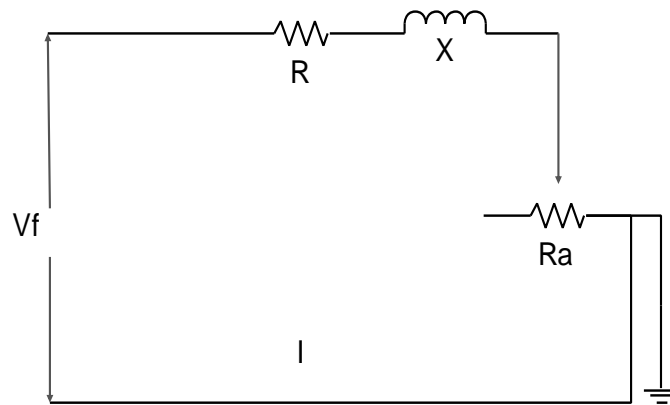


Figura 1.9. Esquema eléctrico simplificado por fase.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

- V_f = Voltaje de fase
- R = Resistencia del circuito o del sistema
- $X = X_{sin} = X_{cc}$ = Reactancia física determinada en la prueba de corto circuito
- R_a = Resistencia de arco
- $I = I_l = I_{op}$ = Corriente de operación

El transformador del horno tiene una configuración delta-delta y la carga forma una estrella, la chatarra forma el neutro conectado a tierra, y por lo tanto el voltaje en la carga es de fase, mientras que la corriente en la carga es de línea.

Criterios generales: [16]

$$V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}}$$

$$I_f = I_l$$

V_f = Voltaje de fase

I_f = Corriente de fase

I_l = Corriente de línea

Análisis de la carga: [16]

$$Z_{op}^2 = (R + R_a)^2 + (X_{op})^2 \quad (1.7)$$

$$R_{op} = R + R_a \quad (1.8)$$

Z_{op} = Impedancia de operación

X_{op} = Reactancia de operación

R = Reactancia del sistema

R_a = Reactancia de arco

$$Z_{op}^2 = (R_{op})^2 + (X_{op})^2$$

$$Z_{op} = \sqrt{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} = \frac{V_f}{I_{op}}$$

$$X_{op} = k X_{cc} \quad (1.9)$$

X_{cc} = Reactancia de corto circuito

Análisis de los voltajes al tratarles como vectores:

$$V_f^2 = (V_{Xop})^2 + (V_{Rop})^2 \quad (1.10)$$

$$\cos \theta = \frac{V_{Rop}}{V_f}, \quad \sin \theta = \frac{V_{Xop}}{V_f} \quad (1.11)$$

$$V_{Rop} = V_{Ra} + V_R = V_{op} \quad (1.12)$$

$V_{Rop} = V_{Ra}$ o voltaje de arco si se desprecia el voltaje en R

$$V_{Rop} = \frac{V_l * \cos \theta}{\sqrt{3}} \quad (1.13)$$

V_{Xop} = Voltaje de la reactancia de operación

V_{Rop} = Voltaje de la resistencia de operación

V_{Ra} = Voltaje de la resistencia de arco

V_R = Voltaje de la resistencia del sistema

V_{op} = Voltaje de operación

Análisis de la impedancia:

$$\cos \theta = \frac{R + R_a}{Z_{op}}, \quad \sin \theta = \frac{X_{op}}{Z_{op}} \quad (1.14)$$

Análisis de la corriente: [16]

$$I_{op} = \frac{V_f}{Z_{op}} = \frac{V_f}{\frac{X_{op}}{\sin \theta}} = \frac{V_l \sin \theta}{\sqrt{3} X_{op}} \quad (1.15)$$

Potencia en términos de voltaje: [16]

$$P_{op} = \sqrt{3} V_l I_l \cos \theta, \text{ Si } V_l = \sqrt{3} V_f, I_l = I_f = I_{op}$$

$$P_{op} = \sqrt{3} V_l I_{op} \cos \theta \quad (1.16)$$

$$P_{op} = 3 V_{Rop} I_f = 3 \frac{V_l \cos \theta}{\sqrt{3}} I_l = \sqrt{3} V_l I_l \cos \theta = \sqrt{3} V_l I_{op} \cos \theta$$

$$Q_{op} = \sqrt{3} V_l I_l \sin \theta = \sqrt{3} V_l I_{op} \sin \theta \quad (1.17)$$

$$S_{op} = \sqrt{3} V_l I_l = \sqrt{3} V_l I_{op} \quad (1.18)$$

P_{op} = Potencia activa de operación

Q_{op} = Potencia reactiva de operación

S_{op} = Potencia aparente de operación

Potencia en términos de resistencia: [16]

$$P_{op} = I^2 (R + R_a) \quad (1.19)$$

$$P_a = I^2 R_a \quad (1.20)$$

$$I_{op} = I = \frac{V_f}{Z_{op}} = \frac{V_f}{\sqrt{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2}} \quad (1.21)$$

$$P_{op} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a) \quad (1.22)$$

$$P_a = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a \quad (1.23)$$

P_a = Potencia activa de arco

En los Anexo I y II se obtienen las expresiones matemáticas para el cálculo de la potencia máxima en función de la variación de R_a , obteniendo los siguientes resultados: [16]

$$\frac{dP_a}{dR_a} = 0, \text{ como resultado } R_a = \sqrt{R^2 + X_{op}^2} \quad (1.24)$$

$$\frac{dP_{op}}{dR_a} = 0, \text{ como resultado } R + R_a = X_{op} \quad (1.25)$$

El valor máximo de P_a es:

$$(P_a)_{max} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a = \frac{V_f^2}{\left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right)^2 + (X_{op})^2} \sqrt{R^2 + X_{op}^2} \quad (1.26)$$

El valor máximo de P_{op} es: [16]

$$(P_{op})_{max} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a) = \frac{V_f^2}{(X_{op})^2 + (X_{op})^2} (X_{op})$$

$$(P_{op})_{max} = \frac{V_f^2}{2(X_{op})^2} (X_{op}) = \frac{V_f^2}{2(X_{op})} \quad (1.27)$$

El valor máximo de P_a cuando P_{op} es máximo: [16]

$$(P_a)_{Pmax} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a = \frac{V_f^2}{(X_{op})^2 + (X_{op})^2} (X_{op} - R)$$

$$(P_a)_{Pmax} = \frac{V_f^2}{2(X_{op})^2} (X_{op} - R) \quad (1.28)$$

El valor máximo de P_{op} cuando P_a es máximo: [16]

$$(P_{op})_{Pmax} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a)$$

$$(P_{op})_{Pmax} = \frac{V_f^2}{\left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right)^2 + (X_{op})^2} \left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right) \quad (1.29)$$

Para el factor de potencia los valores son: [16]

$$\cos \theta = \frac{R + R_a}{Z} = \frac{R + R_a}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X_{op}^2}} \quad (1.30)$$

$$\text{Para } (P_a)_{max}, R_a = \sqrt{R^2 + X_{op}^2}$$

$$\cos \theta = \frac{R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}}{\sqrt{\left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right)^2 + X_{op}^2}} \quad (1.31)$$

Para $(P_{op})_{\max}$, $R + R_a = X_{op}$

$$\cos \theta = \frac{X_{op}}{\sqrt{(X_{op})^2 + X_{op}^2}} = \frac{X_{op}}{\sqrt{2}X_{op}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7071 \quad (1.32)$$

Por lo tanto la P_{op} alcanza el valor máximo a un ángulo $\theta = 45^\circ$

1.3.2. Máxima potencia de arco respecto a la corriente

Al realizar la diferencia entre las ecuaciones 1.16 y 1.20 se obtiene la potencia de arco, para determinar la potencia máxima del arco P_a se realiza la derivada respecto a la corriente de operación I_{op} , ver anexo III. [16]

$$P_{op} = \sqrt{3}V_l I_{op} \cos \theta$$

$$S_{op}^2 = P_{op}^2 + Q_{op}^2$$

$$P_{op}^2 = S_{op}^2 - Q_{op}^2$$

$$P_a = P_{op} - P_R$$

$$P_a = \sqrt{S_{op}^2 - Q_{op}^2} - P_R$$

$$P_a = \sqrt{S_{op}^2 - Q_{op}^2} - 3I_{op}^2 R \quad (1.33)$$

$$S_{op} = \sqrt{3} V_l I_{op}$$

$$Q_{op} = \sqrt{3} V_l I_{op} \sin \theta$$

$$I_{op} = \frac{V_f}{X_{op}} \sin \theta$$

$$Q_{op} = \sqrt{3} V_l I_{op} \sin \theta$$

$$Q_{op} = \sqrt{3} V_l I_{op} \frac{I_{op} X_{op}}{V_f} = \frac{\sqrt{3} V_l I_{op}^2 X_{op}}{V_f} = \frac{\sqrt{3} V_l I_{op}^2 X_{op}}{\frac{V_l}{\sqrt{3}}} = 3I_{op}^2 X_{op} \quad (1.34)$$

Al reemplazar las ecuaciones 1.18 y 1.34 en 1.33 se obtiene la potencia de arco.

$$P_a = \sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2} - 3I_{op}^2 R \quad (1.35)$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = 0$$

$$R = \frac{(V_l^2 - 6I_{op}^2 X_{op}^2)}{2I_{op}\sqrt{3} \sqrt{(V_l^2 - 3I_{op}^2 X_{op}^2)}} \quad (1.36)$$

1.3.3. Rendimiento eléctrico

El rendimiento eléctrico n_e es la relación entre la potencia desarrollada en el arco P_a y la potencia consumida P_{op} , al establecer la relación entre las ecuaciones (1.23) y (1.22) se obtiene el rendimiento que no depende directamente de la reactancia X . [10]

$$n_e = \frac{\frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a}{\frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a)}$$

$$n_e = \frac{P_a}{P_{op}} = \frac{R_a}{(R + R_a)} \quad (1.37)$$

El rendimiento cuando la potencia de arco es máxima $(P_a)_{max}$, se obtiene mediante la relación entre las ecuaciones (1.26) y (1.29), como se muestra en la ecuación 1.38.

$$n_{e1} = \frac{(P_a)_{max}}{(P_{op})_{Pmax}} = \frac{\sqrt{R^2 + X_{op}^2}}{\left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right)} \quad (1.38)$$

El rendimiento cuando la potencia operacional es máxima $(P)_{max}$, se obtiene mediante la relación entre las ecuaciones (1.28) y (1.27), como se muestra en la ecuación 1.39.

$$n_{e2} = \frac{(P_a)_{Pmax}}{(P_{op})_{max}} = 1 - \frac{R}{X_{op}} \quad (1.39)$$

1.4. Diagramas de funcionamiento

1.4.1. Curvas de Potencia

De acuerdo a la ecuación 1.32 se determina que, en un circuito con una carga resistiva y una reactancia, la máxima potencia se obtiene cuando el factor de potencia $\cos \theta = f_p = 0,707$ o $X = R$.

En la figura 1.10, al graficar la potencia activa y el factor de potencia en función de la corriente de operación, para una tensión fija a la salida del secundario del transformador del horno y una reactancia de operación fija, se aprecia que la potencia activa aumenta

al aumentar la corriente, hasta alcanzar un $f_p = 0,707$, a valores de f_p inferiores de $0,707$ a pequeños decrementos de potencia activa los incrementos de corriente son altos. [17]

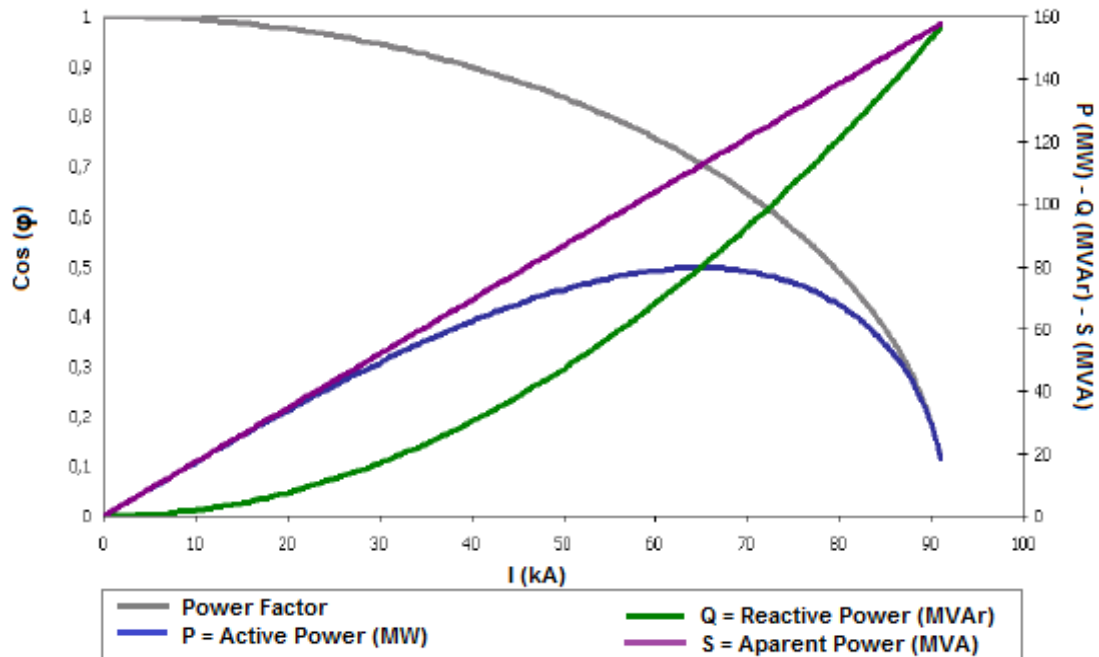


Figura 1.10. Curvas de potencias y f_p con reactancia constante.
(Fuente: L. Jaccard, *Parámetros Eléctricos de Operación-Curvas de Potencia*)

Para cada valor de tap changer en el transformador es equivalente un valor de tensión en el secundario esto permite generar diferentes curvas de potencia, en la figura 1.11 se aprecia las curvas a diferentes valores de tensión considerando un valor constante de reactancia.

En las primeras operaciones de los hornos de arco eléctrico, la curva de potencia cumplía un papel importante y era de carácter general operar con un $f_p = 0,707$ para obtener la máxima potencia en la carga, incluso se llegó a operar con factores de potencia mayores a $0,707$, pero no se trabajaba frecuentemente a estos factores ya que la *Larc* aumentaba considerablemente. Esta forma de operación se realizó cuando aún no se implementaban los paneles refrigerados por agua, no se consideraba la técnica de escoria espumosa, por tal razón se buscaba operar con longitudes de arcos más cortos para no dañar el refractario del horno. [17]

El criterio de operar con tensiones y reactancias más altas surge con la finalidad de reducir el consumo de los electrodos, a partir de este criterio el operar con $f_p = 0,707$ perdió operatividad ya que era posible obtener potencias mayores con tensiones altas e incluso con factores de potencia altos, en la etapa de penetración y fusión se produce una limitación del factor de potencia ya que cuando el f_p es alto genera un gran aumento

de la reactancia operacional lo que provoca una reducción del factor de potencia real respecto al teórico. [17]

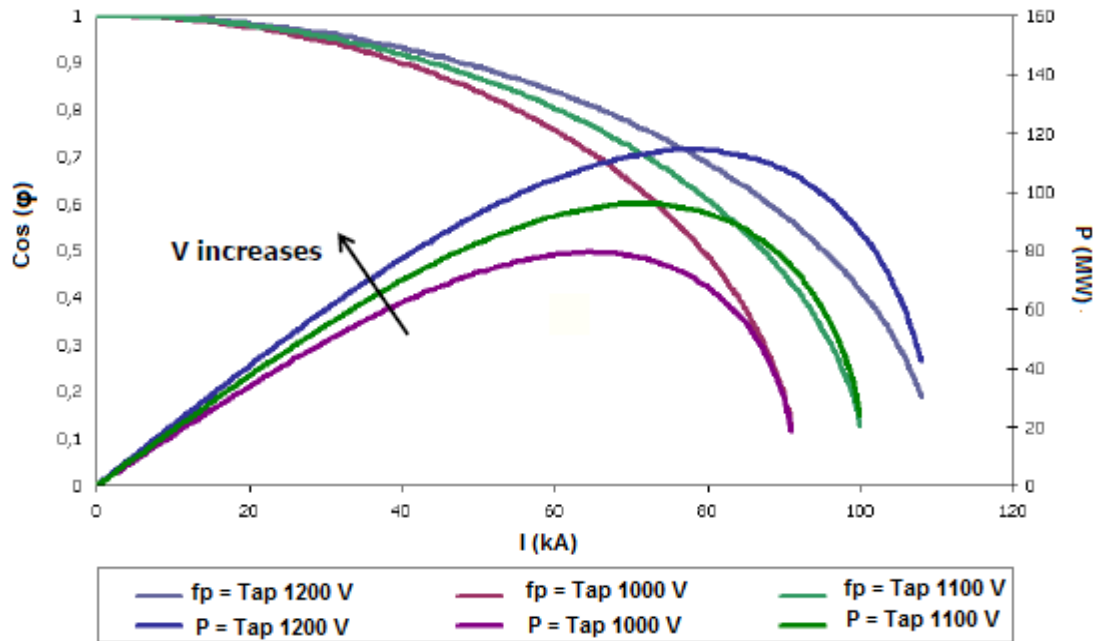


Figura 1.11. Curvas de potencias y fp a diferentes taps.
(Fuente: L. Jaccard, *Parámetros Eléctricos de Operación-Curvas de Potencia*)

1.4.2. Reactancia Operacional

En los análisis anteriores fue considerada la reactancia como fija para la operación del horno, en la práctica la reactancia varía ya que el horno opera durante la fusión de la chatarra en condiciones que se hace muy difícil mantener el arco estable, es decir en algunos momentos el electrodo entra en contacto con la chatarra y en otros momentos el electrodo se aleja, ya que el regulador levanta los electrodos para mantener un cortocircuito controlado.

Estas condiciones adversas de operación traen como resultado la aparición de corrientes armónicas que producen un aumento de la reactancia del circuito. Existen dos factores que inciden sobre el aumento de la reactancia. [3]

- El factor de potencia, cuanto más alto el fp mayor es el efecto del aumento de la reactancia.
- La etapa de fusión, el aumento de la reactancia es mayor al principio de la fusión y va disminuyendo en cuanto la operación del horno se hace más estable hasta llegar a la etapa de afino⁴ (metal líquido).

⁴ Afino: Tercera etapa del proceso de fundición de chatarra, cuando la carga metálica se ha convertido en metal líquido.

Al circular corrientes armónicas, el factor de potencia real es menor que el coseno del ángulo entre la tensión y la corriente de la fundamental a 60 Hz o factor de potencia teórico, al realizar un cálculo del factor de potencia considerando la reactancia sinusoidal a 60 Hz, el valor calculado es superior al valor real por qué no se ha tomado en cuenta el efecto del aumento de la reactancia provocada por las corrientes armónicas. Lo correcto es corregir el valor de la reactancia considerando el efecto de las corrientes armónicas. [8]

1.5. Eficiencia energética

1.5.1. Eficiencia energética en un horno de arco

El proceso de fundición de acero necesita una cierta cantidad de energía que depende de algunas variantes: el tipo de la carga metálica haciendo referencia a que la chatarra ingresa de diferentes tipos y densidades, el tipo de acero a producir, la temperatura final del proceso con la que se enviara el acero a la CCM, la cantidad de escoria espumosa entre otros factores.

Una mala operación en el proceso productivo genera pérdidas de energía como: tiempos altos de t_{off} tiempos de para en una colada, alta frecuencia de apertura de la bóveda la energía se pierde en el ambiente, excesivos tiempos de operación en el afino adicionalmente si se ha ingresado valores incorrectos de ganancia de corriente, valores inadecuados en las recetas de funcionamiento,

Si hay una afinación adecuada y una correcta calibración de la velocidad de respuesta de las válvulas y actuadores hidráulicos se puede minimizar el consumo energético. [11]

1.5.2. Consumo de energía eléctrica

Es importante considerar que los consumos de energía en un horno de arco eléctrico en condiciones normales no dependen de los parámetros eléctricos de operación ni menos del sistema de control o regulador de la posición de electrodos. El consumo de energía en un horno depende de los siguientes parámetros. [11]

- Tamaño del horno
- Tipo de carga
- Tiempos de parada de fundición (t_{off}) y del tiempo de fundición (t_{on})
- Pérdidas térmicas del ambiente
- Pérdidas térmicas por el agua de enfriamiento en las paredes del horno
- Pérdidas en la escoria
- Perdidas en la refrigeración de los electrodos.

- Temperatura de vaciado del horno
- Rendimiento metálico
- Pérdidas eléctricas en los conductores

Las pérdidas en los conductores es el único parámetro eléctrico que en condiciones normales afecta el consumo de energía, está en el orden del 5 % al 6 %, ya que el rendimiento eléctrico en un horno de arco esta entre el 94 % al 95 %, al operar a altas corrientes este rendimiento disminuye al aumentar las pérdidas.

Sin embargo, hay un factor externo a controlar mediante el cual el consumo de energía puede aumentar en función de los parámetros eléctricos siendo la “Estabilidad del arco eléctrico”.

El consumo de energía total de un horno está determinado por el consumo de energía eléctrica y el consumo de energía química. [11]

$$E_T = E_E - E_Q \quad (1.40)$$

E_T = Energía total

E_E = Energía eléctrica

E_Q = Energía química

1.5.3. Estabilidad del arco eléctrico

En un sistema trifásico a 60 Hz, el arco se extingue 120 veces por cada segundo en el momento que la corriente pasa por cero. En cada semiciclo, para obtener la reignición del arco y recuperar la circulación de corriente, debe ser aplicada una tensión superior a la tensión ánodo – cátodo de 40 V, ver figura 1.3.

La tensión aplicada para permitir la reignición del arco depende de la etapa de fusión del horno. Al inicio de la fusión en la etapa de penetración, cuando el arco se establece sobre una carga sólida y a una temperatura ambiente, la ionización se hace más difícil y la tensión requerida para la ignición puede ser superior a la etapa de afino con escoria espumosa, donde el ambiente es más favorable para a la ignición. [17]

Si el $f_p = 1$ la tensión y corriente están en fase por lo tanto el ángulo es 0°, las dos formas de onda pasan por cero simultáneamente, se produce un retardo en la ignición del arco hasta que la tensión alcance un valor adecuado para generar la nueva ignición, ver figura 1.12. [17]

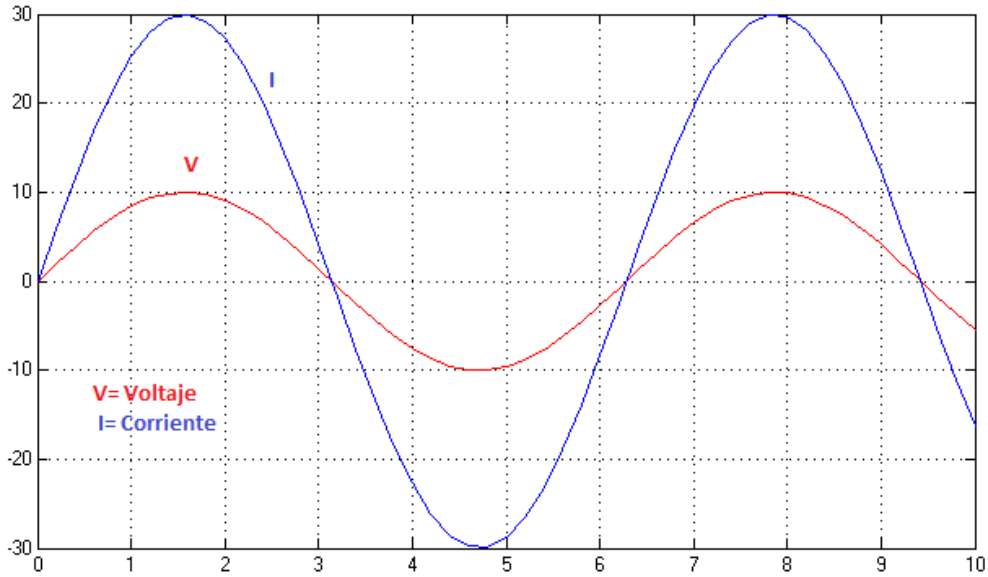


Figura 1.12. Voltaje y Corriente en fase.
(Fuente: L. Jaccard, *Parámetros Eléctricos de Operación-Curvas de Potencia*)

Si el $f_p = 0,70$ la tensión está adelantada a la corriente 45° , como se aprecia en la figura 1.13 cuando la corriente pasa por cero la tensión ya tiene un valor lo que permite que se produzca más fácilmente una ignición del arco.

La estabilidad del arco no depende exclusivamente del factor de potencia, también depende de la carga metálica, al principio de la fusión en la etapa de penetración la carga se encuentra fría y sólida, el arco se comporta de forma inestable sin poder superar factores de potencia superiores a 0,70 o 0,72.

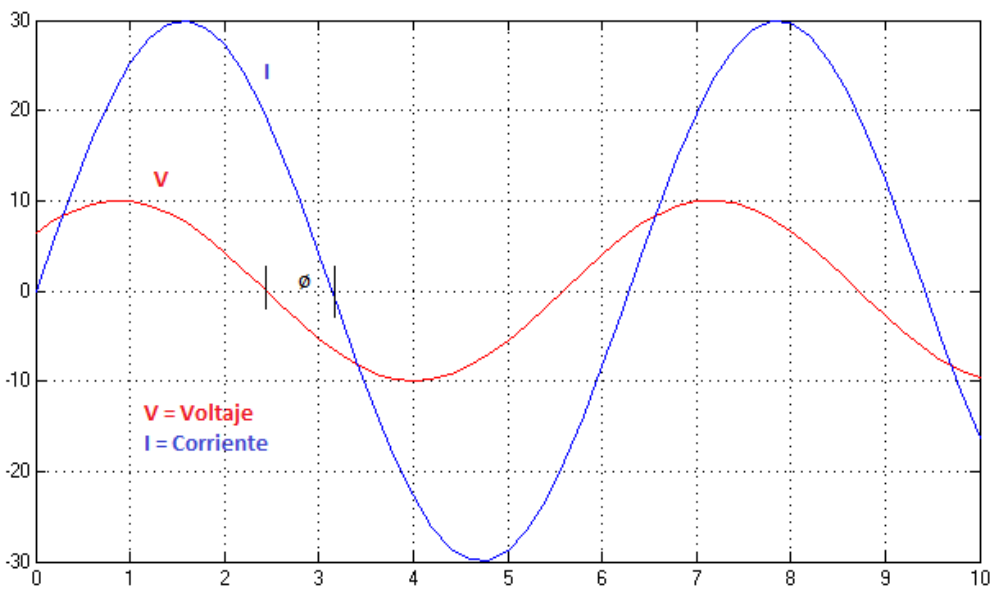


Figura 1.13. Voltaje y corriente desfasados.
(Fuente: L. Jaccard, *Parámetros Eléctricos de Operación-Curvas de Potencia*)

En la etapa de afino al final de la fusión la carga metálica se encuentra en su totalidad fundida, es factible operar con factores de potencia $\cos \phi$ superiores a 0,80. Cuando la operación se realiza con baño líquido y escoria espumosa que cubra el arco, es posible operar con $\cos \phi$ próximos a 1. [17]

Para el periodo inicial de fusión con chatarra la tendencia del arco es a la inestabilidad cuando se utiliza factores de potencia $\cos \phi$ altos, en este periodo para estabilizar el arco es necesario que exista un desfase entre la tensión de entrada y la corriente, cada vez que la corriente de arco se extinga, la tensión ya tenga un valor determinado que permita la inmediata reignición del arco. En la etapa de afino cuando el factor de potencia tiende a 1, la tensión y la corriente están en fase, lo que demora la reignición del arco, por esta razón es importante que en la etapa de fusión de chatarra el $\cos \phi$ sea inferior a 1 y que dependa de la etapa de fusión en la que se encuentra el proceso, por tal razón en la etapa de penetración el valor máximo del factor de potencia se mantiene entre 0,70 y 0,80.

La estabilidad del arco es una cuestión relativa que se manifiesta como un aumento de la reactancia del circuito eléctrico. Se ha establecido que el arco es muy inestable si la relación entre la reactancia operación (X_{op}) y la reactancia física o sinusoidal referida a una tensión secundaria (X_{sin} o X_{cc}) toma un valor elevado. El factor de reactancia operacional (F_{op}) es la relación entre la reactancia operacional y la reactancia física o también se calcula como la relación entre la potencia activa sinusoidal y la potencia activa real. [2]

$$F_{op} = \frac{X_{op}}{X_{sin}} \quad (1.41)$$

$$F_{op} = \frac{P_{sinusoidal}}{P_{op}}$$

$$F_{op} = \frac{\frac{V^2 * \sin \phi \cos \phi}{X_{sin}}}{\frac{V^2 * \sin \phi \cos \phi}{X_{op}}} \quad (1.42)$$

V = Voltaje de línea

X_{op} = Reactancia operacional

F_{op} = Factor de reactancia operacional

El F_{op} normalmente varía durante el periodo de fusión de la chatarra en la etapa de penetración y fusión entre 1,16 cuando el $\cos \phi$ se encuentra entre 0,65 y 0,70, y toma un valor de 1,38 cuando el $\cos \phi$ se encuentra entre 0,80 y más, el factor se reduce a 1,05 cuando se opera con escoria espumosa en la etapa de afino toma un valor bajo y fijo independiente del factor de potencia.

1.6. Balance Energético

El balance energético en un horno se realiza entre las energías aportadas a la fusión y las energías consumidas. Los hornos modernos disponen de: [18]

- Lanzas de oxígeno O_2 , para oxidar algunos componentes de la chatarra, y para la formación de la escoria espumosa.
- Quemadores de oxígeno-gas pudiendo ser (oxi-GLP), para calentar las zonas frías del horno donde no llega la radiación del arco.
- Aportación de recarburantes (coques de petróleo, grafito, antracita).

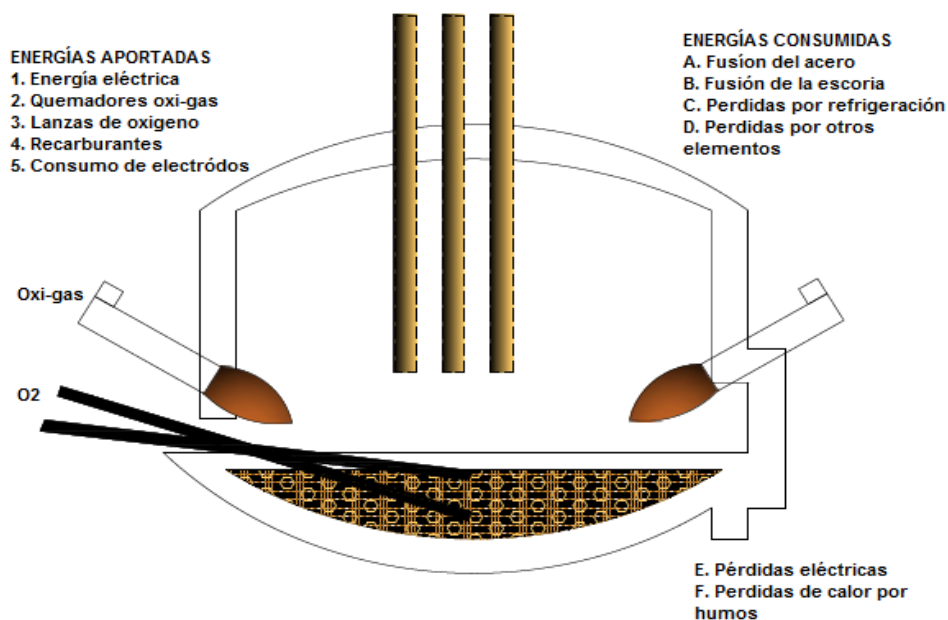


Figura 1.14. Balance Energético.

(Fuente: L. R. Jaccard, *Sistemas Eléctricos de Hornos de Arco - Principales Consumos*)

Los componentes de la energía aportada son: [18]

1. La energía eléctrica que ingresa a través de los electrodos.
2. La combustión que se producen en los quemadores para calentar las zonas frías.
3. Las reacciones de oxidación o combustión de componentes del acero líquido y de la chatarra mediante el oxígeno que ingresa por las lanzas.
4. Las reacciones químicas exotérmicas en la formación de la escoria, por los recarburantes ingresados en las cargas.

5. La energía generada por el peso de electrodos consumidos en el proceso, que procede de la sublimación⁵ del arco, la oxidación de la superficie lateral y las roturas en el interior del horno.

Los componentes de la energía consumida son: [18]

- A. Fusión y sobre calentamiento del acero.
- B. Fusión y sobre calentamiento de la escoria.
- C. Pérdidas térmicas por el agua de refrigeración que ingresa a las paredes, bóveda, puerta, etc.
- D. Pérdidas térmicas por los refractarios de suelda, por la apertura de la bóveda para la introducción de las cargas, etc.
- E. Pérdidas eléctricas en todos los componentes del equipo eléctrico desde la sub estación hasta los electrodos.
- F. Pérdidas de calor o entalpía de los humos que salen del horno.

El balance energético se establece mediante la ecuación 1.43.

$$P_m n_e \tau + E_g = E_a + E_e + P_p \tau + E_h \quad (1.43)$$

Donde:

P_m = Potencia eléctrica media consumida (kW)

n_e = Rendimiento eléctrico

τ = Tiempo del proceso en (h)

E_g = Energía generada por reacciones químicas, oxidación de componentes, consumo de electrodos.

E_a = Energía absorbida por el acero líquido.

E_e = Energía absorbida por la escoria.

P_p = Potencia de pérdidas térmicas por los refractarios, refrigeración y aperturas de la bóveda.

E_h = Energía o entalpía de los humos a la salida del horno.

$$\tau = \frac{E_a + E_e + E_h - E_g}{P_m n_e - P_p} \quad (1.44)$$

En la práctica la máxima producción de un horno operando con cargas constantes es decir con pesos similares se obtiene para un mínimo tiempo τ . [18]

El consumo eléctrico específico del horno para una carga $A_1(t)$ de acero líquido obtenido en cada colada, es:

$$C = \frac{P_m \tau}{A_1} = \frac{P_m}{A_1} \frac{E_a + E_e + E_h - E_g}{P_m n - P_p} \quad (kWh/t) \quad (1.45)$$

⁵ Sublimación: Proceso que consiste en el cambio de estado de sólido a gaseoso.

En la figura 1.15 se presenta el consumo de energía C , y el tiempo de fusión τ en función de la corriente de carga. La máxima producción se obtiene con un tiempo de fundición de 42 min a un consumo eléctrico de 410 kWh/t y una intensidad de 63 kA . Si se analiza el punto mínimo de consumo eléctrico se tienen los siguientes valores para fundir una carga que consuma 382 kWh/t se necesita trabajar a una intensidad de 40 kA con un tiempo máximo de fundición de 54 min . [2]

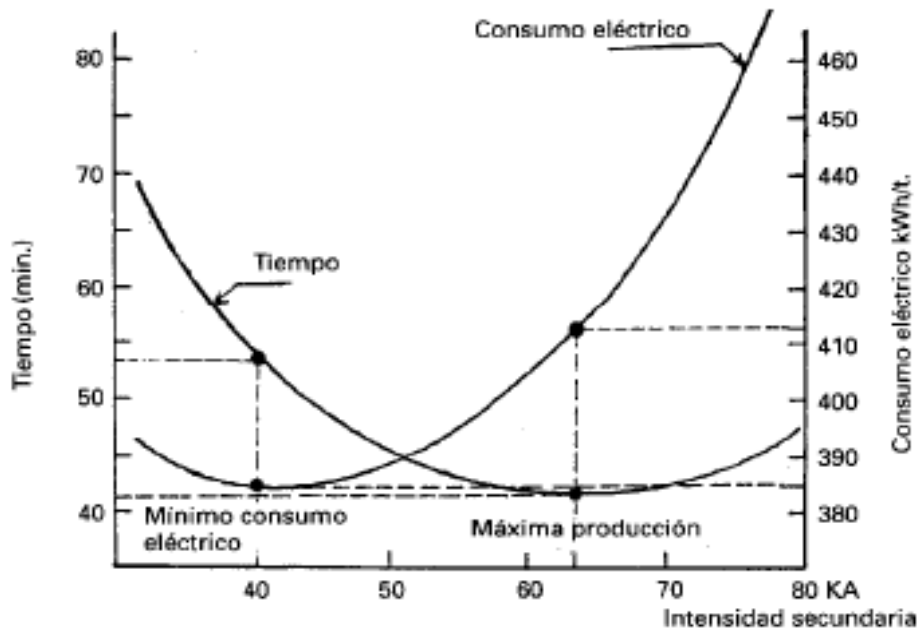


Figura 1.15. Consumo eléctrico y tiempo de fusión.
(Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)

1.6.1. Quemadores

Los quemadores que son utilizados tienen como combustible (gas licuado de petróleo GLP), y como comburente (Oxígeno) la temperatura adiabática⁶ de la llama está en el orden de los $2600 \text{ }^\circ\text{C}$, los quemadores calientan y funden la chatarra, la transmisión de calor se realiza por radiación de la llama y convección formada de los humos. [2]

⁶ Temperatura adiabática de llama: Es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor hacia el entorno.

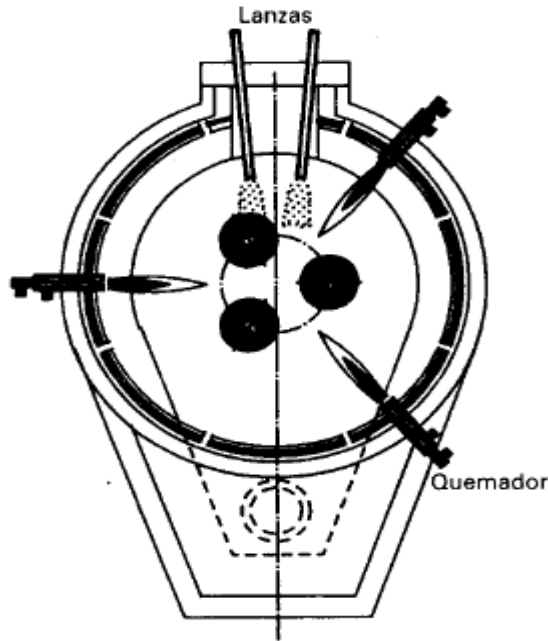


Figura 1.16. Disposición de quemadores y lanzas de O_2 .
(Fuente: J. Astigarraga Urquiza, *Hornos de arco para fusión de acero.*)

1.6.2. Lanzas de inyección de oxígeno

Las lanzas de oxígeno aportan energía por la oxidación de algunos componentes de la chatarra y del acero fundido como ($F_e, C, S_i, M_n, P, \text{grafito de electrodos}$), las lanzas también evitan la formación de zonas frías que están con chatarra sin fundir en la paredes laterales.

La oxidación de la chatarra (reacción exotérmica) y con el carbón forman una escoria espumosa que permite cubrir los arcos eléctricos y el baño, evitando que la radiación térmica generada por el arco no se escape hacia las paredes del horno (paneles refrigerados) aprovechando al 100% esta energía.

El O_2 inyectado oxida la chatarra, el carbón, los electrodos y en el afino reduce el contenido de C, S_i, M_n . Los óxidos de F_e, S_i, M_n pasan a formar la escoria mientras que el CO y CO_2 pasan a formar a los humos que posteriormente serán evacuados por una planta externa o aprovechados para precalentar la chatarra para disminuir el consumo de energía eléctrica y química. En la tabla 1.1 se aprecia las reacciones y las energías desprendidas.

La escoria espumosa se forma al reducir el F_eO con carbón. [8]

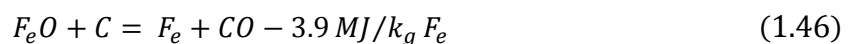


Tabla 1.1. Reacciones con lanzas de oxígeno.

$Fe + 0.5 O_2$	$= FeO + 4,6 MJ/kg Fe$	$(23 MJ/N_{m^3} O_2)$
$C + 0.5 O_2$	$= CO + 9,2 MJ/kg C$	$(10 MJ/N_{m^3} O_2)$
$C + O_2$	$= CO_2 + 31 MJ/kg C$	$(16,5 MJ/N_{m^3} O_2)$
$C_{acero} + 0.5O_2$	$= CO + 11,3 MJ/kg C$	$(12,1 MJ/N_{m^3} O_2)$
$Si + O_2$	$= SiO_2 + 23 MJ/kg Si$	$(28,8 MJ/N_{m^3} O_2)$
$Mn + O_2$	$= MnO_2 + 6,9 MJ/kg Mn$	$(17 MJ/N_{m^3} O_2)$

(Fuente: B. Linchevski, A. Sobolevski and A. Kalmenev, *Metalurgia de metales no ferrosos.*)

1.6.3. Fusión y recalentamiento del acero

La energía que se requiere para fundir y recalentar el acero depende de su composición, para una producción de bajo contenido de carbono se tomara la siguiente referencia.

- Entalpía a 1530 °C (material solido): 295 kWh/t.
- Calor de fusión a 1530 °C: 69 kWh/t.
- Calor requerido para recalentar 100 °C : 22 kWh/t.

La energía requerida para la fusión en algunos hornos es frecuente considerar en 370 kWh/t y un aumento de 30 kWh/t para el recalentamiento. Si se desea alcanzar una temperatura de colado de 1650 °C con un recalentamiento de 120°C se obtendría una entalpía total. [18]

$$295 \frac{kWh}{t} + 69 \frac{kWh}{t} + 22 \frac{kWh}{t} * \frac{120 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ }^\circ\text{C}} = 390 \frac{kWh}{t}$$

1.6.4. Calor perdido por los humos

Es importante mantener una ligera presión negativa en el interior del horno para controlar la emisión de humos, es primordial reducir al máximo el caudal de humos que salen por los ductos hacia la planta de aspiración, ya que esto genera pérdidas de calor por humos. Los puntos de infiltración del aire al horno se generan en: [19]

- La puerta de escoreo
- Las aberturas en los quemadores, lanzas, entrada de adiciones etc.
- Las holguras entre electrodos y bóveda.
- Las holguras entre la bóveda y cuba.

La cantidad de los humos producidos son en función de los siguientes criterios:

- La potencia y capacidad del horno.
- El peso y composición de la chatarra
- El contenido de aceite en la chatarra.
- La secuencia del proceso.

- La infiltración del aire exterior debido a la depresión en el horno, regulado por el sistema de aspiración y depuración de humos.
- La inyección de carbón.

Durante los primeros minutos de operación por la combustión de algunos componentes de la carga se produce la mayor cantidad de humos, de igual manera en el afino. La producción determina el caudal de los humos y es directamente proporcional a las pérdidas de calor. [19]

1.6.5. Pérdidas por la refrigeración

Actualmente se utiliza en las paredes del horno paneles refrigerados con agua construidos con tubos de acero, las pérdidas por el agua en el proceso de fundición varían en función de las fases del proceso:

- Al realizar las diferentes cargas la cuba y la bóveda reciben la radiación directa de la solera y del baño.
- Al finalizar la fusión de cada carga se genera radiación en la cuba y bóveda procedente del baño y del arco.
- En el afino la radiación procede de la superficie de la escoria espumosa a temperaturas inferiores a la del arco.

La ecuación 1.47 permite determinar la potencia de pérdida por área. [1]

$$P = \sigma e T^4 \quad (1.47)$$

σ = Constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

e = Factor de emisividades y formas (considerar 0,6)

T = Temperatura de la fuente de radiación

1.6.6. Pérdidas eléctricas

En los conductores, que van desde el transformador hasta el horno, al ser de carácter inductivo también tienen una resistencia eléctrica, al circular una alta corriente se disipa la energía en forma de calor, por esta razón los cables, los tubos de cobres y las mordazas tienen refrigeración por agua. La potencia de pérdidas por conducción es $P = I^2R$, siendo R la resistencia de pérdidas de los conductores. Las perdidas varían entre el 5 % y el 15 % de la potencia activa total del horno siendo el área donde se genera la mayor cantidad de pérdidas.

En los transformadores se producen dos tipos de pérdidas principales, las pérdidas en los conductores conocidas como pérdidas en el cobre que mantiene la relación $P = I^2R$. Las pérdidas que se produce en el núcleo de hierro o pérdidas en vacío que se generan debido a la histéresis y corrientes parásitas (corrientes de Foucault) que dependen de la tensión, este tipo de pérdidas aumentan con las armónicas, las pérdidas en los transformadores corresponden al 1 %. [9]

1.6.7. Pérdidas térmicas

El consumo específico de energía en un horno de arco depende básicamente de las pérdidas térmicas, el rendimiento eléctrico del horno esta en el orden del 95 %. [3]

Las pérdidas térmicas se generan en los sistemas de extracción de humos y en las paredes refrigeradas del horno, en la cuba y la bóveda, sin embargo, la implementación de nuevas técnicas como la refrigeración de los paneles, la técnica de operación con escoria espumosa, el uso de energía química ha permitido operar con mayores potencias específicas kWh/t lo que ha generado un menor tiempo de operación por cada colada de acero fundida. [10]

En términos de producción los cambios antes mencionados han aumentado la productividad del horno en t/h que equilibra el aumento de la potencia perdida.

1.6.8. Consumo específico de energía

En la ecuación 1.48 se muestra el consumo específico de energía con los diferentes factores que intervienen en el proceso. [4]

$$q_{ee} = q_a + q_{pe} + q_{tap} + q_{on} + q_e \quad (1.48)$$

Dónde:

q_a = calor sensible del acero a 1640 °C = 390 kWh/t .

q_{pe} = pérdidas eléctricas específicas (entre 5 a 10 %).

q_{tap} = pérdidas térmicas proporcionales al tiempo total (tap tp tap).

q_{on} = pérdidas térmicas proporcionales al tiempo de horno conectado.

q_e = calor sensible de la escoria aproximadamente 60 kWh/t .

Las pérdidas eléctricas q_{pe} son menores cuando el horno opera con altas tensiones de arco ya que baja la intensidad y disminuyen las pérdidas.

Las pérdidas térmicas q_{tap} que se producen en el tap to tap es decir el tiempo desde que inicia la fusión hasta que termina, estas pérdidas ocurren cuando el horno está

parado. estas pérdidas son altas cuando el horno opera con prolongados tiempos muertos.

Con respecto a las pérdidas térmicas q_{on} corresponden a un porcentaje de la potencia útil, dependiendo si el arco está cubierto o no por la escoria espumosa, depende de la longitud del arco, un porcentaje de la energía será perdida en la bóveda y en la cuba. [8]

1.6.9. Consumo de refractarios

Para determinar el consumo exacto del refractario no existe una formula, como si ocurre con el consumo de electrodos. En los años 50 W. Schwabe encontró un índice IER en base a mediciones de irradiación de calor, en el cual establece que la erosión de las paredes provocada por el arco es proporcional a la potencia y a la tensión del arco e inversamente proporcional a distancia del electrodo a la pared del horno al cuadrado. Al operar con un V_a alto disminuye el consumo de electrodos ya que aumenta la corriente, mientras que al operar con un V_a menor, aumenta el consumo de electrodos por el incremento de corriente, pero disminuye el índice de erosión del refractario ya que disminuyo la longitud de arco.

De acuerdo a la experiencia se ha determinado que valores superiores a 200 kWV/cm^2 son admisibles sin problema en hornos de alta capacidad, mientras que valores de 50 kWV/cm^2 son excesivos para hornos pequeños cuyo tonelaje oscila entre 5 a 20 t. Los hornos pequeños también sufren deterioro del refractario cuando operan con tiempos de fusión y afino elevados y por la falta de una buena escoria espumosa.

Cuanto mayor sea la longitud de arco, mayor será el IER y mayor será la energía radiada. El índice de erosión debe ser analizado individualmente en cada etapa del proceso. Para hornos que tienen un índice superior a 200 kWV/cm^2 es necesario la utilización de paneles refrigerados y la utilización de escoria espumosa. [18]

En la figura 1.17 y 1.18 se aprecia una vista del horno en la cual se identifica como están distribuidos los paneles refrigerados, los ladrillos de refractario se encuentran ubicados bajo los paneles y cubriendo la cuba inferior.

$$IER = V_a * \frac{P_a}{3} / d^2 \quad (1.49)$$

Dónde:

IER = índice de erosión al refractario

V_a (tensión de arco) = $(Vl * \cos(\theta)) / \sqrt{3}$

$$P_a \text{ (potencia de arco)} = P_{op} = I^2(R + R_a) \text{ o } P_a = I^2R_a$$

d es la distancia de la cara externa del electrodo a la pared del horno

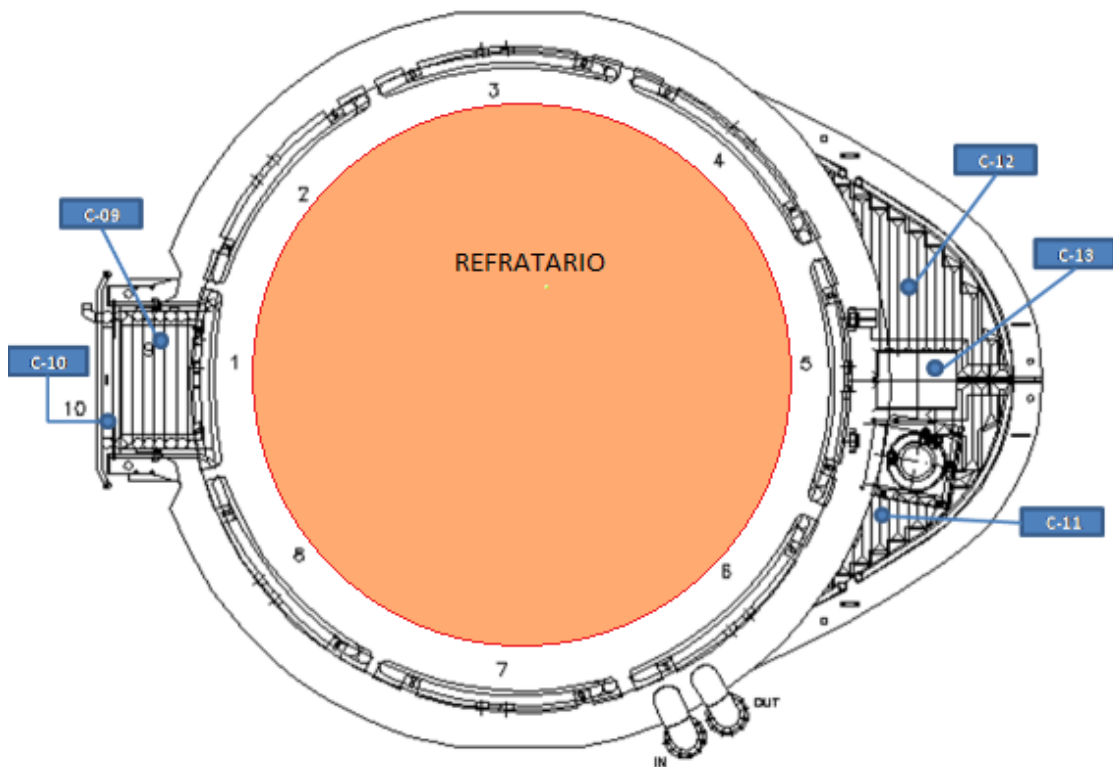


Figura 1.17. Refractario en un horno de arco
(Fuente: Planta industrial Adelca, 2018.)



Figura 1.18. Ladrillo refractario
(Fuente: Planta industrial Adelca, 2018.)

1.6.10. Consumo de electrodos

El consumo específico de electrodos en kilogramos de grafito por tonelada de acero producido, fundamentalmente depende de la tensión de arco, es decir cuanto mayor es la tensión de arco, menor es la corriente y por ende menor el consumo de electrodos.

[18]

$$\begin{aligned} \text{Consumo específico de electrodo } \left(\frac{kg}{t}\right) &= K * \left(\frac{I^2}{P}\right) * \left(\frac{D^2}{d^2}\right) * C_{ee} \\ \left(\frac{kg}{t}\right) &= K * \left(\frac{I}{V_a}\right) * \left(\frac{D^2}{d^2}\right) * C_{ee} \end{aligned} \quad (1.50)$$

Dónde:

I = Corriente (kA)

P= Potencia active (kW)

V_a = Voltaje de arco (V)

C_{ee} = Consumo específico de energía (kWh/t)

D = Diámetro original del electrodo

d = Diámetro de la punta del electrodo

K = Calidad del electrodo (consumo de punto por A² * h)

D²/d² = Representa el afinamiento como resultado de la oxidación lateral

En la ecuación 1.51 se muestra el consumo específico de los electrodos, de tal manera que si no se conoce la relación D²/d² se deduce que el afinamiento del electrodo depende de los parámetros eléctricos y de las dimensiones del electrodo. [4]

$$C_{ee} = K * (I/V_a) * \left[0,5 + \left(0,25 + C_{ox} * D * \frac{H}{I^2}\right)^{0,5}\right]^2 \quad (1.51)$$

Para una aplicación general se tienen que k = 10, C_{ox} = 30 , para las características actuales de un horno y la calidad del electrodo. [4]

$$C_{ee} = 10 * (I/V_a) * \left[0,5 + \left(0,25 + 30 * D * \frac{H}{I^2}\right)^{0,5}\right]^2 \quad (1.52)$$

Dónde:

H = Altura de oxidación o parte roja del electrodo

1.7. Efectos eléctricos del EAF sobre las líneas

En un horno EAF la tensión en el arco no es sinusoidal, tiene la forma rectangular lo que ocasiona que se introduzca armónicos a la alimentación. En la primera parte de la fusión es donde se producen las mayores perturbaciones sobre la alimentación. [9]

1.7.1. Armónicos

Considerando la forma rectangular de la tensión en el arco se produce armónicos en la parte secundaria del circuito del orden $3^{\circ}, 5^{\circ}, 7^{\circ}, y 9^{\circ}$, a los de orden superior se los considera de mínima importancia. [9]

1.7.2. Flicker

El funcionamiento propio del horno con las variaciones imprevistas de la longitud del arco, en la etapa de fusión, provoca fluctuaciones continuas de la tensión de alimentación y de la potencia absorbida, lo que genera perturbaciones en:

- El propio horno
- Equipos electrónicos
- Iluminación en las lámparas
- Pantallas
- Ordenadores

En los hornos de arco las variaciones de la intensidad de corriente en el periodo de fusión pueden tomar valores del 30 % al 50 % del valor nominal, cuando la red de alimentación no es estable, se generan variaciones de tensión que se aprecia fácilmente en el parpadeo de la iluminación. [9]

1.8. Etapas de operación

Un horno de arco eléctrico tiene claramente marcada tres etapas de operación las cuales tienen diferentes comportamientos, para cada etapa se debe definir adecuadamente los parámetros eléctricos de operación. Las etapas son: [3]

- Penetración o perforación
- Fusión, se la puede dividir en inicio de fusión y final de fusión.
- Afinación, es toda la operación con baño plano en esta etapa comprende el calentamiento con escoria espumosa y la parte final del proceso cuando la escoria es retirada del horno el arco se queda sin protección, hasta que se produce el vaciado de acero.

Tabla 1.2. Etapas de fundición.

Etapas de Fundición de un horno de arco eléctrico			
	Cargas	Etapas	tiempo (min)
Colada Completa	primera carga	penetración	10
		fusión	
	segunda carga	penetración	8
		fusión	
	tercera carga	penetración	7
		fusión	
		afino	5

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

1.9. Analizador de energía

Un analizador de energía permite realizar mediciones en un instalación o planta industrial en sistemas eléctricos alternos y continuos desde una hasta tres fases. Un analizador permite medir la tensión, la corriente, la frecuencia, la potencia, la energía, armónicos, interarmónicos, secuencia de fases. El analizador empleado en el presente proyecto es el Fluke 435 las especificaciones se aprecian en la tabla 1.3. [24]



Figura 1.19. Analizador de energía Fluke 435

(Fuente: P. principal, C. eléctrica, A. eléctrica, A. eléctrica, A. Fluke and A. Fluke, "Analizador de calidad eléctrica Fluke 435 II")

Tabla 1.3. Especificaciones técnicas Fluke 435.

Especificaciones del producto				
Voltio	Modelo	Rango de medida	Resolución	Precisión
Vrms (CA + CC)		1 V a 1000 V fase a neutro	0.01 V	±0.1 % de voltaje nominal ¹
Vpico		1 Vpico a 1400 Vpico	1 V	5 % de voltaje nominal
Factor de cresta (CF) de voltaje		1.0 > 2.8	0.01	±5 %
Vrms½			0.1 V	±0.2 % de voltaje nominal
Vfund			0.1 V	±0.1 % de voltaje nominal
Amperios (precisión sin incluir precisión de pinza)				
Amperios (CA + CC)	i430-Flex 1x	5 A a 6000 A	1:00 AM	±0.5 % ± 5 recuentos
	i430-Flex 10x	0.5 A a 600 A	0.1 A	±0.5 % ± 5 recuentos
	1mV/A 1x	5 A a 2000 A	1A	±0.5 % ± 5 recuentos
	1mV/A 10x	0.5 A a 200 A (solo CA)	0.1 A	±0.5 % ± 5 recuentos
Apico	i430-Flex	8400 Apico	1 Arms	±5 %
	1mV/A	5500 Apico	1 Arms	±5 %
Factor de cresta (CF) de amperios		1 a 10	0.01	±5 %
Amperios½	i430-Flex 1x	5 A a 6000 A	1:00 AM	±1 % ± 10 recuentos
	i430-Flex 10x	0.5 A a 600 A	0.1 A	±1 % ± 10 recuentos
	1mV/A 1x	5 A a 2000 A	1:00 AM	±1 % ± 10 recuentos
	1mV/A 10x	0.5 A a 200 A (solo CA)	0.1 A	±1 % ± 10 recuentos
Afund	i430-Flex 1x	5 A a 6000 A	1:00 AM	±0.5 % ± 5 recuentos
	i430-Flex 10x	0.5 A a 600 A	0.1 A	±0.5 % ± 5 recuentos
	1mV/A 1x	5 A a 2000 A	1:00 AM	±0.5 % ± 5 recuentos
	1mV/A 10x	0.5 A a 200 A (solo CA)	0.1 A	±0.5 % ± 5 recuentos
Hz				
Fluke 434 a 50 Hz nominal		42.50 Hz a 57.50 Hz	0.01 Hz	±0.01 Hz
Fluke 434 a 60 Hz nominal		51.00 Hz a 69.00 Hz	0.01 Hz	±0.01 Hz

(Fuente: P. principal, C. eléctrica, A. eléctrica, A. eléctrica, A. Fluke and A. Fluke, "Analizador de calidad eléctrica Fluke 435 II")

2. METODOLOGÍA

Para implementar las nuevas técnicas de ahorro energético se debe partir de un análisis y estudio del estado actual de funcionamiento y consumo energético del horno. Para lo cual se ha obtenido la información mediante dos fuentes: los reportes y registros diarios de producción que se van almacenando desde el inicio de operación del horno hace 10 años, y el monitoreo del horno en funcionamiento mediante la conexión de un analizador de línea.

El proceso de fusión de un horno de arco no siempre es el mismo depende del tipo de acero solicitado por la producción, depende del tipo de chatarra con el que trabajara, y el número de cargas, etc. Por lo tanto, es importante considerar algunos de estos criterios antes de iniciar el estudio.

2.1. Estudio previo del horno

Un ahorro energético no solo conlleva disminuir la facturación de energía eléctrica al finalizar el mes, es importante considerar todos los aspectos y consecuencias sobre el resto de equipos que se verán afectados al implementar un programa de eficiencia energética. En los siguientes pasos se detallan algunos de los criterios a tomar en cuenta desde donde partirá el estudio de eficiencia energética.

- Primero se debe seleccionar el número de tap changer con el que trabajara el transformador en las diferentes etapas de fusión, esto se realiza considerando el *IER* (Índice de erosión del refractario).
- Se considerará el tipo de acero que se va a obtener ya que esto determina el tipo de chatarra y la forma de carga de cada cesta, considerando la densidad de la chatarra, por lo tanto, las recetas de operación no pueden ser siempre las mismas dependerán del tipo de acero que se va a obtener, con este criterio se determina los rangos de operación para mantener factores de potencia adecuados.
- Al trabajar con la curva #10 (ver figura 2.1) que equivale a operar con la corriente nominal del transformador, la curva #10 solo sirve para la etapa de afino no para penetración ni fusión, ya que el arco es muy corto y se podría apreciar perforaciones en la base del horno. Esta curva puede ser utilizada en perforación, pero es determinante el tiempo que sea empleada.
- Todos los perfiles de funcionamiento que se implementaran deben ser analizados y puestos en marcha de acuerdo al tipo de chatarra.

- En el proceso de fundición una colada ver tabla 1.2 está constituida por tres o cuatro cargas de chatarra dividida en diferentes tonelajes hasta completar las 30 t, en cada carga fundida no se debe pasar de un factor óptimo de fundición equivalente a 280 kWh/t , si alguna carga llega a 290 kWh/t hay problemas en el funcionamiento del horno. Considerar que no necesariamente a 280 kWh/t el proceso de fundición se ha completado puede ser antes y lo que se está consumiendo es energía innecesaria hay dos formas de verificar este problema, visualizando el estado del baño conforme a la experiencia o verificando en el proceso de afino hasta cuantos kWh/t el acero alcanza la temperatura optima de fusión para el proceso, un factor de consumo específico de energía para 30t es 280 kWh/t . [13]
- Considerar que para un proceso de afino eficiente ver tabla 1.2 lo ideal es un factor de consumo de energía entre 50 kWh/t y 100 kWh/t , si el horno trabaja a más de 100 kWh/t hay un mal funcionamiento en la etapa de perforación y fusión. [4]
- La energía química dentro del proceso de fusión permite realizar dos cosas disminuir el tiempo de fusión $P_{on} (\text{min})$ o disminuir el consumo de energía eléctrica (kWh) . Para comprobar lo antes mencionado al bajar la energía química uno de los dos factores debe cambiar sea el tiempo o el consumo caso contrario la energía química se estuvo desperdiciando durante todo ese tiempo.
- En la curva de P_{α} ver figura 2.1, lo ideal es trabajar hacia la izquierda de la cúspide o del punto P1 ya que a mayor longitud de arco mayor es el tap changer del transformador.
- Con respecto al controlador el PID permite estabilizar el arco para que el f_p no sea mayor a 0,9, el controlador PID es aconsejable no manipular en función de las características de la carga, una vez calibrado se deben mantener fijas las ganancias, a diferencia de la ganancia de corriente que se puede modificar.

2.1.1. Cálculo de la reactancia total sinusoidal para cada tap changer

El cálculo de todos los parámetros eléctricos para cada tap changer, se efectúa si se conoce el voltaje de fase en vacío en el secundario del transformador del horno y la reactancia sinusoidal total del circuito que comprende desde la subestación eléctrica hasta el electrodo, esto permite obtener las gráficas o curvas de operación para

determinar el comportamiento y funcionamiento del horno en cada uno los tap changer para diferentes factores de potencia.

La reactancia total del circuito se calcula como la suma de todas las reactancias, los valores de las reactancias son referidos al voltaje secundario del transformador del horno, también se emplea en las operaciones matemáticas la corriente en el lado secundario del transformador. La reactancia total está formada por:

- Reactancia de la red de alimentación
- Reactancia del transformador de la subestación principal
- Reactancia del reactor en serie (puede ser nula, media, o alta)
- Reactancia del transformador del horno
- Reactancia del circuito del horno

Las siguientes operaciones muestran la metodología empleada para obtener la reactancia sinusoidal o de corto circuito del sistema que conforma el horno eléctrico en estudio, las operaciones matemáticas se realizaran por separado para cada tap changer y el resumen de los valores obtenidos de reactancia y los voltajes del secundario de acuerdo a cada tap changer se aprecian en la tabla 2.1.

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #9

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 1000 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 1 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente linea}} (\text{kVA}) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,3 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 1 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente transf sub}} (\text{kVA}) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11,8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (1 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0026 \Omega = 2,6 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (m\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 1\ kV$$

$$V_{2ns} = V_{sec\ tranf\ subestacion} (kV) = 23\ kV$$

$$R = R_{resistencia\ reactor} (m\Omega) = 1,8\Omega = 1800\ m\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800\ m\Omega \left(\frac{1\ kV}{23\ KV} \right)^2 = 3,4\ m\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 1\ kV$$

$$S_{cn} = S_{aparente\ transf\ sub} (kVA) = 41660\ kVA$$

$$Z_{cc} = 8,38\ \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (1\ kV)^2 * 8,38\%}{41660\ kVA} = 0,00201\ \Omega = 2,01\ m\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1\ m\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5\ m\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5\ m\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2\ m\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#9} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 10,37\ m\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #8

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 1000\ V = KV2B$$

$$S_{cn} = 3\ GVA = KVAB$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 945\ V$$

$$S_{cn} = S_{aparente\ linea} (kVA) = 3000000\ kVA$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,3 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf } horno} (kV) = 0,945 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate \text{ tranf } sub} (kVA) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11.8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,945 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0023 \Omega = 2,3 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (m\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf } horno} (kV) = 0,945 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{sec \text{ tranf } subestacion} (kV) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{resistencia \text{ reactor}} (m\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,945 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 3,0 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf } horno} (kV) = 0,945 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate \text{ tranf } sub} (kVA) = 41660 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} 8.38 \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,945 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,00180 \Omega = 1,80 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#9} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 9,47 \text{ m}\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #7

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 896 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 896 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{apate\ te\ linea} (\text{kVA}) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,3 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 0,896 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate\ te\ transf\ sub} (\text{kVA}) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11,8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,896 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0,0021 \Omega = 2,1 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (\text{m}\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 0,896 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{sec\ tranf\ subestacion} (\text{kV}) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{resistencia\ reactor} (\text{m}\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,896 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 2,7 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 0,896 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate\ te\ transf\ sub} (\text{kVA}) = 41660 \text{ kVA}$$

Z_{cc} 8.38 %

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,896 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,00161 \Omega = 1,61 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#7} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 8,72 \text{ m}\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #6

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 852 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (\text{kV}) = 852 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{apate linea} (\text{kVA}) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (\text{kV}) = 0,852 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate \text{ transf sub}} (\text{kVA}) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11.8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,852 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0019 \Omega = 1,9 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (\text{m}\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (\text{kV}) = 0,852 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{\text{sec tranf subestacion}} (kV) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{\text{resistencia reactor}} (m\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\text{reactor}} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,852 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 2,5 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{\text{thorno}} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc}\%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (kV) = 0,852 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente transf sub}} (kVA) = 41660 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} \text{ 8.38 \%}$$

$$X_{\text{thorno}} = \frac{10 * (0,852 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,00146 \Omega = 1,46 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{\text{tCu}} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\text{mdz}} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\text{elec}} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{\text{tCu}} + X_{\text{mdz}} + X_{\text{elec}} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{\text{total}\#6} = X_{\text{red}} + X_{\text{tsub}} + X_{\text{reactor}} + X_{\text{thorno}} + X_{\text{reactor}} = 8,08 \text{ m}\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #5

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 812 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (kV) = 812 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente linea}} (kVA) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{\text{red}} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,812\ kV$$

$$S_{cn} = S_{apatente\ transf\ sub} (kVA) = 45000\ kVA$$

$$Z_{cc} = 11.8\ \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,812\ kV)^2 * 11,8\%}{45000\ kVA} = 0.0017\ \Omega = 1,7\ m\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (m\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,812\ kV$$

$$V_{2ns} = V_{sec\ tranf\ subestacion} (kV) = 23\ kV$$

$$R = R_{resistencia\ reactor} (m\Omega) = 1,8\ \Omega = 1800\ m\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800\ m\Omega \left(\frac{0,812\ kV}{23\ KV} \right)^2 = 2,2\ m\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,812\ kV$$

$$S_{cn} = S_{apatente\ transf\ sub} (kVA) = 41660\ kVA$$

$$Z_{cc} = 8.38\ \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,812\ kV)^2 * 8,38\%}{41660\ kVA} = 0,00133\ \Omega = 1,33\ m\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1\ m\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5\ m\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5\ m\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2\ m\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#5} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 7,52\ m\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #4

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 758 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 758 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente linea}} (\text{kVA}) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 0,758 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente transf sub}} (\text{kVA}) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11.8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,758 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0015 \Omega = 1,5 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (\text{m}\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 0,758 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{\text{sec tranf subestacion}} (\text{kV}) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{\text{resistencia reactor}} (\text{m}\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,758 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 2,0 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{\text{sec tranf horno}} (\text{kV}) = 0,758 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{\text{aparente transf sub}} (\text{kVA}) = 41660 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} 8.38 \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,758 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,00116 \Omega = 1,16 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#4} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 6,81 \text{ m}\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #3

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 711 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 711 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{apate\ line\ a} (\text{kVA}) = 3000000 \text{ kVA}$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 0,711 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{apate\ transf\ sub} (\text{kVA}) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11,8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,711 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0,0013 \Omega = 1,3 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (\text{m}\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (\text{kV}) = 0,711 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{sec\ tranf\ subestacion} (\text{kV}) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{resistencia\ reactor} (\text{m}\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,711 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 1,7 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,711\ kV$$

$$S_{cn} = S_{apate\ tranf\ sub} (kVA) = 41660\ kVA$$

$$Z_{cc} = 8,38\ \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,711\ kV)^2 * 8,38\%}{41660\ kVA} = 0,00102\ \Omega = 1,02\ m\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1\ m\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5\ m\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5\ m\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2\ m\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#3} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 6,23\ m\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #2

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 670\ V = KV2B$$

$$S_{cn} = 3\ GVA = KVAB$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 670\ V$$

$$S_{cn} = S_{apate\ linea} (kVA) = 3000000\ kVA$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,1\ m\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc} \%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,67\ kV$$

$$S_{cn} = S_{apate\ tranf\ sub} (kVA) = 45000\ kVA$$

$$Z_{cc} = 11,8\ \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,67 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0012 \Omega = 1,2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (m\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (kV) = 0,67 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{sec \text{ tranf subestacion}} (kV) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{resistencia \text{ reactor}} (m\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,67 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 1,5 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc}\%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (kV) = 0,67 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{aparente \text{ transf sub}} (kVA) = 41660 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} \text{ 8.38 \%}$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,67 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,0090 \Omega = 0,90 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#2} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 5,76 \text{ m}\Omega$$

- Reactancia de corto circuito para el tap changer #1

Reactancia de línea en la sub estación

$$V_{2n} = 633 \text{ V} = \text{KV}2B$$

$$S_{cn} = 3 \text{ GVA} = \text{KVAB}$$

$$V_{2n} = V_{sec \text{ tranf horno}} (kV) = 633 \text{ V}$$

$$S_{cn} = S_{aparente\ linea} (kVA) = 3000000kVA$$

$$X_{red} = \frac{(V_{2n})^2}{S_{cn}} = 0,1 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador de la sub estación

$$X_{tsub} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc}\%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,633 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{aparente\ transf\ sub} (kVA) = 45000 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} = 11.8 \%$$

$$X_{tsub} = \frac{10 * (0,633 \text{ kV})^2 * 11,8\%}{45000 \text{ kVA}} = 0.0011 \Omega = 1,1 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del reactor

$$X_{reactor} = R (m\Omega) \left(\frac{V_{2n}}{V_{2ns}} \right)^2$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,633 \text{ kV}$$

$$V_{2ns} = V_{sec\ tranf\ subestacion} (kV) = 23 \text{ kV}$$

$$R = R_{resistencia\ reactor} (m\Omega) = 1,8\Omega = 1800 \text{ m}\Omega$$

$$X_{reactor} = 1800 \text{ m}\Omega \left(\frac{0,633 \text{ kV}}{23 \text{ KV}} \right)^2 = 1,4 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{thorno} = \frac{10 * (V_{2n})^2 * Z_{cc}\%}{S_{cn}}$$

$$V_{2n} = V_{sec\ tranf\ horno} (kV) = 0,633 \text{ kV}$$

$$S_{cn} = S_{aparente\ transf\ sub} (kVA) = 41660 \text{ kVA}$$

$$Z_{cc} 8.38 \%$$

$$X_{thorno} = \frac{10 * (0,633 \text{ kV})^2 * 8,38\%}{41660 \text{ kVA}} = 0,0081 \Omega = 0,81 \text{ m}\Omega$$

Reactancia del transformador del horno

$$X_{tCu} = \text{Reactancia tubo de cobre} = 1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{mdz} = \text{Reactancia mordaza} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$X_{elec} = \text{Reactancia electrodo} = 0,5 \text{ m}\Omega$$

$$= X_{tCu} + X_{mdz} + X_{elec} = 2 \text{ m}\Omega$$

Reactancia total X_{horno}

$$X_{total\#1} = X_{red} + X_{tsub} + X_{reactor} + X_{thorno} + X_{reactor} = 5,35 \text{ m}\Omega$$

Tabla 2.1. Reactancia para cada tap changer

Tap del transformador	V secundario transformador (V)	Xcc (mΩ)
9	1000	10,37
8	945	9,47
7	896	8,72
6	852	8,08
5	812	7,52
4	758	6,81
3	711	6,23
2	670	5,76
1	633	5,35

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

2.1.2. Análisis de la curva de operación

Las curvas de operación permiten analizar los puntos en los cuales el funcionamiento del horno es más eficiente, además se puede determinar el área optima de trabajo como punto de partida para implementar los nuevos perfiles de operación del horno.

En las figuras 2.1 a y b, se representan las curvas de potencias, longitud de arco, factor de potencia y el rendimiento eléctrico, estas curvas son obtenidas luego de realizar las operaciones matemáticas correspondientes para cada tap-changer, en las siguientes figuras se aprecia el análisis para el tap changer #9 siguiendo los siguientes pasos de análisis.

- El punto de inflexión (P1) es representado al considerar las siguientes curvas: el factor de potencia (fp), potencia activa (P), potencia reactiva (Q), y potencia aparente (S) el punto indica la máxima corriente de operación (Iop) que el sistema del horno permite funcionar de manera eficiente para obtener la máxima potencia activa, considerando que hacia el lado derecho del punto (P1) a pequeños incrementos de potencia activa (P) le corresponde grandes incrementos de corriente por lo tanto aumenta las pérdidas eléctricas y se sobrecarga el transformador, por lo tanto es recomendable trabajar hacia la izquierda del punto en cuestión.
- El punto (P2) indica la corriente nominal máxima del transformador a carga nominal.

- Para determinar el punto óptimo de operación del horno se debe considerar otros aspectos adicionales a los eléctricos como: la densidad de la chatarra, el índice de erosión del refractario, el consumo de electrodo y el tiempo de power on y of, sin embargo para nuestro caso desde el punto de vista eléctrico dentro del área 3 (A3) se encuentra la zona de trabajo más eficiente del horno, comprendida entre un factor de potencia de no mayor a 0,9 ni menor a 0,77, para los diferentes tap changer se puede lograr opciones de funcionamiento más adecuados para el horno, obteniendo un menor consumo de energía por tonelada producida.

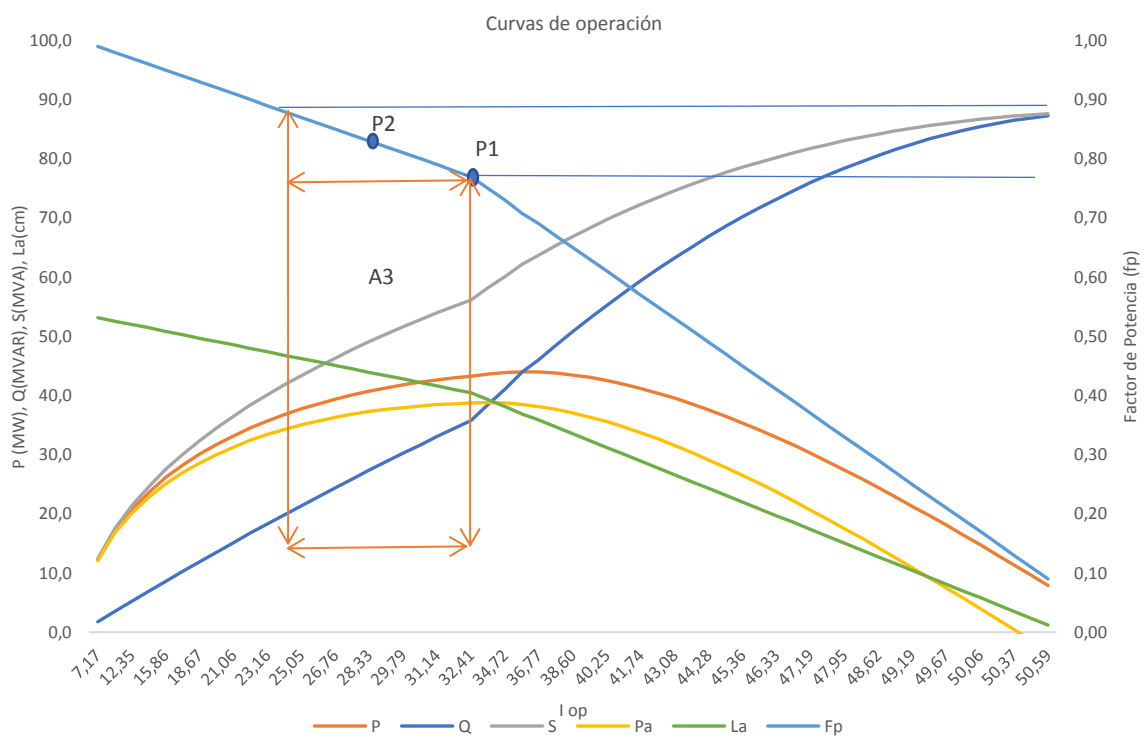


Figura 2.1a. Área de operación.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

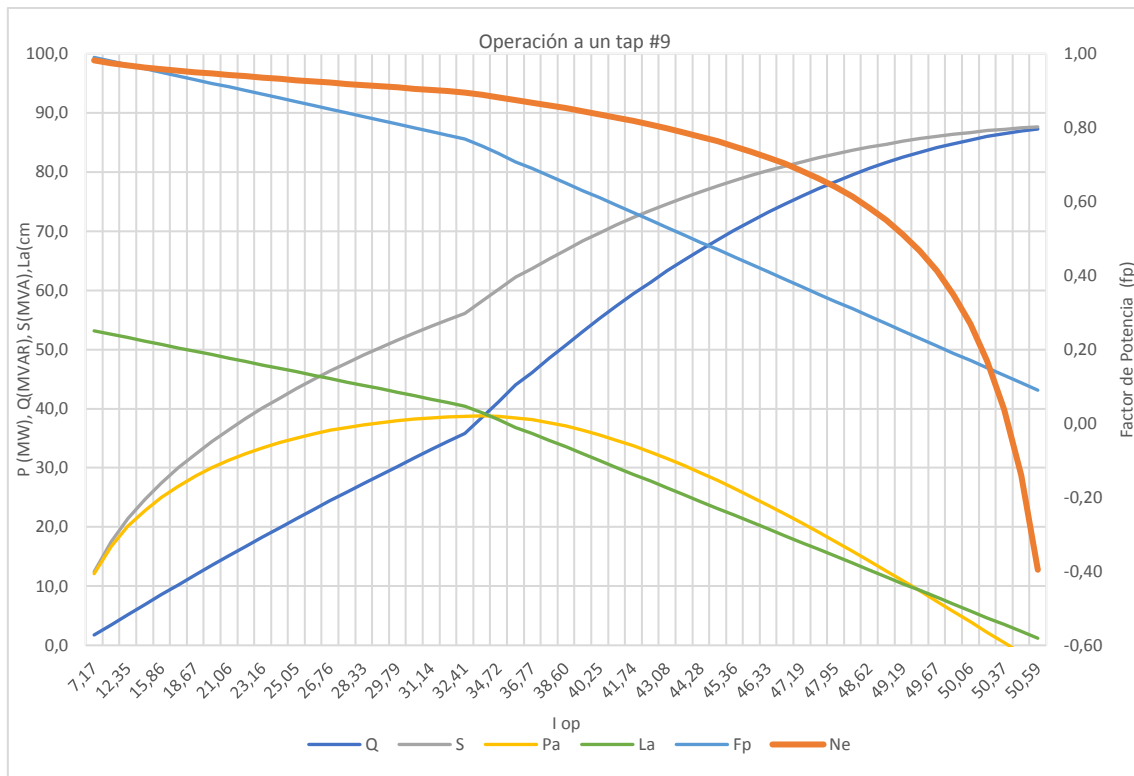


Figura 2.1b. Curva de funcionamiento.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

La operación del horno con unos perfiles adecuados de funcionamiento permite disminuir el consumo de energía por tonelada, mejorar el rendimiento eléctrico siempre y cuando se opere a la izquierda del punto 1, al analizar la figura 2.1b el rendimiento eléctrico tiende a disminuir al operar al lado derecho del punto 1 por lo tanto el funcionamiento y el planteamiento de los perfiles se realizarán en el área 3 (A3). La operación con longitudes de arco largos aumenta el índice de erosión al refractario, disminuye el consumo de electrodos, pero el arco se vuelve más inestable por el efecto de reignición del arco, por lo tanto, menos efectividad del horno al calentar la carga.

2.1.3. Cálculo de la resistencia del sistema y la resistencia de arco

El cálculo de la resistencia del sistema permite obtener el valor de la resistencia de arco R_a . Considerando que $R_{op} = R + R_a$, conocido el valor de X_{op} y la transferencia máxima de potencia que se produce a un $fp = 0,707$, se utiliza la herramienta solver de excel para realizar las respectivas iteraciones en la ecuación (1.31).

$$\cos \theta = \frac{R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}}{\sqrt{\left(R + \sqrt{R^2 + X_{op}^2}\right)^2 + X_{op}^2}}$$

Obteniendo los siguientes resultados para los respectivos valores de tap:

Tabla 2.2. Resistencia del sistema.

Tap del transformador	R(mΩ)
9	4,34
8	4,05
7	3,65
6	3,30
5	3,00
4	2,62
3	2,31
2	2,06
1	1,84

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

R_{op} =La resistencia de operación es la suma de la resistencia del sistema y la resistencia de arco

R = La resistencia del sistema comprende todos los accesorios y cables en los que circula la corriente eléctrica.

R_a =Resistencia de arco.

2.2. Implementación de nuevos perfiles

Los perfiles o recetas de operación son ingresadas a un sistema de control mediante una HMI el cual es comandado por un PLC, las recetas están integradas por dos conjuntos de datos que controlan la energía eléctrica y la energía química que serán entregadas al horno, considerando que el aporte de la energía eléctrica es alrededor del 70 % y el aporte de energía química es del 30 % aproximadamente, esto depende de algunos factores como el costo de este tipo de energías en diferentes países, la disponibilidad y el acceso a las mismas, etc.

Los perfiles se ingresan para configurar el funcionamiento de operación del horno interviniendo en cada una de las cargas de chatarra y en la etapa de afino, normalmente un horno opera con 2, 3 y hasta 4 cargas que conforman una colada completa con un tonelaje máximo que oscilan entre 30 t, 40 t, 100 t, para nuestro caso el estudio se realizó en un horno de 30 t. La operación óptima de trabajo en cuanto al consumo de energía eléctrica en cada carga tiene un factor de consumo máximo de $280 \frac{kWh}{t}$, si el horno trabaja con un factor $290 \frac{kWh}{t}$ hay algún problema de funcionamiento que debe ser analizado y corregido.

Una etapa de afino eficiente trabaja con un factor entre $50 \frac{kWh}{t}$ y $100 \frac{kWh}{t}$ si el consumo es superior a $100 \frac{kWh}{t}$ hay problemas en el proceso en especial en la etapa de perforación y fundición.

Por ejemplo, para una colada de 30 t dividida en dos cargas, si en la primera carga ingresan 20 t al multiplicar por el factor de $280 \frac{kWh}{t}$ la primera carga a consumido 5600 kWh, si en la segunda carga ingresa 10 t y al multiplicar por el factor se ha consumido 2800 kWh, en la etapa de afino se funden las 30t tonales y multiplicadas por el factor de $100 \frac{kWh}{t}$ se ha consumido 3000 kWh por lo tanto la energía total consumida será de 11400 kWh para 30t.

Los parámetros que constituyen los perfiles de funcionamiento eléctrico pueden ser modificados para mejorar la eficiencia del horno siendo estos los que se aprecian en la tabla 2.3.

- El número de tap-changer del transformador.
- La curva de corriente
- El tipo de sistema de regulación si es por Impedancia (Z) o por corriente (I).

Tabla 2.3. Ejemplo de perfil de funcionamiento de un horno de arco.

	CARGA #1									
#Pasos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energía específica [kWh/t]	25	50	80	120	140	160	180	220	250	280
Tap Changaer [#]	1	3	4	5	5	5	4	4	3	3
Curva Corriente [#]	8	10	10	9	10	10	8	7	7	7
Regulación [1=I] [0=Z]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(Fuente: Planta Industrial Adelca)

La metrología para la creación de los nuevos perfiles se parte de los valores nominales de corriente para cada tap changer del transformador, para el diseño se ha tomado un 2,5 % de la corriente entre cada una de las curvas, ver tabla 2.4 en adelante.

Los criterios para la elaboración de las tablas para cada curva de corriente se fundamentan en considerar: la longitud de arco, el coeficiente de desgaste del refractario y el consumo de electrodos, para el efecto se construyen 10 tablas para cada curva de corriente, considerando la reactancia de corto circuito previamente calculada, la reactancia de operación, el voltaje de arco, de esta manera se obtiene la longitud de arco (La), el coeficiente de desgaste de refractario (IER) y el índice de consumo de electrodos.

En las tablas desde la 2.5 hasta 2.14, como resultado de las operaciones algebraicas empleadas, se genera un rango de operación eficiente del factor de potencia para cada una de las curvas como se puede observar en las tablas siguientes, este rango equivale al área donde la operación del horno es la más óptima, analizando las tablas se determina que a mayor longitud de arco mayor es el desgaste del refractario ya que se va aumentando los tap changer y por ende el voltaje de arco, pero la corriente disminuye, siendo esta una característica del horno de arco que a mayor voltaje disminuye la corriente, ya que la resistencia de operación o de arco no es constante y depende del factor de potencia.

Tabla 2.4. Corrientes al 2.5% en diferentes taps changers.

Curva de Corriente	Corriente del electrodo en función de la curva de corriente en (kA)								
	TAP 9	TAP 8	TAP 7	TAP 6	TAP 5	TAP 4	TAP 3	TAP 2	TAP 1
10	28,8	30,5	32,2	33,9	35,5	38,1	40,6	40,6	40,6
9	28,1	29,7	31,4	33,1	34,6	37,1	39,6	39,6	39,6
8	27,4	29,0	30,6	32,2	33,7	36,2	38,6	38,6	38,6
7	26,7	28,3	29,8	31,4	32,9	35,3	37,6	37,6	37,6
6	26,0	27,6	29,1	30,6	32,1	34,4	36,7	36,7	36,7
5	25,4	26,9	28,4	29,9	31,3	33,6	35,8	35,8	35,8
4	24,7	26,2	27,7	29,1	30,5	32,7	34,9	34,9	34,9
3	24,1	25,5	27,0	28,4	29,7	31,9	34,0	34,0	34,0
2	23,5	24,9	26,3	27,7	29,0	31,1	33,2	33,2	33,2
1	22,9	24,3	25,6	27,0	28,3	30,3	32,3	32,3	32,3

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.5. Análisis de la curva 10.

Tap Changer	Curva #10								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ϕ	Cos ϕ	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,65	0,76	277,3	1,8	237,29	176,5	1,72
#02	5,76	6,31	0,66	0,75	289,7	2,0	249,72	192,7	1,65
#03	6,23	6,83	0,68	0,74	302,7	2,3	262,75	210,4	1,58
#04	6,81	7,46	0,65	0,76	332,6	2,6	292,65	238,3	1,45
#05	7,52	8,24	0,62	0,78	366,3	3,0	326,30	269,3	1,33
#06	8,08	8,86	0,61	0,79	389,7	3,3	349,67	291,0	1,26
#07	8,72	9,56	0,59	0,80	415,8	3,6	375,81	314,7	1,20
#08	9,47	10,38	0,58	0,81	444,4	4,0	404,37	340,5	1,14
#09	10,37	11,37	0,57	0,82	475,6	4,3	435,59	368,3	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.6. Análisis de la curva 9.

Tap Changer	Curva #9								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,64	0,77	282,3	1,8	242,29	178,3	1,70
#02	5,76	6,31	0,65	0,76	295,3	2,0	255,27	195,1	1,62
#03	6,23	6,83	0,66	0,75	309,0	2,3	268,95	213,6	1,55
#04	6,81	7,46	0,63	0,77	338,6	2,6	298,60	240,8	1,43
#05	7,52	8,24	0,61	0,79	372,0	3,0	332,02	270,8	1,32
#06	8,08	8,86	0,60	0,80	395,3	3,3	355,34	292,0	1,25
#07	8,72	9,56	0,58	0,81	421,4	3,6	381,40	315,2	1,19
#08	9,47	10,38	0,57	0,82	449,9	4,0	409,90	340,3	1,13
#09	10,37	11,37	0,55	0,83	481,1	4,3	441,12	367,5	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.7. Análisis de la curva 8.

Tap Changer	Curva #8								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,62	0,79	287,0	1,8	246,96	179,7	1,68
#02	5,76	6,31	0,63	0,78	300,4	2,0	260,45	197,0	1,60
#03	6,23	6,83	0,64	0,77	314,7	2,3	274,73	216,1	1,53
#04	6,81	7,46	0,62	0,79	344,2	2,6	304,16	242,5	1,41
#05	7,52	8,24	0,59	0,80	377,4	3,0	337,38	271,7	1,31
#06	8,08	8,86	0,58	0,81	400,7	3,3	360,65	292,4	1,24
#07	8,72	9,56	0,57	0,82	426,6	3,6	386,64	315,0	1,19
#08	9,47	10,38	0,55	0,83	455,1	4,0	415,10	339,5	1,13
#09	10,37	11,37	0,54	0,84	486,3	4,3	446,32	366,1	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.8. Análisis de la curva 7.

Tap Changer	Curva #7								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,60	0,80	291,3	1,8	251,34	180,6	1,66
#02	5,76	6,31	0,61	0,79	305,4	2,0	265,43	198,3	1,58
#03	6,23	6,83	0,63	0,78	320,3	2,3	280,30	218,1	1,51
#04	6,81	7,46	0,60	0,80	349,4	2,6	309,43	243,7	1,40
#05	7,52	8,24	0,58	0,82	382,4	3,0	342,43	272,0	1,30
#06	8,08	8,86	0,57	0,82	405,8	3,3	365,77	292,3	1,24
#07	8,72	9,56	0,55	0,83	431,8	3,6	391,85	314,2	1,18
#08	9,47	10,38	0,54	0,84	459,8	4,0	419,78	338,2	1,13
#09	10,37	11,37	0,53	0,85	491,2	4,3	451,17	364,1	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.9. Análisis de la curva 6.

Tap Changer	Curva #6								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,59	0,81	295,4	1,8	255,43	181,0	1,64
#02	5,76	6,31	0,60	0,80	310,0	2,0	269,95	199,1	1,56
#03	6,23	6,83	0,61	0,79	325,3	2,3	285,34	219,4	1,49
#04	6,81	7,46	0,59	0,81	354,3	2,6	314,30	244,2	1,39
#05	7,52	8,24	0,56	0,83	387,1	3,0	347,15	271,8	1,29
#06	8,08	8,86	0,55	0,83	410,4	3,3	370,44	291,6	1,23
#07	8,72	9,56	0,54	0,84	436,5	3,6	396,46	312,9	1,18
#08	9,47	10,38	0,52	0,85	464,4	4,0	424,39	336,4	1,13
#09	10,37	11,37	0,51	0,86	495,8	4,3	455,77	361,7	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.10. Análisis de la curva 5.

Tap Changer	Curva #5								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,57	0,82	299,3	1,8	259,28	181,1	1,63
#02	5,76	6,31	0,58	0,81	314,2	2,0	274,19	199,5	1,55
#03	6,23	6,83	0,59	0,80	330,1	2,3	290,06	220,1	1,48
#04	6,81	7,46	0,57	0,82	358,9	2,6	318,87	244,3	1,38
#05	7,52	8,24	0,55	0,84	391,6	3,0	351,58	271,1	1,28
#06	8,08	8,86	0,54	0,84	414,8	3,3	374,84	290,4	1,23
#07	8,72	9,56	0,52	0,85	440,8	3,6	400,80	311,2	1,18
#08	9,47	10,38	0,51	0,86	468,7	4,0	428,73	334,1	1,13
#09	10,37	11,37	0,50	0,87	500,1	4,3	460,11	358,9	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.11. Análisis de la curva 4.

Tap Changer	Curva #4								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,56	0,83	302,9	1,8	262,88	180,9	1,62
#02	5,76	6,31	0,57	0,82	318,2	2,0	278,17	199,4	1,54
#03	6,23	6,83	0,58	0,81	334,5	2,3	294,49	220,4	1,46
#04	6,81	7,46	0,56	0,83	363,2	2,6	323,16	243,9	1,37
#05	7,52	8,24	0,54	0,84	395,7	3,0	355,75	270,0	1,28
#06	8,08	8,86	0,52	0,85	419,0	3,3	378,98	288,8	1,23
#07	8,72	9,56	0,51	0,86	444,9	3,6	404,89	309,0	1,18
#08	9,47	10,38	0,50	0,87	472,8	4,0	432,82	331,5	1,13
#09	10,37	11,37	0,49	0,87	504,2	4,3	464,21	355,7	1,08

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.12. Análisis de la curva 3.

Tap Changer	Curva #3								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,55	0,84	306,3	1,8	266,27	180,3	1,61
#02	5,76	6,31	0,55	0,83	321,9	2,0	281,90	199,0	1,53
#03	6,23	6,83	0,57	0,82	338,6	2,3	298,64	220,3	1,45
#04	6,81	7,46	0,54	0,84	367,2	2,6	327,19	243,2	1,36
#05	7,52	8,24	0,52	0,85	399,7	3,0	359,67	268,5	1,28
#06	8,08	8,86	0,51	0,86	422,9	3,3	382,87	286,9	1,23
#07	8,72	9,56	0,50	0,87	448,7	3,6	408,74	306,6	1,18
#08	9,47	10,38	0,49	0,87	476,7	4,0	436,67	328,5	1,13
#09	10,37	11,37	0,47	0,88	508,1	4,3	468,06	352,1	1,09

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.13. Análisis de la curva 2.

Tap Changer	Curva #2								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,53	0,85	309,5	1,8	269,46	179,5	1,60
#02	5,76	6,31	0,54	0,84	325,4	2,0	285,41	198,3	1,52
#03	6,23	6,83	0,55	0,83	342,5	2,3	302,54	219,8	1,45
#04	6,81	7,46	0,53	0,85	371,0	2,6	330,99	242,0	1,36
#05	7,52	8,24	0,51	0,86	403,4	3,0	363,36	266,6	1,28
#06	8,08	8,86	0,50	0,87	426,5	3,3	386,54	284,6	1,23
#07	8,72	9,56	0,49	0,87	452,4	3,6	412,37	303,8	1,18
#08	9,47	10,38	0,47	0,88	480,3	4,0	440,31	325,2	1,13
#09	10,37	11,37	0,46	0,89	511,7	4,3	471,71	348,2	1,09

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.14. Análisis de la curva 1.

Tap Changer	Curva #1								
	Xcc	X [mΩ]	Sen ø	Cos ø	Va	Rop	La [mm]	IER [kW/cm ²]	CE [kg/t]
#01	5,35	5,86	0,52	0,85	312,5	1,8	272,46	178,4	1,59
#02	5,76	6,31	0,53	0,85	328,7	2,0	288,71	197,3	1,52
#03	6,23	6,83	0,54	0,84	346,2	2,3	306,21	218,9	1,44
#04	6,81	7,46	0,52	0,86	374,6	2,6	334,56	240,5	1,35
#05	7,52	8,24	0,50	0,87	406,8	3,0	366,84	264,5	1,28
#06	8,08	8,86	0,49	0,87	430,0	3,3	390,01	282,0	1,23
#07	8,72	9,56	0,47	0,88	455,8	3,6	415,79	300,7	1,18
#08	9,47	10,38	0,46	0,89	483,7	4,0	443,74	321,6	1,14
#09	10,37	11,37	0,45	0,89	515,1	4,3	475,14	344,1	1,10

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

En la tabla 2.15 se aprecia un resumen de las longitudes de arco para las diferentes curvas y tap changer del transformador, por ejemplo en lugar de operar a una curva #10 con un tap changer 2 a una longitud de 250 mm, se podría trabajar a una curva #7 con un tap changer 1 a una longitud de 251 mm ya que las longitudes arco son las mismas, de igual manera en lugar de operar a curva #10 con un tap changer 3 a 263mm se podría operar a una curva #7 con un tap changer 2 a una longitud de 265 mm.

La tabla 2.16 corrobora lo antes mencionado, si al plantear los nuevos perfiles de operación como es el caso de la curva #10 con un tap changer 2 a una curva #7 con un tap changer 1 el IER disminuiría de 193 a 181 permitiendo una reducción del gasto en refractarios, también permite que el horno trabaje de manera más eficiente ya que la energía no se desperdiciara por las paredes del horno y se aprovechada en su totalidad en la carga, generando una eficiencia en el consumo de energía y reduciendo los gastos de operación. En este punto se implementarán los nuevos perfiles de operación se analizará el consumo de energía, se monitoreará la temperatura en los paneles refrigerados, se considerará el desgaste del refractario, el análisis del punto de operación, y la estabilidad del arco eléctrico, realizando una comparación desde el punto de vista energético antes y después de ejecutar los cambios en la operación.

Tabla 2.15. Diseño de perfiles con diferentes longitudes de arco.

Curva de Corriente	Longitudes de arco								
	# de Tap changer								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
10	237	250	263	293	326	350	376	404	436
9	242	255	269	299	332	355	381	410	441
8	247	260	275	304	337	361	387	415	446
7	251	265	280	309	342	366	392	420	451
6	255	270	285	314	347	370	396	424	456
5	259	274	290	319	352	375	401	429	460
4	263	278	294	323	356	379	405	433	464
3	266	282	299	327	360	383	409	437	468
2	269	285	303	331	363	387	412	440	472
1	272	289	306	335	367	390	416	444	475

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 2.16. Diseño de perfiles con diferentes IER.

Curva de Corriente	IER (kWV/cm ²)								
	Tap changer								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
10	176	193	210	238	269	291	315	340	368
9	178	195	214	241	271	292	315	340	367
8	180	197	216	243	272	292	315	339	366
7	181	198	218	244	272	292	314	338	364
6	181	199	219	244	272	292	313	336	362
5	181	199	220	244	271	290	311	334	359
4	181	199	220	244	270	289	309	332	356
3	180	199	220	243	268	287	307	329	352
2	180	198	220	242	267	285	304	325	348
1	178	197	219	241	264	282	301	322	344

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

En la tabla 2.17 se aprecia que a curvas menores a la #10, menor es el consumo de electrodos (*kg/t*), esto generando un ahorro en el costo final de la producción, al realizar una fundición con la curva #7 en el tap changer 1 en comparación con la operación al trabajar con la curva #10 tap changer 2, se aprecia una disminución de la radiación al refractario y el consumo de electrodos.

Tabla 2.17. Diseño de perfiles con diferentes CE.

Curva de Corriente	CE (kg/t)								
	Tap changer								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
10	1,72	1,65	1,58	1,45	1,33	1,26	1,20	1,14	1,08
9	1,70	1,62	1,55	1,43	1,32	1,25	1,19	1,13	1,08
8	1,68	1,60	1,53	1,41	1,31	1,24	1,19	1,13	1,08
7	1,66	1,58	1,51	1,40	1,30	1,24	1,18	1,13	1,08
6	1,64	1,56	1,49	1,39	1,29	1,23	1,18	1,13	1,08
5	1,63	1,55	1,48	1,38	1,28	1,23	1,18	1,13	1,08
4	1,62	1,54	1,46	1,37	1,28	1,23	1,18	1,13	1,08
3	1,61	1,53	1,45	1,36	1,28	1,23	1,18	1,13	1,09
2	1,60	1,52	1,45	1,36	1,28	1,23	1,18	1,13	1,09
1	1,59	1,52	1,44	1,35	1,28	1,23	1,18	1,14	1,10

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Los nuevos perfiles se implementarán en el proceso de fundición de acero y se realizarán las pruebas para diferentes tipos de coladas sean de 2, 3 y 4 cargas según la planificación establecida por la producción los resultados serán presentados en el capítulo 3.

2.3. Punto de equilibrio

Al implementar los nuevos perfiles se realiza un análisis comparativo entre las curvas de operación establecidas mediante los cálculos matemáticos versus el comportamiento real del horno en el proceso de fundición.

Las curvas de operación que se presentan en las figuras 2.2 hasta la 2.10 son obtenidas luego de realizar las operaciones algebraicas correspondientes y han sido divididas en función del tap changer con el cual se está operando, esto permite identificar el punto óptimo de funcionamiento del horno.

Mediante el empleo de un analizador de energía se ha medido los valores de voltajes en cada fase, valores de corrientes en cada fase, el factor de potencia, la potencia activa, reactiva y aparente, en cada una de las etapas del horno para diferentes tipos de acero. En esta parte se analizará cada una de las etapas del proceso de fusión para una colada de acero completa, verificando en qué etapa de trabajo está operando el horno sea en la etapa de penetración, fusión, o afino. Se irá colocando los puntos sobre las gráficas de acuerdo a los diferentes tap changer para ver la diferencia entre la situación actual de operación versus la situación futura luego de implementar las nuevas técnicas de ahorro energético.

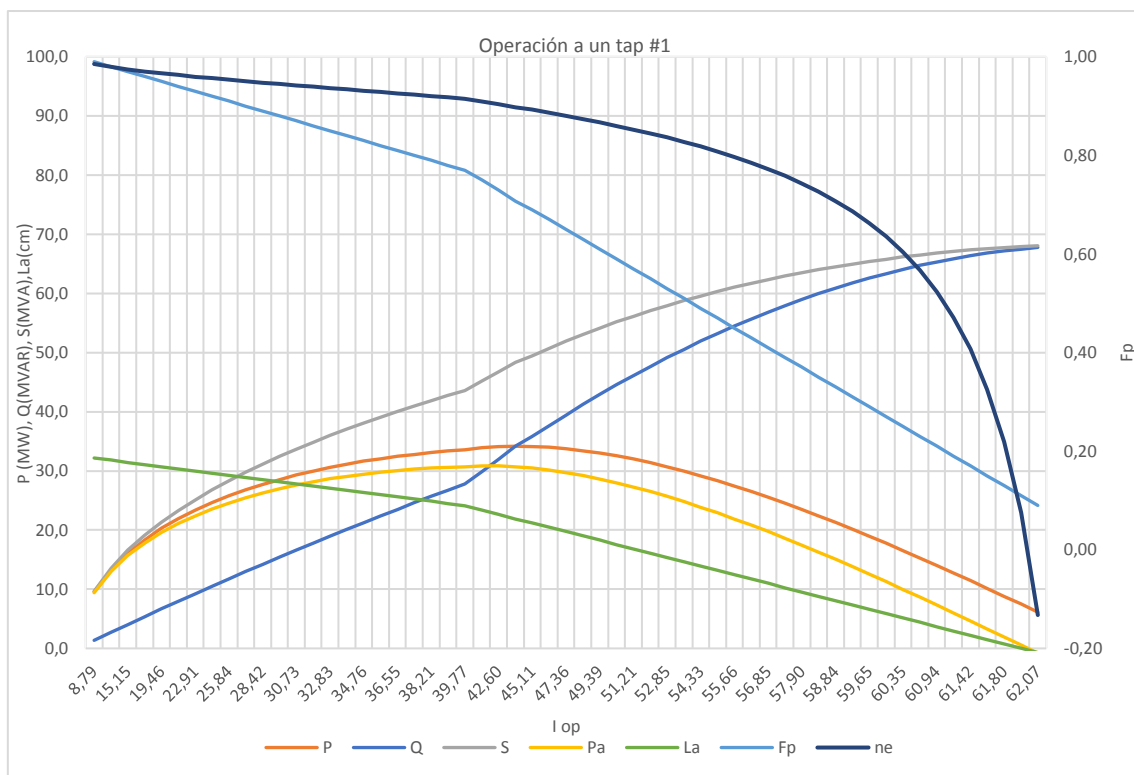


Figura 2.2. Funcionamiento del horno a un tap changer #1.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

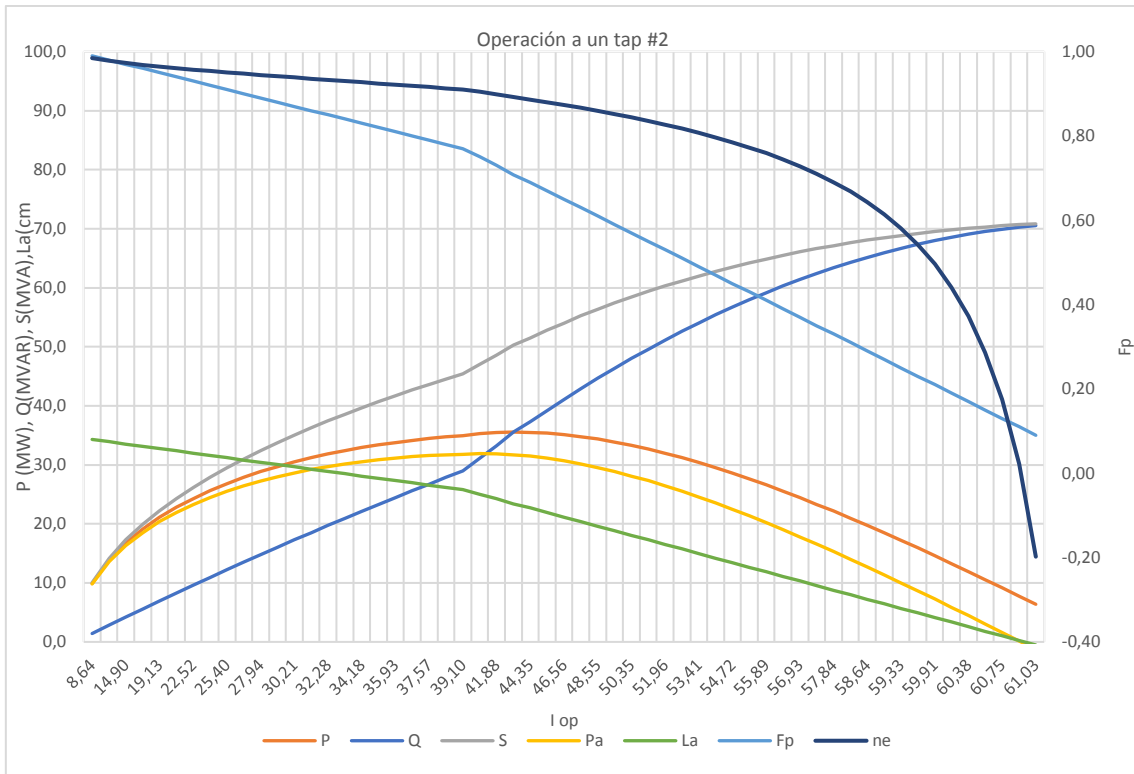


Figura 2.3. Funcionamiento del horno a un tap changer #2.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

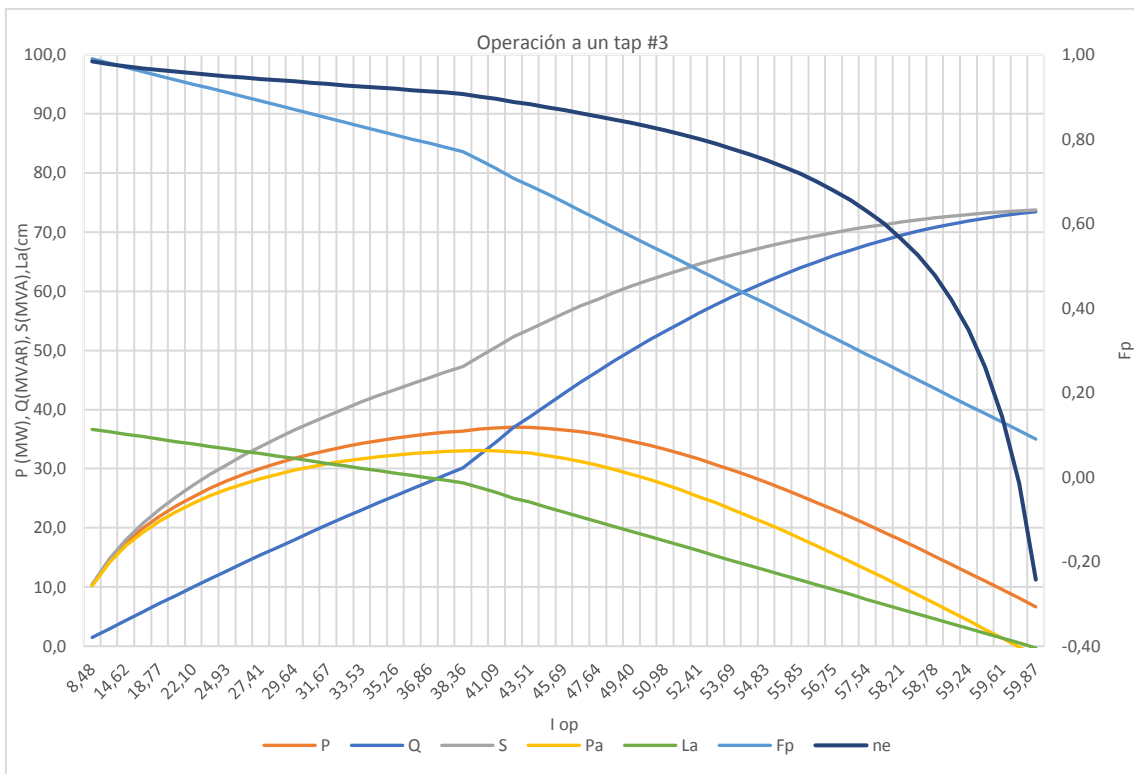


Figura 2.4. Funcionamiento del horno a un tap changer #3.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

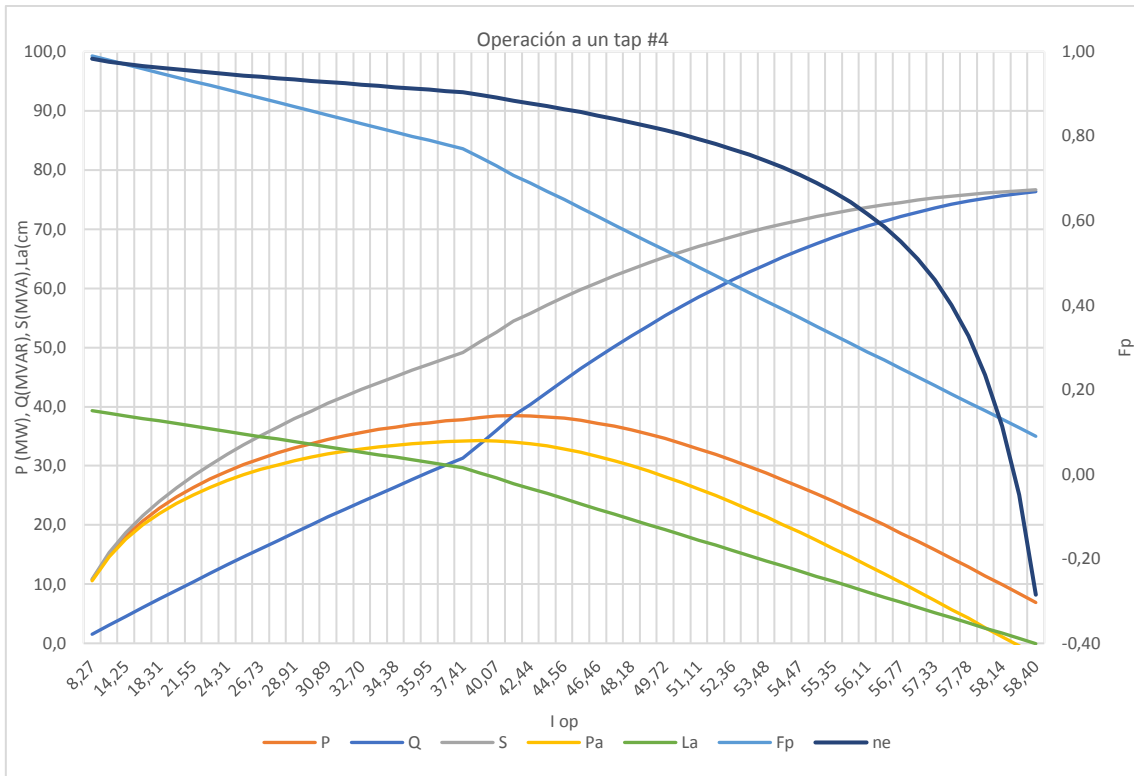


Figura 2.5. Funcionamiento del horno a un tap changer #4.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

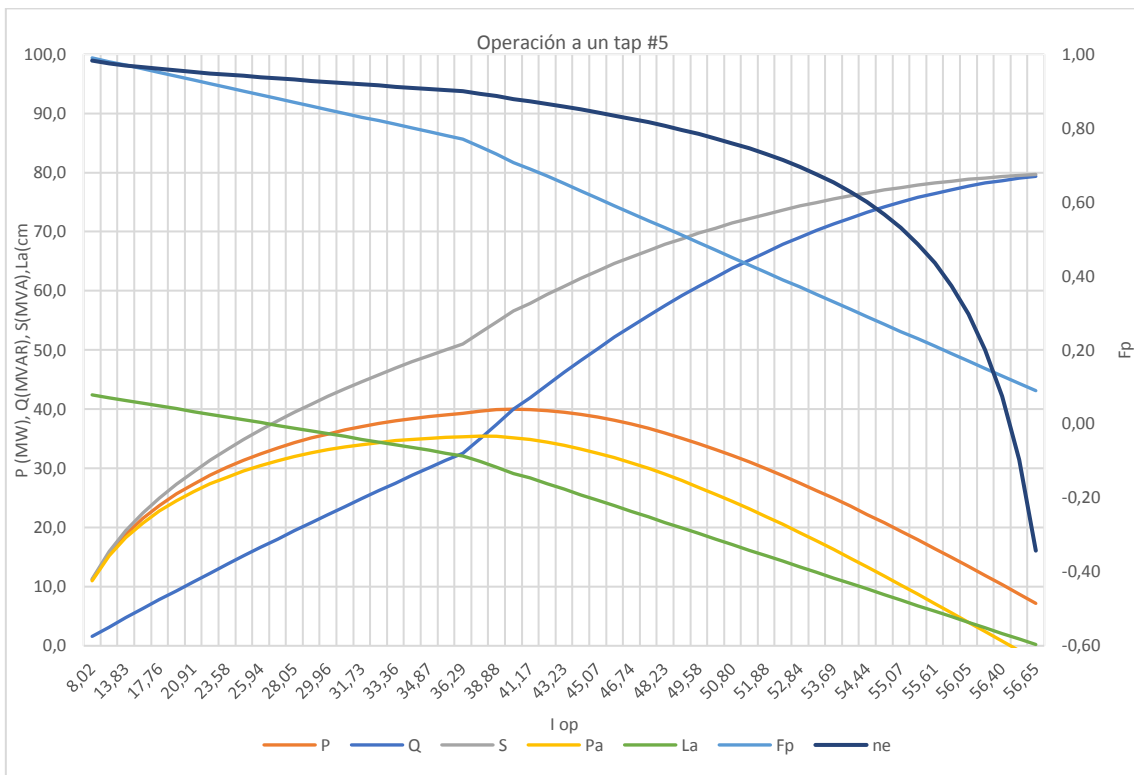


Figura 2.6. Funcionamiento del horno a un tap changer #5.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

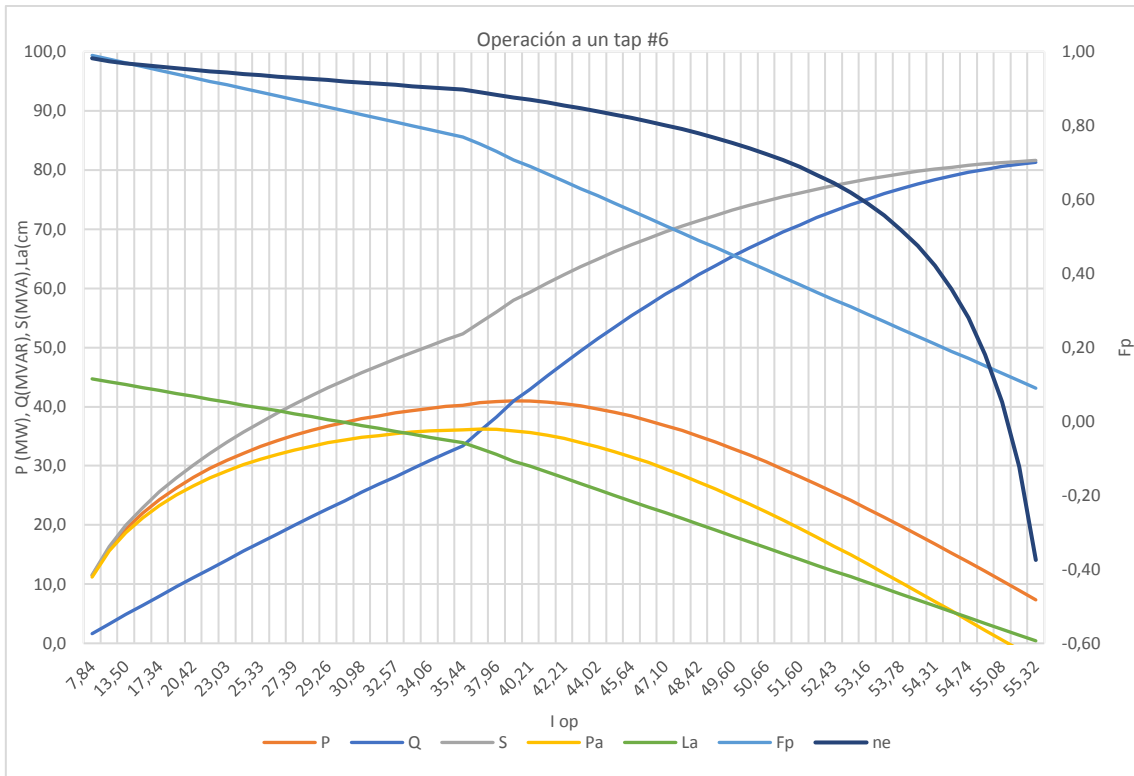


Figura 2.7. Funcionamiento del horno a un tap changer #6.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

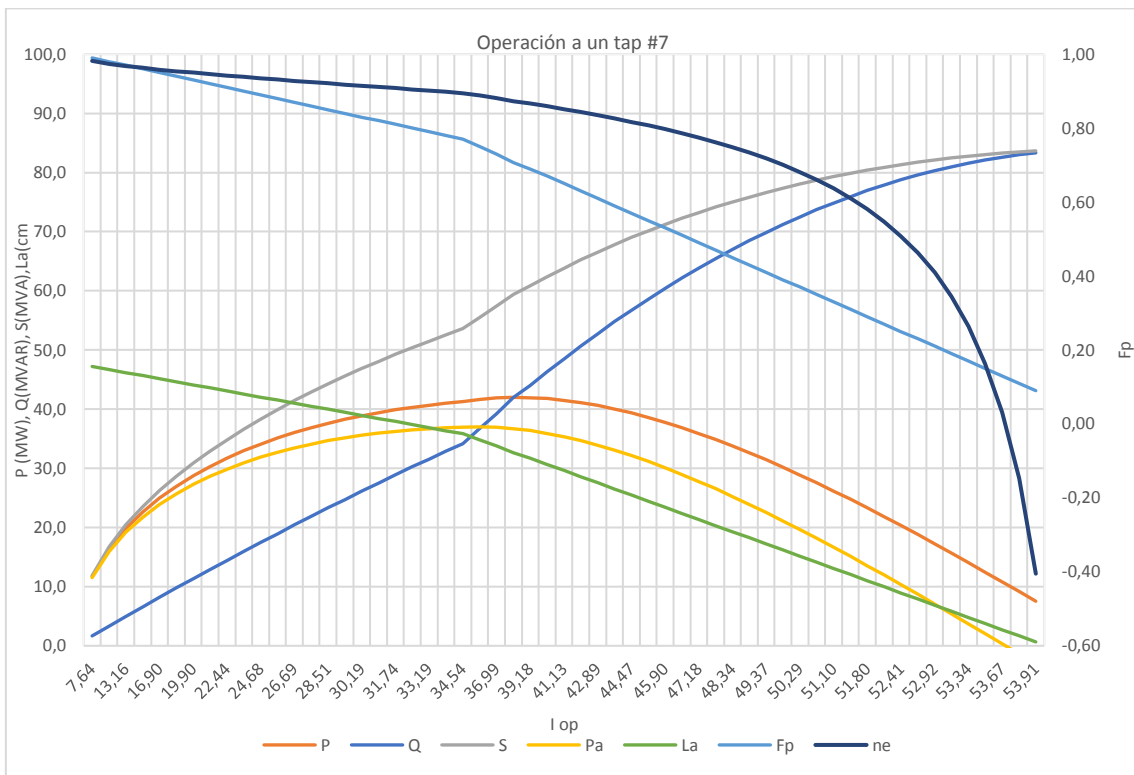


Figura 2.8. Funcionamiento del horno a un tap changer #7.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

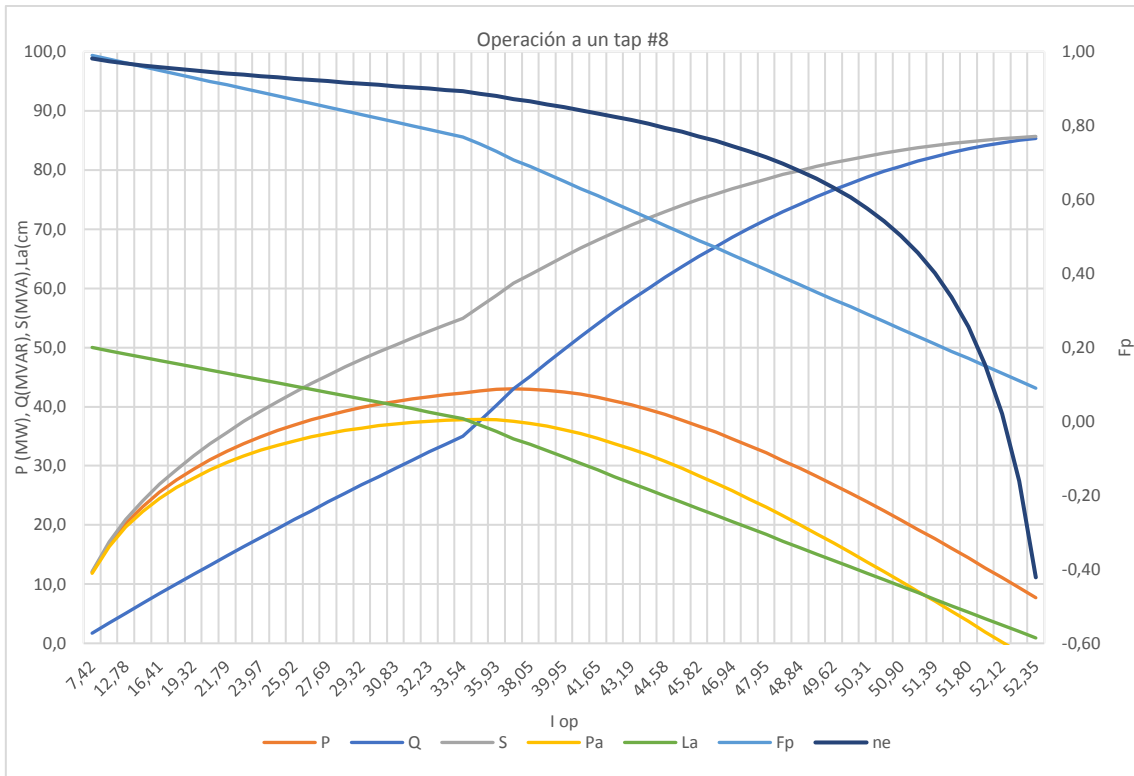


Figura 2.9. Funcionamiento del horno a un tap changer #8.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

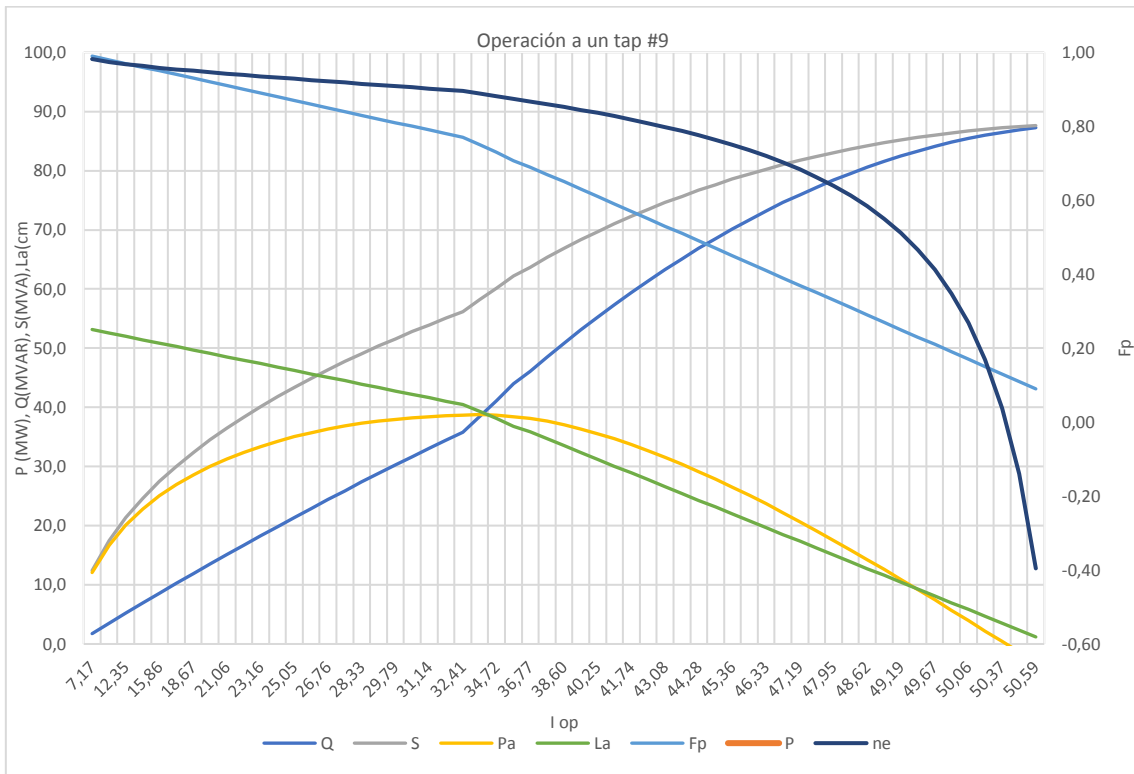


Figura 2.10. Funcionamiento del horno a un tap changer #9.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

2.4. Estabilidad del arco

2.4.1. Estabilidad del arco eléctrico mediante un modelamiento

Un indicador de importancia que permite identificar la estabilidad del arco es el análisis de las curvas de corriente y voltaje en las distintas etapas de la fundición, considerando que cada carga de chatarra tiene dos etapas de fundición bien definidas: la etapa de penetración que consiste en el contacto inicial entre los electrodos y la carga metálica, la fusión es la etapa en la cual toda la carga metálica sólida se funde y se convierte en acero líquido, y finalmente cuando todas las cargas han pasado por la etapa de penetración y fusión la carga total de acero cumple una etapa final denominada etapa de afino que permite aumentar la temperatura del acero y fundir alguna chatarra metálica que no ha sido fundida en la etapa de fusión. En la etapa de afino se puede analizar claramente el comportamiento del horno si está operando de manera estable o inestable, esto se debe a algunos factores que pueden alterar la estabilidad y no necesariamente factores eléctricos sino de carácter mecánico e hidráulico que serán analizados posteriormente.

En la figura 2.11 se aprecia la fundición de una colada completa, mediante el ingreso de dos cargas, y una interrupción del proceso denominado empalme donde el horno se detiene para realizar el alargamiento del electrodo más desgastado, esta parada lleva alrededor de unos 5 minutos.

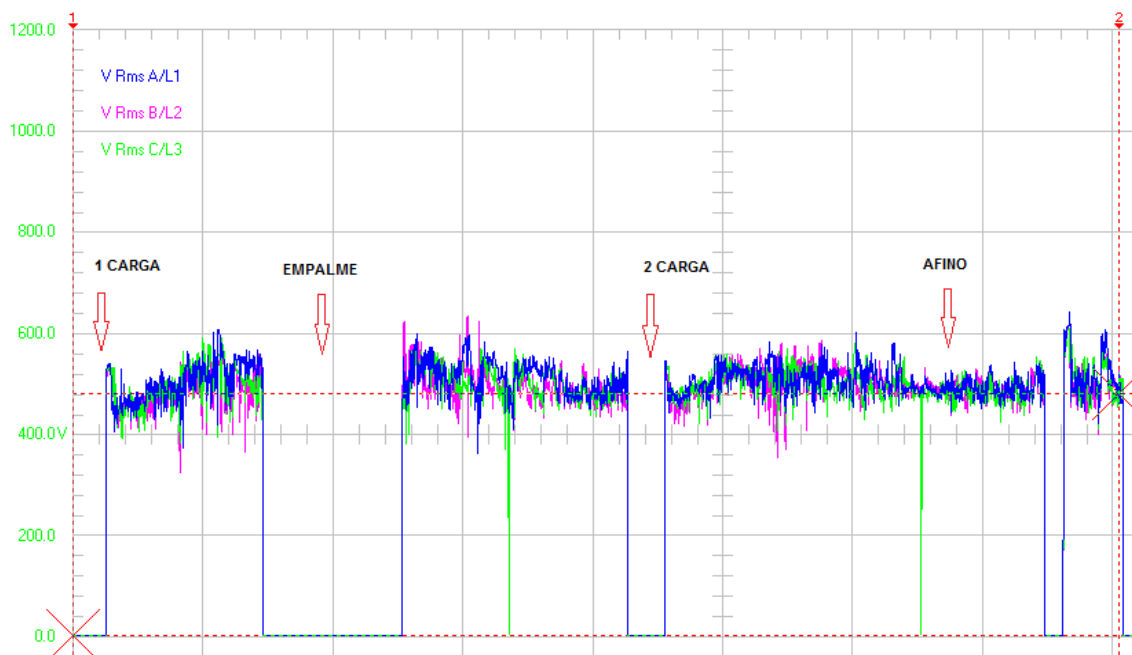


Figura 2.11. Curva de voltajes.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

El análisis se realiza en la etapa de afino donde todo el acero esta fundido y en estado líquido esta etapa equivale desde el punto de vista energético a tener una carga eléctrica estable que no varié su valor en el tiempo, al revisar las tendencias en la etapa de afino si todas las curvas sean de voltajes o corrientes equivalentes a las tres fases están sobrepuestas unas con otras indica que la operación del horno se mantiene en una zona estable y que los valores de voltaje y corriente son equivalentes, mientras que si las curvas muestran espacios en blanco unas con otras se debe a un desequilibrio de las fases pudiendo ser de carácter eléctrico, mecánico, hidráulico o productivo, una acción inmediata para corregir el problema es aumentar una de las ganancias de corriente en el sistema de control considerando la fase descompensada, esta acción produce un efecto en el sistema eléctrico la corriente se aumenta entre el 1 % al 5 % mientras tanto el voltaje disminuye, la longitud de arco de la fase correspondiente se ha reducido apreciando que él electrodo se acerca más a la carga compensado el punto de operación de la configuración Y entre los tres arco de acuerdo a la ecuación diferencial (2.12). El cambio de la ganancia se realiza directamente en el programa que contiene el PLC.

En la figura 2.12 se analiza el punto óptimo de funcionamiento P del arco, en la gráfica A se tienen longitudes de arco iguales que representa la configuración Y de los tres arcos y el punto neutro la carga metálica, por lo tanto, hay una distribución equitativa de la radiación hacia la carga produciéndose una estabilidad del arco, minimizando el calentamiento de los paneles refrigerados y el impacto al refractario.

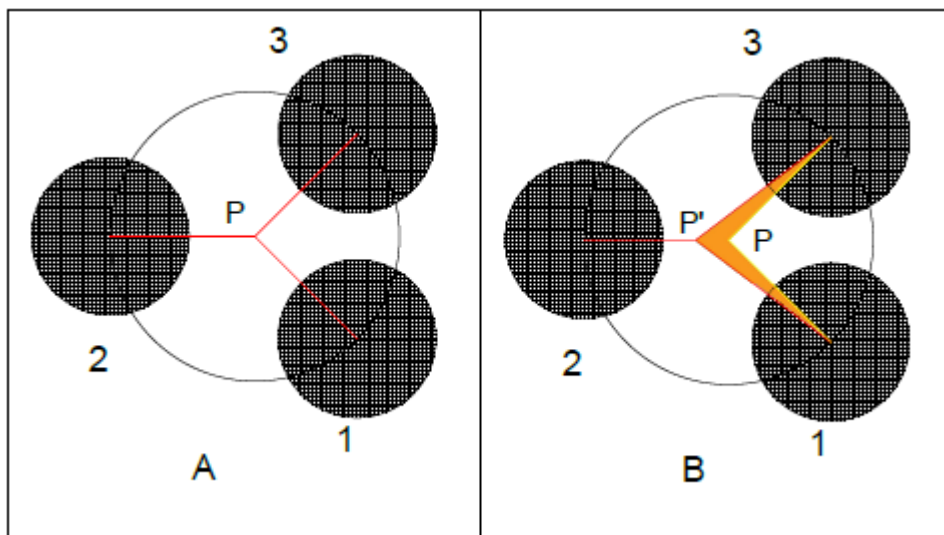


Figura 2.12. Punto de operación del arco.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

En la gráfica B se aprecia un desequilibrio ya que el horno está operando en el punto P' , la longitud del arco de la fase 2 es corta opera a una mayor corriente este efecto genera que los arcos de la fase 1 y 3 aumenten en longitud y trabajen a menores corrientes, en esta acción se aprecia un desequilibrio en la operación ya que el horno no está trabajando en el punto de operación óptimo P , por lo tanto hay que tomar correctivos uno de ellos es aumentar la ganancias de la fases 1 o 3 para disminuir las respectivas longitud de arco y forzar a que salga la operación del punto P' hacia el punto P .

El mantener un punto de operación equilibrado con longitudes de arco equivalentes optimiza el consumo energético ya que al trabajar con arcos desequilibrados con longitudes de diferentes medidas hace que la radiación del arco se proyecte a la paredes el horno, como consecuencia calienta los paneles refrigerados produciendo paradas de producción para cambiarlos, y al no recibir la carga líquida toda la energía por efecto que se desperdicia en los paneles y en el ambiente se prolonga el tiempo de fundición y por ende mayor consumo energético.

Por el contrario, al tener un equilibrio en los arcos eléctricos de las tres fases la energía irradiada es aprovechada en su totalidad por el acero líquido disminuyendo el tiempo de fundición y consumiendo menor cantidad de energía.

Cabe mencionar que cuando los registros de tiempo de operación en la planta que se está realizando el estudio sobrepasa el tiempo de fundición normal de 30 min, constituye un indicador para iniciar con el análisis de estabilidad de arco para tomar las respectivas acciones correctivas correspondientes.

- Verificar la velocidad al momento de subir y bajar cada una de las fases, en este punto al mover las fases deben tener las mismas velocidades de respuesta caso contrario se realizará un ajuste en la válvula proporcional.
- Revisar la limpieza de los rodillos que hacen de guía a los brazos de los electrodos si por alguna razón un rodillo se encuentra sucio o remordido el desplazamiento del electrodo no se efectúa con facilidad por lo tanto crea un desequilibrio en las longitudes de arco.
- Realizar una compensación de corriente para aumentar o disminuir la velocidad de respuesta de los electrodos, la compensación se efectuará directamente en el programa del PLC.

2.4.2. Modelamiento del arco eléctrico

El modelo del horno permite representar el comportamiento físico y compararlo con la situación real de funcionamiento para esta parte a empleado las ecuaciones de balance de energía y de la potencia del arco eléctrico, realizando un análisis del comportamiento físico interno del arco eléctrico. En la ecuación (2.1) se plantea el balance de energía donde Q es la energía térmica almacenada en el arco eléctrico, P es la potencia que se suministra al arco para nuestro estudio se considerara únicamente la potencia eléctrica, y P_0 es la potencia de pérdida del arco eléctrico que será transmitida al ambiente en forma de calor.

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_0 \quad (2.1)$$

La potencia P que ingresa al arco está dada por la ecuación (2.5), en la que g es la conductancia del arco eléctrico, i es la corriente instantánea del arco, y V es el voltaje instantáneo del arco.

$$V = iR \quad (2.2)$$

$$R = \frac{1}{g} \quad (2.3)$$

$$P = Vi \quad (2.4)$$

$$P = \frac{i^2}{g} \quad (2.5)$$

La ecuación (2.6) representa la potencia de pérdidas P_0 en función de la conductancia y la longitud del arco eléctrico, siendo k_1 y β constantes de pérdida, mientras L es la longitud de arco.

$$P_0 = k_1 g^{-\beta} L \quad (2.6)$$

La ecuación general de balance de energía (2.7) quedaría representada de la siguiente manera. En la ecuación (2.8) se multiplican a los dos extremos por dg .

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{i^2}{g} - k_1 g^{-\beta} L \quad (2.7)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{i^2}{g} - k_1 g^{-\beta} L \right) \frac{dg}{dQ} \quad (2.8)$$

El cilindro de la temperatura del arco es representado en la figura 2.13, Q es la energía que almacena el arco eléctrico.

$$Q = 0,354 p \left(1 - \frac{T_1}{T_0} \right) \pi r^2 L \quad (2.9)$$

p = presión del gas de operación del horno

T_0 = temperatura del cilindro en el que atraviesa el arco eléctrico

T_1 = temperatura del medio

$r = \frac{d}{2}$ radio del cilindro

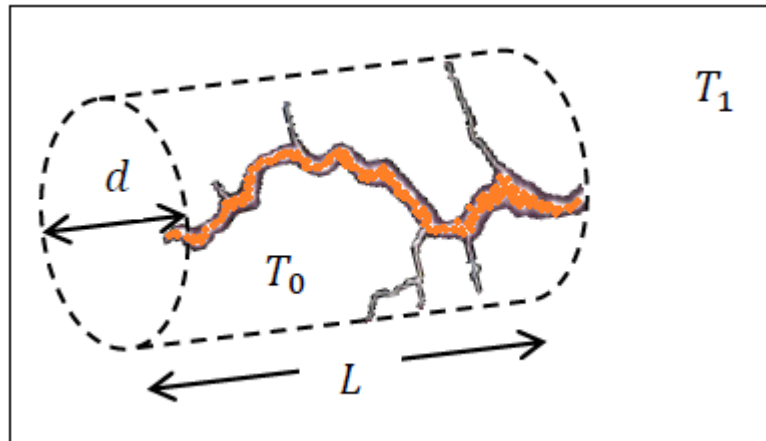


Figura 2.13. Cilindro de temperatura del arco.

(Fuente: Yan Wang, Zhizhong Mao, Yan Li, Huixin Tian, and Lifeng Feng, "Modeling and Parameter Identification of an Electric Arc,")

Considerando que el medio donde se produce el arco eléctrico tiene una presión de gas p y el calor específico del arco manteniéndose constantes, la conductancia del arco se representa por la siguiente ecuación que manifiesta el estado de ionización del arco con la temperatura y la presión.

$$g = \frac{\pi r^2 \sigma_0 e^{\frac{-\alpha}{T_0}}}{L} \quad (2.10)$$

σ_0 y α = constantes que dependen de las propiedades físicas del medio

La ecuación (2.11) se obtiene mediante las derivadas de las ecuaciones (2.10) y (2.9).

$$\frac{dg}{dQ} = \frac{\frac{dg}{dT_0}}{\frac{dQ}{dT_0}} = \frac{\frac{d\left(\frac{\pi r^2 \sigma_0 e^{\frac{-\alpha}{T_0}}}{L}\right)}{dT_0}}{\frac{d\left(0,354 p \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \pi r^2 L\right)}{dT_0}}$$

$$\frac{dg}{dQ} = \frac{\frac{\pi r^2 \sigma_0}{L} \frac{d}{dT_0} \left(\frac{-\alpha}{T_0}\right) e^{\frac{-\alpha}{T_0}}}{\frac{d\left(0,354 p \pi r^2 L - 0,354 p \pi r^2 L \frac{T_1}{T_0}\right)}{dT_0}}$$

$$\frac{dg}{dQ} = \frac{\frac{\pi r^2 \sigma_0 \alpha T_0^{-2} e^{-\frac{\alpha}{T_0}}}{L}}{0,354 p \pi r^2 L T_1 T_0^{-2}}$$

$$\frac{dg}{dQ} = \frac{\frac{\pi r^2 \sigma_0 \alpha T_0^{-2} e^{-\frac{\alpha}{T_0}}}{L}}{0,354 p \pi r^2 L T_1 T_0^{-2}} = k_2 \frac{g}{L} \quad (2.11)$$

$$k_2 = \frac{\alpha}{0,354 p \pi r^2 T_1}$$

Al reemplazar la ecuación (2.11) en la ecuación (2.8), se obtiene la ecuación general que representa el modelo del horno de arco eléctrico.

$$\frac{dg}{dt} = \left(\frac{i^2}{g} - k_1 g^{-\beta} L \right) k_2 \frac{g}{L}$$

$$\frac{dg}{dt} = \left(k_2 \frac{i^2}{L} - k_1 k_2 g^{-\beta} g \right)$$

$$\frac{dg}{dt} = \left(k_2 \frac{i^2}{L} - k_1 k_2 g^{-(\beta-1)} \right)$$

$$\frac{dg}{dt} = \left(k_2 \frac{i^2}{L} - k_1 k_2 g^{-\lambda} \right) \quad (2.12)$$

$$\lambda = \beta - 1$$

La estabilidad del arco se realiza mediante el ajuste de la ganancia K, considerando que el sistema de control del horno tiene como característica un lazo cerrado, la ganancia no modifica las características físicas del sistema. Es importante mencionar que la forma que identifica la inestabilidad del arco es mediante al análisis de las curvas de corriente y voltaje por cada fase del horno, en la figura 2.14 se representa la ganancia que al modificarla produce un cambio en la salida del sistema.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \quad (2.13)$$

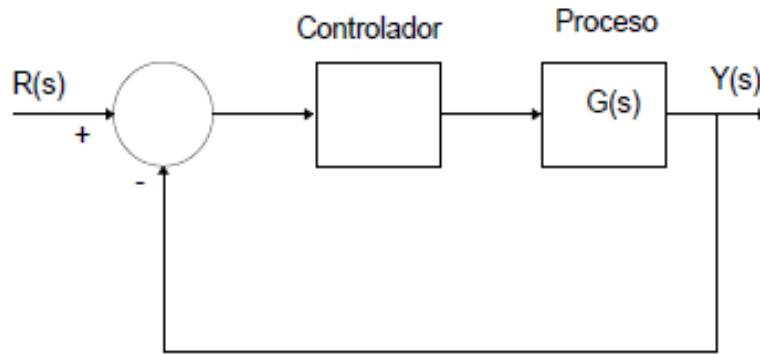


Figura 2.14. Ganancia ajustable.

(Fuente: R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control, conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*)

2.4.3. Estabilidad del arco eléctrico mediante el sistema de control

Evidentemente el estado y condiciones de los equipos del sistema hidráulico y mecánico afectan el correcto funcionamiento del horno, entre los más importantes se tiene:

- Estado y operatividad de las válvulas proporcionales
- Estado de los filtros de las válvulas proporcionales
- Estado de los filtros y del aceite del sistema hidráulico
- Estado de los rodamientos y limpieza de los rodillos guías

Si una de las causas mencionadas se presenta y está generando una inestabilidad del horno ese mal funcionamiento es apreciado en el análisis de las curvas de voltaje y corriente y como mayor impacto de un mal funcionamiento se ve reflejado en un aumento en el tiempo de fundición, aumento del consumo de energía eléctrica, estos datos se evaluaron registrando la información para cada colada fundida.

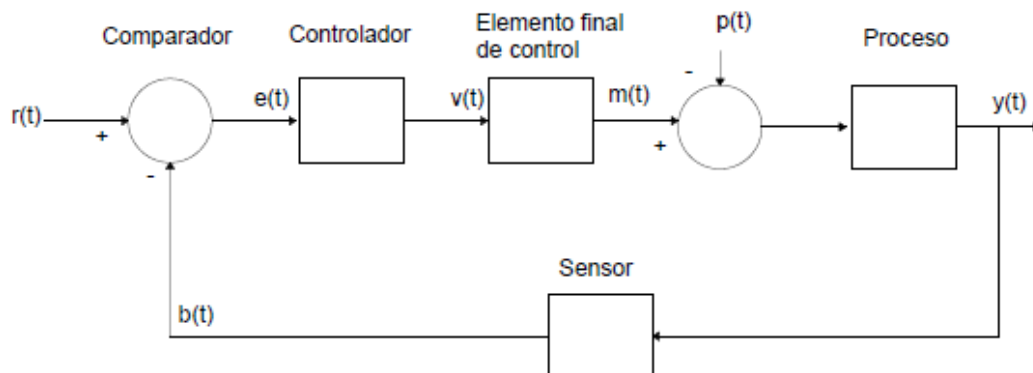
Al monitorear el funcionamiento del horno mediante el analizador de energía que fue conectado de tal forma que mida los valores de voltajes en el lado de la carga metálica y las corrientes en las tres fases se monitorio y registro las potencias, el factor de potencia y la energía consumida para cada colada, si el consumo de energía en un grupo de coladas aumenta con respecto a la media se inicia evaluando los estados de funcionamiento del sistema hidráulico y mecánico de la siguiente manera:

- Estado y operatividad de las electroválvulas: las válvulas proporcionales con el tiempo y el uso tienden a deteriorarse y fallar por lo tanto se ha procedido a cambiar las válvulas para corregir el problema de estabilidad.

- Estado de los filtros de las válvulas proporcionales: el daño en los filtros se comprobó que es uno de los factores más relevantes que inciden en un mal funcionamiento de las válvulas y por ende desequilibra la estabilidad del arco, por lo tanto, se ha procedido a realizar el cambio de una forma más cotidiana en los mantenimientos programados.
- Estado de los filtros y el aceite del sistema hidráulico: un factor que deteriora las válvulas y los filtros del sistema hidráulico es la calidad del aceite para lo cual se ha procedido a realizar pruebas al aceite para determinar la cantidad de agua que contiene y en lo posible cambiar todo el aceite del sistema evaluando los costos que esto conlleva.
- Estado de los rodamientos y limpieza de los rodillos guías: un factor externo que afecta el desplazamiento libre de los electrodos son los rodillos y la limpieza de los mismos para lo cual se ha garantizado un mantenimiento adecuado de los rodamientos para evitar trabamientos en los brazos de los electrodos.

2.4.4. Representación del sistema de control

El sistema de control que representa el funcionamiento del horno es del tipo de lazo cerrado la acción de control depende de la salida del sistema, este sistema dispone de un sensor que para nuestra aplicación son los transformadores de potencial y de corriente cuya función es medir la salida de voltaje y corriente en la carga para posteriormente compararla con la referencia de voltaje establecida por los valores del tap changer, mientras que la referencia de corriente se ingresa a través de la ganancia de corriente establecida en el programa del PLC. En la figura 2.15 se representa el diagrama general del sistema de control de un horno de arco.



. Figura 2.15. Diagrama de bloques sistema lazo cerrado.

(Fuente: R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control, conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*)

$r(t)$ = entrada de referencia, corriente eléctrica por fase

$e(t)$ = señal de error de corriente

$v(t)$ =variable regulada, voltaje de regulación a las válvulas proporcionales

$m(t)$ =variable manipulada, caudal de aceite a los cilindros hidráulicos

$p(t)$ =señal de perturbación, carga no lineal del horno, accionamientos mecánicos

$y(t)$ =variable controlada, corriente eléctrica por fase

$b(t)$ =variable de retroalimentación

Para comprobar este efecto se realizó una prueba de linealidad a las válvulas, se envió una señal eléctrica comprendida ente 0 – 10 V, a pasos de 1 V por cada fase para manipular el caudal de aceite que pasa atreves de la válvula proporcional esto se refleja en las respectivas velocidades del movimiento de cada brazo que sostiene al electrodo, los tres electrodos deben tener la misma velocidad tanto en subida como en bajada si esto no se cumple la válvula se encuentra descalibrada por lo tanto se procede a manipular el potenciómetro, para compensar las tolerancias de fabricación y poder obtener las características de caudal idénticas en cada válvula, con la finalidad de aumentar o reducir el esfuerzo del resorte.

La carrera de una electroválvula es directamente proporcional a la corriente que circula por la bobina I_b , la fuerza de atracción que genera la bobina aumenta con I_b , como se aprecia en la figura 2.16a y 2.16b.

- si la corriente I_b es menor a I_o la válvula continúa cerrada
- si la corriente I_b es mayor a I_o , la fuerza magnética de la bobina es superior a la fuerza del resorte, por lo tanto, el núcleo se desplaza y comprime el resorte permitiendo la apertura de la válvula.

La desestabilidad del arco eléctrico se produce principalmente por las características físicas de la carga, por lo general al inicio de la fusión la inestabilidad no se puede evitar pero si controlar mediante una calibración óptima de los parámetros del horno y de las condiciones mecánicas, siendo de gran importancia la revisión y cambio de los filtros de las válvulas, el estado de rodamientos de los rodillos guías de los brazos, y la revisión de las presiones de diseño, manteniendo una revisión y confiabilidad de estos factores en la figura 2.15 se aprecia que las condiciones de la planta afectan la respuesta de salida del sistema de control.

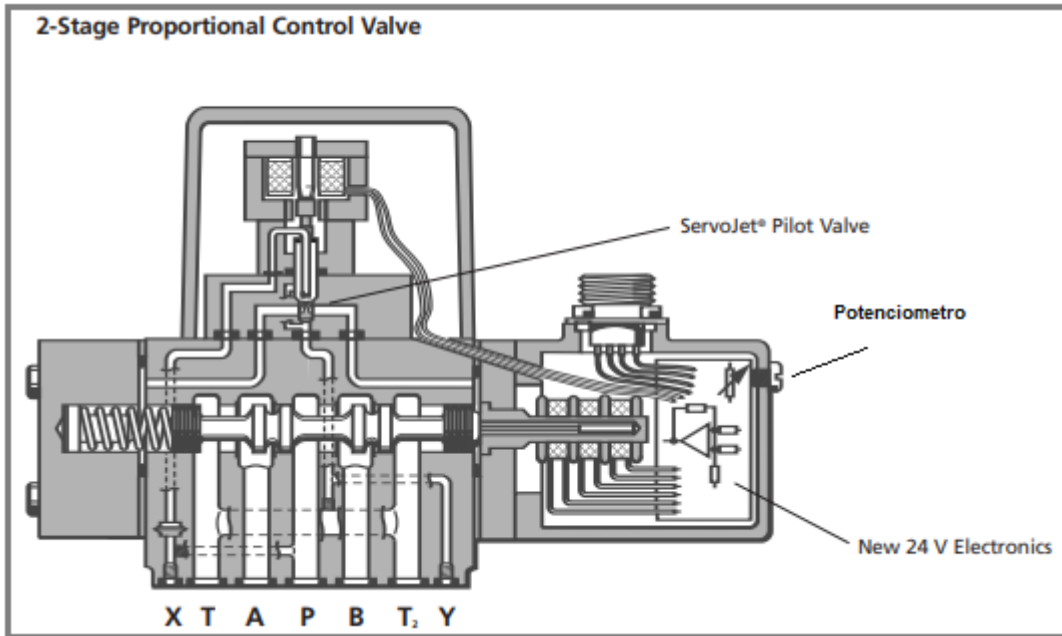


Figura 2.16a. Partes de una válvula proporcional.

(Fuente: *Moog.com*, 2018 <http://www.moog.com/literature/ICD/d660seriesvalves.pdf>)

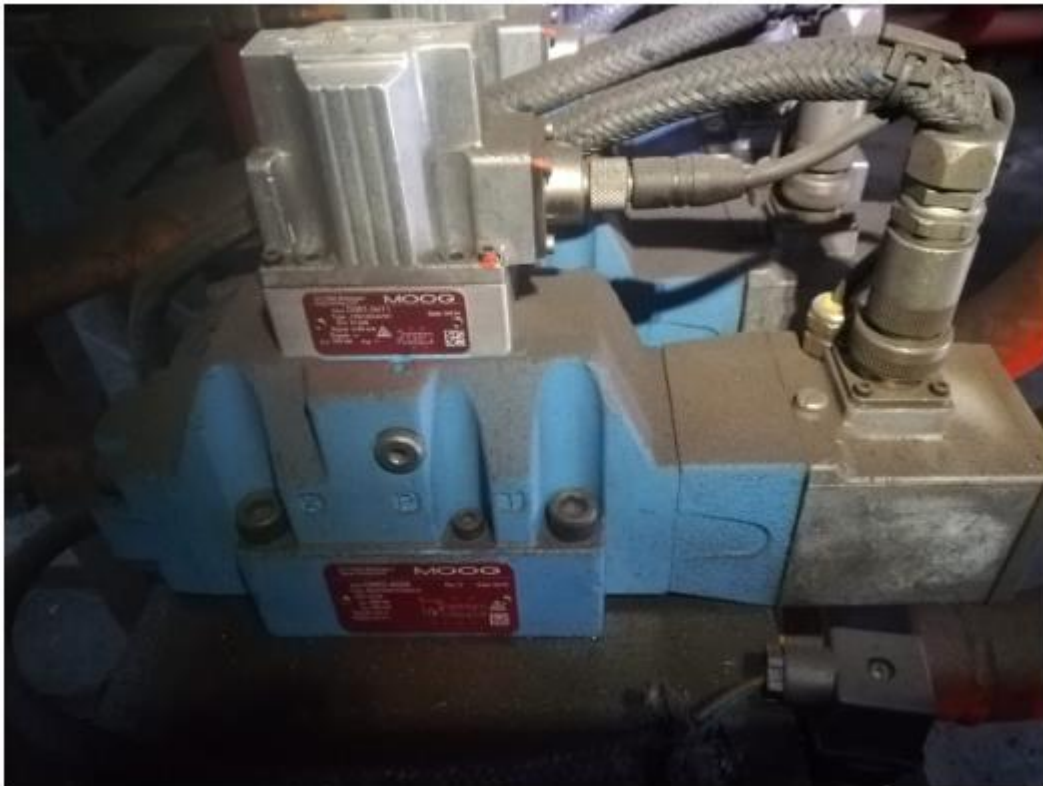


Figura 2.16b. Manifold de válvulas proporcionales.

(Fuente: *Planta Industrial Adelca*, 2018.)

2.5. Consumo de electrodos por fuerzas electrodinámicas

En esta etapa se analizó la causa principal de la ruptura en los electrodos y la manera de controlarla se partió considerando que la fuerza electromagnética entre dos conductores que se disponen de forma paralela está dada por la expresión (2.14). Los electrodos están distribuidos en el horno de arco eléctrico como se aprecia en la figura 2.17 vista desde la parte superior.

$$F = i_1 * i_2 \frac{\mu * L}{2 * \pi * d} = k * i_1 * i_2 \quad (2.14)$$

i_1, i_2 = valores instantáneos de corriente que circulan por cada conductor o electrodo

μ = permeabilidad magnética al vacío = $4\pi * 10^{-7} H/m$

L = longitud de los conductores

d = distancia entre conductores

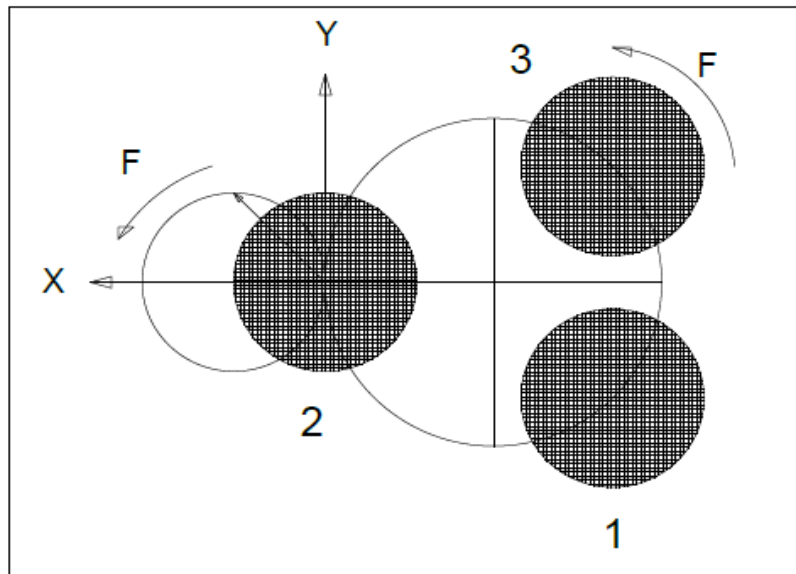


Figura 2.17. Fuerzas electrodinámicas entre electrodos.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Las expresiones de corriente para una disposición triangular de los electrodos, considerando a la fase 2 como referencia son:

$$i_1 = i * \sin(\omega t - 120) \quad (2.15)$$

$$i_2 = i * \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

$$i_3 = i * \sin(\omega t + 120) \quad (2.17)$$

i = valor máximo de corriente

$\omega = 2\pi * f$ siendo la $f = 60 Hz$

Se analiza las fuerzas que se ejercen sobre el electrodo 2 causadas por los electrodos 1 y 3.

$$F_{21} = -k * i^2 * \sin(\omega t) * \sin(\omega t - 120)$$

$$F_{23} = -k * i^2 * \sin(\omega t) * \sin(\omega t + 120)$$

Las componentes de las dos fuerzas, sumada de forma vectorial quedarían de la siguiente manera.

$$F_x = k \frac{\sqrt{3}}{4} i^2 (1 - \cos(2\omega t))$$

$$F_y = k \frac{\sqrt{3}}{4} i^2 \sin(2\omega t)$$

La fuerza resultante se expresa como un vector que gira a una doble frecuencia 120 Hz siendo el modulo $|F|$.

$$|F| = k \frac{\sqrt{3}}{2} i^2 |\sin \omega t| \quad (2.18)$$

En esta etapa se analiza la fuerza resultante en cada fase y la corriente en los diferentes tipos de acero para determinar la frecuencia de ruptura de los electrodos antes y después de corregir los perfiles de funcionamiento.

2.6. Programa eficiente de extracción de humos

La operación de un horno de arco eléctrico al fundir el acero no tiene un carácter lineal sino más bien intermitente en las diferentes etapas de preparación de una colada, el flujo de los gases varia constantemente sea por el ducto de extracción directa al horno o por la chimenea superior de toda la planta, un mal funcionamiento del sistema de extracción de gases no solo genera problemas en la planta de humos sino también en los diferentes equipos eléctricos y mecánicos externos al horno, ya que se eleva la temperatura y aumenta las partículas del polvo en toda la planta.

El mantener una planta con una operación eficiente permite reducir las pérdidas energéticas en función de los siguientes criterios.

- Al no existir una coordinación entre la extracción de los gases calientes y el proceso se produce una succión en exceso de los gases, lo que afecta la eficiencia del horno, considerando que el calor de los gases cumple la función de aumentar la temperatura de la carga metálica o chatarra para disminuir el tiempo de fusión t_{on} y que la colada pueda ser preparada en menor tiempo.
- Al no tener una regulación eficiente en las velocidades de los motores que controlan los ventiladores, ya que trabajan a toda su capacidad, esto genera un

consumo excesivo de energía eléctrica en los ventiladores, por lo tanto, se mejoró el sistema de control mediante una modificación del programa de extracción de gases en el PLC.

Para los objetivos de este trabajo se implementó un control eficiente en la extracción de los gases en función de cada etapa del proceso, se modifica el programa actual del PLC, se comparó la eficiencia del horno antes y después de implementar el nuevo programa, manteniendo controlada la temperatura de los paneles refrigerados, monitoreando el consumo de electrodos, los resultados del consumo energético se detallarán en el siguiente capítulo.

La modificación del programa de control se realizó para la etapa de afino ya que el programa inicial de arranque de la planta no tiene esta particularidad en la que normalmente la VFP y la VCH se encontraban abiertas de forma constante sin tener una modulación en la apertura, para corregir este inconveniente el programa se modificó con la finalidad de mantener la mayor cantidad de gases calientes en el horno y que esta energía sea aprovechada por la carga metálica para reducir el consumo de energía eléctrica y disminuir el tiempo de fusión, mientras que el resto de gases cuya salida es inevitable sean extraídos por la chimenea superior de la planta.

En el diagrama de flujo de la figura 2.18 se aprecia la secuencia de trabajo que permite realizar una apertura proporcional de las compuertas VFP que extraen los gases calientes directamente del horno estos gases pasan por ductos refrigerados hasta llegar a la planta de humos, mientras que la VCH extrae los gases que salen hacia la parte superior de la nave principal de la planta. El programa inicial tiene una regulación de las compuertas cuando el horno se abre para recibir la carga metálica, luego cambia la regulación cuando el horno está fundiendo y finalmente regula la apertura cuando el proceso se encuentra en la etapa de afino en esta etapa inicialmente el porcentaje de apertura de las compuertas era fijo, sin embargo se realizó un nuevo programa tomando en cuenta que el horno en esta etapa se inclina desde 0° hasta $\pm 12^\circ$ grados aproximadamente, se tomó como referencia esta inclinación y se ejecutó el programa en el cual para cada grado de inclinación las compuertas tengan cierta apertura con la finalidad de ir controlando la concentración de gases en el horno.

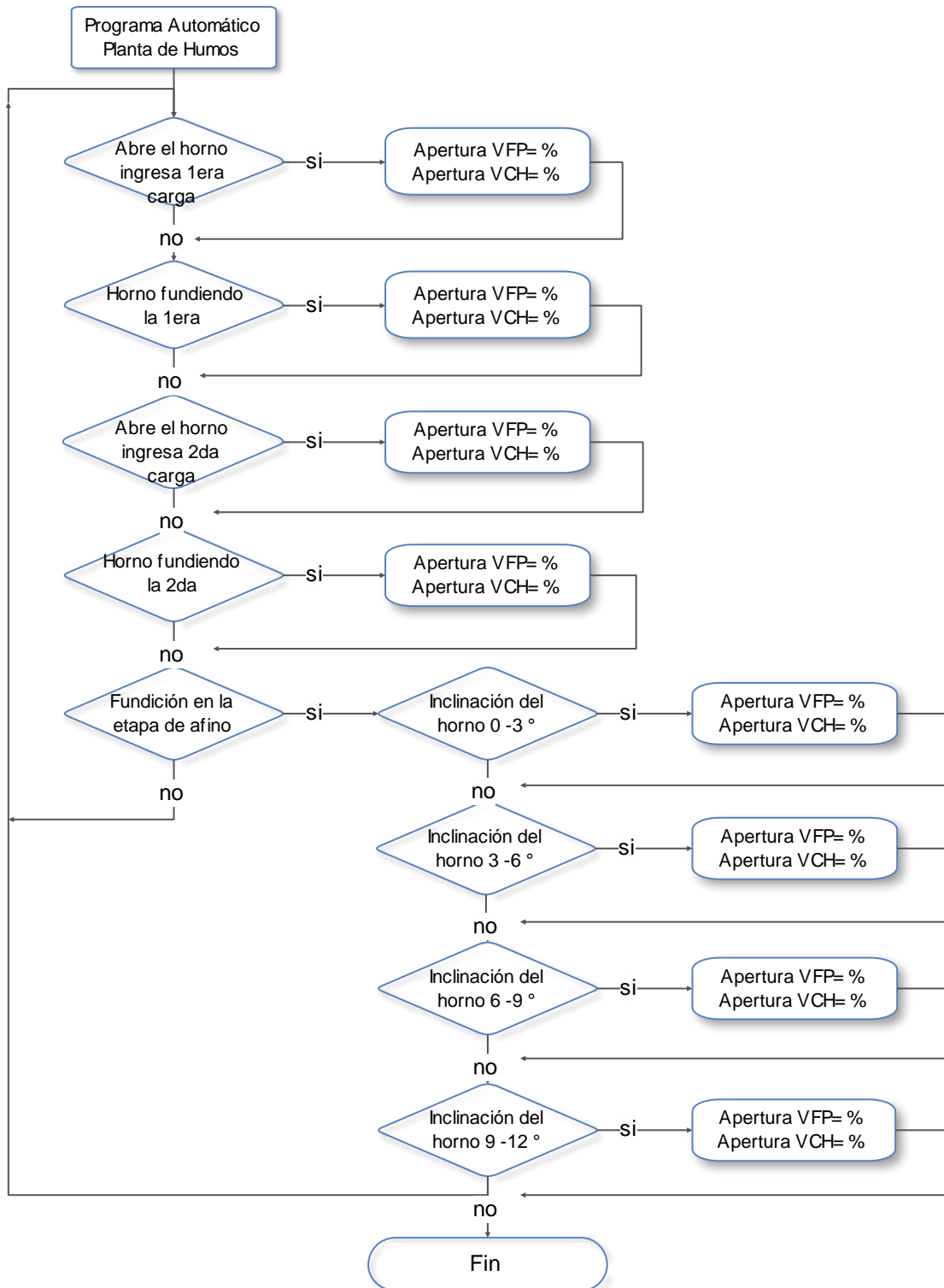


Figura 2.18. Diagrama de flujo operación planta de humos.

(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)



Figura 2.19. Etapa de carga de chatarra en el horno.
(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

2.7. Simulación del horno

En el estudio del horno de arco eléctrico existen algunos modelos que permiten comprender su funcionamiento, para el estudio del presente proyecto se utilizó el modelo de Balance de Energía, ya que se acopla a la no linealidad del arco eléctrico y está en función de la corriente eléctrica.

2.7.1. Implementación del modelo en diagrama de bloques

Partiendo de la expresión (2.12), se puede representar la ecuación diferencial en un diagrama de bloques, en el lado izquierdo se deja la derivada de mayor orden, el objetivo es obtener la conductancia g , considerando que la entrada del sistema es la corriente i , como se aprecia en la figura 2.20.

$$\frac{dg}{dt} = \left(k_2 \frac{i^2}{L} - k_1 k_2 g^{-\lambda} \right)$$

$$\lambda = \beta - 1$$

$$c_1 = \frac{k_2}{L}$$

$$c_2 = -k_1 k_2$$

$$c_3 = -\lambda$$

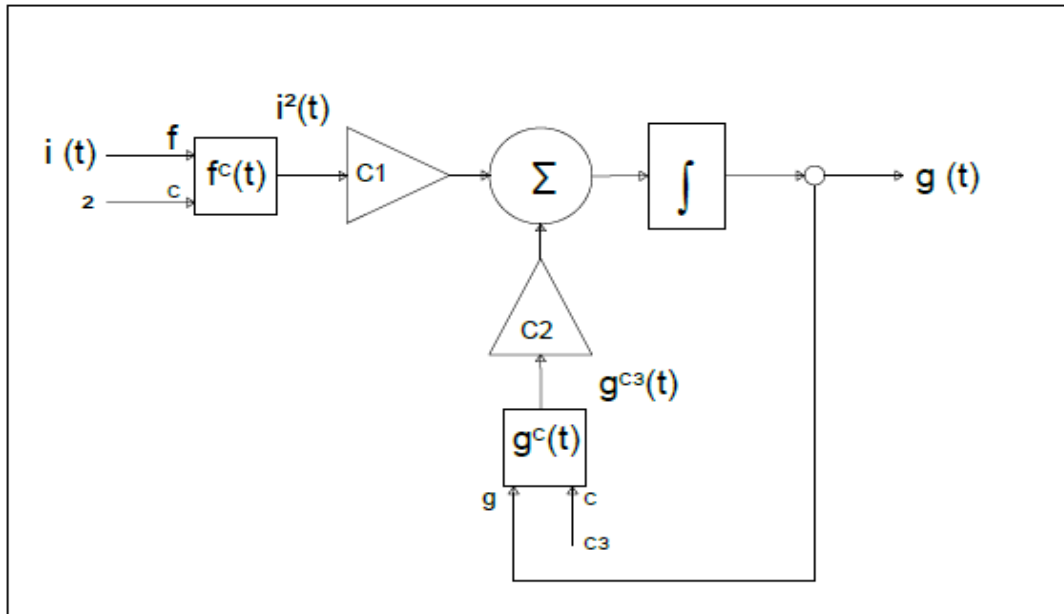


Figura 2.20. Diagrama de bloques modelo del horno.

(Fuente: H. Bermudez Rosero, "Técnica de identificación de parámetros para un modelo de horno de arco eléctrico")

Para determinar el V_a , se parte de la ley de Ohm, donde se establece que el voltaje de arco depende de la conductancia de arco $g(t)$, y de la corriente de arco $i(t)$. Aplicando este criterio el diagrama de bloques final se aprecia en la figura 2.21.

$$V_a = R_a i = \frac{1}{g_a} i \quad (2.19)$$

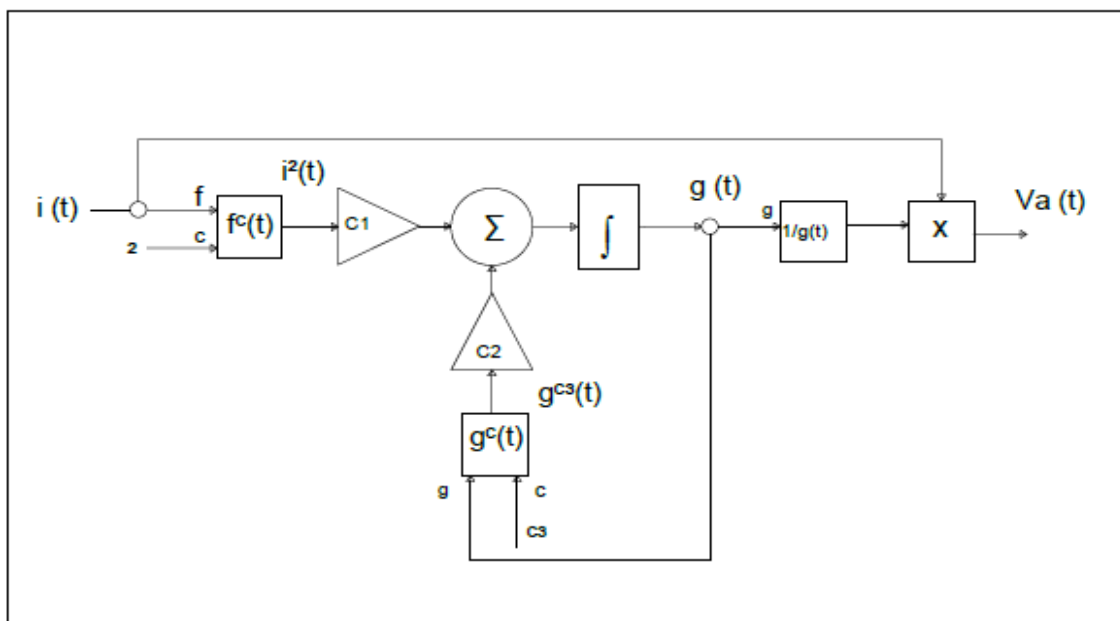


Figura 2.21. Voltaje del arco eléctrico en diagrama de bloques.

(Fuente: H. Bermudez Rosero, "Técnica de identificación de parámetros para un modelo de horno de arco eléctrico")

2.7.2. Representación del modelo en Simulink sin perturbación

La simulación se realizó en Simulink de Matlab. La figura 2.22 diseñada en la simulación indica el modelo de balance de energía sin conectar una perturbación, la entrada al modelo es la corriente que equivale a la corriente de arco, y la única salida corresponde al voltaje de arco. Este modelo permite dar solución a la ecuación diferencial (2.12).

Las constantes de simulación se realizaron hasta conseguir los valores de voltaje reales de funcionamiento del horno de acuerdo a cada uno de los tap changer, las constantes de simulación se calcularon tomando un punto en el área de mayor eficiencia del horno ver figuras desde 2.2 hasta 2.10 obteniendo los siguientes valores de acuerdo a las tablas 2.18 en adelante.

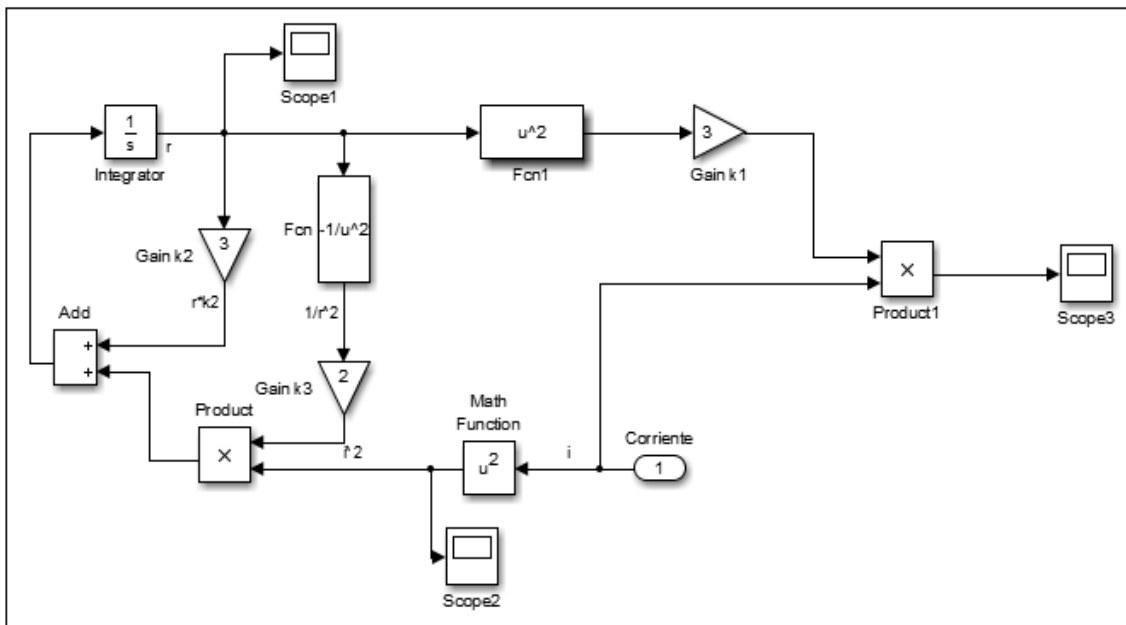


Figura 2.22. Simulación del modelo del horno de arco.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.18. Parámetros de simulación para el tap changer #1.

Simulación para el tap changer #1			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	3,06	$C3=$	-3,0600
$k2=$	0,0732	$C2=$	-2,2341
$k1=$	30,52	$C1=$	0,0028
$L=$	26,00		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.19. Parámetros de simulación para el tap changer #2.

Simulación para el tap changer #2			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,92	C3=	-2,9200
k2=	0,0786	C2=	-2,2520
k1=	28,652	C1=	0,0028
L=	27,70		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.20. Parámetros de simulación para el tap changer #3.

Simulación para el tap changer #3			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,90	C3=	-2,9000
k2=	0,0832	C2=	-2,2411
k1=	26,936	C1=	0,0028
L=	29,70		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.21. Parámetros de simulación para el tap changer #4.

Simulación para el tap changer #4			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,89	C3=	-2,8900
k2=	0,0885	C2=	-2,2194
k1=	25,078	C1=	0,0028
L=	31,90		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.22. Parámetros de simulación para el tap changer #5.

Simulación para el tap changer #5			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,88	C3=	-2,8800
k2=	0,0946	C2=	-2,2000
k1=	23,256	C1=	0,0028
L=	34,40		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.23. Parámetros de simulación para el tap changer #6.

Simulación para el tap changer #6			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,87	C3=	-2,8700
k2=	0,0991	C2=	-2,1841
k1=	22,039	C1=	0,0027
L=	36,30		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.24. Parámetros de simulación para el tap changer #7.

Simulación para el tap changer #7			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,86	C3=	-2,8600
k2=	0,1040	C2=	-2,1666
k1=	20,833	C1=	0,0027
L=	38,40		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.25. Parámetros de simulación para el tap changer #8.

Simulación para el tap changer #8			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,85	C3=	-2,8500
k2=	0,1095	C2=	-2,1523
k1=	19,656	C1=	0,0027
L=	40,70		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

Tabla 2.26. Parámetros de simulación para el tap changer #9.

Simulación para el tap changer #9			
Parámetro		Constantes	
$\lambda=$	2,84	C3=	-2,8400
k2=	0,1156	C2=	-2,1309
k1=	18,433	C1=	0,0027
L=	43,40		

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos antes y después de la implementación de las diferentes técnicas que tienen como objetivo minimizar el consumo energético, los datos fueron obtenidos de forma directa mediante mediciones en el tablero de control ver figura 3.2 en el cual se automatiza el movimiento controlado de las tres fases eléctricas.



Figura 3.1. Horno de arco eléctrico Adelca.
(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

En la figura 3.1 se aprecia el horno de arco eléctrico en el cual se ha desarrollado el presente proyecto, algunos datos fueron obtenidos por mediciones en sitio y otros obtenidos de la información almacenada en los reportes diarios de las áreas de producción y mantenimiento que han permitido revisar el comportamiento eléctrico y el consumo energético del horno en diferentes fechas a manera de históricos del proceso.

Las mediciones se realizaron con el analizador de energía 435 de la marca Fluke que presta una gran confiabilidad y seguridad por su sofisticada tecnología y numerosas funciones de trabajo, los datos obtenidos se almacenaron en una computadora portátil y monitoreados en tiempo real mediante un software propio de la marca del equipo.



Figura 3.2. Tablero de control.

(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

3.1. Consumo de energía por tipo de acero

El consumo de energía es presentado en función de los tipos de acero que son fabricados en la planta industrial de Adelca siendo estos: 1006, 1008, 1010, 1026 en las figuras 3.3 a la 3.5 se analiza la tendencia del consumo de energía para los diferentes tipos de aceros fabricados cuyos valores son presentados y tomados en la etapa de operación normal sin aun implementar las técnicas de ahorro energético.

En la figura 3.3 se presenta la energía específica promedio medida en (kWh/t) las toneladas fundidas están directamente relacionadas a la capacidad del horno la planta tiene una capacidad de producción de 30 t aproximadamente por colada de acero fundido en un tiempo promedio de 40 min, el acero más común que se fabrica es el 1026 sin embargo en los últimos años la planta ha adoptado la producción de aceros de bajo carbón como los 1006, 1008, 1010. En la figura 3.3 se aprecia el consumo de energía promedio de cada colada analizado con muestras en un mes completo de producción para el caso del acero 1026 tiene un promedio de consumo de 504,11 (kWh/t) para 30

t. Es importante resaltar que de acuerdo a las mediciones el consumo de energía específica es menor para los aceros de bajo carbón con respecto al acero 1026.

La figura 3.4 presenta la energía promedio en (kWh) consumida en cada colada de acero fundiendo 30 t, el consumo para el acero 1026 en de 1490,03 (kWh). En la figura 3.5 se presenta el tiempo de operación del horno que se emplea para fundir las 30 t de acero este tiempo corresponde al instante donde el horno esta energizado y consumiendo energía (tiempo de fundición) sin tomar los tiempos muertos en el que el horno no está consumiendo energía, el tiempo fundición también es conocido en algunas nomenclaturas como power on.

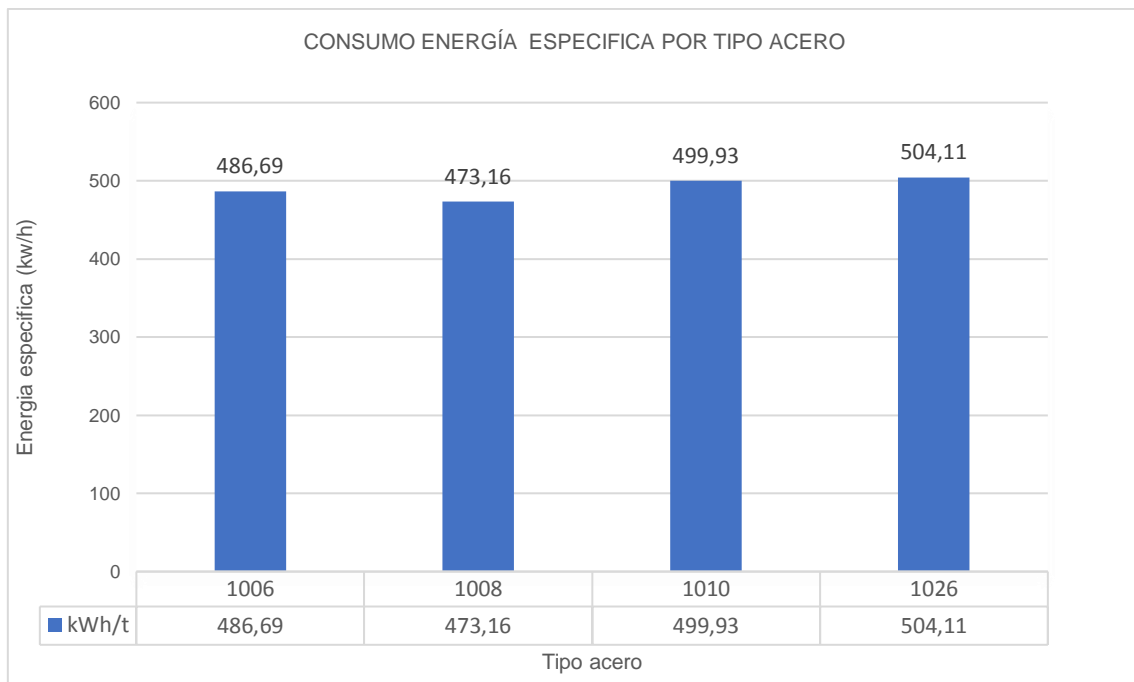


Figura 3.3. Consumo de energía específica para diferentes tipos aceros.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

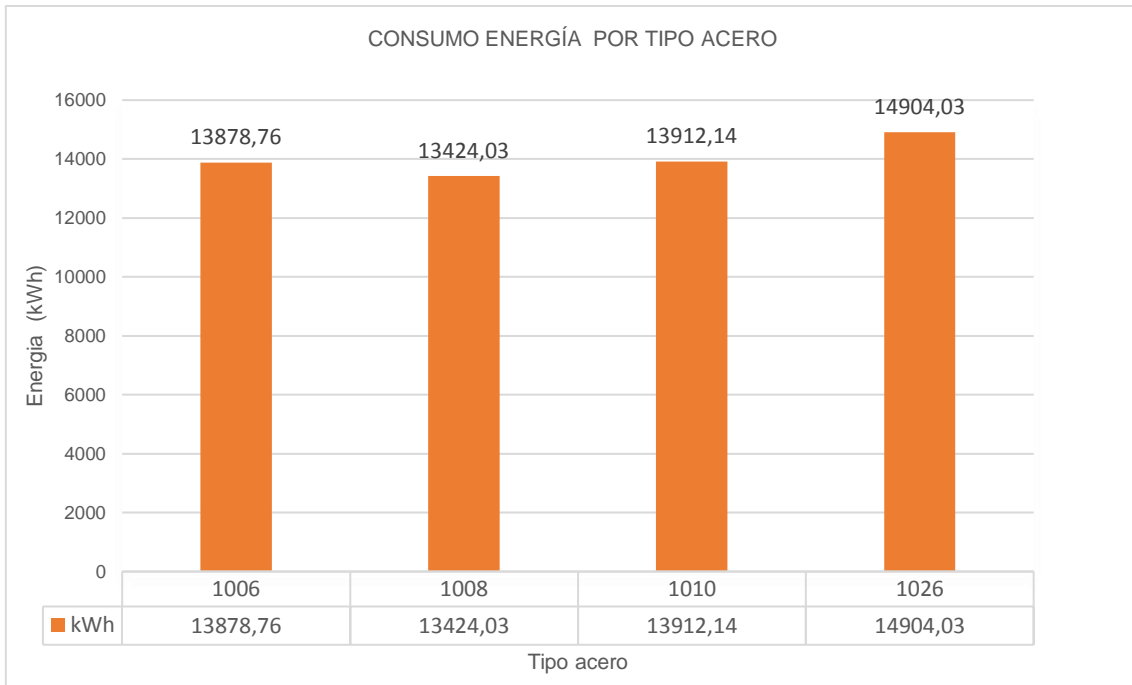


Figura 3.4. Consumo de energía para diferentes tipos de aceros.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

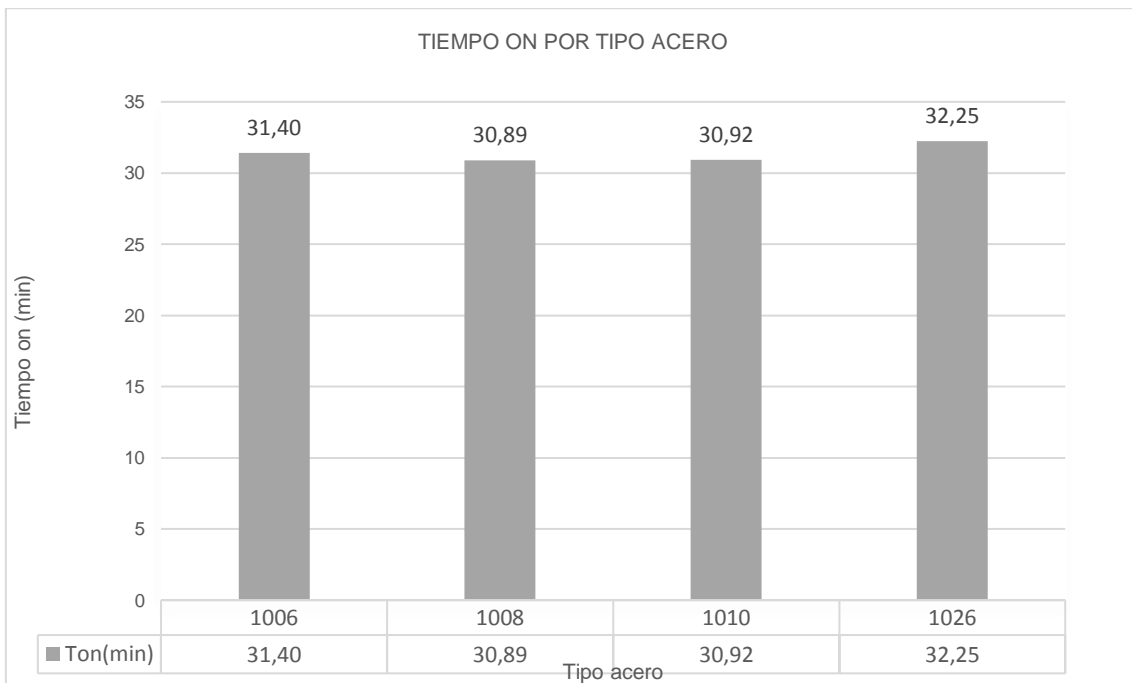


Figura 3.5. Tiempo de fusión para diferentes tipos de aceros.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

3.2. Ahorro de energía para nuevos perfiles

En la implementación de los nuevos perfiles de trabajo se planteó la opción de ir modificando tanto los taps changer del transformador como las curvas de corriente de acuerdo a la tabla 2.15 del capítulo anterior seleccionando las longitudes de arco que tienen el mismo valor para diferentes taps changer y curvas de corriente, en esta etapa como resultados obtenidos se minimizó el consumo energético, se redujo el índice de erosión al refractario, como una alternativa de ahorro considerando que el costo del refractario representa un valor representativo dentro la producción de acero.

Los nuevos perfiles se implementaron para una fundición de acero por colada promedio de 30 t, al comparar los datos de las figuras 3.6 a la 3.8 en relación a los datos de las figuras 3.3 a la 3.5, se aprecia un ahorro promedio de energía del 5,39 % presentado en la tabla 3.1.

El tiempo de fusión en la etapa productiva es de gran importancia mantenerlo en un promedio de 30 min ya que la demanda productiva en nuestro país amerita a minimizar al máximo este tiempo para poder fundir la mayor cantidad de toneladas requeridas por el mercado nacional por tal razón al comparar los datos con la implementación de los nuevos perfiles se aprecia una reducción del tiempo en un 4% promedio correspondiente a 1,2 min por colada esto por lo tanto permite aumentar al menos una colada de acero de 30 t más en un día de 24 horas de producción, que en un mes permite ganar 900 t más de producción.

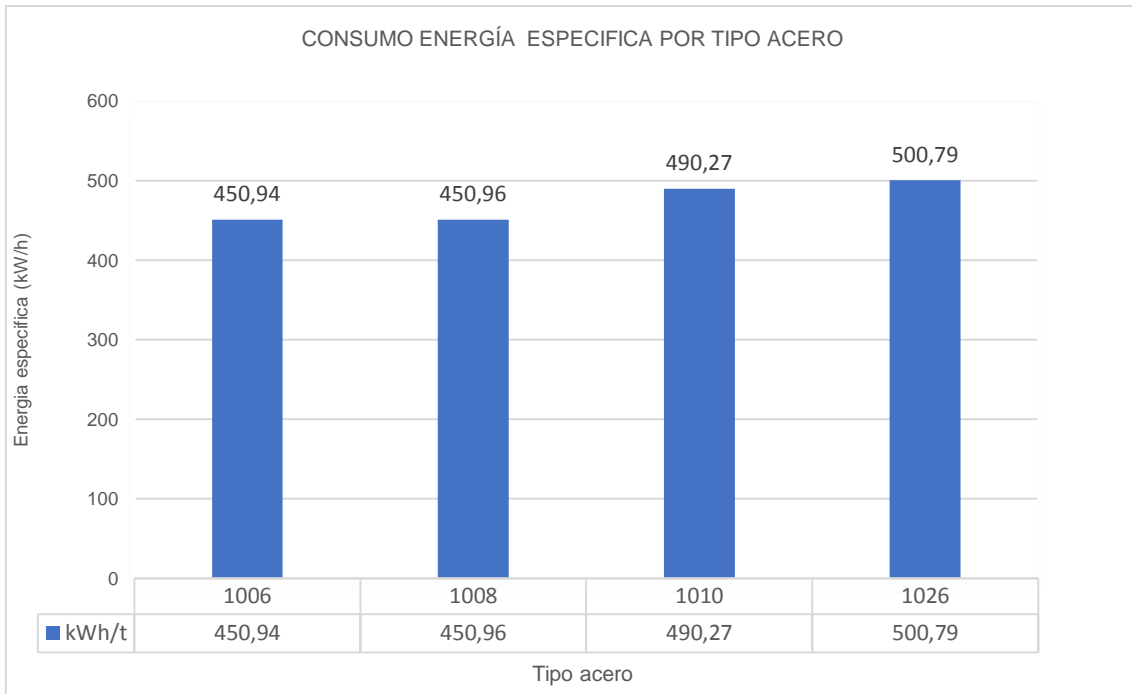


Figura 3.6. Consumo de energía específica con nuevos perfiles.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

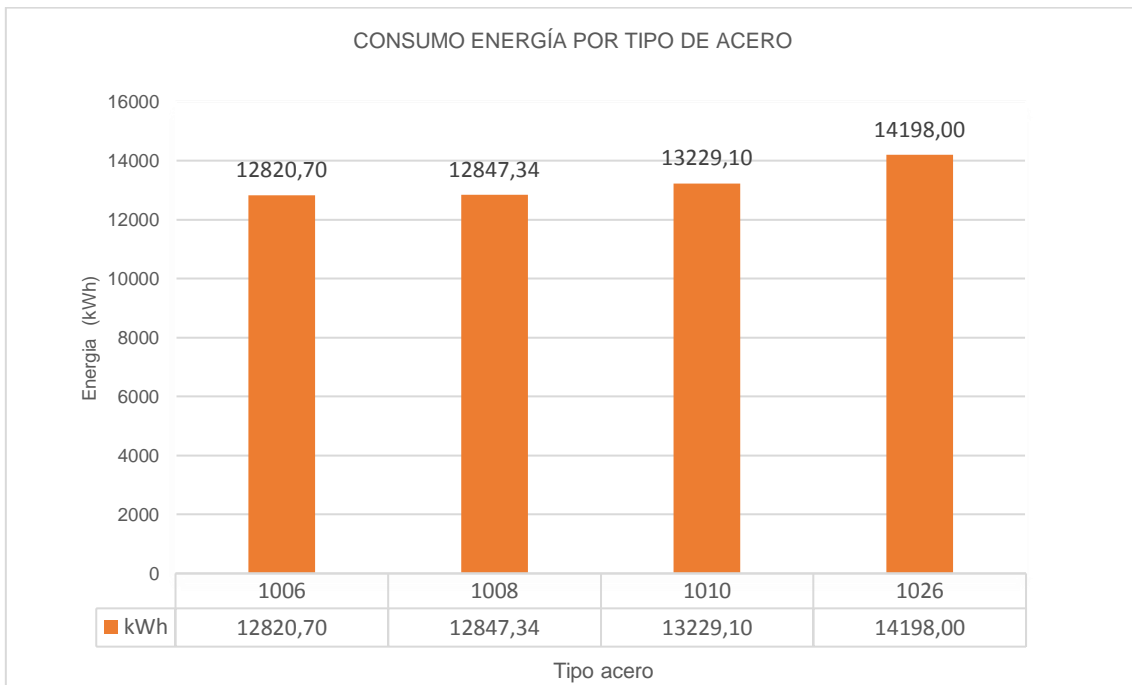


Figura 3.7. Consumo de energía con nuevos perfiles.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

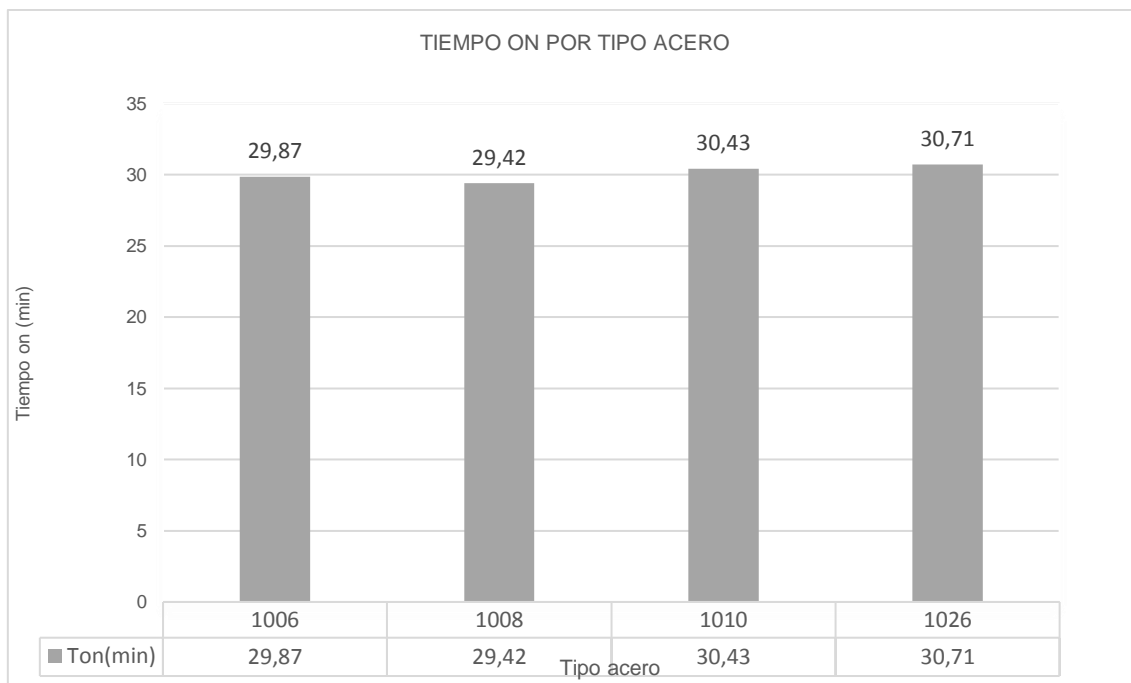


Figura 3.8. Tiempo de fusión con nuevos perfiles.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

Tabla 3.1. Comparación del consumo energético.

Tipo de acero		Energía Específica	Energía	Tiempo fusión
		(kWh/t)	(kWh)	(min)
1006	Perfiles originales	486,69	13878,76	31,4
	Perfiles nuevos	450,94	12820,7	29,87
	Ahorro (%)	7,35%	7,62%	4,87%
1008	Perfiles originales	473,16	13424,03	30,89
	Perfiles nuevos	450,96	12847,34	29,42
	Ahorro (%)	4,69%	4,30%	4,76%
1010	Perfiles originales	499,93	13912,14	30,92
	Perfiles nuevos	490,27	13229,1	30,43
	Ahorro (%)	1,93%	4,91%	1,58%
1026	Perfiles originales	504,11	14904,03	32,25
	Perfiles nuevos	500,79	14198	30,71
	Ahorro (%)	0,66%	4,74%	4,78%
Ahorro promedio (%)		3,66%	5,39%	4,00%

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

El costo de la energía de acuerdo al “Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución en el periodo enero – diciembre 2018” establece los siguientes aspectos, esta información se aprecia en el Anexo IV.

El consumidor debe pagar: [22]

Un cargo por comercialización en USD/consumidor-mes, independiente del consumo de energía.

Un cargo por demanda en USD/kW-mes, por cada kW de demanda mensual facturable, indicada en el numeral 8.1; como mínimo de pago, independiente del consumo de energía, multiplicado por un factor de gestión de la demanda (FGDI) señalado en el numeral 9.2. (Ver anexo IV)

Un cargo por energía en USD/kWh, en función de la energía consumida en el período de lunes a viernes, de 08h00 hasta las 18h00.

Un cargo por energía en USD/kWh, en función de la energía consumida en el período de lunes a viernes, de 18h00 hasta las 22h00.

Un cargo por energía en USD/kWh, en función de la energía consumida en el período de lunes a viernes, de 22h00 hasta las 08h00; incluyendo la energía de sábados, domingos y feriados, en el período de 22h00 a 18h00.

Un cargo por energía en USD/kWh, en función de la energía consumida en el período de sábados, domingos y feriados, en el período de 18h00 hasta las 22h00.

En la tabla 3.2 se detallan los valores en (USD/kWh) que la Empresa Eléctrica factura mensualmente a la empresa Adelca para el proceso de fundición, los costos varían de acuerdo al día y al horario de trabajo. [22]

Tabla 3.2. Pliego tarifario para las Empresas Industriales Ecuatorianas.

RANGO DE CONSUMO	DEMANDA	ENERGIA	COMERCIALIZACIÓN
	(USD/kW-mes)	(USD/kWh)	(USD/Consumidor)
Nivel de Tensión	Alta Tensión con demanda horario diferenciada		
	Industriales		
	4,4		1,414
L-V 08h00 hasta 18h00		0,0837	
L-V 18h00 hasta 22h00		0,0967	
L-V 22h00 hasta 08h00***		0,0501	
S,D,F 18h00 hasta 22h00		0,0837	
*** El valor de este cargo tarifario se aplica para el periodo complementario de los días S,D,F			

(Fuente: *Regulacionelectrica.gob.ec*, 2018. [Online]. Available)

En un mes de producción la compañía no realiza un solo un tipo de acero sino que va fabricando los diferentes aceros alternando el tonelaje hasta cumplir una producción promedio mensual de 22000 t/mes, hay meses en los cuales se puede producir hasta 27000 t/mes e incluso 29000 t/mes, sin embargo los tipos de aceros son fabricados en

función de la demanda y las necesidad de compra del mercado nacional ecuatoriano, en la tabla 3.3 se ha realizado un resumen del ahorro en (USD/colada) para los diferentes tipos de acero considerando las tarifas de facturación que la Empresa Eléctrica cobra al sector industrial en los diferentes horarios y días laborables, estos datos sean obtenido relacionando la información de las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.3. Ahorro de energía por tipo de acero.

Tipo de acero		Energía	Energía Consumida L- V 08h00 hasta 18h00	Energía Consumida L- V 18h00 hasta 22h00	Energía Consumida L- V 22h00 hasta 08h00	Energía Consumida S,D,F 18h00 hasta 22h00
		(kWh)	(USD/Colada)	(USD/Colada)	(USD/Colada)	(USD/Colada)
1006	Perfiles originales	13878,76	1161,7	1342,1	695,3	1161,7
	Perfiles nuevos	12820,7	1073,1	1239,8	642,3	1073,1
	Ahorro (USD/Colada)		88,6	102,3	53,0	88,6
1008	Perfiles originales	13424,03	1123,6	1298,1	672,5	1123,6
	Perfiles nuevos	12847,34	1075,3	1242,3	643,7	1075,3
	Ahorro (USD/Colada)		48,3	55,8	28,9	48,3
1010	Perfiles originales	13912,14	1164,4	1345,3	697,0	1164,4
	Perfiles nuevos	13229,1	1107,3	1279,3	662,8	1107,3
	Ahorro (USD/Colada)		57,2	66,0	34,2	57,2
1026	Perfiles originales	14904,03	1247,5	1441,2	746,7	1247,5
	Perfiles nuevos	14198	1188,4	1372,9	711,3	1188,4
	Ahorro (USD/Colada)		59,1	68,3	35,4	59,1

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

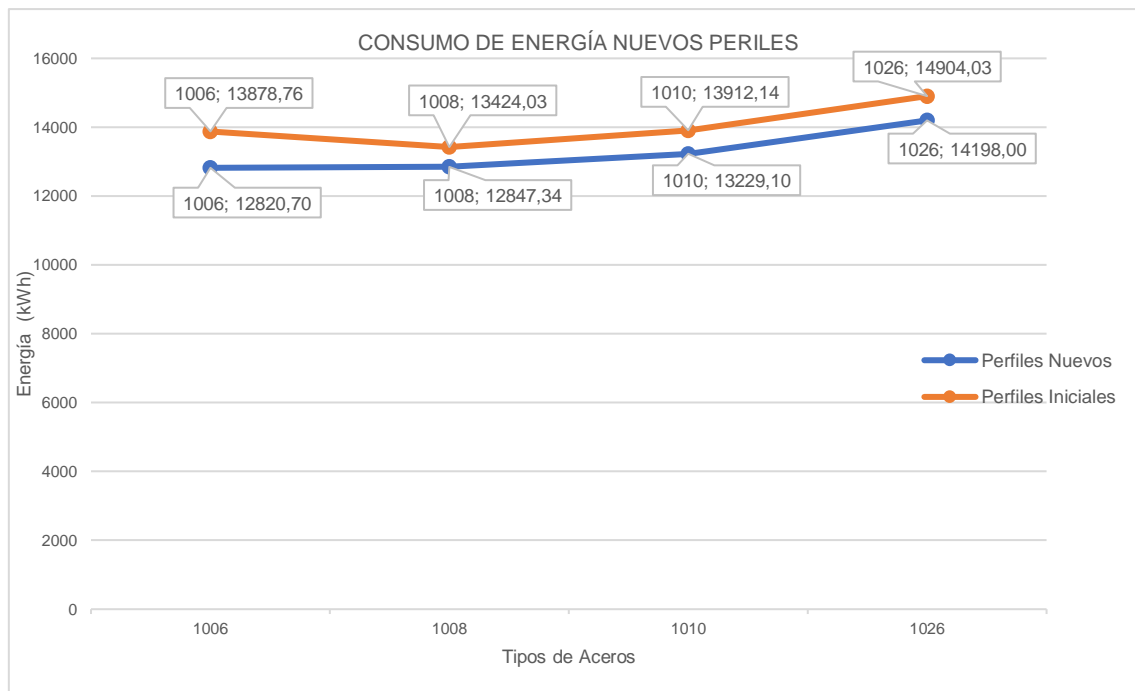


Figura 3.9. Comparación de consumo de energía técnica nuevos perfiles.

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

3.3. Ahorro de energía mediante la automatización de la planta de humos

En la segunda etapa del proyecto se regresó los perfiles a las condiciones iniciales de operación para que al implementar el programa de automatización de la planta de humos en la que se controla la apertura y cierre automático de las compuertas VFP y VCH durante la etapa de afino se pueda apreciar los resultados de eficiencia en el consumo energético como se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3.4. Consumo de energía mediante automatización de la Planta Humos.

	Energía Especifica	Energía	Tiempo fusión	Tonelaje
	(kWh/t)	(kWh)	(min)	(t)
Sin Automatización	523,59	14425,71	31,19	32,07
Automatizado	504,30	14262,00	31,07	32,50
Ahorro (%)	3,7%	1,1%	0,4%	

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

El ahorro energético al implementar un sistema eficiente y controlado de extracción de humos ha permitido un ahorro del 1,1% por cada colada fundida en todos los tipos de aceros, si a este sistema de eficiencia se le aplica el cambio de perfiles el ahorro en porcentaje aumenta y se minimiza el tiempo de fusión de esta manera se ha conseguido un horno más eficiente y mayores ganancias para la compañía tanto en tiempo y en dinero. En la figura 3.10 se aprecia la tendencia de la reducción del consumo energético para los diferentes tipos de aceros.

En la tabla 3.5 se detalla el ahorro en dólares que representa la implementación de esta técnica para cada tipo de acero.

Tabla 3.5. Ahorro de energía por tipo de acero con automatización de la planta de humos.

Tipo de acero		Energía	Energía Consumida L- V 08h00 hasta 18h00	Energía Consumida L- V 18h00 hasta 22h00	Energía Consumida L- V 22h00 hasta 08h00	Energía Consumida S,D,F 18h00 hasta 22h00
		(kWh)	(USD/Colada)	(USD/Colada)	(USD/Colada)	(USD/Colada)
1006	Perfiles originales	13878,76	1161,7	1342,1	695,3	1161,7
	Perfiles nuevos	13726,09	1148,9	1327,3	687,7	1148,9
	Ahorro (USD/Colada)		12,8	14,8	7,6	12,8
1008	Perfiles originales	13424,03	1123,6	1298,1	672,5	1123,6
	Perfiles nuevos	13276,37	1111,2	1283,8	665,1	1111,2
	Ahorro (USD/Colada)		12,4	14,3	7,4	12,4
1010	Perfiles originales	13912,14	1164,4	1345,3	697,0	1164,4
	Perfiles nuevos	13759,11	1151,6	1330,5	689,3	1151,6
	Ahorro (USD/Colada)		12,8	14,8	7,7	12,8
1026	Perfiles originales	14904,03	1247,5	1441,2	746,7	1247,5
	Perfiles nuevos	14740,09	1233,7	1425,4	738,5	1233,7
	Ahorro (USD/Colada)		13,7	15,9	8,2	13,7

(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

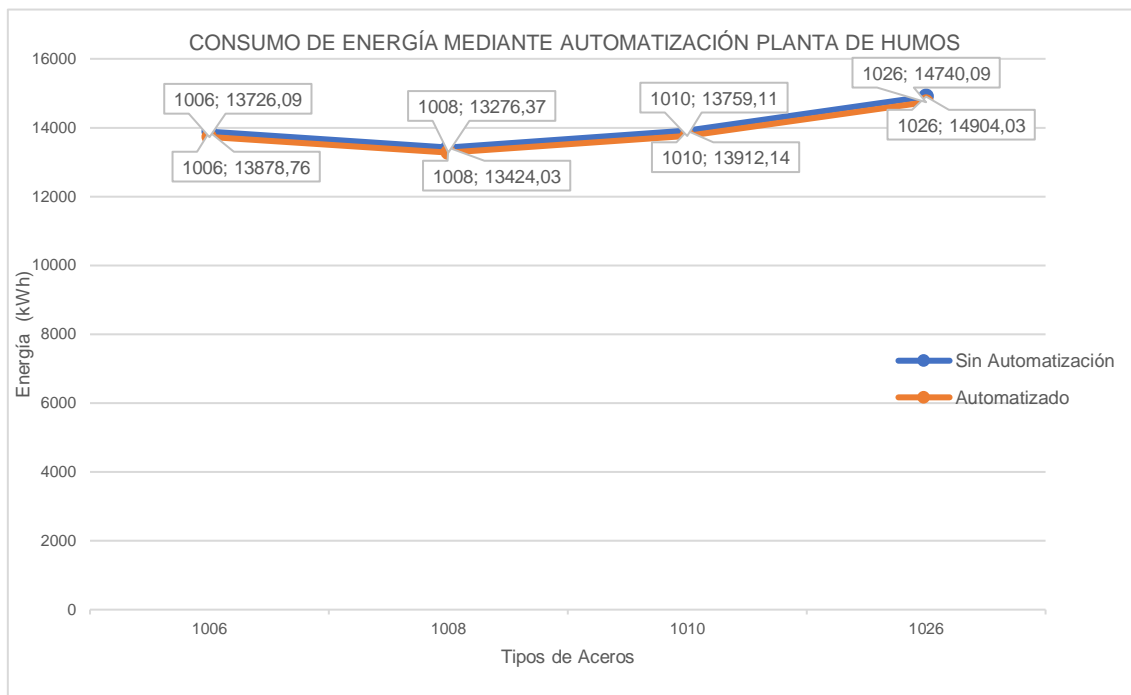


Figura 3.10. Comparación del consumo de energía con la automatización de planta de Humos.
(Fuente: Autor, Jorge Chamorro, 2018)

3.4. Análisis del punto de equilibrio

3.4.1. Análisis en condiciones actuales

El punto de equilibrio de operación de un horno de arco permite identificar las condiciones de trabajo en el que se encuentra operando el horno en ese momento, para lo cual se analiza un indicador importante como el factor de potencia siendo el valor óptimo de trabajo el rango comprendido entre un $fp = 0,77$ y $0,9$, para valores superiores a un $fp = 0,9$ el arco se vuelve inestable, en el rango óptimo de operación del factor de potencia se produce una mejor transferencia de energía a la carga metálica, mientras que para valores menores a $fp = 0,77$ se pierde eficiencia en el arco.

Tabla 3.6. Análisis del punto de equilibrio para dos cargas.

Análisis para dos cargas acero 1008										
	V1	V2	V3	I1	I2	I3	fp	P	Q	S
	(V)	(V)	(V)	(kA)	(kA)	(kA)		MW	MVAR	MVA
Carga 1	509,08	493,52	498,11	30,39	31,90	32,49	0,73	20,55	6,48	23,40
Carga 2	509,79	507,64	506,04	29,59	29,10	32,07	0,76	20,84	4,16	23,19
Afino	503,23	496,79	494,94	32,15	37,10	39,00	0,79	23,72	9,08	26,24

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

En la tabla 3.6 se analiza el comportamiento del horno en la etapa de afino para dos cargas fabricando acero 1008 , de acuerdo a las figuras analizadas desde la 2.2 hasta la 2.10 la mejor área de trabajo del horno se establece a un factor de potencia promedio de $fp = 0,82$ el mismo que se encuentra entre el rango óptimo de trabajo de $fp = 0,77$ y $0,9$, en el rango de trabajo también es considerado dos factores importante que es la afectación al refractario y el consumo de energía, para esta muestra en la primera carga él $fp = 0,73$ y en la segunda carga a $fp = 0,76$ los datos indican que la operación se encuentra bajo el rango de operación del resultado esperado ya que en esta etapa la penetración desestabiliza el funcionamiento del arco, siendo el objetivo de este proyecto acercar el punto de trabajo al rango de operación óptimo. En la etapa de afino el factor de potencia se encuentra en $fp = 0,79$ sin estabilizarse en $fp = 0,82$, por lo tanto, se requiere mejorar la estabilidad de funcionamiento y operación del horno, para minimizar tanto el consumo de energía como el tiempo de fusión

En las figuras desde la 3.11 hasta la 3.14, se representa los valores de voltajes y corrientes en las tres fases, el factor de potencia y las potencias totales, referentes a la colada estudiada en la tabla 3.6.

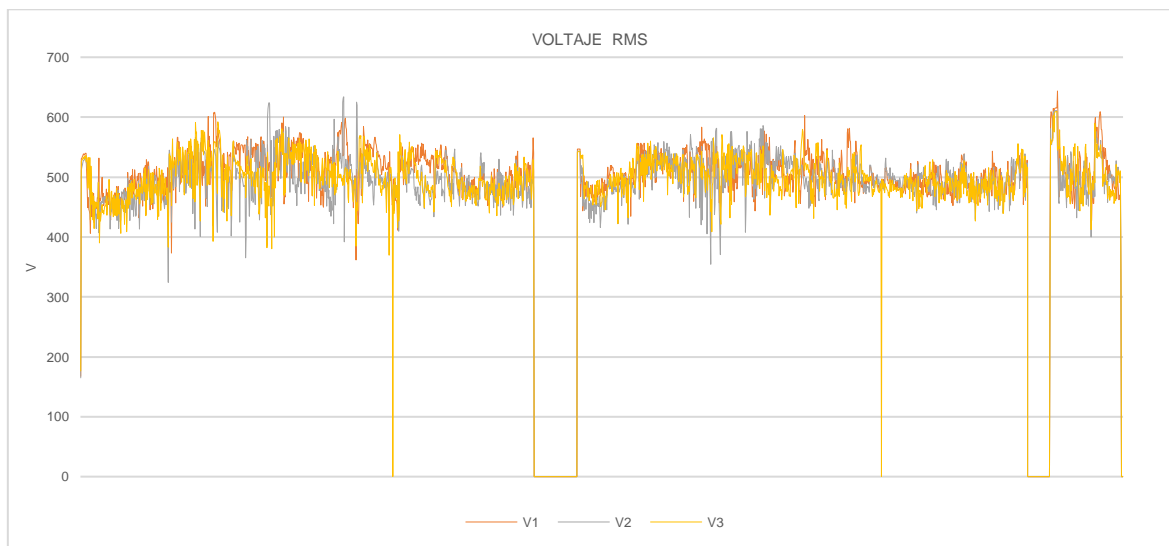


Figura 3.11. Voltaje para dos cargas.

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

Las figuras 3.11 y 3.12 indica los valores de voltaje y corriente instantáneos en una colada de 2 carga, se aprecia que los tres voltajes se encuentran uno superpuesto al otro esto indica una estabilidad del arco, el primer segmento de la figura muestra la fusión de la primera carga mientras que el segundo segmento muestra la fusión de la

segunda carga y parte de la etapa de afino, al tercer segmento le corresponde la etapa de afino donde el arco tiene una estabilidad.

En la figura 3.13 se aprecia los valores del factor de potencia en la primera carga el factor es inferior a la segunda mientras que en la etapa de afino el factor de potencia aumenta ratificando los datos de la tabla 3.6.

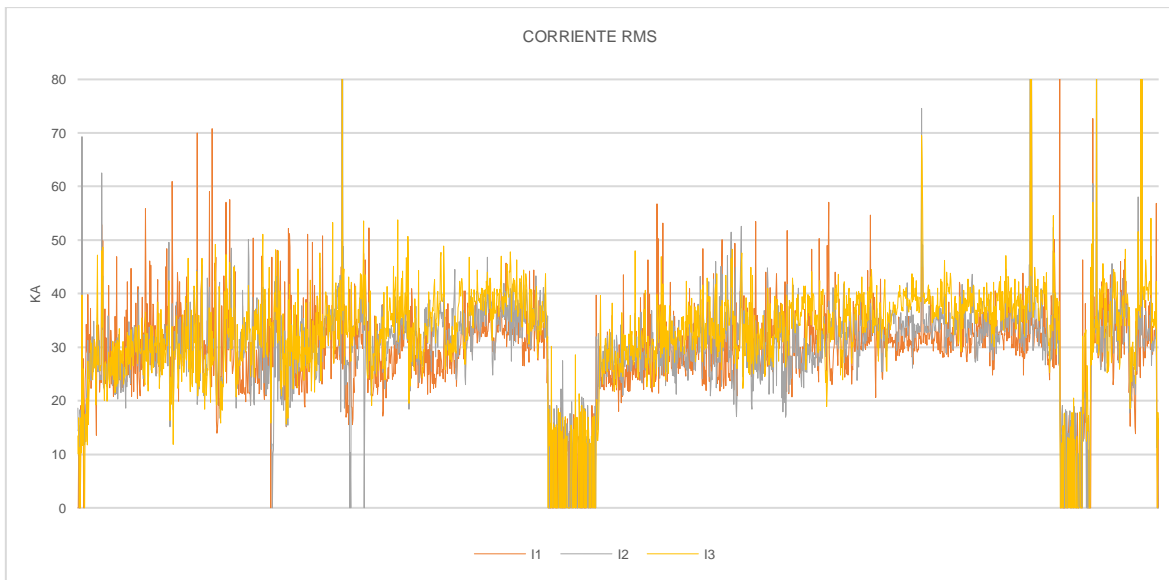


Figura 3.12. Corriente para dos cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

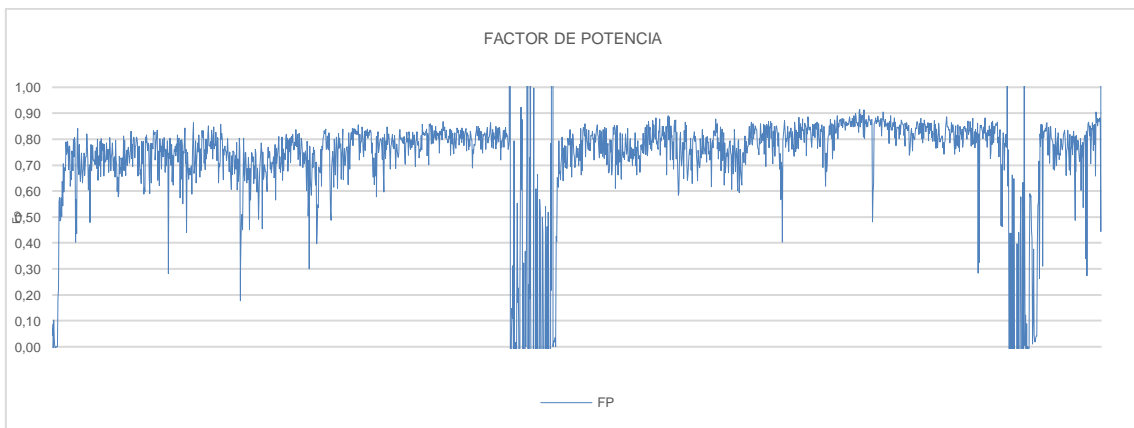


Figura 3.13. Factor de potencia para dos cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

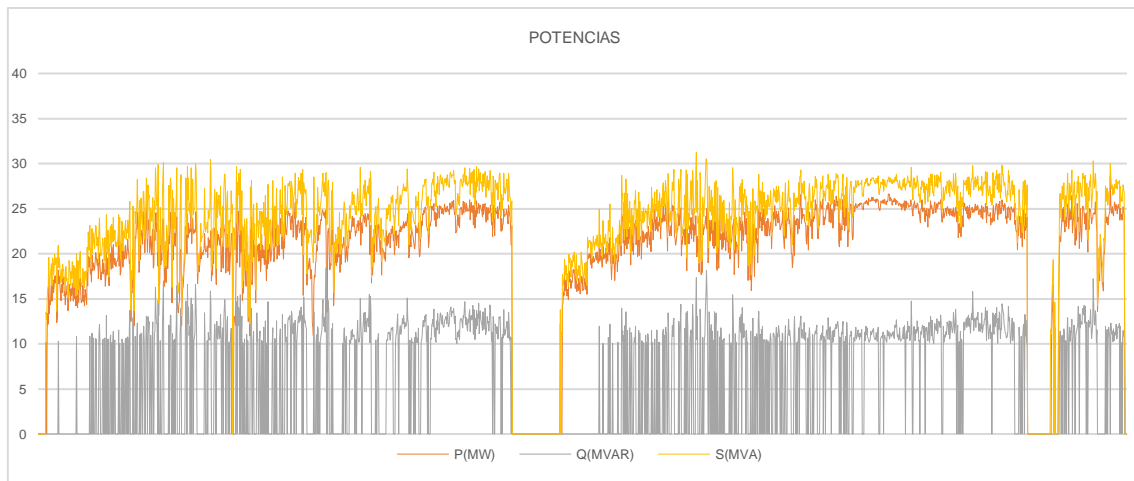


Figura 3.14. Potencias para dos cargas.

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

En la tabla 3.7 se analiza la estabilidad para un colada de acero 1026 constituido por 4 cargas consecutivas de chatarras con un tonelaje total de 30 t, el $fp = 0,74$ en la primera carga es bajo y aceptable ya que inicia un proceso de fundición con chatarra sólida, en esta etapa la inestabilidad del arco se produce hasta completar la fundición de la primera carga, desde la carga 2 hasta la 4, el factor de potencia aumenta a un valor estable de $fp = 0,77$, sin embargo en la carga 3 se produce una disminución del factor que se debe a factores externos a un proceso de fusión como el desprendimiento de cascones o cargas altas de chatarra, sin embargo llegar a fundir a un factor próximo a $fp = 0,82$ determina que el horno no está operando dentro de la zona de estabilidad, en la etapa de afino el $fp = 0,78$ no alcanza el punto de mejor eficiencia de $fp = 0,82$, en los siguientes análisis con la implementación de los nuevos perfiles se tratara de acercarse a un $fp = 0,82$ en la etapa de afino.

Al analizar la etapa de afino en las tablas 3.6 y 3.7 en ningún caso el factor de potencia se aproxima al punto óptimo, en el siguiente análisis de fundición ya implementados los nuevos perfiles se verificará el comportamiento del fp en todo el proceso.

Tabla 3.7. Análisis del punto de equilibrio para cuatro cargas.

Análisis para cuatro cargas acero 1026										
	V1	V2	V3	I1	I2	I3	fp	P	Q	S
	(V)	(V)	(V)	(kA)	(kA)	(kA)		MW	MVAR	MVA
Carga 1	551,21	535,91	523,03	29,25	31,43	35,44	0,74	22,75	6,10	26,26
Carga 2	540,47	533,70	525,61	28,14	31,56	34,98	0,77	24,01	6,07	26,74
Carga 3	545,59	535,65	524,34	29,36	31,57	35,20	0,76	23,00	7,43	26,56
Carga 4	540,65	531,77	519,67	29,34	33,07	36,75	0,77	24,46	7,77	27,71
Afino	510,28	499,44	489,46	31,08	36,89	40,38	0,78	23,84	7,32	26,81

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

En las figuras desde la 3.15 hasta la 3.18, se representan los valores de voltajes y las corrientes en las tres fases, el factor de potencia y las potencias totales para una colada de 4 cargas.

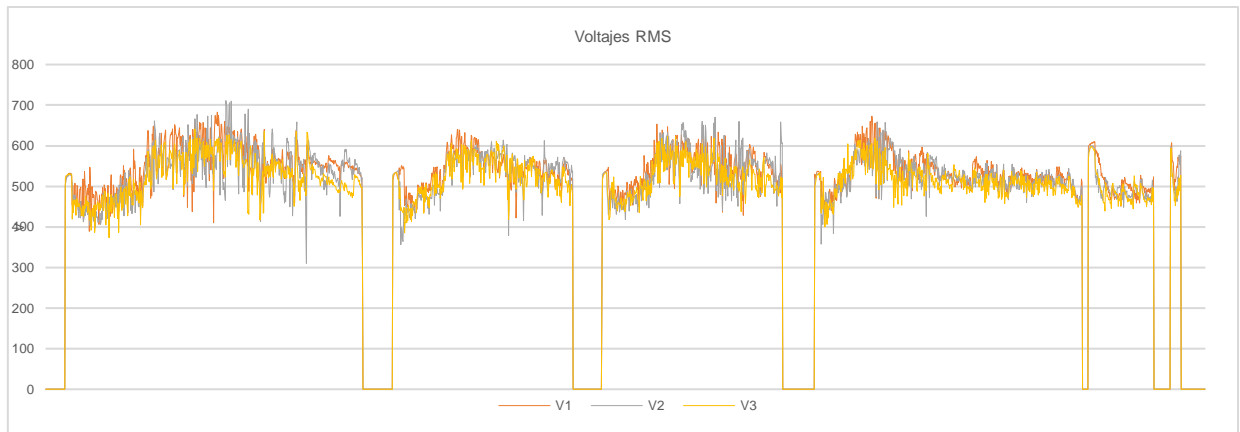


Figura 3.15. Voltaje para cuatro cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

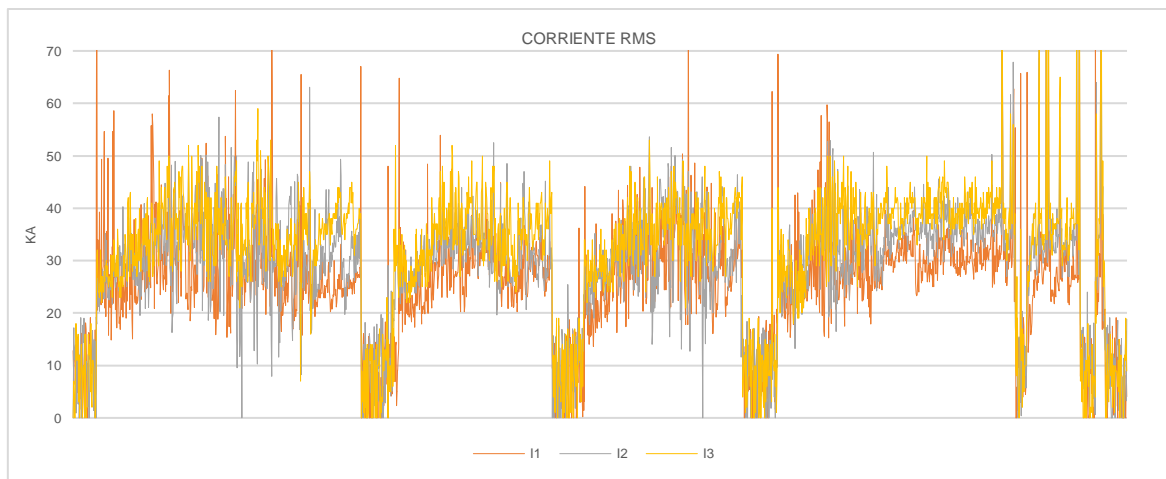


Figura 3.16. Corriente para cuatro cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

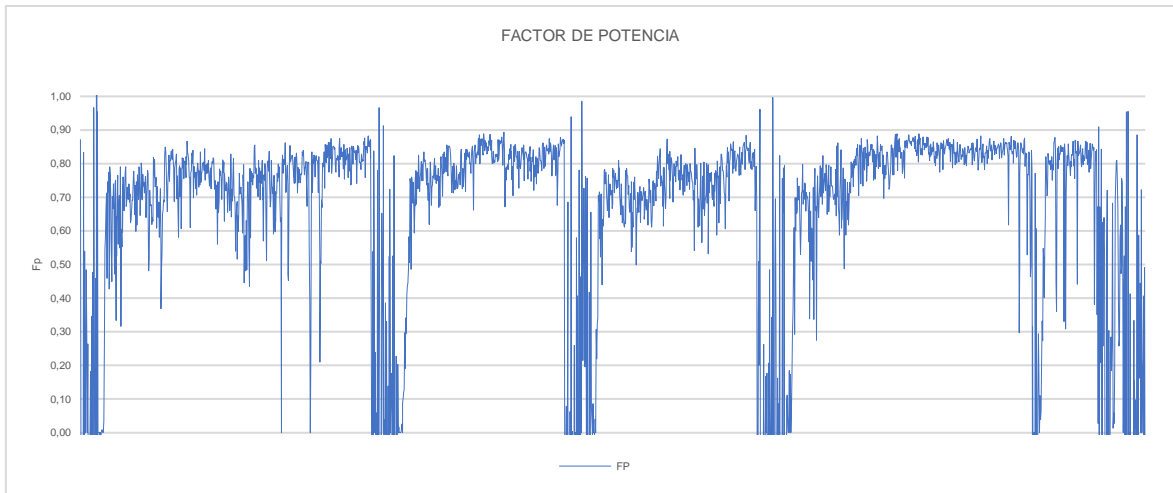


Figura 3.17. Factor de potencia para cuatro cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

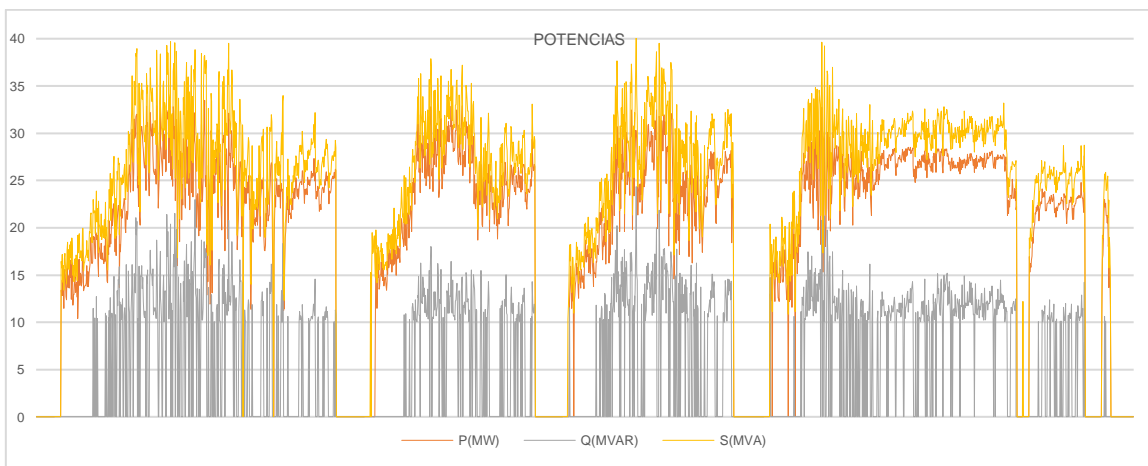


Figura 3.18. Potencias para cuatro cargas.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

3.4.2. Análisis del fp con la implementación de nuevas técnicas

Al analizar el punto de equilibrio luego de implementar los nuevos perfiles de funcionamiento el comportamiento del horno para las diferentes cargas y en especial en la etapa de afino el factor de potencia aumentado de $fp = 0,79$ a $fp = 0,84$ para la colada de 2 cargas, mientras que para la colada de 4 cargas el factor de potencia a aumentado $fp = 0,78$ a $fp = 0,85$ en los dos casos se ha conseguido que el horno opere en el área de mejor eficiencia y que la transferencia de energía sea optima a la carga metálica, como se aprecia en las tablas 3.8 y 3.9.

El realizar un análisis del funcionamiento del punto de equilibrio de un proceso de fundición permite identificar el área de trabajo que es como la huella digital de un horno, este análisis debe ser siempre analizado ya que es el paso previo para realizar las

acciones ingenieriles de estabilización del arco eléctrico que se realizaron en la siguiente parte de este capítulo.

El fundir en un área de trabajo adecuada de acuerdo a la figura 2.1 aumenta la eficiencia del horno y minimiza el consumo de energía en esta parte no se realizó el análisis tarifario ya que el objetivo del proyecto en este punto es determinar el punto de equilibrio.

Tabla 3.8. Análisis del punto de equilibrio dos cargas nuevos perfiles.

Análisis para dos cargas acero 1008										
	V1	V2	V3	I1	I2	I3	fp	P	Q	S
	(V)	(V)	(V)	(kA)	(kA)	(kA)		MW	MVAR	MVA
Carga 1	509,08	493,52	498,11	30,39	31,90	32,49	0,8	20,55	6,48	23,40
Carga 2	509,79	507,64	506,04	29,59	29,10	32,07	0,8	20,84	4,16	23,19
Afino	503,23	496,79	494,94	32,15	37,10	39,00	0,84	23,72	9,08	26,24

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

Tabla 3.9. Análisis del punto de equilibrio cuatro cargas nuevos perfiles.

Análisis para cuatro cargas acero										
	V1	V2	V3	I1	I2	I3	fp	P	Q	S
	(V)	(V)	(V)	(kA)	(kA)	(kA)		MW	MVAR	MVA
Carga 1	559,68	540,93	536,27	27,06	31,22	34,18	0,80	22,44	6,02	25,77
Carga 2	552,14	540,69	527,71	27,55	29,74	33,49	0,81	22,20	4,21	24,94
Carga 3	560,77	549,25	544,40	29,84	30,73	33,56	0,82	22,25	6,83	25,71
Carga 4	565,81	547,46	545,00	28,63	31,32	33,76	0,83	22,83	6,58	26,29
Afino	527,69	514,18	507,67	29,63	35,05	37,65	0,85	22,95	4,26	25,48

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

3.5. Análisis de la estabilidad del arco

El objetivo de mantener una estabilidad del arco no solo es minimizar el consumo de energía, sino más bien optimizar el tiempo y minimizar el impacto y desgaste de otros equipos (paneles refrigerados, refractario y consumo de electrodos) afectados por este desequilibrio, por lo tanto, es importante ver el funcionamiento del horno como un ente productivo en todo su conjunto y no solo como un equipo eléctrico, para lo cual los factores de mayor impacto e importancia a ser considerados en el momento de un desequilibrio de fases son:

- Productividad (t/h)
- Consumo de energía específico (kWh/t)
- Consumo de energía eléctrica (kWh)
- Consumo de refractario (kg/t o \$/t)
- Consumo de electrodos (kg/t o kg/kWh)
- Consumo de aleaciones (kg/t)

3.5.1. Análisis mediante un modelamiento

La estabilidad del arco mediante el aumento de la ganancia en el modelo del horno, es considerada una corrección temporal que cumple dos funciones importantes, aumentar la transmisión de energía hacia la carga por lo tanto menos tiempo de fusión y la segunda corregir el punto óptimo de fusión entre los tres electrodos solucionando un problema ya no de carácter eléctrico sino más bien obedece a factores externos que se generan dentro de la planta y pueden ser de carácter mecánico u operativo, esta técnica se aplica para no generar una parada de producción y poder cumplir con el objetivo productivo planificado, finalizada las respectivas revisiones en la planta se vuelve a colocar los valores iniciales de ganancia y realizar las respectivas revisiones técnicas en planta para corregir el problema, la inestabilidad se detecta de acuerdo a tres puntos de análisis, estudio de las gráficas de voltajes y corrientes, tiempo de fusión, y aumento del consumo energético.

La etapa en la cual la detección de la inestabilidad del arco es notoria se puede apreciar en la etapa de afino ya que al tener el acero en su totalidad fundido la carga metálica es estable y al tener un acero líquido el arco eléctrico se comporta de forma constante y genera estabilidad al sistema eléctrico del horno, si por algún factor que será corregido en esta etapa se genera una pequeña desviación de los voltajes y corrientes de cualquiera de las tres líneas o fases eléctricas sea la fase 1 (L1), fase 2 (L2) o fase 3 (L3) significa que es necesario estabilizar el arco para mejorar la eficiencia del horno.

En la figura 3.19 se aprecia que la fase eléctrica 1 en una operación normal de función para cualquier tipo de acero no se encuentra alineado a las dos fases eléctricas restantes, este inconveniente se puede resolver mediante un ajuste de las ganancia en la fase 1 al aumentar la ganancia por software en un rango de 0% al 5% me permite ajustar la desviación de la fase 1 si no se corrige el problema aumenta el tiempo de fusión y el consumo energético.

En la figura 3.20 se aprecia que el voltaje de la fase 1 se alineado con respecto a las otras fases por lo tanto el arco sea estabilizado.

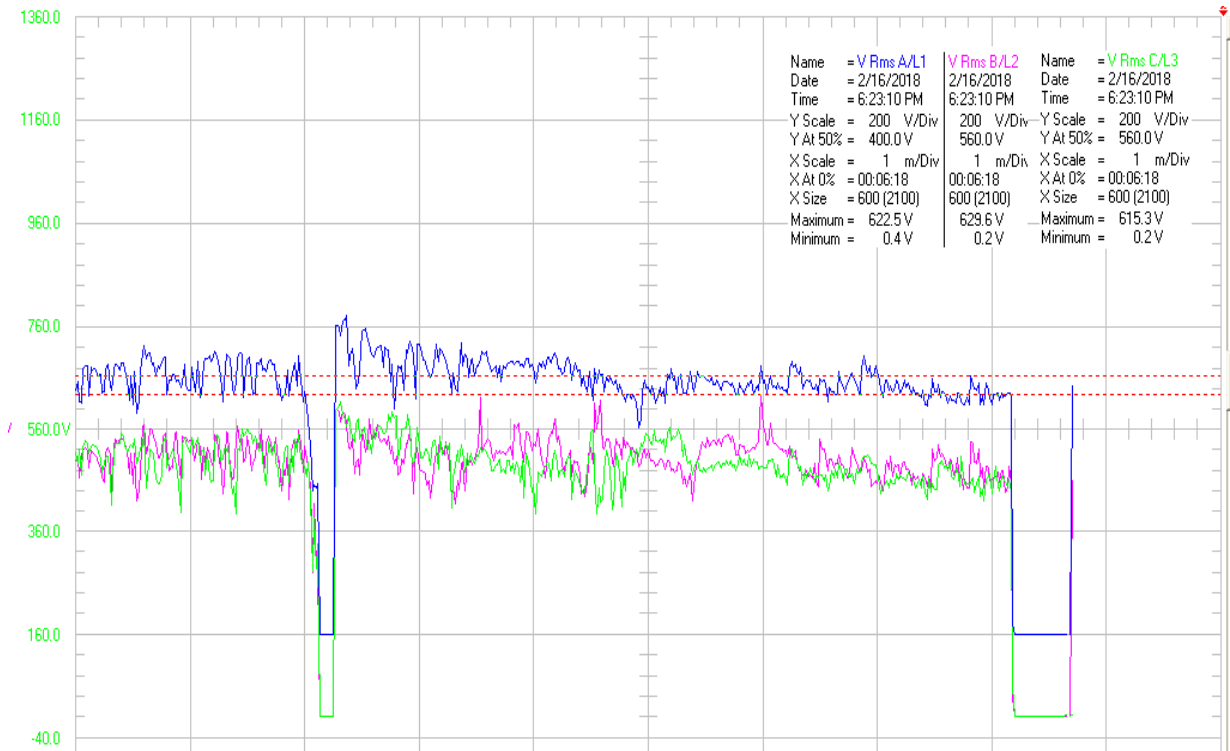


Figura 3.19. Desestabilidad del arco en el afino.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

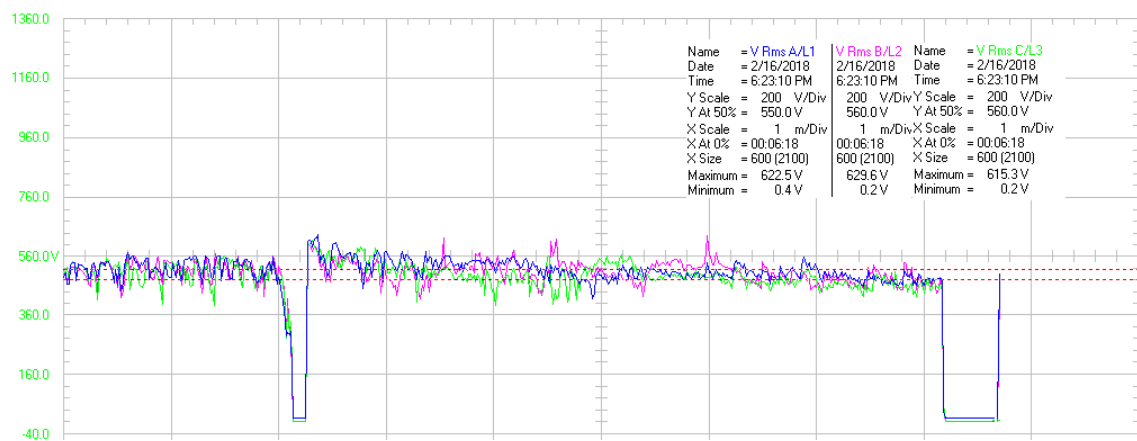


Figura 3.20. Estabilidad del arco en el afino.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

3.5.2. Análisis mediante el sistema de control

La desestabilidad del arco al no depender solo de factores eléctricos sino también de otros factores directos de carácter hidráulico, mecánico u operacional que están presentes en la planta generan inestabilidad y mal funcionamiento en la fundición, en la figura 3.21 se aprecia la curva de voltaje de las tres fases, para una producción de 3 cargas, con un intervalo de tiempo en la primera carga por efecto de la limpieza del horno, la gráfica indica que durante todas las etapas de fusión el voltaje de la fase 1 tiene un incremento respecto a la fase 2 y 3, esto indica que la fase dos tendrá un mayor voltaje de arco mayor longitud de arco y una menor corriente de operación, este efecto produce un calentamiento de los paneles refrigerados que se encuentran junto a la fase desequilibrada, se produce una pobre distribución de la radiación del arco dentro del horno, por lo tanto un aumento en el tiempo de fusión y un incremento de la energía consumida para una misma cantidad de tonelaje. La figura 3.22 muestra la estabilidad luego de realizarse las correcciones correspondientes se ha calibrado las válvulas proporcionales, revisión del estado del aceite hidráulico, cambio de filtros en las válvulas, limpieza y mantenimiento de los rodillos guías en cada uno de los electrodos.

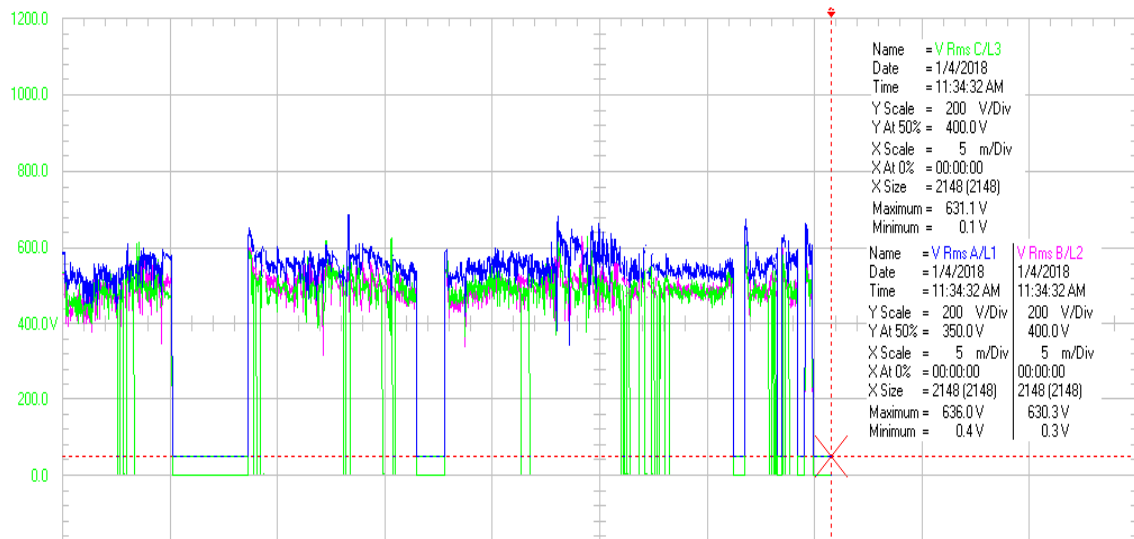


Figura 3.21. Desestabilidad del arco.

(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

En la figura 3.23 se aprecia la inestabilidad del arco monitoreada en los equipos de medición que indican el voltaje de arco, y corriente de arco en un proceso de fundición.

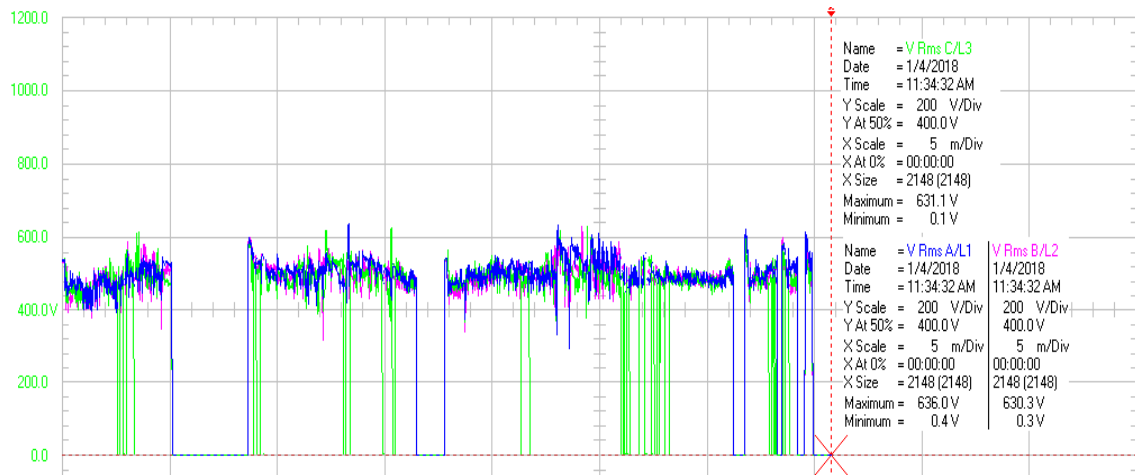


Figura 3.22. Arco estable.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)



Figura 3.23. Arco inestable en equipos de medida.
(Fuente: Registro Analizador de Energía, Planta Adelca)

3.6. Análisis y eficiencia del consumo de electrodos

3.6.1. Análisis por fuerzas electrodinámicas

El consumo de electrodos en una acería es un insumo que no se puede evitar y tiene una alta relevancia en el costo del proceso, pero si se puede reducir para minimizar el costo en la producción, el consumo de los electrodos se debe básicamente a los siguientes factores:

- oxidación en la superficie
- desgaste por el arco en la punta
- roturas por fuerzas electromagnéticas

Los dos primeros factores se han podido reducir mediante el empleo de un óptimo sistema de operación y cuidado del electrodo en el proceso de fundición para lo cual sea implementado sistemas de refrigeración por agua en las columnas de los electrodos, de igual manera al mejorar la calidad y el control de la chatarra se minimiza el consumo, etc.

La rotura por fuerzas electrodinámicas se debe a una inestabilidad del horno al tener una alta corriente circulando por uno de los electrodos, generando fuerzas directas sobre los otros electrodos. Al operar con electrodos de longitudes largas y altas intensidades, la carga de trabajo puede superar la resistencia del electrodo y generar la ruptura. Al operar con intensidades menores a la nominal y arcos largos, la carga de trabajo del electrodo disminuye teniendo una menor probabilidad de ruptura, en la implementación de las nuevas técnicas de ahorro energético de este trabajo especialmente en el uso de los nuevos perfiles si se consideró la operación con arcos largos para trabajar con valores menores de corriente y evitar la ruptura de electrodos

Las consecuencias de la ruptura de los electrodos, fueron analizados durante un periodo de dos y hasta tres semanas, tiempo en el cual se monitoreo la ruptura inesperada del electrodo en cualquier etapa del proceso, es común que por la calidad de la chatarra en la etapa de perforación de cada carga sea el momento justificable de la ruptura mientras que en la etapa de afino a menos que se genere un desprendimiento de las paredes del horno se produzca una ruptura.

Al tener este problema de forma consecutiva y presente en múltiples coladas se debe básicamente a una alta corriente de paso en una de las fases, para minimizar el problema se realizó una compensación en la ganancia de corriente, mediante un análisis previo de todas las curvas y el comportamiento del factor de potencia.

Si el problema es repetitivo y consecuente en una semana de producción se podrían generar entre dos a tres rupturas en diferentes puntos del electrodo de la misma fase y no necesariamente en el acople donde se realizan los respectivos empalmes.

Al realizar una recopilación de las diferentes rupturas se determinó que en todas las ocasiones se efectuaron en la fase 3, en la tabla 3.10 se aprecia un mayor valor de la fuerza de la fase 3 respecto al resto de fases apreciándose de mejor manera en la etapa de afino, una alta corriente genera una elevada fuerza, pero una baja longitud de arco.

En la etapa de afino lo recomendable es extender el arco para que se produzca una mejor transferencia de calor, al mismo tiempo cuidar el calentamiento de paneles mediante una buena producción de escoria.

En las diferentes cargas la fuerza en la fase 3 es mayor por lo tanto aumento el consumo de energía y se encareció la producción por el elevado costo de los electrodos rotos.

Tabla 3.10. Fuerzas que ocasionan ruptura fase 3.

Fuerzas Electromagnéticas			
	F1 (N)	F2 (N)	F3(N)
Carga 1	933,6	1077,5	1370,0
Carga 2	864,0	1086,5	1334,7
Carga 3	940,1	1087,3	1351,7
Carga 4	939,3	1193,3	1473,7
Afino	1053,4	1484,9	1778,7
Promedio	946,1	1185,9	1461,8

(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

La corrección del consumo de electrodos se realizó mediante la compensación de la ganancia para este caso se redujo la ganancia en las tres fases, con el objetivo de disminuir la corriente, aumentar el voltaje, aumentar la longitud de arco, y obtener menores fuerzas electromagnéticas en cada fase como se aprecia en la tabla 3.11, la tendencia de la mayor fuerza se mantiene en la fase 3, pero sea conseguido minimizar la carga de trabajo del electrodo y evitar la ruptura.

Tabla 3.11. Fuerzas compensadas.

Fuerzas Electromagnéticas			
	F1 (N)	F2(N)	F3(N)
Carga 1	798,9	1063,6	1274,8
Carga 2	827,8	965,2	1223,5
Carga 3	971,6	1030,1	1229,0
Carga 4	894,2	1070,2	1243,2
Afino	957,6	1340,6	1546,4
Promedio	890,0	1093,9	1303,4

(Fuente: Planta Industrial Adelca, 2018.)

3.7. Resultados de la simulación del horno de arco.

La simulación para los diferentes taps changers del transformador, luego de haber encontrado la solución a la ecuación diferencial que representa el horno, permite visualizar la forma de onda de voltaje de arco en el proceso de fundición.

En las figuras 3.24 en adelante se representa el voltaje de arco para cada uno de los taps changer. Las constantes de simulación que son ingresadas al Simulink han generado valores de voltaje de arco similares a los valores que se obtuvieron por él analizador.

De acuerdo a las tablas de operación para el tap changer #1 el voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia es de $V_a = 299,7 V$, mientras la corriente de operación $I_{op} = 35,67 kA$.

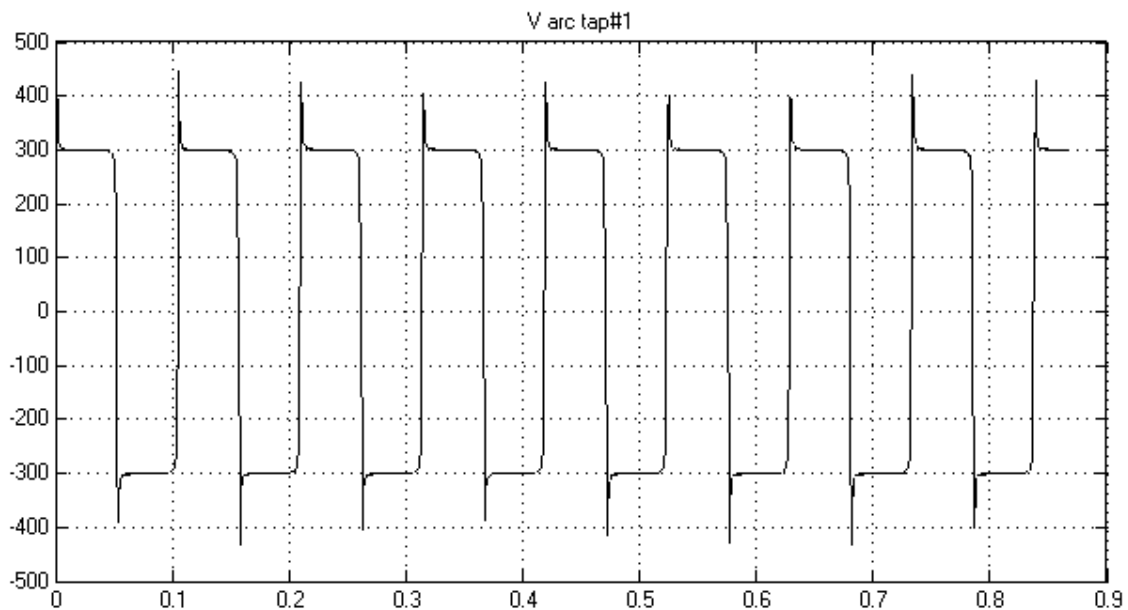


Figura 3.24. Simulación voltaje de arco tap changer #1.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #2 es 317,2 (V).

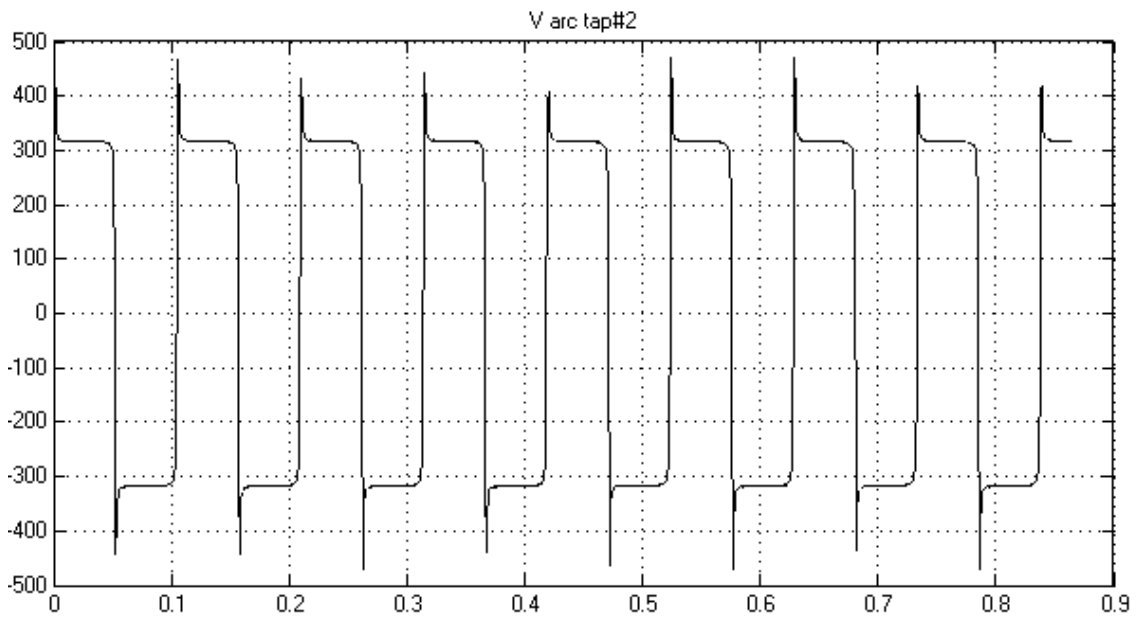


Figura 3.25. Simulación voltaje de arco tap changer #2.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #3 es 336,6 (V).

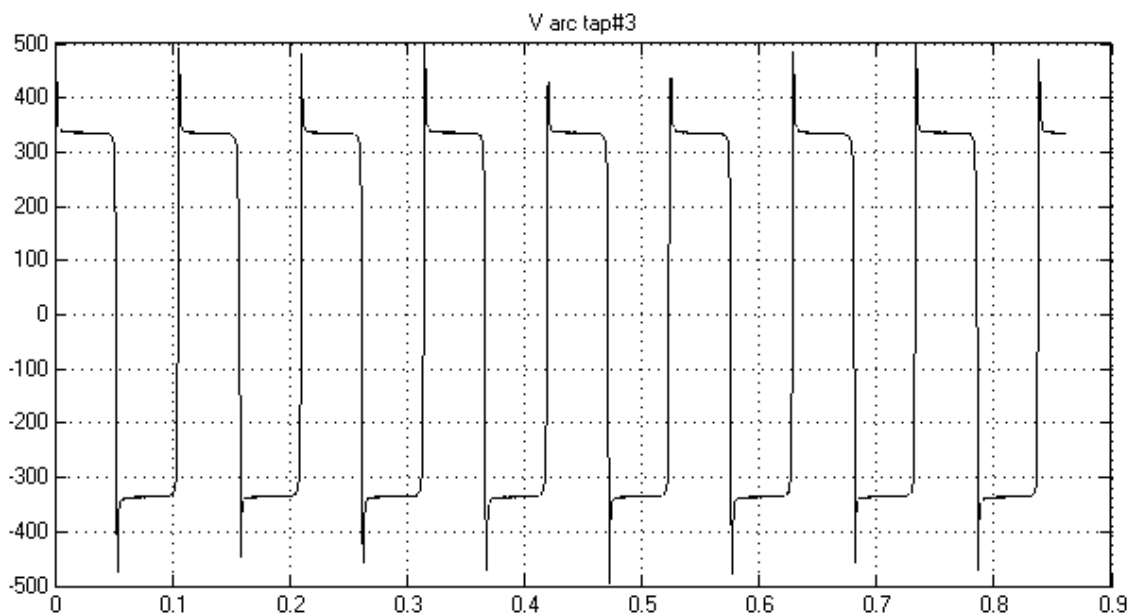


Figura 3.26. Simulación voltaje de arco tap changer #3.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #4 es 358,9 (V).

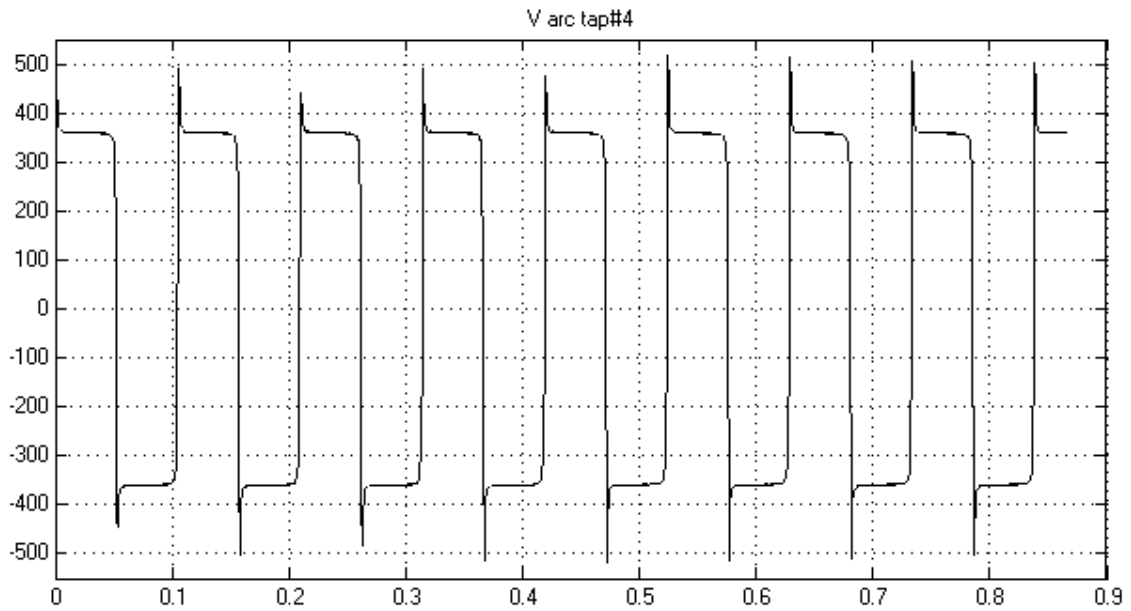


Figura 3.27. Simulación voltaje de arco tap changer #4.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #5 es 384,4 (V).

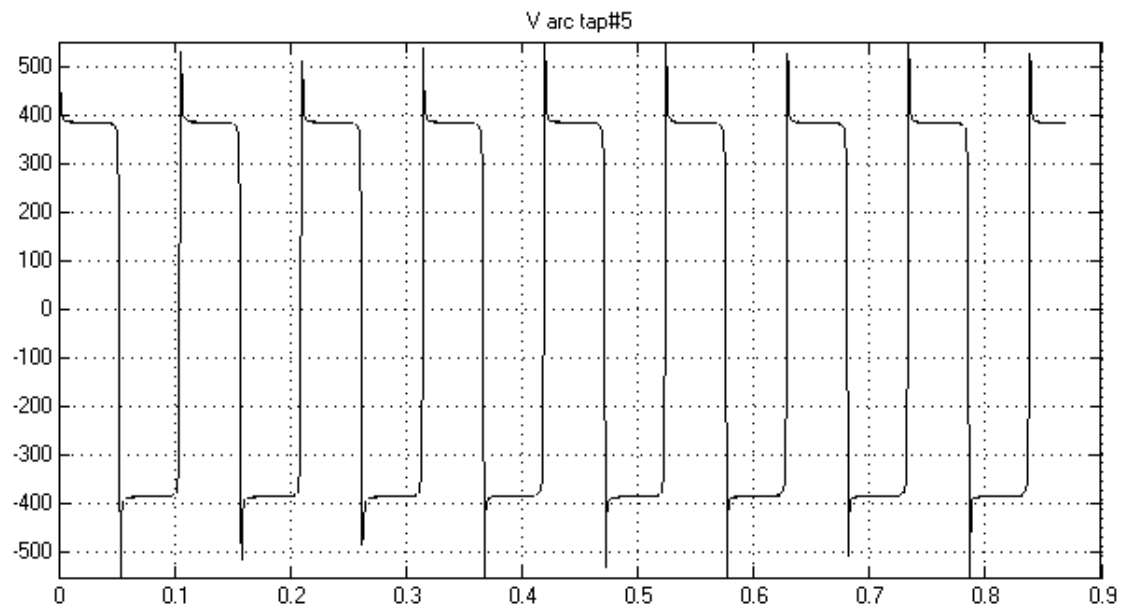


Figura 3.28. Simulación voltaje de arco tap changer #5.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #6 es 403,4 (V).

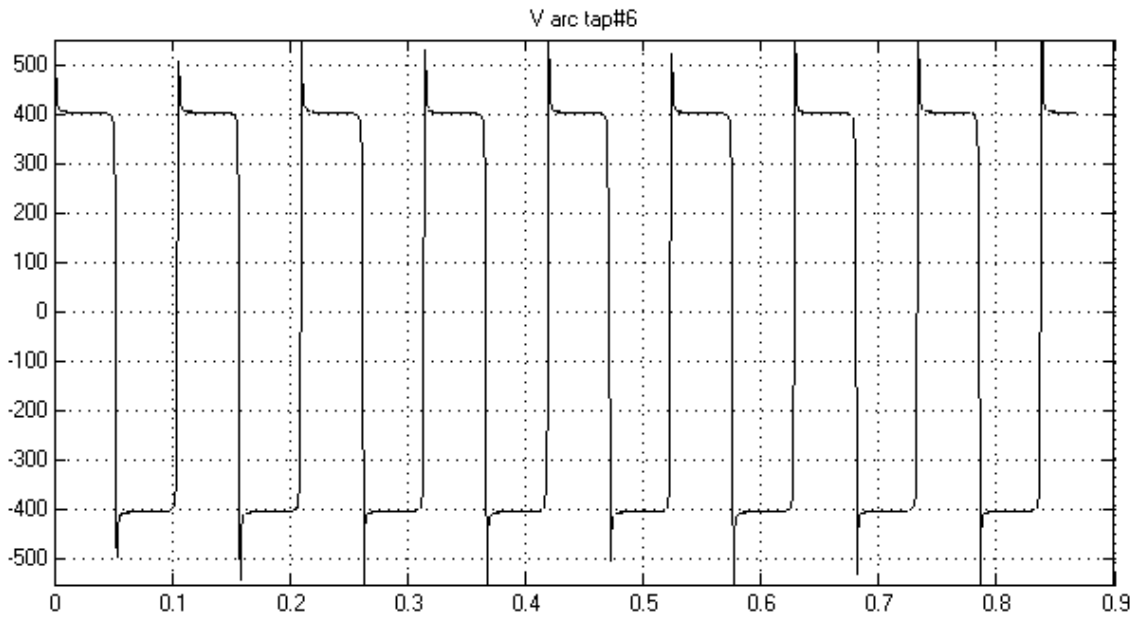


Figura 3.29. Simulación voltaje de arco tap changer #6.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #7 es 424,2 (V).

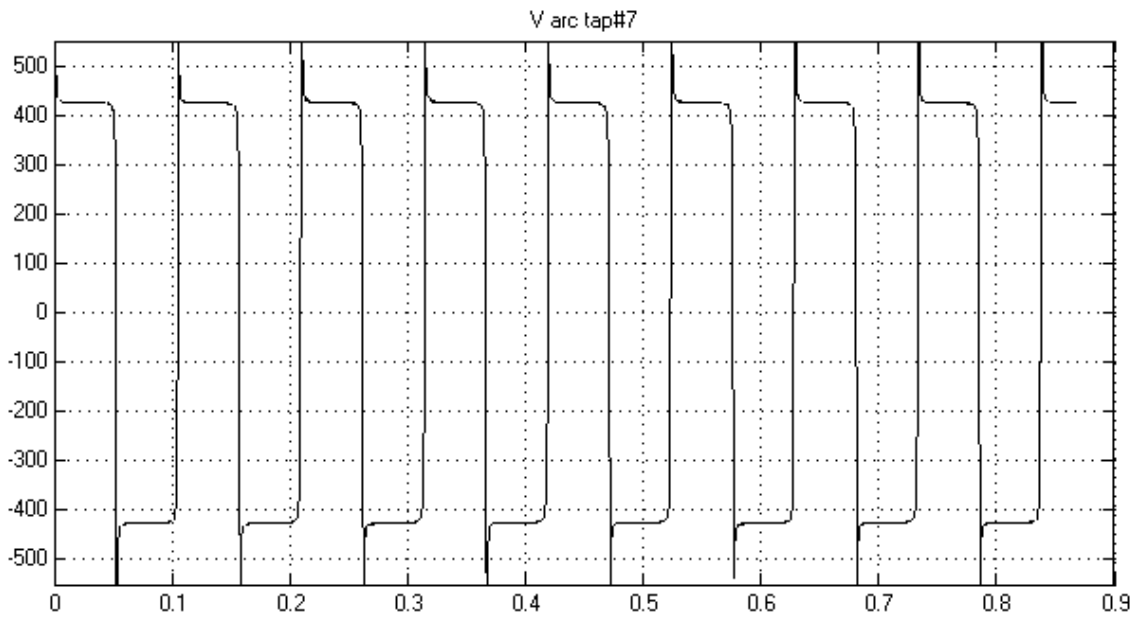


Figura 3.30. Simulación voltaje de arco tap changer #7.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #8 es 447,4 (V).

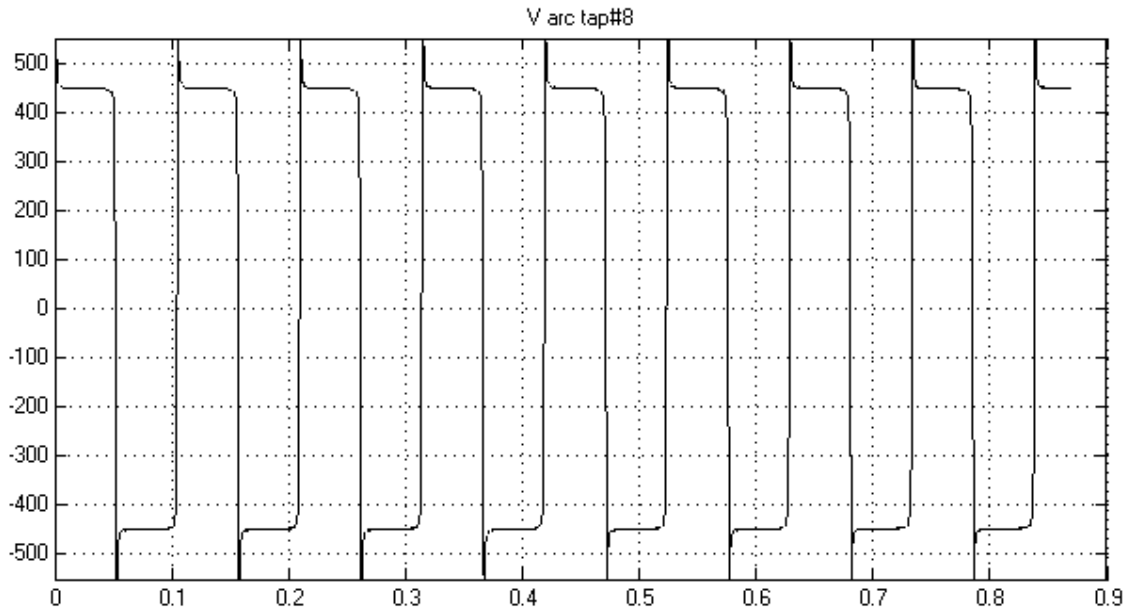


Figura 3.31. Simulación voltaje de arco tap changer #8.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

El voltaje de arco en el punto de máxima eficiencia para un tap changer #9 es 473,4 (V).

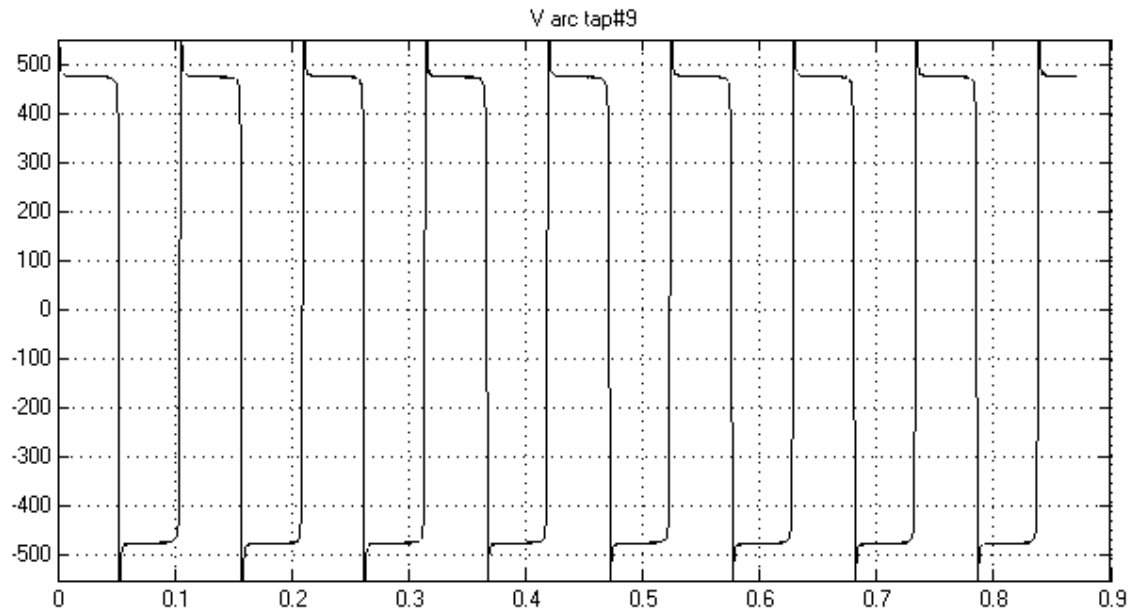


Figura 3.32. Simulación voltaje de arco tap changer #9.

(Fuente: Simulink, Matlab R2013b)

3.8. Impacto energético del proyecto en el sistema Eléctrico Ecuatoriano

El presente proyecto tiene como objetivo aportar información a las actuales y nuevas compañías ecuatorianas que se dedican a la producción de acero para que se implementen medidas de mejoramiento y lograr una eficiencia productiva y energética.

En el Ecuador y en el resto de la región andina la cantidad de hornos de arco eléctrico esta en crecimiento y dependen de la demanda del tonelaje que requiere el país o una región, el consumo de energía que requiere un horno es equivalente al consumo de una ciudad con un alto numero de habitantes, por tal razón al disminuir las perturbaciones y el consumo que un horno genera al sistema eléctrico nacional es de alta importancia para contribuir con una excelente calidad de energía.

La generación eléctrica en el país es de carácter hídrica considerada una generación limpia, mientras que en otros países la generación es de carácter térmica donde los costos del combustible son elevados generando un impacto ambiental en la etapa de generación, al minimizar el consumo de energía de un horno que representa una carga importante permite direccionar esta energía al resto de consumidores que en muchos de los casos en de países en vías de desarrollo no tienen accesibilidad a la energía eléctrica, adicionalmente el generar menos energía a un país le representa una reducción de los gastos en la compra de combustible como materia prima para las generadoras térmicas.

4. CONCLUSIONES

- El estudio e implementación de las técnicas en la operación de un horno de arco eléctrico para disminuir el consumo energético se cumplieron, basado en la implementación de nuevos perfiles de operación, la automatización de la planta de humos y el cambio en las ganancias del sistema de control, con los cual se obtuvo un ahorro de energía, disminución del tiempo de fusión y menor ruptura de electrodos.
- El sistema de control para la fundición de acero viene calibrado inicialmente para un correcto y normal funcionamiento, sin embargo, existen otras variables que interferir en la operación normal del horno basado en aspectos mecánicos y operacionales como la limpieza el mantenimiento y las condiciones del sistema hidráulico.
- El sistema de control con el que opera un horno de arco es del tipo PID, si las ganancias del controlador se encuentran calibradas y afinadas inicialmente esto permite que el horno opere en el área de mayor estabilidad de arco, si esta condición se cumple no es necesario manipular las ganancias del controlador, sin embargo en el presente proyecto se ha modificado la ganancia que permite tener una mejor velocidad de respuesta de las válvulas proporcionales que regulan la longitud de arco y que posicionan el funcionamiento del horno en el área de mayor eficiencia comprendida para un rango de factor de potencia entre 0,77 y 0,9.
- La operación de un horno de arco es un ente integrado por diferentes campos ingenieriles de carácter mecánico, eléctrico, químico que cada uno aporta conocimiento y técnicas para una óptima funcionalidad, por lo tanto, el resultado del consumo energético está dado por una adecuada coordinación y operatividad de todas sus ramas ingenieriles.

- La implementación de los nuevos perfiles de funcionamiento ha permitido obtener una reducción de un 5,6% del consumo de energía para una colada de 30 t, estos resultados dependen del tipo de acero que se está fabricando y de gran importancia las condiciones y características de la carga metálica (chatarra).

- La implementación de un sistema automático de regulación de las compuertas de la planta de humos en la etapa de afino ha permitido obtener una reducción del 1,1 % en el consumo de energía ya que los gases calientes del horno se evitan extraerlos en su totalidad hacia la planta de humos y se prefiere que permanezcan en el interior del horno de una forma controlada calentado y aumentado la temperatura del acero por lo tanto se minimiza el consumo de energía.

- Al implementar los nuevos perfiles de funcionamiento se ha obtenido una reducción del tiempo de fusión en un 4% que representa 1,2 min menos por cada colada que normalmente se funde en 30 min, con este nuevo sistema una colada se producirá en 28,8 min y al ganar 1,2 min en una producción de 24 horas se puede fundir una colada adicional a lo planificado es decir 30 t de acero más por día producido aumentando la productividad de una planta industrial para abastecer la demanda del mercado nacional.

- Las técnicas de ahorro energético que se han implementado en el presente proyecto tienen un desarrollo de carácter eléctrico y electrónico sin bien han permitido minimizar el consumo de energía y mejorar la eficiencia y productividad de un horno, por otro lado, las condiciones del sistema hidráulico son de alta importancia y prioridad para que estas técnicas implementadas tengan los resultados esperados caso contrario no se podría llegar a los objetivos planteados.

Referencias Bibliográficas

- [1]B. Bowman and K. Krüger, *Arc Furnace Physics*. Düsseldorf: Stahleisen, 2011.
- [2]J. Astigarraga Urquiza and J. Martín Zorraquino, *Hornos de arco para fusión de acero*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill, 1999.
- [3]Y. Toulouevski, *Innovation in electric arc furnaces 2013*. [Place of publication not identified]: Springer, 2013.
- [4]L. Chevrand, *Aciaria Eléctrica*, 1st ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2013.
- [5]J. Enríquez Berciano and J. Hernáez Marín, *El análisis térmico de la fundición y las propiedades de la misma*. Sevilla: [s.n.], 1981.
- [6]J. Enríquez Berciano and E. Tremps Guerra, *Metalurgia Secundaria*. Madrid: [s.n.], 2007.
- [7]Cengel., *Introduction to Thermodynamics & Heat Transfer With EES Software, 3rd Edition*. Mc Graw Hill 2008.
- [8]B. Linchevski, A. Sobolevski and A. Kalmenev, *Metalurgia de metales no ferrosos*. Moscú: MIR, 2014.
- [9]G. Enríquez Harper, *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México: Limusa, 2014.
- [10]F. Treppschuh, *Electrical Engineering of Arc Furnaces*. Braunschweig: Steel Academy, 2006.
- [11]A. Martínez Gracia, A. Valero Delgado and A. Aranda Usón, *Disminución de costes energéticos en la empresa*. Madrid: Fundación Confemetal, 2006.
- [12]J. Pino Tarragó, H. Terán Herrera, E. Mena Mena and E. Navas Medina, *Cálculos de fusión en la Metalurgia*, 1st ed. Sangolqui: ESPE, 2015.
- [13]Jaccard, "Hornos Electricos de Arco", *Jaccard.com.br*, 2018. [Online]. Available: <http://www.jaccard.com.br/ES/>. [Accessed: 24- Oct- 2018].
- [14]P. Argenta and M. Bianchi Ferri, "The EAF technology evolution and the Consteele", Italia.
- [15]"Tap-changers and switches - Transformer insulation and components (Transformers) | ABB", *New.abb.com*, 2018. [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/tap-changers-and-switches>. [Accessed: 24- Oct- 2018].
- [16]L. Jaccard, *Sistemas Eléctricos de Hornos de Arco*, 1st ed. Tenaris University, 2009.
- [17]L. Jaccard, *Parámetros Eléctricos de Operación-Curvas de Potencia*, 1st ed. Tenaris University, 2009.
- [18]L. R. Jaccard, *Sistemas Eléctricos de Hornos de Arco - Principales Consumos*, 1st ed. Tenaris University, 2009.
- [19]J. Montoya Pérez, "DISEÑO DE UN SISTEMA DE DUCTOS DE EXTRACCIÓN DE GASES PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO", Ing, UNAM, 2014.
- [20]*Moog.com*, 2018. [Online]. Available: <http://www.moog.com/literature/ICD/d660seriesvalves.pdf>. [Accessed: 11- Nov- 2018].
- [21]R. Hernández Gaviño, *Introducción a los sistemas de control, conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB [recurso electrónico]* \$c. México: Pearson Educación, 2010.

[22]Regulacionelectrica.gob.ec, 2018. [Online]. Available: http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE-20182.pdf. [Accessed: 13- Nov- 2018].

[23]Planta Industrial Adelca, 2018.

[24]P. principal, C. eléctrica, A. eléctrica, A. eléctrica, A. Fluke and A. Fluke, "Analizador de calidad eléctrica Fluke 435 II", *Fluke.com*, 2018. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/analizadores-de-calidad-electrica/analizadores-trifasicos-de-calidad-electrica/fluke-435-series-ii>. [Accessed: 18- Nov- 2018].

[25]H. Bermudez Rosero, "Técnica de identificación de parámetros para un modelo de horno de arco eléctrico", Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.

[26]Yan Wang, Zhizhong Mao, Yan Li, Huixin Tian, and Lifeng Feng, "Modeling and Parameter Identification of an Electric Arc," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Qingdao, China, 2008, pp. 740-743.

ANEXOS

Anexo I

Valores Máximos de P en la variación de Ra

Para obtener el valor máximo de P_{op} se deriva la ecuación 1.22 con respecto a R_a .

$$P_{op} = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a)$$

$$\frac{dP_{op}}{dR_a} = 0, \quad \frac{dP_{op}}{dR_a} = \frac{d \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} (R + R_a)}{dR_a} = 0$$

$$\frac{[V_f^2 (R + R_a)]' [(R + R_a)^2 + (X_{op})^2] - V_f^2 (R + R_a) [(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]'}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2} = 0$$

$$\frac{V_f^2 [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2] - V_f^2 (R + R_a) [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2]'}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2} = 0$$

$$\frac{V_f^2 [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2] - V_f^2 (R + R_a) (2R + 2R_a)}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2} = 0$$

$$V_f^2 [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2 - 2R^2 - 2R_aR - 2R_aR - 2R_a^2] = 0$$

$$[R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2 - 2R^2 - 2R_aR - 2R_aR - 2R_a^2] = 0$$

$$[-R^2 - R_a^2 + X_{op}^2 - 2R_aR] = 0$$

$$-(R + R_a)^2 + X_{op}^2 = 0$$

$$(R + R_a)^2 = X_{op}^2$$

$$R + R_a = X_{op}$$

Anexo II

Valores Máximos de P_a en la variación de R_a

Para obtener el valor máximo de P_a se deriva la ecuación 1.23 con respecto a R_a .

$$P_a = \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = 0, \quad \frac{dP_a}{dR_a} = \frac{d \frac{V_f^2}{(R + R_a)^2 + (X_{op})^2} R_a}{dR_a} = 0$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = \frac{(V_f^2 R_a)' [(R + R_a)^2 + (X_{op})^2] - (V_f^2 R_a) [(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]'}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2}$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = \frac{V_f^2 [(R + R_a)^2 + (X_{op})^2] - (V_f^2 R_a) [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + (X_{op})^2]'}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2}$$

$$\frac{dP_a}{dR_a} = \frac{V_f^2 [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + (X_{op})^2] - (V_f^2 R_a)(2R + 2R_a)}{[(R + R_a)^2 + (X_{op})^2]^2} = 0$$

$$V_f^2 [R^2 + 2RR_a + R_a^2 + (X_{op})^2] - (V_f^2 R_a)(2R + 2R_a) = 0$$

$$V_f^2 [(R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2) - (R_a)(2R + 2R_a)] = 0$$

$$[(R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2) - (2RR_a + 2R_a^2)] = 0$$

$$(R^2 + 2RR_a + R_a^2 + X_{op}^2 - 2RR_a - 2R_a^2) = 0$$

$$(R^2 - R_a^2 + X_{op}^2) = 0$$

$$R_a^2 = R^2 + X_{op}^2$$

$$R_a = \sqrt{R^2 + X_{op}^2}$$

Anexo III

Valores Maximos de P_a en la variaci3n de I

Para obtener el valor maximo de P_a se deriva la ecuaci3n 1.35 con respecto a I_{op} .

$$P_a = \sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2} - 3I_{op}^2 R$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = \frac{d\sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2} - 3I_{op}^2 R}{dI_{op}} = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = \left[\left((\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2 \right)^{1/2} \right]' - (3I_{op}^2 R)' = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = \frac{1}{2} \left[\left((\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2 \right)^{-1/2} \right] (3V_l^2 I_{op}^2 - 9I_{op}^4 X_{op}^2)' - (3I_{op}^2 R)' = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = \frac{1}{2} \frac{(3V_l^2 I_{op}^2 - 9I_{op}^4 X_{op}^2)'}{\sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2}} - (3I_{op}^2 R)' = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = \frac{(6V_l^2 I_{op} - 36I_{op}^3 X_{op}^2) - 6I_{op} R \cdot 2\sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2}}{2 * \sqrt{(\sqrt{3} V_l I_{op})^2 - (3I_{op}^2 X_{op})^2}} = 0$$

$$\frac{dP_a}{dI_{op}} = (6V_l^2 I_{op} - 36I_{op}^3 X_{op}^2) - 6I_{op} R \cdot 2 * \sqrt{3V_l^2 I_{op}^2 - 9I_{op}^4 X_{op}^2} = 0$$

$$(6V_l^2 I_{op} - 36I_{op}^3 X_{op}^2) - 6I_{op} R \cdot 2 * \sqrt{3V_l^2 I_{op}^2 - 9I_{op}^4 X_{op}^2} = 0$$

$$\frac{(6V_l^2 I_{op} - 36I_{op}^3 X_{op}^2)}{6I_{op} * 2 * \sqrt{3V_l^2 I_{op}^2 - 9I_{op}^4 X_{op}^2}} = R$$

$$\frac{6I_{op} (V_l^2 - 6I_{op}^2 X_{op}^2)}{6I_{op} * 2 * \sqrt{3I_{op}^2 (V_l^2 - 3I_{op}^2 X_{op}^2)}} = R$$

$$6I_{op} * 2 * \sqrt{3I_{op}^2 (V_l^2 - 3I_{op}^2 X_{op}^2)}$$

$$R = \frac{(V_l^2 - 6I_{op}^2 X_{op}^2)}{2 * \sqrt{3I_{op}^2} \sqrt{(V_l^2 - 3I_{op}^2 X_{op}^2)}} = \frac{(V_l^2 - 6I_{op}^2 X_{op}^2)}{2I_{op} \sqrt{3} \sqrt{(V_l^2 - 3I_{op}^2 X_{op}^2)}}$$

Anexo IV

Pliego tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución

ORDEN DE EMPASTADO