



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO
PARA EL CONTROL DE LAS COMPUERTAS DE VENTILACIÓN
SUPERIOR DEL HORNO ELÉCTRICO HELT – 300BSC, PARA LA
MEJORA EN LOS PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN EL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS
HIDRÁULICAS “CIRT” (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN)**

AUTOR: MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO

DIRECTOR: ING. MULLO QUEVEDO, ÁLVARO SANTIAGO

LATACUNGA

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

i

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL CONTROL DE LAS COMPUERTAS DE VENTILACIÓN SUPERIOR DEL HORNO ELÉCTRICO HELT – 300BSC, PARA LA MEJORA EN LOS PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT” (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN)”**, fue realizado por el señor **MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO**, ha sido revisado en su totalidad analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 25 de enero del 2019

ING. ÁLVARO SANTIAGO MULLO QUEVEDO

C.C. 0502768542

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO**, con cédula de ciudadanía 180518067-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL CONTROL DE LAS COMPUERTAS DE VENTILACIÓN SUPERIOR DEL HORNO ELÉCTRICO HELT – 300BSC, PARA LA MEJORA EN LOS PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT” (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN)”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 25 de enero del 2019

MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO

C.C.: 180518067-4



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL CONTROL DE LAS COMPUERTAS DE VENTILACIÓN SUPERIOR DEL HORNO ELÉCTRICO HELT – 300BSC, PARA LA MEJORA EN LOS PROCESOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS HIDRÁULICAS “CIRT” (CELEC UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN)”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 25 de enero del 2019



MONTERO MENA, ANIBAL SANTIAGO

C.C.: 180518067-4

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre, a mi padre y a mis hermanas.

AGRADECIMIENTO

A mi madre y a mi padre por ser los pilares fundamentales durante toda mi vida, con su apoyo incondicional en los momentos difíciles, sus consejos me guiaron en cada paso de mi etapa universitaria, a mis hermanas por el cariño inmenso que les tengo y espero que esta meta cumplida sea ejemplo de superación para cada una de ellas.

A mis compañeros de estudio, que más que compañeros son mis amigos los del departamento C-308, con los cuales vivimos muchos momentos de alegría a lo largo de todos estos años, formando un grupo muy unido de hermanos con nuestro prototipo ELECTROMACHINE, representamos con mucho orgullo a la mejor carrera Ingeniería Electromecánica.

A mi querida Universidad y a mis docentes que me brindaron sus conocimientos y experiencias, para mi formación profesional y humana.

ÍNDICE DE CONTENIDOS**CARATULA**

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii

CAPÍTULO I**PROBLEMA**

1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación e Importancia.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4

CAPÍTULO II**MARCO TEÓRICO**

2.1. Antecedentes investigativos	6
--	---

2.2.	Turbina hidráulica	6
2.2.1.	Clasificación de las turbinas hidráulicas	7
2.3.	Tratamientos térmicos	8
2.4.	Tipos de tratamientos térmicos	12
2.4.1.	Recocido	12
2.4.2.	Normalizado	13
2.4.3.	Endurecimiento	14
2.4.4.	Revenido	14
2.4.5.	Templado	15
2.5.	Etapas de tratamiento térmicos	16
2.5.1.	Etapas de calentamiento	17
2.5.2.	Etapas de soaking	18
2.5.3.	Etapas de enfriamiento	18
2.6.	Tratamientos térmicos más usados	19
2.6.1.	A través del endurecimiento	20
2.6.2.	Cementación - Cementación	20
2.6.3.	Endurecimiento por inducción	20
2.7.	Tipos de hornos para tratamientos térmicos	21
2.7.1.	Horno de fondo de cabina	21
2.7.2.	Horno de campana	21
2.7.3.	Horno de fosa vertical	22
2.7.4.	Horno de cinta	22
2.7.5.	Horno de rodillos	22
2.7.6.	Horno de empuje	22
2.7.7.	Horno de recocido de banda continua	23

	viii
2.7.8. Horno de resistencias eléctricas	23
2.8. Horno Eléctrico HELT-300BSC.....	24
2.8.1. Especificaciones Horno Eléctrico HELT-300BSC	25
2.9. Deterioro en rodets de turbina	26
2.9.1. Cavitación	26
2.9.2. Erosión.....	27
2.9.3. Corrosión	28
2.10. Procedimiento para la reparación del rodete de la turbina.....	29
2.10.1. Procedimiento de reparación parcial de rodets de turbinas	29
2.10.2. Procedimiento de reparación integral de rodets de turbinas.....	30
2.10.3. Procedimiento de repotenciación de rodets de turbinas	30
2.10.4. Procedimiento de controles finales de rodets de turbinas.....	30
2.11. Transferencia de calor por convección	30
2.11.1. Convección natural	31
2.11.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección natural.....	31
2.11.3. Convección forzada	33
2.12. Controlador lógico programable.....	35
2.13. PLC Simatic S7-1200.....	36
2.14. Portal TIA.....	37
2.15. Data Logging	38
2.16. Interfaz HMI	39
2.17. Fundamentación Legal	40
2.18. Sistemas de variables.....	41
2.19. Hipótesis	42
2.20. Cuadro de operacionalización de las variables.....	42

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.	Modalidad de la investigación.....	44
3.1.1.	Investigación bibliográfica.....	44
3.1.2.	Investigación de campo.....	45
3.1.3.	Investigación experimental.....	45
3.1.4.	Investigación aplicada.....	45
3.2.	Tipos de investigación.....	46
3.2.1.	Cuantitativo.....	46
3.3.	Diseño de la investigación.....	46
3.3.1.	Método de hallazgo inductivo.....	46
3.3.2.	Método de hallazgo deductivo.....	47
3.4.	Niveles de investigación.....	47
3.4.1.	Exploratorio.....	47
3.5.	Población y muestra.....	47
3.5.1.	Población.....	47
3.5.2.	Muestra.....	48
3.6.	Técnicas de recolección de datos.....	49
3.6.1.	Observación en laboratorio.....	49
3.6.2.	Instrumentos.....	50
3.6.3.	Validez y confiabilidad.....	51
3.7.	Técnicas de análisis de datos.....	51
3.8.	Técnicas de comprobación de hipótesis.....	52

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

	x
4.1. Análisis de los resultados	53
4.1.1. Análisis de la curva de tratamiento térmico del rodete Pelton de la Central Pucará	53
4.1.2. Error absoluto medio de la curva del proceso.....	57
4.1.3. Error porcentual absoluto medio de la curva del proceso	58
4.1.4. Calor total perdido por el rodete.....	59
4.1.5. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural.....	60
4.1.6. Relación entre el ángulo de apertura de las compuertas y el calor disipado	62
4.1.7. Calor perdido por las paredes y techo del horno	65
4.1.8. Simulación de la transferencia de calor en las paredes del horno	66
4.1.9. Simulación térmica del horno HELT 300-BSC	67
4.1.10. Análisis Termográfico de la etapa de enfriamiento	71
4.2. Discusión de los resultados	73
4.2.1. Aplicación del ángulo de apertura de las compuertas en el tratamiento térmico del rodete Pelton de la Central Pucará	73

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1. Datos informativos	81
5.2. Justificación	82
5.3. Objetivos.....	83
5.4. Fundamentación de la propuesta.....	83
5.4.1. Selección de la mejor alternativa para el diseño del sistema.....	83
5.4.2. Mecanismo accionado mediante pistón.	84
5.4.3. Mecanismo accionado mediante motor.	85
5.4.4. Sistema de poleas.	88

	xi
5.4.5. Criterios a evaluar.....	90
5.5. Diseño de la propuesta	92
5.5.1. Componentes del sistema de poleas	92
5.5.2. Selección del cable	93
5.5.3. Factor de seguridad para los cables de acero	98
5.5.4. Dimensionamiento del tambor y polea.....	98
5.5.5. Verificación de la tensión permisible a la fatiga	102
5.5.6. Geometría del tambor y polea	102
5.5.7. Cálculo del motor.....	106
5.5.8. Diseño de eje principal para tambores.....	112
5.5.9. Diseño de eje para poleas	122
5.5.10. Análisis computacional de los ejes	131
5.5.11. Selección de chaveta del eje principal para tambores.....	134
5.5.12. Selección de chumaceras.....	135
5.6. Análisis de costos	136
5.6.1. Costos directos	136
5.6.2. Costos indirectos	137
5.6.3. Costos totales	139
5.7. Programación del ángulo de apertura de las compuertas.....	140
5.8. Almacenamiento de datos mediante el PLC	142
5.9. Diseño de las pantallas del HMI.....	143
5.10. Prueba del sistema de control implementado	145
5.10.1. Cálculo de errores en el proceso térmico	150
5.11. Prueba de Hipótesis.....	152

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones 154

6.2. Recomendaciones 156

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 157**ANEXOS 162**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de las turbinas hidráulicas</i>	7
Tabla 2 <i>Especificaciones técnicas Horno HELT-300BSC</i>	25
Tabla 3 <i>Operacionalización de la variable independiente</i>	42
Tabla 4 <i>Operacionalización de la variable dependiente</i>	43
Tabla 5 <i>Rodetes de la Unidad de Negocio Hidroagoyán</i>	48
Tabla 6 <i>Instructivo del tratamiento Térmico del rodete Pelton Central Pucará</i>	53
Tabla 7 <i>Evaluación de criterios para la selección del sistema</i>	91
Tabla 8 <i>Selección del diámetro de cable</i>	96
Tabla 9 <i>Propiedades de los cables de acero</i>	98
Tabla 10 <i>Comparación de modelos de motores</i>	111
Tabla 11 <i>Ejes de Acero DIPAC</i>	112
Tabla 12 <i>Selección de rodamientos y chumaceras</i>	135
Tabla 13 <i>Costo de materiales y accesorios</i>	136
Tabla 14 <i>Costos de mano de obra</i>	137
Tabla 15 <i>Costos de equipos utilizados</i>	137
Tabla 16 <i>Total costos directos</i>	137
Tabla 17 <i>Costos de materiales y accesorios indirectos</i>	138
Tabla 18 <i>Costo por alquiler de maquinaria y equipos utilizados</i>	138
Tabla 19 <i>Costos por transporte</i>	138
Tabla 20 <i>Costo de diseño</i>	139
Tabla 21 <i>Total costos indirectos</i>	139
Tabla 22 <i>Costos totales</i>	139
Tabla 23 <i>Instructivo del tratamiento Térmico del Cono de la Central Agoyán</i>	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno de Tratamiento Térmico	9
Figura 2. Curva para cada tipo de tratamiento térmico	12
Figura 3. Etapas de un tratamiento térmico	16
Figura 4. Horno Eléctrico HELT-300BSC	24
Figura 5. Rodete erosionado Central San Francisco	28
Figura 6. Partes de corroídas de la Central San Francisco	29
Figura 7. Distribución de flujo convección natural.....	31
Figura 8. Convección forzada	34
Figura 9. Arquitectura PLC	35
Figura 10. PLC Simatic S7-1200	37
Figura 11. Interfaz TIA Portal.....	37
Figura 12. Simatic HMI panel.....	39
Figura 13. Turbina Pelton - Central Pucará	49
Figura 14. Cámara Termográfica FLIR SC 660	50
Figura 15. Distribución de termocuplas y soporte.....	54
Figura 16. Curva de Tratamiento Térmico rodete Pelton Central Pucará	55
Figura 17. Curva de temperaturas tratamiento térmico rodete Pelton	56
Figura 18. Error absoluto medio rodete Pelton Central Pucará	57
Figura 19. Error porcentual absoluto medio rodete Pelton	58
Figura 20. Coeficiente de transferencia de calor del aire por convección natural.....	61
Figura 21. Curva polinómica transferencia de calor por convección natural.....	61
Figura 22. Compuertas de ventilación superior	62
Figura 23. Área de liberación a diferentes ángulos de apertura de la compuerta.....	64
Figura 24. Ángulo de apertura de las compuertas VS Área de liberación de calor	64
Figura 25. Simulación térmica de las paredes del horno	66
Figura 26. Ensamble del horno para simulación térmica	67
Figura 27. Análisis térmico del horno compuertas cerradas	68
Figura 28. Análisis térmico del horno compuerta a 10 grados	69
Figura 29. Análisis térmico compuerta 20 grados.....	70

	xv
Figura 30. Trayectoria del flujo análisis térmico	70
Figura 31. Mapa térmico en el instante de la apertura de la compuerta	71
Figura 32. Puntos específicos del análisis térmico	72
Figura 33. Análisis etapa de enfriamiento - FLIR SC 660	73
Figura 34. Apertura de compuertas forma manual	81
Figura 35. Mecanismo accionado mediante pistón	84
Figura 36. Compuerta cerrada (vástago posición cero)	84
Figura 37. Compuerta abierta (vástago máxima de carrera)	85
Figura 38. Mecanismo accionado mediante motor	86
Figura 39. Representación de eslabones del mecanismo de 4 barras	86
Figura 40. Ángulo de trasmisión y	87
Figura 41. Límites de posición del mecanismo de 4 barras	88
Figura 42. Sistema de poleas	89
Figura 43. Vista posterior del sistema de poleas	89
Figura 44. Partes del sistema de poleas	93
Figura 45. Diagrama de cuerpo libre del peso de la compuerta	94
Figura 46. Tensión del cable con respecto al ángulo de apertura	95
Figura 47. Geometría de tambor	103
Figura 48. Tambor ranurado	104
Figura 49. Geometría de la polea	104
Figura 50. Polea estándar	105
Figura 51. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas de la compuerta	106
Figura 52. Distancia entre el centro de masa y eje principal	106
Figura 53. Circunferencia del rodillo	108
Figura 54. Curva para la selección de la potencia del motor	110
Figura 55. Ángulo de inclinación β de la tensión del cable	114
Figura 56. Diagrama de fuerzas en el plano XY	115
Figura 57. Diagrama de fuerzas en el plano XZ	115
Figura 58. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XY	115
Figura 59. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XZ	116
Figura 60. Fluctuación de esfuerzos eje principal para tambores	121

Figura 61. Eje principal para tambor.....	122
Figura 62. Distribución de fuerzas en las poleas	123
Figura 63. Diagrama de fuerzas en el plano XY	124
Figura 64. Diagrama de fuerzas en el plano XZ	124
Figura 65. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XY	125
Figura 66. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XZ.....	125
Figura 67. Fluctuación de esfuerzos eje para poleas	130
Figura 68. Eje para poleas.....	131
Figura 69. Factor de seguridad eje principal para tambores.....	132
Figura 70. Deformación eje principal para tambores	132
Figura 71. Factor de seguridad eje para poleas	133
Figura 72. Deformación eje para poleas.....	133
Figura 73. Demisiones de chaveta y chavetero estándar	134
Figura 74. Selección de chaveta y chavetera	134
Figura 75. Rodamientos y Unidades de Rodamientos estándar SKF	135
Figura 76. FB control de compuertas de ventilación.....	140
Figura 77. Estructuración FB control compuertas de ventilación	141
Figura 78. FB porcentaje de apertura	141
Figura 79. Data Logger almacenamiento de datos	142
Figura 80. Ingreso de recetas HMI	143
Figura 81. Estado de Compuertas HMI	144
Figura 82. Monitoreo de calentamiento HMI	145
Figura 83. Monitoreo de proceso HMI	145
Figura 84. Cono central Agoyán	146
Figura 85. Ingreso del cono al horno	147
Figura 86. Distribución de termocuplas y soporte del cono	147
Figura 87. Curva de Tratamiento Térmico del Cono Central Agoyán	148
Figura 88. Curva de temperaturas tratamiento térmico Cono Agoyán.....	149
Figura 89. Error absoluto medio Cono Central Agoyán	150
Figura 90. Error porcentual absoluto medio Cono Central Agoyán.....	151

RESUMEN

El presente trabajo de investigación describe el Diseño y factibilidad de un sistema automático para el control de las compuertas de ventilación superior del horno eléctrico HELT – 300BSC, ubicado en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulica “CIRT”, que realiza los procesos de tratamientos térmicos para rodetes y partes de las turbinas hidráulicas. En la actualidad el sistema de control del horno no posee ningún parámetro de alerta, para la apertura de sus compuertas de ventilación superior lo cual generó un error absoluto medio de 13.4 °C, en la etapa de enfriamiento de su último tratamiento registrado. Con la simulación térmica de la trayectoria del fluido del horno, se determinó que la temperatura a la que quedan expuestas las compuertas de ventilación es de 96.67 °C sin afectar a la parte trasera de la compuerta. Un análisis con una cámara termográfica permitió verificar las temperaturas registradas por las termocuplas del horno, se observó que las compuertas de ventilación no provocan un aumento en la velocidad de enfriamiento de los procesos térmicos. Como parte de la interacción del control con el operador, se eliminó el ingreso de los parámetros del tratamiento mediante un ordenador, con la implementación de una nueva interfaz de HMI facilitando el ingreso de los parámetros, de igual forma una problemática que se solucionó fue la adquisición de los registros de temperaturas por medio de su PLC. Con la propuesta del diseño mecánico y la implementación del sistema automático de control se genera una solución para la apertura de las compuertas, la misma que fue sometida a prueba con el Cono de la Central Agoyán, registrando un error absoluto medio de 6.28 °C.

PALABRAS CLAVE:

- **TRATAMIENTO TÉRMICO**
- **HORNO ELÉCTRICO HELT-300BSC**
- **ENFRIAMIENTO - HORNO**
- **INTERFAZ DE HMI**

ABSTRACT

This research work describes the design and feasibility of an automatic system for the control of the upper ventilation gates of the electric furnace HELT - 300BSC, located in the Center for Research and Recovery of Hydraulic Turbines "CIRT", which performs heat treatment processes for impellers and parts of hydraulic turbines. At present, the furnace control system does not have any warning parameters for the opening of its superior ventilation gates, which generated an average absolute error of 13.4 °C, in the cooling stage of its last registered treatment. With the thermal simulation of the furnace fluid path, it was determined that the temperature to which the ventilation dampers are exposed is 96.67 °C without affecting the back of the damper. An analysis with a thermographic camera made it possible to verify the temperatures recorded by the thermocouples of the furnace, it was observed that the ventilation gates do not cause an increase in the cooling speed of the thermal processes. As part of the interaction of the control with the operator, the entry of the treatment parameters by means of a computer was eliminated, with the implementation of a new HMI interface facilitating the entry of the parameters, in the same way a problem that was solved was the acquisition of the temperature records through its PLC. With the proposal of the mechanical design and the implementation of the automatic control system, a solution is generated for the opening of the floodgates, which was tested with the Cone of the Agoyan Power Plant recording an average absolute error of 6.28 °C.

KEYWORDS:

- **THERMAL TREATMENT**
- **ELECTRIC OVEN HELT-300BSC**
- **COOLING - OVEN**
- **HMI INTERFACE**

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

El Horno Eléctrico HELT – 300BSC realiza los tratamientos térmicos de turbinas hidráulicas y partes industriales, controlado mediante un PLC el mismo que recibe órdenes de un computador para llevar acabo los tratamiento, lo cual limita el proceso al tener que estar siempre en conexión con la computadora, también el horno cuenta con compuestas de ventilación superior que funcionan de forma manual y no existe un control en la apertura de las compuertas de ventilación lo que provoca un exceso de calor acumulado.

En la actualidad para la apertura de las compuertas se utiliza un puente grúa, el mismo que sufre un desgaste rápido por las altas temperaturas que soporta, además como la operación del puente grúa y el control de este proceso depende de un ser humano, los procesos no son automáticos lo que provoca riesgo para los operadores y la maquinaria, también el tiempo de apertura de las compuertas no es el adecuado para que el tratamiento térmico cumpla sus condiciones ideales.

Por ello he decidido analizar la factibilidad y diseñar un sistemas automático que controle la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, para así conseguir mejorar el rendimiento del horno, con ello de igual forma existirá una mejora en los procesos de tratamientos térmicos en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales "CIRT".

1.2. Antecedentes

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales "CIRT" es parte de la unidad de negocio Hidroagoyán, está ubicado en el Km 5 ½ de la Vía Baños-Puyo, en la provincia de Tungurahua cantón de Baños de Agua Santa.

El centro de investigación se caracteriza por su aporte técnico, tecnológico de investigación y el desarrollo de conocimientos en el área de recuperación de turbinas hidráulicas y partes industriales, cumpliendo todos los estándares de calidad.

Debido a la demanda energética que cada día crece en nuestro país, tanto las centrales hidroeléctricas y sus componentes esta sometidos a un trabajo forzado, lo que reduce a un más su tiempo de vida útil, debido al desgaste por la erosión y la cavitación producidas por los sedimentos que se encuentran en el agua.

Para recuperar las turbinas hidráulicas y componentes industriales se realiza un proceso de llenado a base de soldadura especializada en el área afectada, y después de la soldadura se da paso a un alivio de tensiones post-soldadura.

Mediante un horno que es un dispositivo que genera calor y lo mantiene en un espacio cerrado, se puede realizar dichos tratamientos para cambiar las propiedades físicas del material; la unidad de negocio Hidroagoyán y el "CIRT" se vieron en la necesidad de adquirir un Horno Eléctrico HELT – 300BSC, el cual funciona con el principio de las resistencias eléctricas o niquelinas para generar calor.

El horno es operado mediando un controlador lógico programable (PLC) que en la actualidad se encuentra funcionando mediante parámetros que son ingresados por una

computado, por ello surge la necesidad de crear un nuevo sistema de control HMI para que el control se limite solo a su pantalla, también cuenta con un sistema de compuertas de ventilación superior que son las encargadas de liberar el exceso de calor para mantener en sus condiciones ideales los tratamientos térmicos y de igual forma en la parte de enfriamiento del horno, la apertura y cierre de las mismas son de forma manual por lo que existe la necesidad de diseñar un sistema de forma automática que se entrelace con el sistema de control del horno y realizar las tareas de levantamiento y cierre de una forma autónoma, aportando con esto un control más óptimo al proceso y de igual forma mejorando el rendimiento en cada proceso térmico que se lleve a cabo.

1.3. Justificación e Importancia

El CIRT cuenta con el Horno Eléctrico HELT – 300BSC para realizar los tratamientos térmicos, siendo el más grande del país en sus características, con tecnología de punta y personal altamente calificado para realizar estos procesos, los mismos que requieren la automatización de la apertura y cierre de sus compuertas superiores.

Con el análisis de factibilidad y el diseño del sistema automático para la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior se garantiza un mejor rendimiento del horno y de igual forma optimiza las condiciones de trabajo de los operadores y las maquinarias que están controlando los procesos de tratamientos térmicos del horno.

Para que un tratamiento térmico cumpla con todos sus parámetros de calidad el control de los procesos debe ser de forma automática y que se cumplan en sus tiempos requeridos para que el componente que es reparado sea óptimo y pueda volver a funcionar adecuadamente para lo que fue creado.

Dentro de los objetivos que tiene la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se encuentra la formación integral de profesionales de excelencia con enfoque investigativo, capaces de solucionar problemas en el entorno en el que se desarrollen, es por eso que el presente proyecto busco la mejora de la eficiencia del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, encargado de los tratamientos térmicos en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales "CIRT" al incorporar un sistema automático que se encargue de la apertura y cierre de sus compuertas de ventilación superior.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar la factibilidad y diseñar un sistema de control automático en la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior, mediante un software de simulación térmica con un sistema HMI, para la mejora en los procesos de tratamientos térmicos del Horno Eléctrico HELT – 300BSC.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la factibilidad de implementación de un sistema de control automático para las compuertas de ventilación del Horno Eléctrico HELT – 300BSC.
- Diseñar un sistema para la apertura de compuertas de ventilación superior.
- Implementar un nuevo sistema HMI.
- Generar los documentos técnicos y reportes de ingeniería para la construcción del sistema automático.

- Realizar la programación para el enlace de control entre el horno y sistema de apertura.
- Generar un protocolo de pruebas que permita verificar el diseño realizado.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes investigativos

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales "CIRT" genera un gran impacto en el cambio de la matriz productiva de energía eléctrica en el país, su desarrollo tecnológico elimina la dependencia que se tenía al momento del mantenimiento de las centrales y de la reparación de turbinas hidráulicas, es por ello que el centro se encuentra equipado con maquinaria de última tecnología y personal con experiencia y altamente capacitado.

Dentro de la recuperación de turbinas hidráulicas un proceso importante es el tratamiento térmico que se lleva a cabo a la turbina, por lo cual el centro de investigación trabajó en conjunto con Verónica Paulina López Pérez y Wilson Andrés Ramírez Montesdeoca (2011), de la Escuela Politécnica Nacional de Chimborazo, mediante su tema de investigación titulado "Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC unidad de negocio Hydroagoyán)", logrando diseñar un horno con el principio de resistencias eléctricas, simulando el comportamiento del rodete con la variación de tiempos y temperaturas del proceso y con un control automático mediante un sistema PID, este diseño establece un rendimiento del 91.51% de horno.

2.2. Turbina hidráulica

La turbina hidráulica es un motor que transforma la energía de caudal del agua, en energía mecánica de rotación. El elemento encargado de realizar esta acción es el

rodete o rotor que en su configuración cuenta con palas, hélices o cuchillas situados alrededor de su circunferencia, de tal forma que al chocar el fluido produce una fuerza tangencial, que impulsa y hacer girar el rodete (Alajo & Anchatuña, 2013).

2.2.1. Clasificación de las turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos:

- **Turbinas de acción:** El agua es dirigida a sus alabes a través de inyectores, que a su vez convierte la energía potencial del agua en energía mecánica con la variación de su sección (Alajo & Anchatuña, 2013).
- **Turbinas de reacción:** El agua llega a los alabes a una presión superiores a la atmosférica y con una gran velocidad, se ingresa energía potencial y energía cinética, que se trasforma en energía mecánica y rotación del rodete (Alajo & Anchatuña, 2013).

Tabla 1

Clasificación de las turbinas hidráulicas

Turbinas de acción	Turbinas de reacción
Pelton	Francis
Kaplan	Bulbo
Hélice	

- **Turbina Pelton:** Es el modelo más antiguo de turbina y una de los más utilizadas en el mundo, esta máquina funciona por el impacto del chorro de agua sobre sus cucharas, están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con caudales pequeños (Alajo & Anchatuña, 2013).

- **Turbina Kaplan:** Turbinas axiales, con la diferencia de la variación del ángulo de sus palas durante su funcionamiento, están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños y con grandes caudales.
- **Turbina Hélice:** Son muy parecidas a las Kaplan en su configuración, pero con la diferencia que sus palas son fijas y no cambia su ángulo.
- **Turbina Francis:** Son turbinas de flujo mixto, poseen un diseño complejo y son capaces de variar el ángulo de sus alabes durante su funcionamiento y fueron creados para trabajar en saltos de agua medios con caudales medios (López & Ramirez, 2011).

2.3. Tratamientos térmicos

El tratamiento térmico es una operación o combinación de operaciones que implican calentar a una velocidad específica, remojar a una temperatura durante un período de tiempo y enfriar a una velocidad específica. El objetivo es obtener una microestructura deseada para lograr ciertas propiedades predeterminadas (físicas, mecánicas, magnéticas o eléctricas) (Manna, 2012).

El tratamiento térmico, como su nombre indica, es una serie de tratamientos en los que el calor se utiliza para alterar las propiedades de un metal o aleación. Debido a que el tiempo a temperatura también es importante, el tratamiento térmico puede definirse como una serie de tratamientos de tiempo y temperatura. Los tratamientos térmicos se utilizan para una variedad de propósitos, siendo el más importante el control de las propiedades mecánicas, especialmente la dureza, ductilidad, resistencia, tenacidad y tensiones internas.

El éxito del tratamiento térmico requiere un estrecho control de todos los factores que afectan al calentamiento y enfriamiento de un metal. Este control sólo es posible cuando se dispone del equipo adecuado. De acuerdo a Jirapure y Borade (2014) el horno debe ser de tamaño y tipo adecuado y controlado, de modo que las temperaturas se mantengan dentro de los límites prescritos para cada operación. Incluso la atmósfera del horno afecta el estado del metal que se está tratando térmicamente.



Figura 1. Horno de Tratamiento Térmico

Fuente: (López & Ramirez, 2011)

La atmósfera del horno está formada por los gases que circulan por la cámara de calentamiento y que rodean al metal a medida que se calienta. En un horno eléctrico, la atmósfera es aire o una mezcla controlada de gases. Al contrario, en un horno de combustible, la atmósfera es la mezcla de gases que proviene de la combinación del aire y los gases liberados por el combustible durante la combustión (Gedeon, 2010). Estos gases contienen varias proporciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y otros hidrocarburos. Los hornos de combustible pueden proporcionar tres atmósferas distintas cuando se varían las proporciones de aire y combustible. Se llaman oxidantes, reductores y neutros.

Los objetivos principales en los tratamientos térmicos son aumentar la resistencia, el arnés y la resistencia al desgaste (endurecimiento en masa, endurecimiento superficial), aumentar la ductilidad y la suavidad (revenido, recocido de recristalización), aumentar la dureza (revenido, recocido de recristalización), obtener un tamaño de grano fino (recocido de recristalización, recocido completo, normalización), eliminar las tensiones internas inducidas por la deformación diferencial por el trabajo en frío, el enfriamiento no uniforme de la alta temperatura durante la fundición y la soldadura (recocido de alivio de tensiones) (Sarrate, 1995).

De igual manera, para mejorar la maquinabilidad (recocido completo y normalización), para mejorar las propiedades de corte de los aceros para herramientas (temple y revenido), para mejorar las propiedades superficiales (endurecimiento superficial, tratamiento estabilizador de la resistencia a la corrosión y endurecimiento por precipitación y resistencia a altas temperaturas, tratamiento superficial), para mejorar las propiedades eléctricas (recristalización, revenido, temple, endurecimiento por envejecimiento), para mejorar las propiedades magnéticas (endurecimiento, transformación de fase) (Sarrate, 1995).

La dureza es la resistencia de un material deformarse. Los valores de dureza son aproximadamente proporcionales a la resistencia de un metal y pueden dar una indicación de las propiedades de desgaste de un material. De esta manera, valores de dureza pueden ser útiles durante el proceso de selección de materiales y para evaluaciones de control de calidad, pero los valores no se pueden aplicar directamente durante el diseño de una pieza.

Por otro lado, la ductilidad se define como la capacidad de un material de deformarse plásticamente sin fracturarse, y generalmente se mide por la cantidad que una barra bajo carga de tracción alargará antes de fracturarse (Ordoñez, 2013). La elongación se expresa como un porcentaje de la longitud original de la barra.

La resistencia es la capacidad de un material para resistir una fuerza aplicada, y tres tipos son comúnmente discutidos. La resistencia elástica, conocida como límite elástico, es la resistencia antes de que el material se deforme permanentemente (Ordoñez, 2013). El límite elástico es la resistencia de un material antes de que se produzca una deformación plástica apreciable. La resistencia máxima a la tracción es la resistencia máxima que exhibe un metal durante la deformación por tracción.

La dureza es la capacidad de un metal de absorber energía en el rango plástico. Aunque existen varios enfoques para definir la tenacidad, uno de los más antiguos es considerarla como el área total bajo la curva de tensión-deformación. Esta área es una indicación de la cantidad de trabajo por unidad de área que se puede hacer sin que falle. Debido a que la dureza es el área bajo la curva de tensión-deformación, es una función tanto de la fuerza como de la ductilidad (Flores, 2002).

Las tensiones residuales o bloqueadas surgen en los componentes de muchas fuentes y, si no se tratan, pueden provocar distorsión de los componentes, concentración de tensiones y fallos. Una de las causas más comunes de tensiones residuales es el enfriamiento no uniforme a temperaturas elevadas. Al enfriarse, la superficie se enfría rápidamente y se contrae, mientras que el núcleo interno permanece más caliente durante más tiempo y se enfría más lentamente, creando así

tensiones residuales. Los componentes se calientan a una temperatura adecuada y se mantienen a temperatura durante el tiempo suficiente para reducir las tensiones residuales, y luego se enfrían lentamente para que no se introduzcan nuevas tensiones residuales (García, 2014).

2.4. Tipos de tratamientos térmicos

Hoy en día se utilizan cuatro tipos básicos de tratamiento térmico. Son recocidos, normalizados, templados y revenidos. Las técnicas utilizadas en cada proceso y se detallan en los siguientes párrafos.

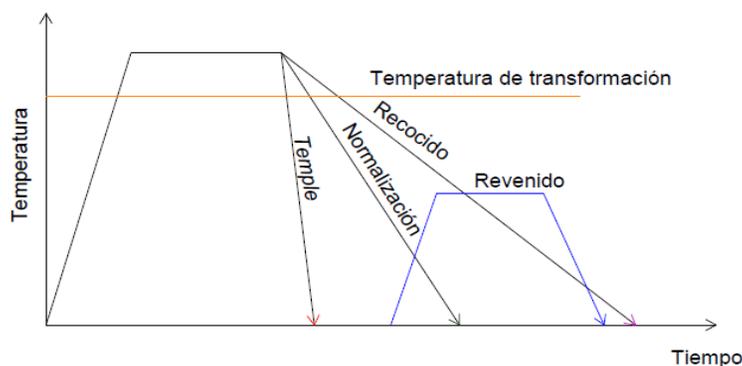


Figura 2. Curva para cada tipo de tratamiento térmico

Fuente: (López & Ramirez, 2011)

2.4.1. Recocido

En general, el recocido es lo opuesto al endurecimiento, usted recoce los metales para aliviar las tensiones internas, suavizarlos, hacerlos más dúctiles y refinar sus estructuras de grano. El recocido consiste en calentar un metal a una temperatura específica, mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo determinado y, a continuación, enfriar el metal a temperatura ambiente. El método de enfriamiento depende del metal y de las propiedades deseadas. Algunos metales son enfriados en el

horno, y otros son enfriados enterrándolos en cenizas, cal u otros materiales aislantes (ASM Internacional, 2015).

Un claro ejemplo es en la soldadura, la cual produce áreas que tienen metal fundido al lado de otras áreas que están a temperatura ambiente. A medida que la soldadura se enfría, se producen tensiones internas junto con puntos duros y fragilidad. La soldadura puede debilitar el metal. El recocido es sólo uno de los métodos para corregir estos problemas (ASM Internacional, 2015).

2.4.2. Normalizado

La normalizado es un tipo de tratamiento térmico aplicable únicamente a los metales ferrosos. Se diferencia del recocido en que el metal se calienta a una temperatura más alta y luego se retira del horno para el enfriamiento por aire (Krauss, 2005).

El propósito de la normalización es eliminar las tensiones internas inducidas por el tratamiento térmico, la soldadura, la fundición, la forja, el conformado o el mecanizado. La tensión, si no se controla, conduce a la falla del metal; por lo tanto, antes de endurecer el acero, debe normalizarlo primero para asegurar los máximos resultados deseados. Por lo general, los aceros bajos en carbono no requieren normalización; sin embargo, si estos aceros se normalizan, no se producen efectos nocivos. Las piezas fundidas suelen estar recocidas, en lugar de normalizadas; sin embargo, algunas piezas fundidas requieren el tratamiento de normalización (Krauss, 2005).

Los aceros normalizados son más duros y resistentes que los aceros recocidos. En la condición normalizada, el acero es mucho más resistente que en cualquier otra condición estructural. Las piezas sometidas a impacto y las que requieren máxima

tenacidad con resistencia a esfuerzos externos suelen normalizarse. Al normalizar, la masa de metal influye en la velocidad de enfriamiento y en la estructura resultante. Las piezas finas se enfrían más rápido y son más duras después de la normalización que las gruesas. En el recocido (enfriamiento en horno), la dureza de ambos es aproximadamente la misma (Gedeon, 2010).

2.4.3. Endurecimiento

Para endurecer el acero, se enfría rápidamente después de haberlo empapado a fondo a una temperatura ligeramente superior a su punto crítico superior. La adición de aleaciones al acero disminuye la tasa de enfriamiento requerida para producir dureza. Una disminución de la velocidad de enfriamiento es una ventaja, ya que disminuye el peligro de agrietamiento y deformación (Aspilcueta, 2014).

Después de aplicar el tratamiento de endurecimiento, el acero es a menudo más duro de lo necesario y demasiado quebradizo para la mayoría de los usos prácticos. Además, durante el enfriamiento rápido a partir de la temperatura de endurecimiento se producen fuertes tensiones internas. Para aliviar las tensiones internas y reducir la fragilidad, debe templar el acero después de que se haya endurecido (Hinrichsen, 2016).

2.4.4. Revenido

El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura específica (por debajo de su temperatura de endurecimiento), manteniéndolo a esa temperatura durante el tiempo requerido, y luego enfriándolo, normalmente se infunde aire. La resistencia, dureza y

ductilidad resultantes dependen de la temperatura a la que se calienta el acero durante el proceso de templado.

El propósito del revenido es reducir la fragilidad que se produce por el endurecimiento y producir propiedades físicas definidas dentro del acero. El revenido siempre sigue, nunca precede, a la operación de temple. Además de reducir la fragilidad, el revenido ablanda el acero. Esto es inevitable, y la cantidad de dureza que se pierde depende de la temperatura a la que se calienta el acero durante el proceso de templado. Esto es válido para todos los aceros, excepto para el acero de alta velocidad. El revenido aumenta la dureza del acero rápido (ASM Internacional, 2015).

El revenido se realiza siempre a temperaturas por debajo del punto crítico del acero. En este sentido, el revenido difiere del recocido, la normalización y el endurecimiento en el que las temperaturas están por encima del punto crítico superior. Cuando se recalienta el acero endurecido, el revenido comienza a 212°F y continúa a medida que la temperatura aumenta hacia el punto de baja criticidad. Seleccionando una temperatura de revenido definida, se puede predeterminar la dureza y resistencia resultantes. El tiempo mínimo de temperatura para el revenido debe ser de 1 hora.

2.4.5. Templado

El acero puede ser templado después de haber sido normalizado, siempre y cuando exista alguna dureza a templar. El acero recocido es imposible de templar. El revenido alivia las tensiones de temple y reduce la dureza y la fragilidad. En realidad, la resistencia a la tracción de un acero endurecido puede aumentar a medida que el acero

es templado a una temperatura de aproximadamente 450°F. Por encima de esta temperatura comienza a disminuir (ASM Internacional, 2015).

El temple produce tensiones internas extremadamente altas en el acero, y para aliviarlas, se puede templear el acero justo antes de que se enfríe. La pieza se retira del baño de enfriamiento a una temperatura de aproximadamente 200°F y se deja enfriar por aire. El rango de temperatura de 200°F a temperatura ambiente se denomina "rango de agrietamiento" y no se desea que el acero pase a través de él (Aspilcueta, 2014).

El temple aumenta la suavidad, ductilidad, maleabilidad y resistencia al impacto. Una vez más, el acero de alta velocidad es una excepción a la regla. El acero de alta velocidad aumenta su dureza durante el revenido, siempre y cuando esté templado a alta temperatura (alrededor de 1550°F).

2.5. Etapas de tratamiento térmicos

El tratamiento térmico se realiza en tres etapas principales:



Figura 3. Etapas de un tratamiento térmico

- **Etapas 1** Calentamiento lento del metal para asegurar una temperatura uniforme.

- **Etapas 2** - Remojar (mantener) el metal a una temperatura dada durante un tiempo dado y enfriar el metal a temperatura ambiente.
- **Etapas 3** - Enfriar el metal a temperatura ambiente.

2.5.1. Etapas de calentamiento

El objetivo principal en la etapa de calentamiento es mantener temperaturas uniformes. Si se produce un calentamiento desigual, una sección de una pieza puede expandirse más rápidamente que otra y provocar distorsiones o grietas. Las temperaturas uniformes se consiguen mediante un calentamiento lento (Ruiz, 2010).

La velocidad de calentamiento de una pieza depende de varios factores. Un factor importante es la conductividad térmica del metal. Un metal con una alta conductividad de calor se calienta a un ritmo más rápido que uno con una baja conductividad. Además, la condición del metal determina la velocidad a la que puede ser calentado. La velocidad de calentamiento de las herramientas y piezas templadas debe ser más lenta que la de los metales no tensados o no tratados (ASM Internacional, 1990).

Finalmente, el tamaño y la sección transversal figuran en la velocidad de calentamiento. Las piezas con una sección transversal grande requieren velocidades de calentamiento más lentas para permitir que la temperatura interior permanezca cerca de la temperatura de la superficie, lo que evita que se deforme o se agriete. Las piezas con secciones transversales desiguales experimentan un calentamiento desigual; sin embargo, estas piezas son menos propensas a agrietarse o a deformarse excesivamente cuando la velocidad de calentamiento se mantiene lenta (Ruiz, 2010).

2.5.2. Etapa de soaking

Después de que el metal se calienta a la temperatura adecuada, se mantiene a esa temperatura hasta que se producen los cambios estructurales internos deseados. Este proceso se llama SOAKING. El período de tiempo que se mantiene a la temperatura adecuada se denomina período de remojo. El tiempo de remojo depende del análisis químico del metal y de la masa de la pieza. Cuando las piezas de acero tienen una sección transversal irregular, el período de remojo viene determinado por la sección más grande (Chasi, 2011).

Durante la etapa de remojo, la temperatura del metal rara vez se lleva de la temperatura ambiente a la temperatura final en una sola operación; en cambio, el acero se calienta lentamente a una temperatura justo por debajo del punto en el que tiene lugar el cambio y luego se mantiene a esa temperatura hasta que el calor se iguala en todo el metal. A este proceso lo llamamos precalentamiento. Después del precalentamiento, el metal se calienta rápidamente a la temperatura final requerida (Enríquez & Tremps, 2009).

2.5.3. Etapa de enfriamiento

Después de que un metal ha sido empapado, debe ser devuelto a temperatura ambiente para completar el proceso de tratamiento térmico. Para enfriar el metal, puede ponerlo en contacto directo con un medio frío compuesto por un gas, líquido, sólido o una combinación de estos. La velocidad a la que se enfría el metal depende del metal y de las propiedades deseadas. La velocidad de enfriamiento depende del medio; por lo

tanto, la elección de un medio de enfriamiento tiene una influencia importante en las propiedades deseadas (Hernández, 2009).

El enfriamiento es el procedimiento utilizado para enfriar metal rápidamente en aceite, agua, salmuera o algún otro medio. Debido a que la mayoría de los metales se enfrían rápidamente durante el proceso de endurecimiento, el enfriamiento se asocia generalmente con el endurecimiento; sin embargo, el enfriamiento no siempre resulta en un aumento de la dureza; por ejemplo, en el caso del cobre recocido, por lo general se enfría en agua. Otros metales, como los aceros templados al aire, se enfrían a un ritmo relativamente lento para su endurecimiento (Zúñiga, 2014).

2.6. Tratamientos térmicos más usados

El tratamiento térmico se utiliza para alterar las propiedades físicas de un material, normalmente para aumentar las características de resistencia y desgaste de una cadena, manteniendo al mismo tiempo la dureza y ductilidad adecuadas para la aplicación. El tratamiento térmico implica el uso de calefacción, enfriamiento rápido (enfriamiento) y, a veces, incluso el enfriamiento de los componentes a temperaturas extremas para lograr el resultado deseado (Mayorga & Sánchez, 2011).

Todos los metales están formados por una cierta microestructura. Las moléculas cambian de posición cuando se calientan. Cuando los metales son enfriados, las moléculas permanecen en una nueva microestructura con mayores niveles de dureza y el aumento deseado en la fuerza y resistencia al desgaste de los componentes. Los componentes de la cadena son tratados térmicamente por separado antes del montaje, lo que facilita el ajuste de las propiedades de cada componente a su estado ideal.

Existen muchos métodos diferentes de tratamiento térmico que se utilizan para adaptar el nivel de dureza y la profundidad (Aspilcueta, 2014). Los tres métodos más comunes de tratamiento térmico para los componentes de la cadena son:

2.6.1. A través del endurecimiento

El endurecimiento es un proceso de calentamiento, temple y revenido de la pieza. Este proceso endurece y refuerza el material uniformemente en toda la sección de la pieza, a diferencia de algunos métodos que sólo endurecen la capa exterior. El resultado es un acero templado que es más duro y más fuerte, pero que todavía tiene una ductilidad y dureza adecuadas (Solís, 2014).

2.6.2. Cementación - Cementación

La cementación es el proceso de endurecimiento del acero al exponerlo al carbono mientras se calienta el metal. La adición de carbono a la superficie del acero cambia la química y lo hace más sensible al tratamiento térmico mientras mantiene una dureza del núcleo más suave y dúctil. El carbono sólo se absorbe en las superficies expuestas, y la profundidad de penetración es proporcional al tiempo en el horno, por lo que el término "cementado". La cementación crea el potencial para un acero más duro que otros métodos de cementación, pero las cementaciones profundas pueden tomar más tiempo y ser muy costosas (Tomé & Yury, 2006).

2.6.3. Endurecimiento por inducción

Similar al endurecimiento en que requiere un proceso de calentamiento y luego de enfriamiento, pero la aplicación del calor se hace de manera controlada a través de un proceso de inducción (campos magnéticos fuertes). El endurecimiento por inducción se

aplica generalmente como un proceso secundario sobre el endurecimiento total. El control del proceso de inducción limita la profundidad y el patrón del cambio de dureza (Enríquez & Tremps, 2009). El endurecimiento por inducción se utiliza para endurecer secciones específicas de una pieza en lugar de toda la unidad.

Mientras que el tratamiento térmico es una manera efectiva y crítica de aumentar la calidad de su cadena, existen muchos otros procesos de fabricación, tales como estampado, doblado y ajustes de interferencia, que se requieren para hacer una cadena de alta calidad y larga duración.

2.7. Tipos de hornos para tratamientos térmicos

2.7.1. Horno de fondo de cabina

Los hornos de este tipo tienen un fondo móvil (carro). El carro sale del horno y puede ser cargado o descargado con piezas tratadas. El método de calentamiento puede ser de resistencia eléctrica o de combustible/gas. Los hornos de fondo de cabina son adecuados para diversas operaciones de tratamiento térmico de piezas grandes y pesadas (ASM Handbook, 1991).

2.7.2. Horno de campana

Los hornos de este tipo tienen una campana móvil de calentamiento vertical y un fondo fijo con las partes tratadas. Los hornos de este tipo tienen una campana móvil de calentamiento vertical y un fondo fijo con las partes tratadas. Los hornos de campana son adecuados para el recocido de bandas en espiral y otros tratamientos térmicos, incluyendo operaciones en atmósfera controlable (ASM Internacional, 2015).

2.7.3. Horno de fosa vertical

Los hornos de este tipo se utilizan para el tratamiento térmico de piezas similares a ejes (rotores de generadores, rotores de turbinas de vapor) que se cargan verticalmente a través de la parte superior del horno. El método de calentamiento puede ser de resistencia eléctrica o de combustible/gas (ASM Internacional, 2015).

2.7.4. Horno de cinta

Los hornos de este tipo tienen una cinta transportadora de malla que se mueve a través de un tubo largo como el horno. El método de calentamiento puede ser eléctrico (resistencia o inducción) o de combustible/gas. El método de calentamiento puede ser eléctrico (resistencia o inducción) o de combustible/gas (ASM Internacional, 2015).

2.7.5. Horno de rodillos

Los hornos de este tipo tienen rodillos de acero resistentes al calor que mueven las piezas a través de un tubo largo como el horno. El método de calentamiento puede ser eléctrico o de combustible/gas. Los hornos de rodillos son adecuados para el tratamiento térmico de chapas, tubos y otras piezas largas (ASM Internacional, 1990).

2.7.6. Horno de empuje

Los hornos de este tipo tienen un empujador situado en el extremo del horno y que mueve las piezas a través del horno. El método de calentamiento puede ser eléctrico o de combustible/gas. Los hornos de empuje se utilizan generalmente para calentar piezas antes de la deformación en caliente (ASM Internacional, 1990).

2.7.7. Horno de recocido de banda continúa

La banda laminada en frío en estado desenrollado pasa a través del horno de tubo largo o en bucle con atmósfera reductora controlada (comúnmente una mezcla de Hidrógeno y Nitrógeno) previniendo la oxidación de la superficie de acero (ASM Internacional, 1990).

2.7.8. Horno de resistencias eléctricas

Para describir un horno de resistencia eléctrica, se asemeja a una tostadora de gran tamaño con aire soplando a través de ella. A medida que el aire empujado por el soplador se mueve a través de los elementos de calefacción, recoge el calor, luego continúa hacia el plenum y los conductos hasta los registros en cada habitación. Debido a que no se produce ninguna combustión en un horno eléctrico, no requiere el conducto de humos o el intercambiador de calor que deben tener los hornos de gas y aceite (Jirapure & Borade, 2014).

Por lo tanto, el mantenimiento es casi nulo. Sin embargo, los costes de explotación suelen ser mucho más elevados. Un interruptor de circulación de aire - a menudo en el termostato de la casa, pero a veces en el horno - le permite hacer funcionar el soplador continuamente, si así lo desea.

Debajo, accesible a través de una cubierta desmontable, puede haber fusibles o interruptores para cada uno de los elementos calefactores. Un transformador aumenta el amperaje a los altos niveles necesarios para la calefacción.

Los relés encienden o apagan los elementos según las instrucciones del termostato. La siguiente tabla enumera algunas cosas que pueden fallar con los hornos de

resistencia eléctrica y lo que usted puede hacer al respecto. Siempre apague el interruptor principal del horno antes de retirar los paneles de control o de acceso (Jirapure & Borade, 2014).

2.8. Horno Eléctrico HELT-300BSC

Es el horno de tratamientos térmicos del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT”, fue creado en el año del 2013 con el objetivo de brindar una recuperación integral en el proceso de recuperación de turbinas.

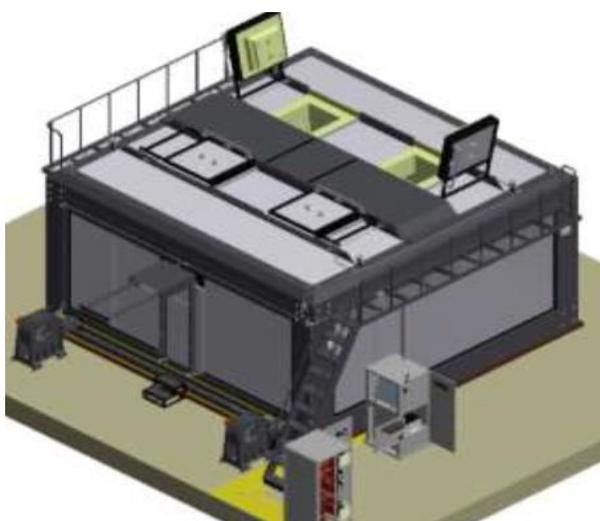


Figura 4. Horno Eléctrico HELT-300BSC

Fuente: (COAVPRO, 2013)

Un horno es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimiento cerrado. En la industria metalúrgica, se lo utiliza para realizar tratamientos térmicos sobre los materiales, de modo de obtener propiedades mecánicas y microestructuras deseadas para algún uso particular (COAVPRO, 2013).

2.8.1. Especificaciones Horno Eléctrico HELT-300BSC

Entre las principales consideraciones de diseño que se tomaron en cuenta a la hora de hacer el diseño del horno para tratamiento térmico, así como las principales variables del equipo; son las siguientes:

Tabla 2

Especificaciones técnicas Horno HELT-300BSC

Tipo de Horno:	Eléctrico para alivio de tensiones
Voltaje:	480 V, 3 Fases
Potencia máxima:	300 Kw
Dimensión de cámara:	5m x 5m x 2.5m
Peso máximo de pieza:	27 TON
Temperatura máxima:	650°C
Tasa de calentamiento:	Programable de 30-50 °C/h
Tapa superior:	Independiente, desmontable, manual.
Control de temperatura:	Automático programable
Sensores:	Control de temperatura y cierre de compuertas
Enfriamiento:	Apertura de escotillas y tiro forzado

Fuente: (COAVPRO, 2013)

Según su principio de funcionamiento, se los puede agrupar en 3 tipos:

- **Calentamiento por efecto Joule**

Entre los cuales se encuentran los hornos de inducción eléctrica y arco eléctrico,

- **Calentamiento por elevación de la temperatura del medio circundante**

Como los hornos de calentamiento por resistencia eléctrica y los de calentamiento por combustión.

- **Calentamiento por interacción de radiación con la muestra**

Entre ellos, los que emplean radiación láser y los de haces de electrones.

De estos tipos de hornos existentes, se destacan los que utilizan resistencias eléctricas o niquelinas para llevar a cabo el calentamiento.

2.9. Deterioro en rodetes de turbina

El deterioro de rodetes hidráulicos es un problema en el proceso de generación de energía eléctrica ya que causa reducciones en la eficiencia. Los fenómenos determinantes en el deterioro de los rodetes son el desgaste por erosión, desgaste por cavitación y fatiga (Cáceres & Andree, 2016).

Una vez el rodete se encuentra suficientemente deteriorado, se realiza la reparación mediante la reconstrucción de los perfiles hidráulicos por medio de soldadura. Sin embargo, como los rodetes son altamente exigidos durante su funcionamiento, es necesario que después de la reparación la microestructura del material recupere en lo posible las condiciones y propiedades originales.

2.9.1. Cavitación

Cuando la presión del líquido cae por debajo de la presión de vapor, el líquido se vaporiza y el líquido se convierte en vapor, este proceso continúa hasta que la presión del líquido se iguala a la presión de vapor. Debido a esto se crean burbujas en la región de baja presión. Cuando estas burbujas llegaron a la región de alta presión, colapsaron debido a la alta presión, estas burbujas tienen tendencia a dañar la superficie del material creando erosión o fallas por picaduras. La cavitación es un fenómeno indeseable que se observa en muchas situaciones prácticas como el venturímetro, el vórtice y el hidroala (Rodríguez, 2016).

2.9.2. Erosión

La erosión de los álabes de la turbina produce superficies ásperas y desiguales que alteran las trayectorias del flujo de vapor. Esto reduce la eficiencia de la turbina y también puede limitar la capacidad. La erosión en el extremo de alta presión de una turbina suele ser causada por partículas sólidas (normalmente óxido de hierro) presentes en el vapor. Las partículas de óxido de hierro están presentes si no fueron eliminadas por golpes de vapor durante el arranque del sistema. También pueden ser el resultado de la exfoliación del sobrecalentador o de los óxidos del cabezal de vapor principal, o pueden ser introducidos en el vapor por el agua contaminada que se utiliza para intentarlo (Rueda, Toledo, & Carvajal, 2007).

La erosión de las palas de presión intermedia y baja suele ser causada por el agua en el vapor. La operación por debajo de la temperatura de entrada de vapor diseñada o a baja carga puede causar condensación en estas etapas, llevando a problemas de erosión. (Rueda, Toledo, & Carvajal, 2007)

El dióxido de carbono u otras especies ácidas presentes en el condensado pueden acelerar el daño. Las aminas de baja relación de distribución, que neutralizan la acidez y elevan el pH del condensado, pueden proporcionar cierta protección contra la erosión-corrosión. (Rueda, Toledo, & Carvajal, 2007)



Figura 5. Rodete erosionado Central San Francisco

Fuente: (López & Ramirez, 2011)

2.9.3. Corrosión

Los problemas de corrosión por picadura, fatiga por corrosión y corrosión bajo tensión ocurren en las turbinas de vapor. Los principales corroedores son el hidróxido de sodio, el cloruro, el sulfato y los sulfuros. Normalmente, el nivel de contaminantes presentes en el vapor no es lo suficientemente alto como para corroer los componentes del sistema. A medida que el vapor se expande a través de una turbina, la solubilidad de los contaminantes en el vapor disminuye. Se condensan en las superficies a concentraciones de solución muy superiores a la concentración original del contaminante en el vapor. Estas soluciones concentradas promueven la corrosión del sistema (López C. , 2013).

Las picaduras se asocian comúnmente con depósitos de cloruro y ocurren en rotores, discos y cubos. El ataque de picadura ocurre a menudo cuando se desarrolla

una atmósfera húmeda cargada de oxígeno en turbinas fuera de servicio. El daño es más severo cuando también hay depósitos de cloruro. Se debe mantener una atmósfera libre de oxígeno o condensado para proteger las turbinas fuera de servicio de la corrosión.



Figura 6. Partes de corroídas de la Central San Francisco

Fuente: (López & Ramirez, 2011)

2.10. Procedimiento para la reparación del rodete de la turbina

El procedimiento de diagnóstico de rodetes de turbinas tiene como objetivo el realizar un diagnóstico inicial del estado del rodete, observando la existencia de discontinuidades, defectos y el grado de desgaste con lo cual se determina el tipo de mantenimiento que necesita. Se debe realizar a todos los rodetes Pelton, que lleguen al Taller Central, antes de realizar la reparación respectiva (Auz, 2017).

2.10.1. Procedimiento de reparación parcial de rodetes de turbinas

Su objetivo es realizar la reparación parcial de los rodetes que los necesite en forma minuciosa. Es aplicado a los rodetes que después de un periodo de funcionamiento presentan desgastes en las superficies interiores de las cucharas, producto de la abrasión del agua erosiva.

2.10.2. Procedimiento de reparación integral de rodets de turbinas

Se realiza la reparación integral de los rodets que lo necesiten en forma minuciosa con todos los requisitos y procedimientos que necesiten en forma adecuada. Que después de un periodo de funcionamiento presentan desgastes en las superficies interiores de las cucharas, producto de la abrasión del agua erosiva del río.

2.10.3. Procedimiento de repotenciación de rodets de turbinas

Cuyo objetivo es realizar la repotenciación de los rodets con todos los procedimientos de control en forma minuciosa. Se aplica a los rodets que requieran de la repotenciación.

2.10.4. Procedimiento de controles finales de rodets de turbinas

Se realiza un control minucioso utilizando todas las pruebas y procedimientos del rodete reparado o repotenciado con el fin de tener un producto de alta calidad. Se debe realizar a todos los rodets al concluir totalmente la reparación realizada (Auz, 2017).

2.11. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor que realiza el horno con una de sus compuertas total mente liberada es:

$$q = h * A_{\infty} * (T_s - T_{\infty}) \quad Ec. (1)$$

Dónde:

- q = Velocidad de transferencia de calor [J/s = W]
- A = Coeficiente de transferencia de calor por conveccion [W/m² * °C]
- h = Coeficiente de transferencia de calor por conveccion [W/m² * °C]

- T_s = Temperatura de la superficie °C
- T_∞ = Temperatura del fluido lejos de la superficie °C
- $q_{\text{compuerta}} = h * A_\infty * (T_s - T_\infty)$

2.11.1. Convección natural

Es el mecanismo principal de enfriamiento para muchos sistemas, la convección natural es tan eficiente tanto para enfriar superficies calientes con un ambiente frío, como calentar una superficie fría con un ambiente caliente (Çengel & Ghajar, 2011).



Figura 7. Distribución de flujo convección natural

Fuente: (Çengel & Ghajar, 2011)

2.11.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección natural

El coeficiente de transferencia de calor representa las propiedades físicas de un fluido cuando produce transferencia de calor por convección sobre una superficie, y se le representa como " h " (Çengel & Ghajar, 2011).

El Número promedio de Nusselt es utilizado en los estudios térmicos de convección ya que es una representación adimensional del coeficiente de transferencia de calor con el fin de reducir el número de variables totales (Çengel & Ghajar, 2011).

$$Nu = \frac{h * L_c}{k} \quad Ec. (2)$$

Dónde:

- Nu = Número promedio de Nusselt
- h = Coeficiente promedio de transferencia de calor sobre la superficie
- L_c = Longitud característica
- k = Conductividad térmica del fluido

Rayleigh es el producto de los números de Grashof y de Prandtl como se indica en la ecuación 2.

$$Ra_L = Gr_l * Pr \quad Ec. (3)$$

Donde Grashof es la relación entre la flotabilidad y la viscosidad dentro de un fluido, ecuación 3.

$$Gr_l = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} \quad Ec. (4)$$

Prandtl es la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica, ecuación 4 (Çengel & Ghajar, 2011).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad Ec. (5)$$

Reemplazando la Ec. (4) y Ec. (5) en la Ec. (3) se obtiene:

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu * \alpha} \quad Ec. (6)$$

Dónde:

- g = Aceleración gravitacional = 9.8 m/s^2
- β = Coeficiente de expansión volumétrica

- T_s = Temperatura de la superficie
- T_∞ = Temperatura del fluido lejos de la superficie
- L_c = Longitud característica
- ν = Viscosidad cinemática del fluido
- α = Difusividad térmica

Todas las propiedades del fluido deben evaluarse a la temperatura de película (Çengel & Ghajar, 2011).

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

- T_f = Temperatura de película

Con ayuda del Anexo 1, se selecciona la ecuación característica para el número promedio de Nusselt considerando los intervalos de Rayleigh.

2.11.3. Convección forzada

La convección es el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido en presencia de movimiento de fluido a granel. La convección se clasifica como natural (o libre) y convección forzada dependiendo de cómo se inicia el movimiento del fluido. En la convección natural, cualquier movimiento de fluido es causado por medios naturales, como el efecto de flotabilidad, es decir, el aumento del fluido más caliente y la caída del fluido más frío. Mientras que, en la convección forzada, el fluido es forzado a fluir sobre una superficie o en un tubo por medios externos como una bomba o un ventilador (Bahrami, 2009).

En la convección forzada se genera la transición de flujo laminar a turbulento el cual depende de la geometría, aspereza y temperatura de la superficie y el tipo y velocidad del fluido, la relación de estas variables se expresa como el número de Reynolds y depende principalmente de la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

$$R_e = \frac{V * D}{\nu} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

- R_e = Número de Reynolds
- V = Velocidad del fluido
- D = Longitud característica
- ν = Viscosidad cinemática del fluido

El coeficiente de transferencia de calor por convección h depende en gran medida de las propiedades del fluido y de la rugosidad de la superficie sólida, así como del tipo de flujo del fluido (laminar o turbulento).

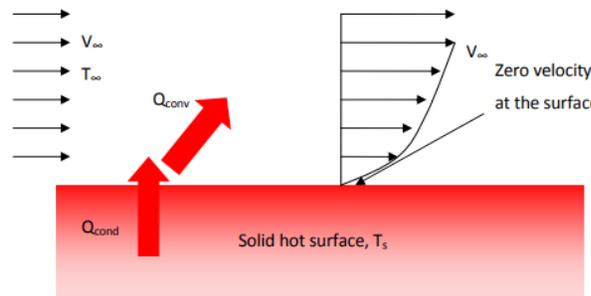


Figura 8. Convección forzada

Fuente: (Çengel & Ghajar, 2011)

El coeficiente de transferencia de calor por convección, en general, varía a lo largo de la dirección del flujo. El coeficiente de transferencia de calor por convección medio o

medio para una superficie se determina promediando (adecuadamente) el coeficiente de transferencia de calor local en toda la superficie (Betancourt, 2003).

2.12. Controlador lógico programable

Un controlador lógico programable (PLC) es una computadora industrial de estado sólido que monitorea las entradas y salidas y toma decisiones basadas en la lógica para procesos o máquinas automatizadas (Micro Capacitación, 2013).

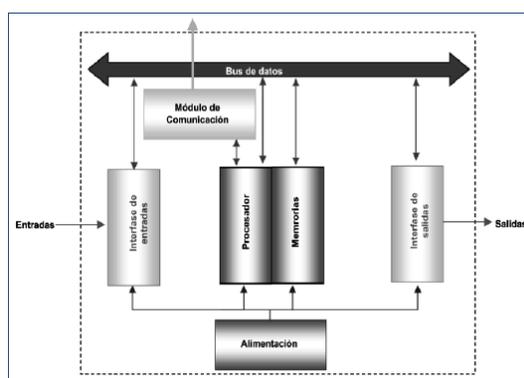


Figura 9. Arquitectura PLC

Fuente: (Siemens, 2015)

Los PLCs fueron introducidos a finales de los años 60 por el inventor Richard Morley para proporcionar las mismas funciones que los sistemas de lógica de relés. Los sistemas de retransmisión en ese momento tendían a fallar y a crear retrasos. Los técnicos tuvieron que solucionar el problema de una pared entera de relés para solucionar el problema (Micro Capacitación, 2013).

Los PLCs son robustos y pueden sobrevivir a condiciones severas, incluyendo calor, frío, polvo y humedad extrema. Su lenguaje de programación es fácilmente comprensible, por lo que pueden ser programados sin mucha dificultad. Los PLCs son modulares, por lo que pueden conectarse a varias configuraciones. La conmutación de

relés bajo carga puede causar arcos no deseados entre contactos. El arco genera altas temperaturas que cierran los contactos de soldadura y causan la degradación de los contactos en los relés, lo que resulta en una falla del dispositivo. La sustitución de los relés por PLCs ayuda a evitar el sobrecalentamiento de los contactos.

Una de las desventajas de los PLC's es que no funcionan bien cuando se manejan datos complejos. Cuando se trata de datos que requieren C++ o Visual Basic, los ordenadores son los controladores de elección. Los PLC tampoco pueden mostrar bien los datos, por lo que a menudo se necesitan monitores externos (Micro Capacitación, 2013).

2.13. PLC Simatic S7-1200

Los controladores básicos SIMATIC S7-1200 convencen por su amplia gama de funciones tecnológicas y sus E/S integradas, así como por su diseño compacto que ahorra espacio. Son la elección inteligente para todas las tareas diarias de automatización con un alcance de proyecto pequeño. Las CPUs S7-1200 con mango Safety Integrated estándar y tareas relacionadas con la seguridad - sin hardware adicional. Se ahorra en el trabajo de cableado y es mucho más flexible en la adaptación de los circuitos de seguridad y en la gestión de los modos de funcionamiento. Gracias a los protocolos de telecontrol estandarizados, puede conectar los controladores SIMATIC S7-1200 directamente a su centro de control sin necesidad de programación (Siemens, 2015).



Figura 10. PLC Simatic S7-1200

Fuente: (Siemens, 2015)

Una ventaja decisiva es la integración del S7-1200 en el portal de automatización totalmente integrado.

2.14. Portal TIA

De este modo, los controladores SIMATIC y los paneles SIMATIC acceden a una base de datos común, a un concepto de manejo uniforme y a servicios centrales. Para usted, esto significa mucho menos trabajo de ingeniería. El manejo sencillo e innovador del TIA Portal, así como el diagnóstico integrado del sistema, contribuyen a un trabajo eficiente. (Siemens, 2012).

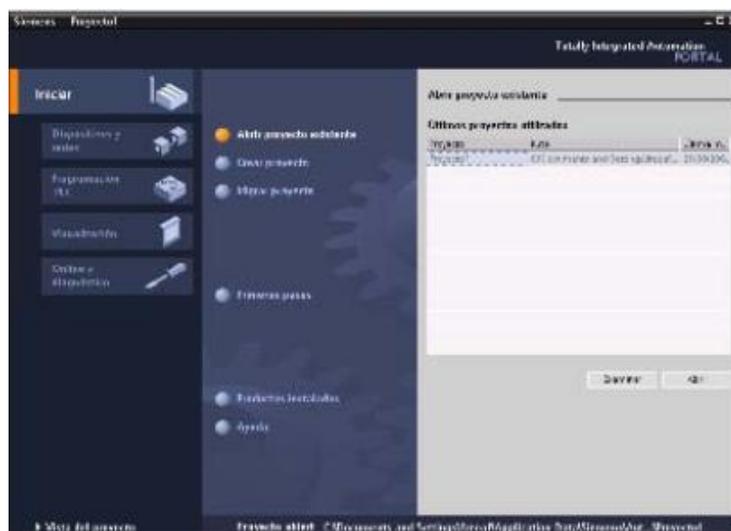


Figura 11. Interfaz TIA Portal

Fuente: (Siemens, 2015)

Gracias a sus prestaciones y funcionalidad, los controladores SIMATIC son compatibles con soluciones de automatización escalables y, por tanto, rentables en todos los casos. La funcionalidad de los controladores SIMATIC S7-1200 se deriva de forma consecuente de los controladores SIMATIC S7-1500 desarrollados para tareas más complejas. Esto asegura procedimientos uniformes y, por lo tanto, la máxima eficiencia en ingeniería, operación y mantenimiento, así como durante las migraciones (Siemens, 2012).

2.15. Data Logging

Un requisito muy común en las aplicaciones de adquisición y registro de datos es la necesidad de aplicar un elemento de control. Esto puede ser tan simple como probar los límites de un valor analógico adquirido y establecer una salida digital cuando se rompe, o una aplicación más compleja que controla un proceso o protocolo de prueba (Siemens, 2012).

Un requisito universal de las aplicaciones de adquisición y registro de datos con un componente de control es la necesidad de programar. No hay dos aplicaciones de control iguales, lo que significa que no es posible ofrecer una solución lista para usar. Pero una vez que se cruza el umbral de programación, las cosas tienden a complicarse muy rápidamente. Comience con las herramientas de programación que su hardware soporta, y luego busque un entorno de programación compatible para que ambos puedan fusionarse y lograr el resultado deseado.

Ejemplos de propósito general son el soporte de programación.NET o ActiveX para el hardware que puede ser aplicado a lenguajes de programación ubicuos como Visual

BASIC, un lenguaje.NET, e incluso LabVIEW. Aparte de la necesidad de programar en lo que podría ser un entorno exótico, complejo y quizás desconocido, este enfoque requiere que el PLC esté conectado a un PC durante la prueba, lo que puede no ser deseable o incluso práctico (Micro Capacitación, 2013).

2.16. Interfaz HMI

La selección de la HMI para un sistema de automatización basado en PLC es una experiencia para el ingeniero de planta. El proceso de selección consta de dos componentes. La primera es la evaluación de cuestiones técnicas como las características de rendimiento, las especificaciones, el coste, el diseño modular, las técnicas de tratamiento de datos, los conceptos de red de comunicaciones, la arquitectura abierta y el software que permitirán llevar el sistema a una "prueba de conducción" (Martínez & Yanchaliquín, 2013).



Figura 12. Simatic HMI panel

Fuente: (Siemens, 2012)

El sistema de automatización basado en PLC permite al operador interactuar a través de la HMI con la lógica almacenada en el PLC para controlar el proceso del mundo real en tiempo real. El operador puede ver la información en la pantalla de la HMI que se

necesita para tomar la decisión de control y luego emitir comandos a través de la HMI a la lógica del PLC que a su vez manipula las variables del proceso para producir el resultado deseado. Una HMI más sofisticada sería una computadora personal con una capacidad gráfica de alto nivel que reemplazaría todas las funciones de visualización y control del panel de cableado (Martínez & Yanchaliquín, 2013).

Para que un sistema HMI sea realmente eficaz en la mejora de la productividad, deben cumplirse los siguientes requisitos: La responsabilidad del control debe ser asignada a una máquina o a un ser humano. Algunas tareas se llevarán a cabo automáticamente, mientras que otras requerirán la intervención del operador.

Esta asignación debe ser claramente definida y comprendida por los usuarios del sistema. El sistema debe mostrar la información necesaria y suficiente para la toma de decisiones competente. La información debe ser fácil de localizar y organizada de manera coherente. Los controles proporcionados deben ser relevantes para las tareas operativas. El trabajo del operador es controlar la planta. Debe garantizarse una respuesta adecuada del sistema. Los usuarios deben recibir siempre una respuesta rápida e inequívoca cuando inician una acción (Esther, 2012).

En otras palabras, el sistema debe ser fácil de mantener, adaptar y desarrollar. Las plantas sufren inevitablemente modificaciones y mejoras, por lo cual los sistemas de control deben ampliarse y modificarse progresivamente.

2.17. Fundamentación Legal

El artículo 173 de la ley orgánica de Educación Superior en el Ecuador (LOES), establece que el Consejo de Evaluación, Acreditación y aseguramiento de la Calidad de

la Educación Superior (CEAACES) es el organismo técnico público encargado de la ejecución de los procesos de evaluación externa, acreditación y aseguramiento de la calidad de la educación superior, así como de normar el proceso de autoevaluación (Asamblea Nacional Republica del Ecuador, 2012).

En el mismo artículo también se establece que todo establecimiento público o privado de educación superior del país, deberá de someterse en forma obligatoria a la evaluación interna y externa, a la acreditación y a la clasificación académica y el aseguramiento de la calidad de la educación (Asamblea Nacional Republica del Ecuador, 2012).

Mientras que el Plan Nacional del Buen Vivir en vigencia, estipula el posicionar al sistema ecuatoriano de Educación Superior como ejemplo de calidad en la región, mediante la formación técnica y tecnológica superior, fomentando y fortaleciendo la formación de cuarto nivel, capacitando continuamente a servidores públicos, mejorando el sistema de certificación de competencias laborales y la educación continua (Asamblea Nacional Republica del Ecuador, 2012).

2.18. Sistemas de variables

- **Variable Independiente:** Diseño y factibilidad de un sistema automático de apertura de compuertas superiores.
- **Variable Dependiente:** Determinar la mejora que tendrá el proceso en los tratamientos térmicos en las turbinas hidráulicas y partes industriales.

2.19. Hipótesis

- Con el diseño y factibilidad de un sistema automático de apertura de compuertas superiores del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, se determinara la mejora que tendrá el proceso en los tratamientos térmicos en la turbinas hidráulicas y partes industriales.

2.20. Cuadro de operacionalización de las variables

Tabla 3

Operacionalización de la variable independiente

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Dimensiones
Diseño y factibilidad de un sistema automático de apertura de compuertas superiores.	El diseño y factibilidad de un sistema automático para la apertura de las compuertas superiores da una solución al problema existente en los tratamientos térmicos en la parte de enfriamiento de los rodets, al no existir ningún control para realizar la apertura de compuertas lo cual ocasiona una variación de temperatura excesiva con la curva ideal del proceso.	Obtención de datos para la selección del sistema automático	<ul style="list-style-type: none"> • Error existente entre las temperaturas medidas y la temperatura ideal del proceso (°C, %) • Temperatura a la que es expuesta la tapa superior del horno y sus compuertas (°C)
		Diseño Mecánico del sistema automático	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de los componentes del sistema • Calculo y dimensionamiento de los componentes del sistema • Factor de seguridad (FDs)
		Diseño del control para el sistema automático	<ul style="list-style-type: none"> • Obtención de las variables para el control (°C) • Programación de bloques para el control del sistema • Implantación de la interfaz HMI

Tabla 4

Operacionalización de la variable dependiente

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Dimensiones
Determinar la mejora que tendrá el proceso en los tratamientos térmicos en las turbinas hidráulicas y partes industriales.	Con el diseño del sistema y su factibilidad determinara la mejora que el mismo puede generar a los procesos térmicos y conjuntamente con la reparación integral de las turbinas.	Control en el proceso del tratamiento térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Control autónomo del horno • Interfaz para la apertura de las compuertas • Recolección de datos mediante el PLC (.csv)
		Eficiencia del horno	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del error entre las temperaturas medidas y la temperatura ideal del proceso en la etapa de enfriamiento (°C, %)

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

Dicho proyecto tiene como finalidad diseñar un sistema para la automatización en la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior de horno eléctrico HELT – 300BSC, conjuntamente con su análisis de factibilidad para una futura implementación del sistema. La parte de diseño se realiza mediante software CAD, de igual forma el control del sistema de apertura y cierre de las compuertas debe ser integrado con el control general del horno para que todo el proceso funcione automáticamente.

3.1. Modalidad de la investigación.

La modalidad de investigación orienta a la estructura que debe tener cualquier proyecto para una buena ejecución, aquí se detallara los tipos de investigación que están implicados en dicho proyecto, de igual forma las técnicas y pasos que se deben llevar acabo.

Para el presente proyecto se adopta la investigación bibliográfica, investigación de campo, investigación experimental e investigación aplicada.

3.1.1. Investigación bibliográfica.

La parte bibliográfica del presente proyecto se sustenta en la información obtenida de libros, artículos científicos, revistas, páginas web, y demás documentos bibliográficos veraces, que permitirán tener un concepto claro de los distintos tipos de sistemas para la apertura y cierre de las compuestas de ventilas, los criterios a considerar para el diseño de los componentes y mecanismos que conforman dichos sistemas, los tipos de control e interfaces gráficas y el análisis de factibilidad para su futura implementación.

3.1.2. Investigación de campo.

La presente investigación se desarrollara en las instalaciones del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT”, en donde se obtiene información técnica y datos recopilados en los procesos del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, todo esto dentro de las jornadas de trabajo establecidos por la “CELEC” Unidad de Negocio Hidroagoyán.

3.1.3. Investigación experimental.

Con el método de investigación experimental se utilizan técnicas y métodos con los cuales nos permiten formular hipótesis y de igual forma obtener datos relevantes para la selección y diseño del sistema automático de apertura y cierre de las compuertas de ventilación, se obtiene información mediante los registros de las curvas características que deben llevar acabo los procesos térmicas del horno, variables físicas como la temperatura a la que puede quedar expuesto el sistema de apertura de las compuertas y el calor perdido por cada escotilla de ventilación..

3.1.4. Investigación aplicada.

El presente proyecto plantea generar la solución para la automatización de las compuertas de ventilación superior del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, utilizado en los procesos térmicos en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT”, con el diseño de un sistema automático para la apertura de sus compuertas, el mismo que debe constar de un estudio de factibilidad para su futura implementación y mejora en el rendimiento de sus procesos.

3.2. Tipos de investigación.

3.2.1. Cuantitativo.

Con el diseño del sistema automático de ventilación y su control se procede a la simulación del mismo para obtener los datos de las curvas características en los procesos térmicos, con los mismos se determina el porcentaje de error que tiene con respecto a su curva ideal del proceso, para ser comparado con el porcentaje de error que se obtiene en un tratamiento térmico de deshumidificación.

3.3. Diseño de la investigación

El presente proyecto tiene como finalidad generar una solución al control de las compuertas de ventilación superior del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, mediante el diseño y factibilidad de un sistema automático el cual controlara la etapa de enfriamiento evacuando el exceso de calor de una forma adecuada en el tiempo y proporción apropiado; con todo esto el proceso corregirá el error existente en sus curvas aumentando el rendimiento del horno.

3.3.1. Método de hallazgo inductivo

Buscar el análisis previamente con la obtención de parámetros y datos de las curvas características de los procesos térmicos realizados en el horno con el fin de determinar el porcentaje de error que poseen las curvas y buscar la mejor solución para el control automático y el diseño mecánico del sistema para las compuertas de ventilación.

3.3.2. Método de hallazgo deductivo

Con la problemática existente en el control de las compuertas se procede al diseño del sistema automático para el control de las mismas, el cual cuenta con una parte mecánica para la apertura y cierre de la compuertas y todo esto controlado de forma automática permitiendo un enfriamiento ideal en el proceso y por consiguiente una mejor curva térmica y aumento en el rendimiento del horno, todos estos parámetros se analizaran para determinar la factibilidad del sistema y su implementación futura.

3.4. Niveles de investigación

3.4.1. Exploratorio

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT” perteneciente a CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán cuenta con el Horno Eléctrico HELT – 300BSC el mismo que realiza los tratamientos térmicos de rodets y partes industriales, no dispone de un sistema automático de control de las compuertas de ventilación superior que permita realizar la apertura optima de las compuertas en los tiempos apropiados, para lo cual se realiza el diseño y factibilidad del sistema automático con el fin de ser implementado en un futuro y aumentar el rendimiento del horno.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población.

La población se considera como el conjunto de persona, objetos o medidas con ciertas características en común de las cuales se desea conocer algo en una investigación (Lopez, 2004); el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas

Hidráulicas “CIRT” está en la capacidad de brindar sus servicios a todas la centrales hidroeléctricas del país, aunque para el desarrollo del proyecto se considera como la población a todas las distintas turbinas de las centrales hidroeléctricas Agoyan, Pucara y San Francisco que forman parte de CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán, que se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5

Rodetes de la Unidad de Negocio Hidroagoyán

CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán		
Centrales	Tipo de Turbina	Numero de Rodetes
Agoyan	Francis	4
Pucara	Peltón	5
San Francisco	Francis	4
Población Total		13

3.5.2. Muestra

La muestra es un subconjunto que representa de forma fiable a la población, para seleccionar la muestra se utiliza distintos tipos de muestreo que ayudan a una selección adecuada de la muestra. (Lopez, 2004)

En este caso se utiliza el muestreo probabilístico aleatorio simple, se caracteriza porque cada objeto de la población tiene la misma probabilidad para ser seleccionado como muestra de la investigación.

Se selecciona a una de las Turbinas Peltón de la central hidroeléctrica Pucara la misma que posee todos los reportes del tratamiento térmico que se llevó acabo del 15 al 16 de Marzo del año 2018.



Figura 13. Turbina Pelton - Central Pucará

Fuente: (CIRT)

3.6. Técnicas de recolección de datos.

3.6.1. Observación en laboratorio.

La técnica nos permite obtener datos de forma experimental a partir de los registros de la curva característica en el proceso de tratamientos térmicos, el calor perdido por cada compuerta de ventilación y la temperatura a la que queda expuesto el sistema automático, por lo que se recurrirá a equipos de medición para obtener los parámetros de las variables físicas, para poder seleccionar un sistema automático que solucione la apertura y cierre de las compuertas y determinar la mejora que ofreciera el sistema automático al proceso térmico.

3.6.2. Instrumentos

Para la recopilación de información se obtiene datos, tablas y graficas a partir del registro de la curva característica en el proceso de tratamientos térmicos, de igual forma con un estudio termografico realizado mediante una cámara térmica FLIR SC 660, Figura 14; se obtiene los valores de temperatura de la pieza y la temperatura a la que queda expuesta la compuerta superior del horno.



Figura 14. Cámara Termográfica FLIR SC 660

Fuente: (FLIR, 2019)

Características de la cámara termográfica FLIR SC 660:

- Resolución 640x480.
- Gran variedad de alto rendimiento.
- Lentes con tecnología USM.
- 1-8 veces el zoom continuo.
- Cámara digital incorporada de 3.2 Mpixel
- Rango de temperatura estándar -40 ° C a 1500 ° C
- 1%, 1 ° C de precisión.
- Almacenamiento periódico.
- Panorama.

- Anotación de voz y texto.
- Optimización de contraste
- Localizador láser con automático.
- GPS incorporado

3.6.3. Validez y confiabilidad.

Para realizar el procesamiento de todos los datos obtenidos, se procede en base a los siguientes criterios:

- Inspección de la información obtenida para comprobar que la misma esté dentro de los rangos establecidos, caso contrario dar paso a desechar la información defectuosa.
- Manejo de información, mediante gráficas y tablas explicativas que asocien a los parámetros y variables obtenidas, conjuntamente con el apoyo de herramientas computacionales.
- Análisis estadístico de los datos obtenidos.
- Presentación de resultados y su contraste.

3.7. Técnicas de análisis de datos.

Para el procesamiento de los datos obtenidos se seguirán varios procedimientos en base a los siguientes criterios:

- Observación de los elementos muestrales y pruebas.
- Revisión crítica de la información recopilada.
- Representación gráfica de variables con respecto al tiempo.

- Análisis estadístico de las curvas obtenidas.
- Estimación de variación.
- Interpretación y reporte.

3.8. Técnicas de comprobación de hipótesis.

- Justificación del diseño mecánico y diseño del sistema de control, de acuerdo a su aplicabilidad requerida.
- Análisis de factibilidad para la implementación futura del sistema.
- Porcentaje de incremento en el rendimiento del horno.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Análisis de los resultados

4.1.1. Análisis de la curva de tratamiento térmico del rodete Pelton de la Central Pucará

El tratamiento térmico post soldadura del rodete Pelton de la central Pucará se llevó a cabo los días 15 y 16 de Marzo del 2018, con el fin de realizar un alivio de tensiones al rodete previamente reparado, con esta reparación integral se logró repotenciar y aumentar la eficiencia del rodete; el Plan de Inspección y Pruebas del tratamiento se encuentra en el Anexo 2.

En la Tabla 6, se encuentra el Instructivo del tratamiento con sus especificaciones.

Tabla 6

Instructivo del tratamiento Térmico del rodete Pelton Central Pucará

Instrucción del Tratamiento Térmico	
Procedimiento	CIRT-PRO-TT-01
Proyecto	CIRT17-PUC-TH-016
Equipamiento	RODETE PELTON #66326-034-09520
Cant. Pieza	1
Material	Acero inoxidable A743 CA-6NM
Tipo de Tratamiento Térmico	
<ul style="list-style-type: none"> • Alivio de tensiones • Revenido Post-Soldadura • Mejorar propiedades mecánicas 	
Dimensiones de la pieza (mm)	D2179 x 552.9
Espesor a ser considerado (mm)	50
Área de la pieza (m²)	11.2

CONTINÚA 

Peso (kg)	2925
Temperatura de inicio (°C)	19-21 (temperatura ambiente)
Velocidad de calentamiento (°C/h)	Max 50 hasta 580 °C
Temperatura de tratamiento (°C)	580 (±5)
Tiempo del tratamiento (h)	3
Velocidad de enfriamiento (°C/h)	Max 55
Temperatura de salida de la pieza(°C)	300
Tiempo total TT – revenido (h)	24

La ubicación de los soportes para la pieza y de las termocuplas tanto superiores como inferiores para las mediciones de temperatura del proceso, se observan en la Figura 15.

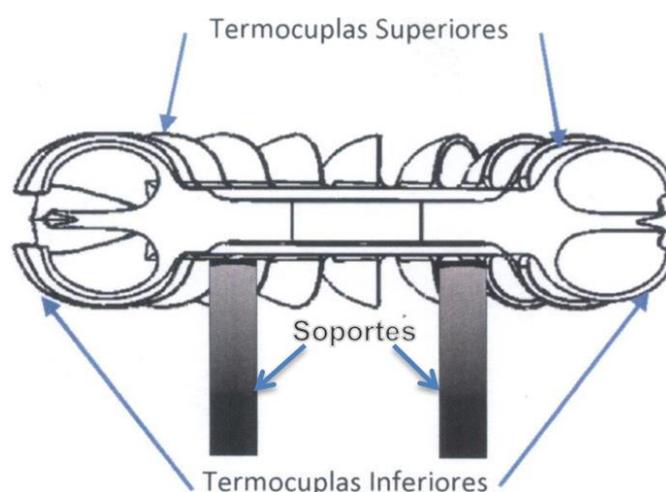


Figura 15. Distribución de termocuplas y soporte

La Figura 16, representa la curva característica del proceso térmico en función del tiempo y la temperatura a la que debe alcanzar la pieza, también se detalla su rampa de calentamiento, meseta de permanencia y pendiente de enfriamiento, cuando la pieza alcance los 300 °C las compuertas superiores se abren por completo y el horno se enfría de forma natural.

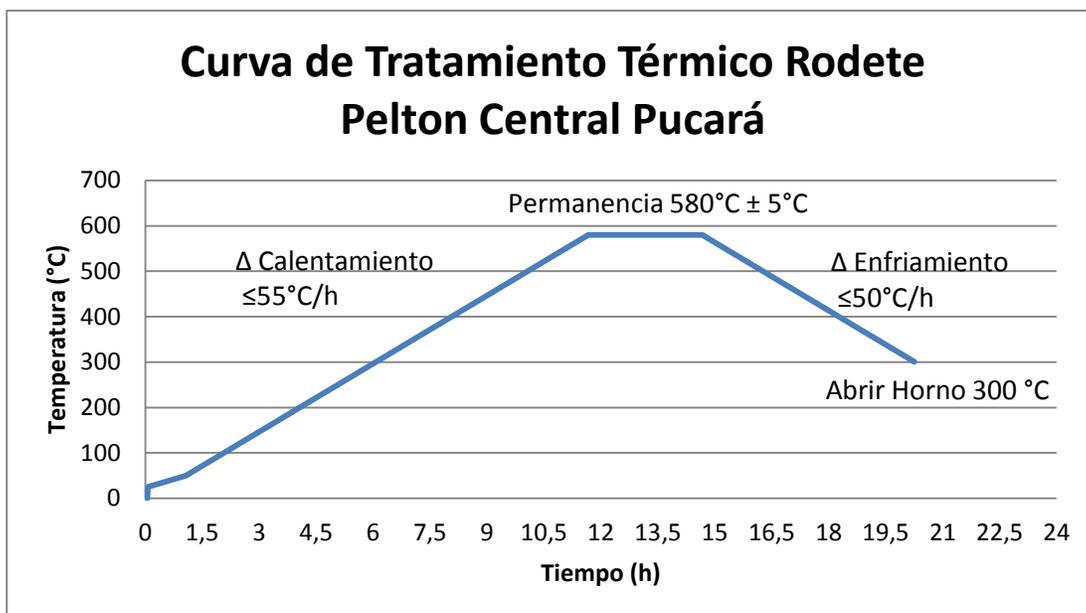


Figura 16. Curva de Tratamiento Térmico rodete Pelton Central Pucará

En la Figura 17, se observa las Temperaturas promedio registradas por las termocuplas al final del proceso.

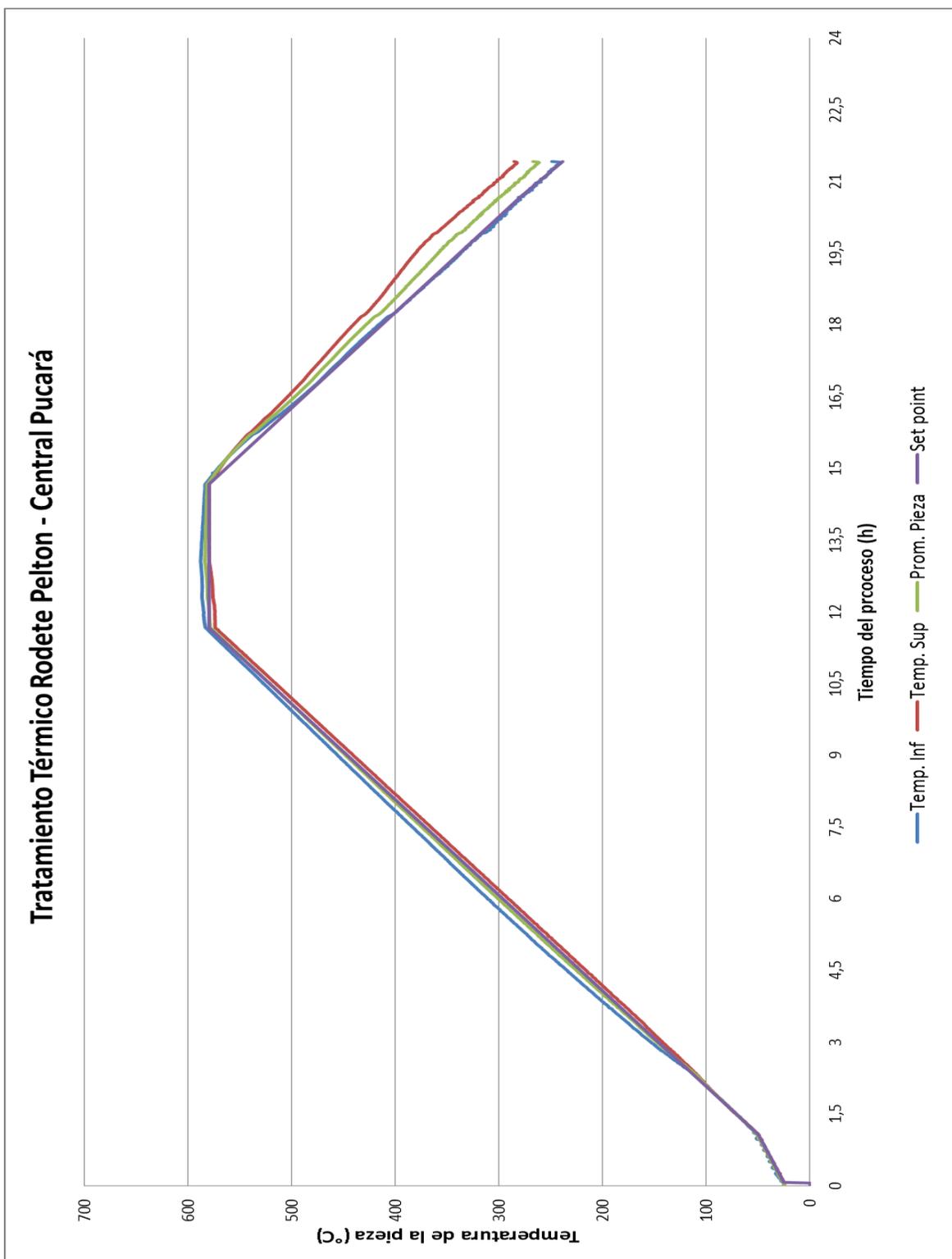


Figura 17. Curva de temperaturas tratamiento térmico rodete Pelton

4.1.2. Error absoluto medio de la curva del proceso

Siendo el promedio de la suma de la diferencia entre los valores reales y los valores pronosticados, conocido como MAE.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Real_i - Pronostico_i|}{n} \quad Ec. (9)$$

Dónde:

- $Real_i$ = Valor promedio de temperatura de termocuplas
- $Pronostico_i$ = Valor de la curva del proceso térmico
- n = Numero de lecturas

Como se observa en la Figura 16, el proceso se divide en 3 etapas, rampa de calentamiento, meseta de permanencia y pendiente de enfriamiento; se determina el MAE para cada etapa y para todo el proceso.

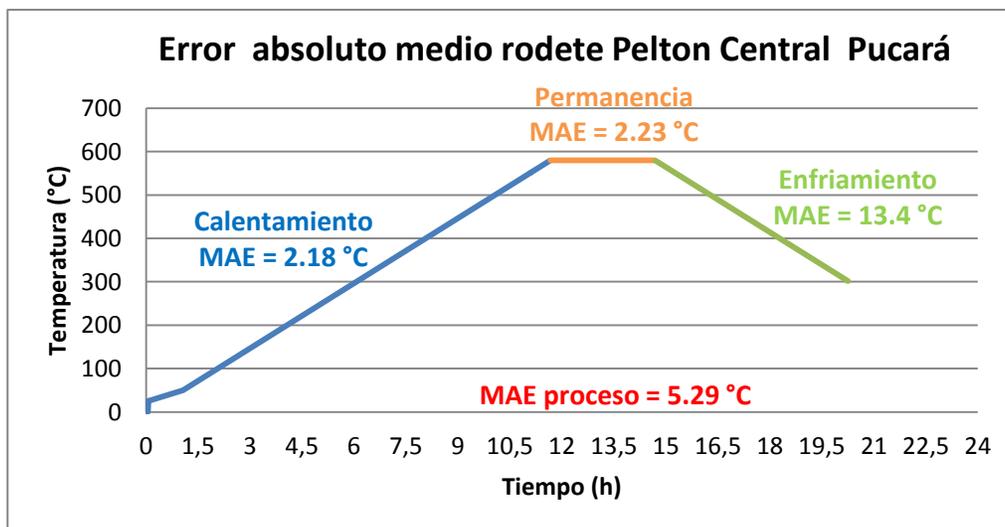


Figura 18. Error absoluto medio rodete Pelton Central Pucará

En la Figura 18, se identifica el error absoluto medio del rodete Pelton de la Central Pucará en sus 3 etapas con los siguientes valores; rampa de calentamiento 2.18 °C, meseta de permanencia 2.23 °C y pendiente de enfriamiento 13.4 °C; el proceso completo del tratamiento térmico posee un error absoluto medio de 5.29 °C.

4.1.3. Error porcentual absoluto medio de la curva del proceso

El error porcentual absoluto medio mejor conocido como MAPE es un indicador que mide el tamaño del error absoluto en términos porcentuales, ya que el MAPE es un porcentaje más fácil de comprender que otros estadísticos de medición.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Real_i - Pronostico_i|}{|Real_i|} * 100}{n} \quad Ec. (10)$$

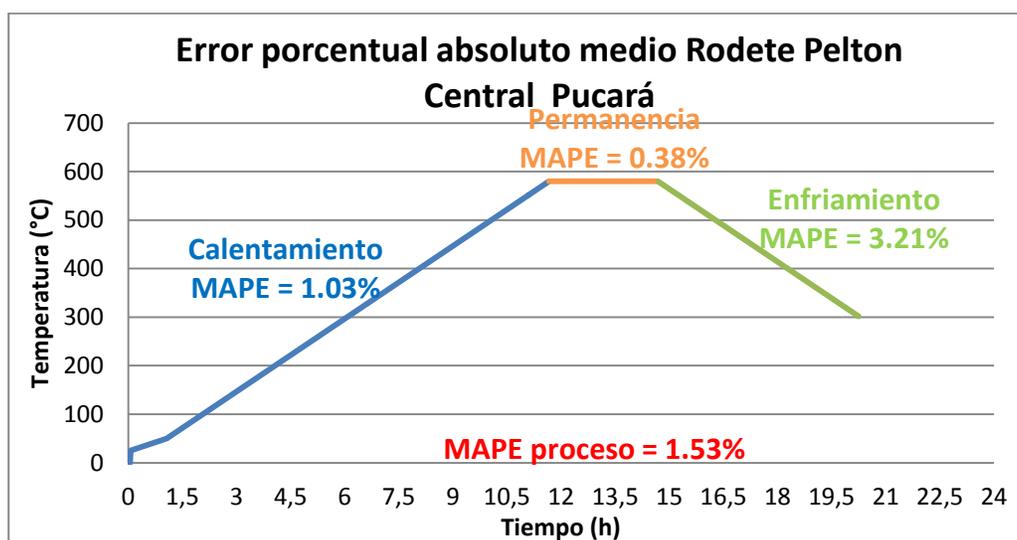


Figura 19. Error porcentual absoluto medio rodete Pelton

De la Figura 19, se expresa el error porcentual absoluto medio en las etapas, rampa de calentamiento de 1.03%, en la meseta de permanencia 0.38% y en la

pendiente de enfriamiento de 3.21%; todo el proceso de tratamiento térmico tiene un error porcentual absoluto medio de 1.53%.

4.1.4. Calor total perdido por el rodete

Se determina el calor que pierde el rodete al término de la meseta de permanencia con una temperatura de 580°C, durante un tiempo $t = 5.5$ horas estimando llegar a una temperatura de 300°C.

$$q_T = -C_p * m_r * \frac{dT}{dt}$$

Dónde:

$$m_r = 2925 \text{ kg}$$

$$C_p = 0.12 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}$$

$$dT = -280^\circ\text{C}$$

$$dt = 5.5 \text{ h}$$

Reemplazando:

$$q_T = \frac{-0.12 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 2925 \text{ kg} * (-280^\circ\text{C})}{5.5 \text{ h}}$$

$$q_T = 17869.09 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 20781.75 \text{ W}$$

El rodete perderá 20781.75 W al pasar de los 580°C a los 300°C en un tiempo estimado de 5.5 horas.

4.1.5. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural

El coeficiente de transferencia de calor de aire varía dependiendo a la temperatura en la que se encuentre la superficie del horno, ya que las propiedades del aire como conductividad térmica, difusividad térmica y viscosidad cinemática no son constantes y cambian a diferentes temperaturas.

$$Nu = \frac{h * D}{k}$$

Se utiliza la Ec. (4) que expresa a Rayleigh en función de las propiedades físicas del fluido:

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu * \alpha}$$

Las compuertas poseen una geometría cuadrada y con referencia al Anexo, se selecciona una correlación empírica para el número de Nusselt.

$$Nu = 0.15 * Ra_L^{1/3}$$

A continuación se muestra la Figura 20, en la cual se genera una curva de transferencia de calor por convección natural del aire considerando las variaciones de temperatura y las propiedades del aire a dicha temperatura, donde se puede apreciar que a partir de los 470 °C la curva tiende a ser estable y posee una transferencia de calor de 9.45 W/m² * K.

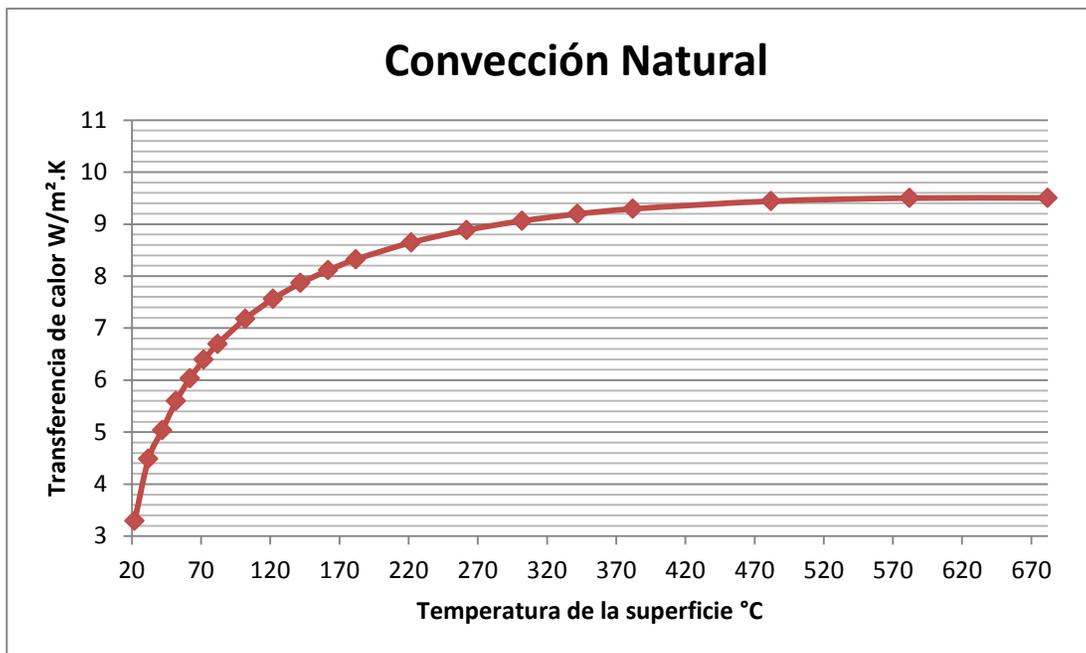


Figura 20. Coeficiente de transferencia de calor del aire por convección natural

Con ayuda del software Matlab ingresamos los parámetros y se obtiene la ecuación de una curva polinómica de grado 7 que representa la transferencia de calor por convección natural para las compuestas de ventilación superior del horno, Figura 21.

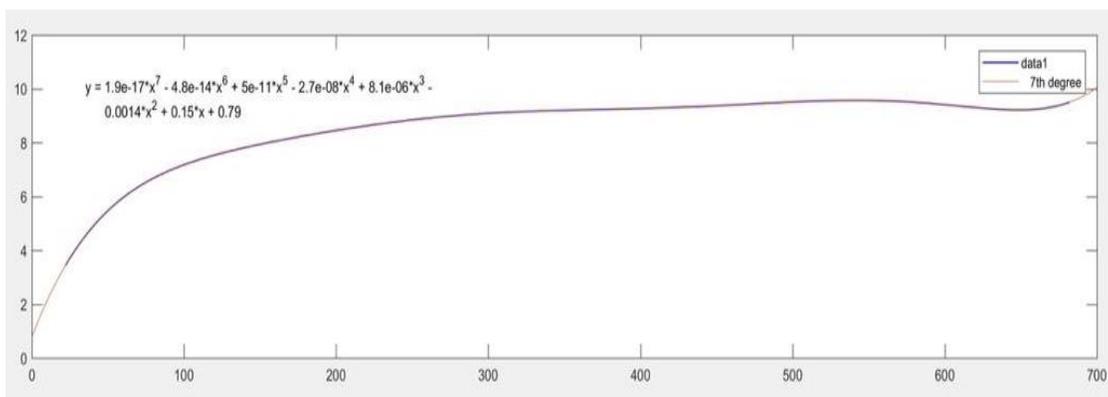


Figura 21. Curva polinómica transferencia de calor por convección natural

$$y = 1.9095E^{-17} * x^7 - 4.8309E^{-14} * x^6 + 4.9592E^{-11} * x^5 - 2.6662E^{-8} * x^4 + 8.1177E^{-6} * x^3 - 0.0014307 * x^2 + 0.14795 * x + 0.79181 \quad Ec. (11)$$

A diferencia del coeficiente de transferencia de calor por convección natural en la transferencia de calor por convección forzada no se puede expresar su coeficiente mediante una curva o ecuación ya que el mismo depende de la geometría de la pieza, mas no en la geometría de las compuertas de ventilación superior, lo cual generaría una curva diferente para cada pieza o rodete que sea tratado térmicamente.

4.1.6. Relación entre el ángulo de apertura de las compuertas y el calor disipado

El horno cuenta con 4 compuertas de ventilación superior las mismas que son las encargadas de liberar el exceso de calor concentrado en el horno, en su etapa de enfriamiento mediante la convección natural de sus compuertas.

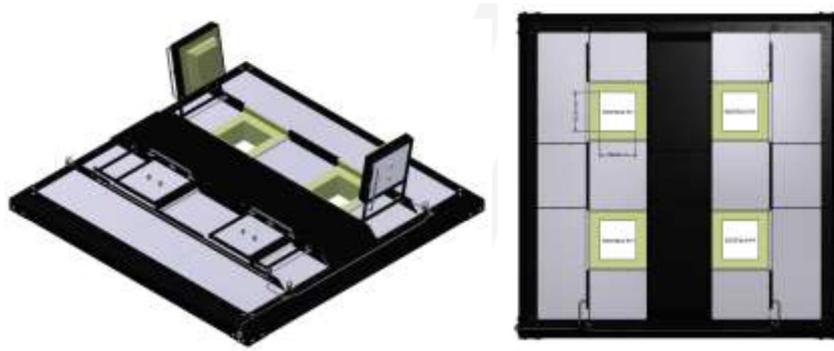


Figura 22. Compuertas de ventilación superior

Las compuertas poseen una geometría cuadrada y sus dimensiones fueron definidas por fabricante:

$$L = \text{lado} = 0.7m$$

$$A = \text{area} = 0.49m^2$$

Para lograr una mayor precisión en la transferencia de calor se mide las dimensiones del conducto reales por donde libera el calor las compuertas más no las dimensiones de las compuertas:

$$L_{real} = lado = 0.75m$$

$$A_{real} = area = 0.56m^2$$

La transferencia de calor que realizan las compuertas del horno se expresa mediante la Ec. (1).

$$q_{compuertas} = h * A_{\infty} * (T_s - T_{\infty})$$

El valor de transferencia de calor requerido por las compuertas es el resultado de la resta entre el calor total que se quiere dispar en el horno y el calor que disipa sus ventiladores.

$$q_{compuertas} = q_T - q_{ventiladores}$$

Para establecer el ángulo al que deben desplazarse las compuertas primero se obtiene el área de liberación de calor, ya que es la superficie que deben liberar las compuertas para realizar la transferencia de calor por convección natural.

$$A_{\infty} = \frac{q_{compuertas}}{h * (T_s - T_{\infty})}$$

La Figura 23, demuestra la aplicación del software CAD en la obtención del área de liberación de calor en función a la variación del; con estos datos se genera una ecuación que representa dicha variación.

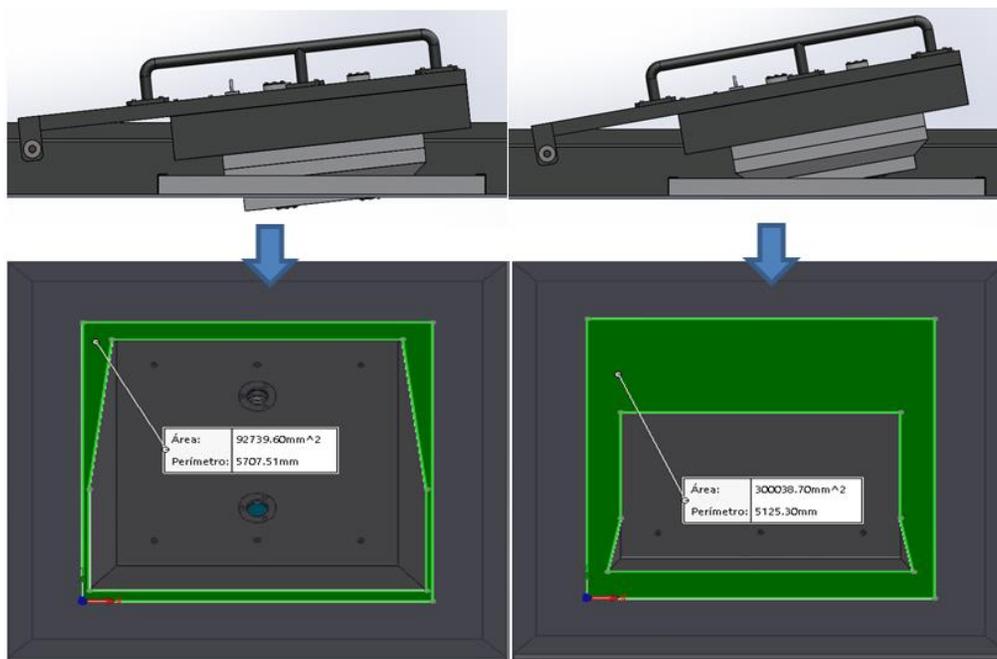


Figura 23. Área de liberación a diferentes ángulos de apertura de la compuerta

Como se demuestra en la Figura 24, se genera la ecuación de una curva polinómica de grado 6 que representa en el ángulo de apertura de las compuertas en función del área de liberación de calor que se requiera para liberar el exceso de calor por convección natural.

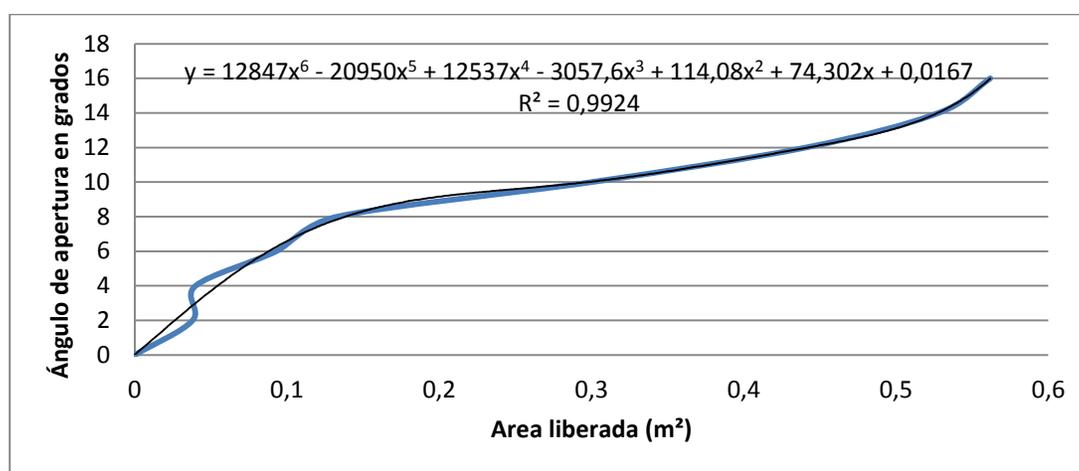


Figura 24. Ángulo de apertura de las compuertas VS Área de liberación de calor

$$y = 12847 * x^6 - 20950 * x^5 + 12537 * x^4 - 3057.6 * x^3 + 114.08 * x^2 + 74.302 * x + 0.0167 \quad Ec. (12)$$

4.1.7. Calor perdido por las paredes y techo del horno

Para determinar las pérdidas por las paredes y el techo, se considera la relación de resistencia térmica por convección que facilita el fabricante del horno:

$$\sum R = \frac{1}{h1_{\infty} * A1_{\infty}} + \frac{1}{h2_{\infty} * A2_{\infty}} + \dots + \frac{1}{hn_{\infty} * An_{\infty}} \quad Ec. (13)$$

Dónde:

$$\sum R_{pared} = 0.2404 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\sum R_{techo} = 0.1736 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Estos valores se remplazan en la siguiente ecuación para obtener la pérdida de calor por paredes y techo en función de la temperatura del horno.

$$q_p = \frac{(T_i - T_{\infty})}{\sum R} \quad Ec. (12)$$

Las pérdidas de paredes y techo se suman; se debe tomar en cuenta las 4 paredes del horno.

$$q_{total} = q_{pared} + q_{techo}$$

$$q_{total} = 4 * q_{pared} + q_{techo}$$

$$q_{total} = 4 * \frac{(T_i - T_{\infty})}{\sum R_{pared}} + \frac{(T_i - T_{\infty})}{\sum R_{techo}}$$

$$q_{total} = (T_i - T_{\infty}) * \left(\frac{4}{\sum R_{pared}} + \frac{1}{\sum R_{techo}} \right)$$

$$q_{total} = (T_i - 18^{\circ}\text{C}) * \left(\frac{4}{0.2404 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}} + \frac{1}{0.1736 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}} \right)$$

$$q_{total} = (T_i - 18^{\circ}\text{C}) * 22.4 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}}$$

4.1.8. Simulación de la transferencia de calor en las paredes del horno

Con esta simulación se analiza transferencia el comportamiento del aislamiento utilizado en las paredes del horno y se observa cómo se produce la transferencia de calor hacia el exterior de horno.

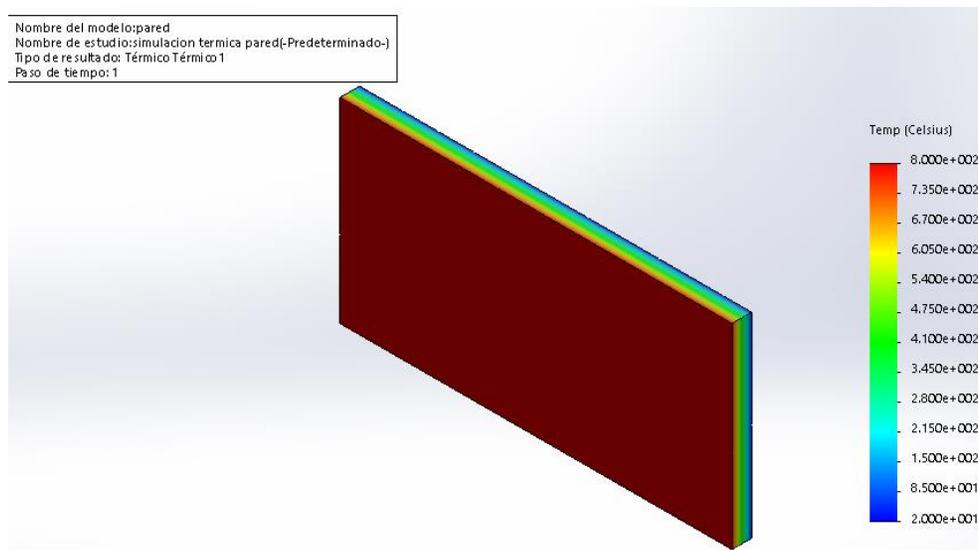


Figura 25. Simulación térmica de las paredes del horno

En la Figura 25, se observa cómo se produce la transferencia de calor desde el interior del horno hasta el exterior, el color rojo nos indica la mayor temperatura al interior del horno y el color azul la temperatura menor. Según los datos generados en el

exterior se estima una temperatura de 20°C, con esto se asegura que no exista riesgo de pérdidas de calor hacia el exterior del horno.

4.1.9. Simulación térmica del horno HELT 300-BSC

Con este análisis se observa el comportamiento del flujo de aire que recircula en el horno y es liberado por las compuertas de ventilación y los conductos de deshumidificación, el análisis nos permite identificar sus valores críticos de temperatura en función del ángulo de apertura para la compuerta.

Los parámetros para el análisis son los siguientes:

$$W_h = \text{Potencia del horno} = 300 \text{ kW}$$

$$v_{\text{ventiladores}} = \text{Velocidad de los ventiladores} = 5 \text{ m/s}$$

$$T_{\text{ambiente}} = \text{Temperatura del ambiente} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

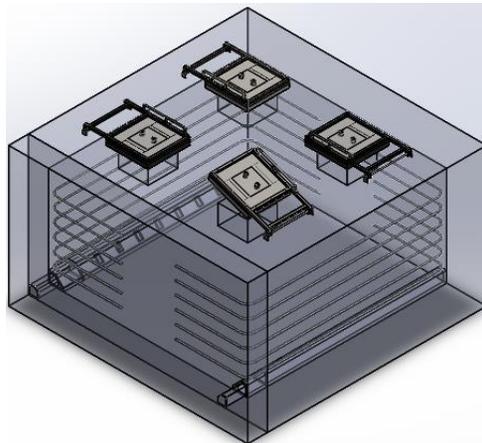


Figura 26. Ensamble del horno para simulación térmica

En la Figura 27, se encuentra los resultados del análisis térmico del horno con las 4 compuertas de ventilación cerradas por completo donde se puede destacar de color amarillo una temperatura promedio del centro del horno de 198.89°C, de color celeste la

temperatura que posee el aire al salir por los conductos de deshumidificación es de 122.22 °C, dejando con una temperatura ambiente a la parte posterior de la compuerta.

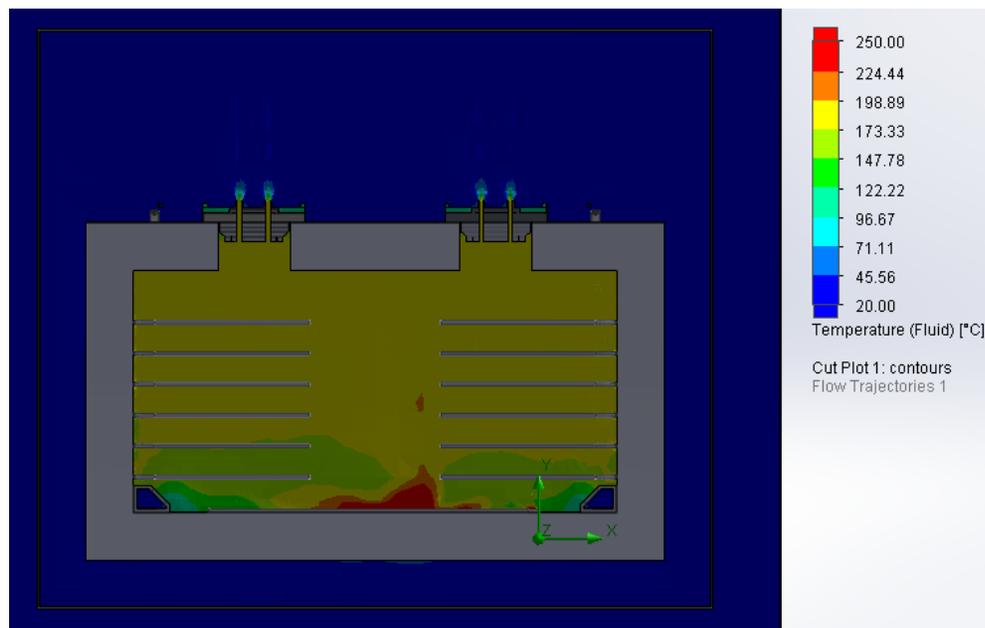


Figura 27. Análisis térmico del horno compuertas cerradas

En la Figura 28, se obtuvo en análisis térmico del horno con la apertura de una de sus compuertas a 10 grados, donde se puede observar de color verde una temperatura promedio del centro del horno a 173.33 °C, la salida del aire por la compuerta de ventilación se encuentra a una temperatura igual que el centro del horno de 173.33 °C, que va disminuyendo conforme sale al ambiente y registra una temperatura límite de 96.67 °C, ubicada en la parte frontal y posterior de la compuerta la misma que no afectara a la implementación de un sistema para la apertura de las compuertas.

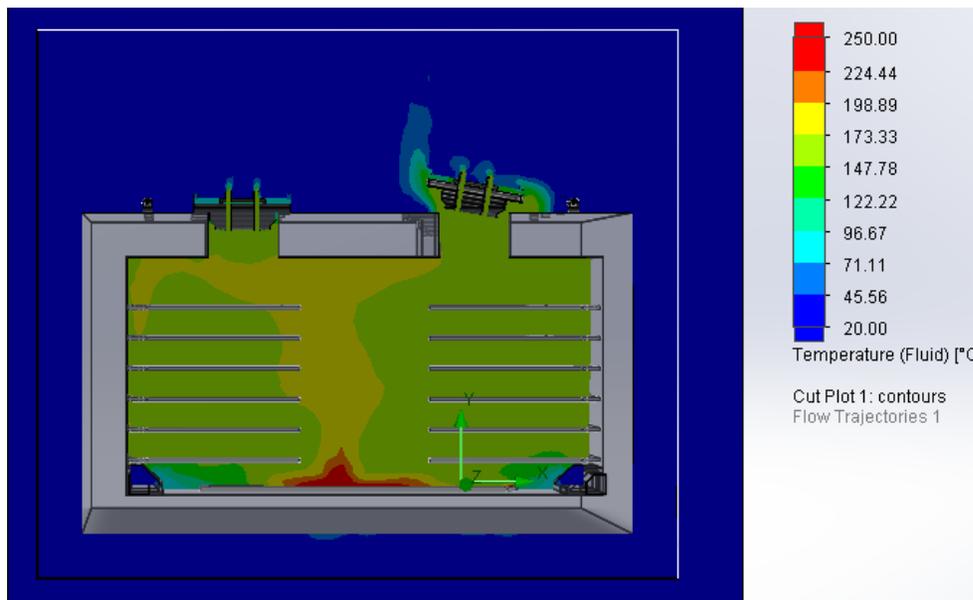


Figura 28. Análisis térmico del horno compuerta a 10 grados

En la Figura 29, se analiza la simulación térmica de horno con una de sus compuertas abierta 20 grados, donde se muestra con un color verde la parte central del horno a una temperatura de 173.33 °C, en la salida de aire de las compuertas se tiene una temperatura de 173.33 °C igual al centro del horno, que va disminuyendo conforme el aire entra contacto con el ambiente y se identifica una temperatura límite de color celeste a 96.67 °C, ubicada en los extremos de las compuerta, esta temperatura cambio como respecto a la de la Figura 28, ya que al encontrarse la compuerta más abierta el aire tiende a salir en dirección vertical dejando libre la parte posterior de las compuerta y garantizando la no afectación a un sistema para la apertura de las compuertas.



Figura 29. Análisis térmico compuerta 20 grados

El análisis permite obtener los resultados mediante una trayectoria de flujo en donde se puede identificar de mejor manera el flujo de aire con su dirección y trayectoria, con los valores de temperatura respectivos, observar Figura 30.

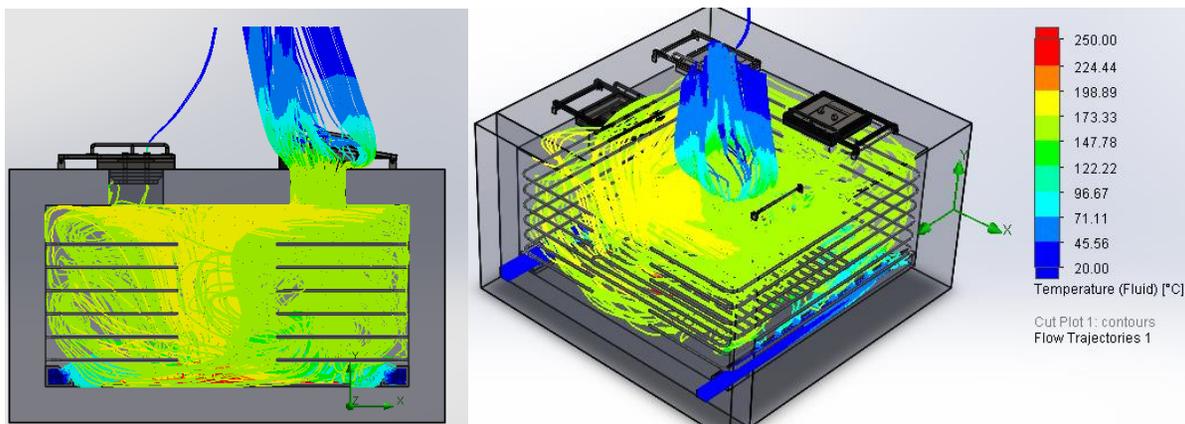


Figura 30. Trayectoria del flujo análisis térmico

4.1.10. Análisis Termográfico de la etapa de enfriamiento

Para realizar un análisis más profundo a la etapa de enfriamiento del horno, con ayuda de una cámara térmica se realizó lecturas del proceso para comparar los datos registrados por la cámara térmica y los valores de las distintas termocuplas ubicadas en la pieza para monitorear las temperaturas del proceso térmico.

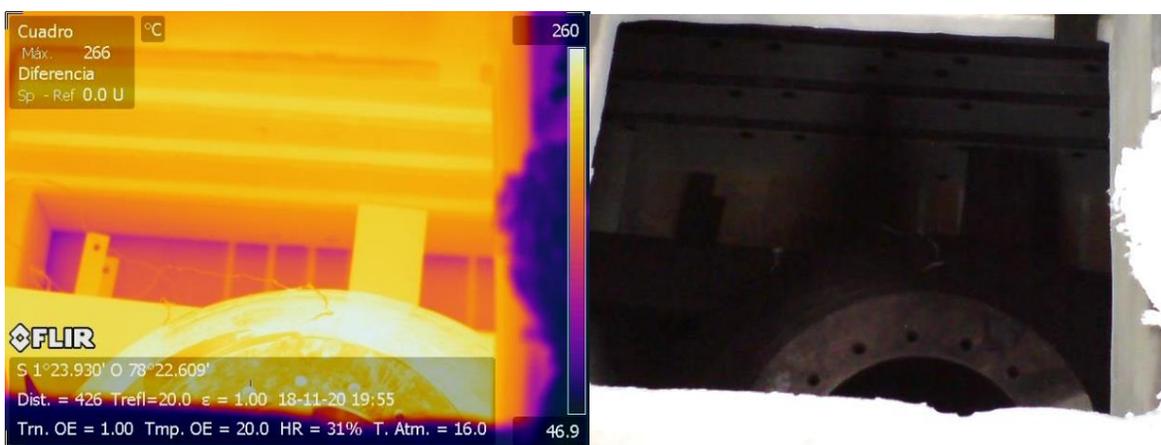


Figura 31. Mapa térmico en el instante de la apertura de la compuerta

En la Figura 31, se observa el mapa térmico en el instante en que la compuerta 1 de ventilación se levanta, se determina un rango de temperatura de 260 °C a 46.9 °C, definiendo a los lugares más calientes con un color blanco que es la superficie superior y los costados de la pieza, y a la parte más fría con un color negro que son los bordes de la apertura de las escotilla.

Las lecturas fueron tomadas cada 2 minutos por la cámara térmica FLIR SC 660 para obtener un mapa térmico de la imagen e identificar los lugares más calientes, y a su vez estos datos al ser analizados en puntos específicos como resistencias y termocuplas se los compara con los valores obtenidos por el control del horno, observar la Figura 32.

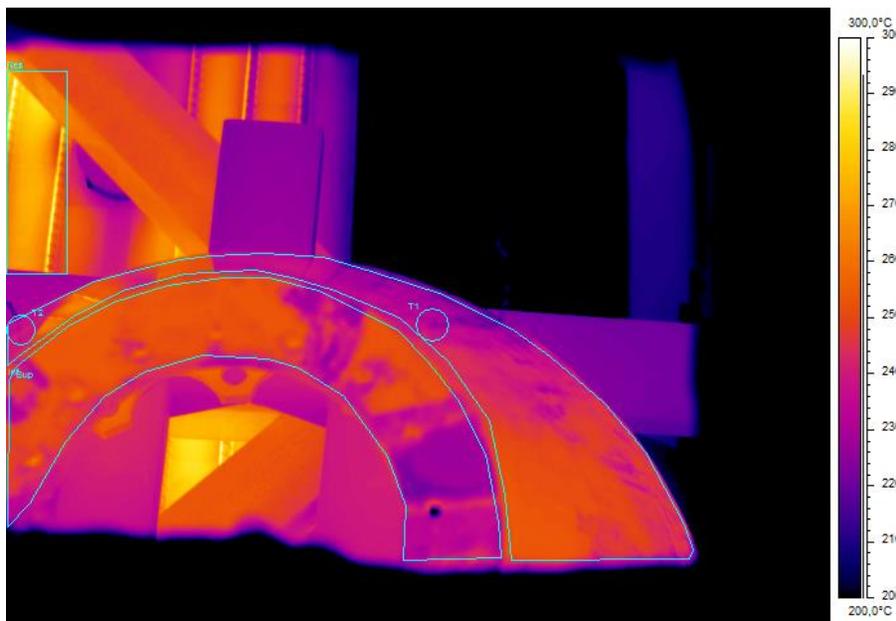


Figura 32. Puntos específicos del análisis térmico

En la Figura 33, se compara los datos registrados del análisis térmico de la cámara FLIR SC 660 y los datos de las termocuplas registrados por el control del horno, donde se puede observar una variación entre los dos registros de 5°C - 10°C, las dos curvas tienden a una recta decreciente que decae por un tiempo de 5 minutos y se debe a la apertura de las compuertas, esto quiere decir que las compuertas de ventilación solo provocan una pequeña variación de temperatura entre los 5°C - 10°C, en la pendiente de enfriamiento debido a la apertura de cada compuerta mas no cambian la pendiente de enfriamiento ni fuerzan a que el sistema se enfríe más rápido.

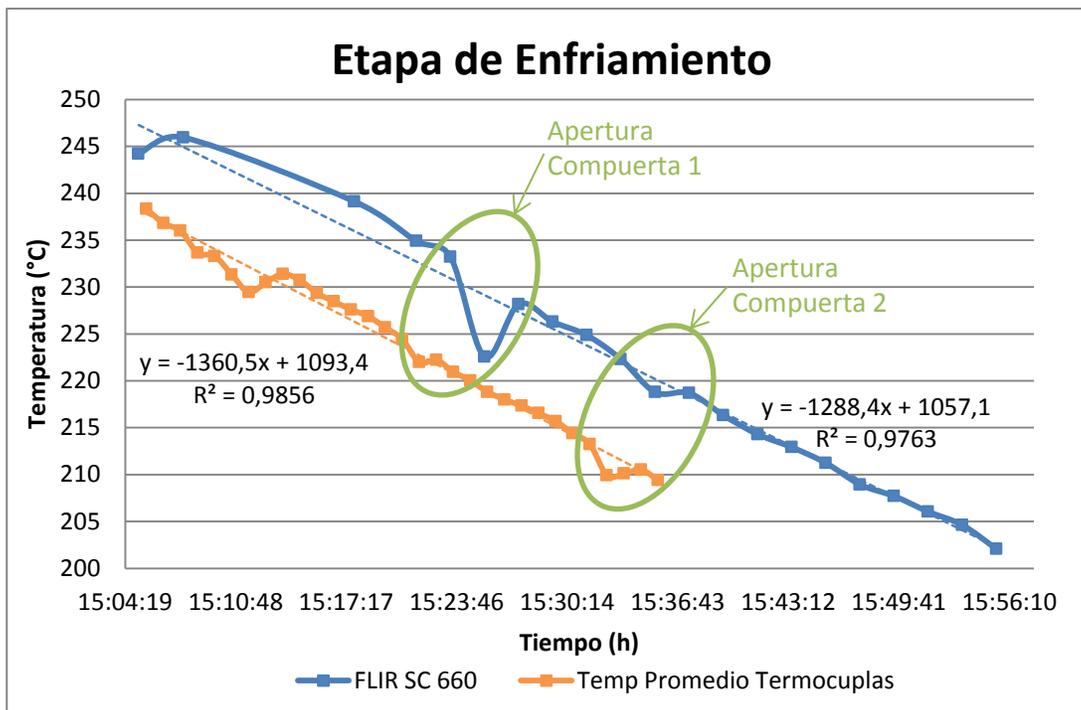


Figura 33. Análisis etapa de enfriamiento - FLIR SC 660

4.2. Discusión de los resultados

4.2.1. Aplicación del ángulo de apertura de las compuertas en el tratamiento térmico del rodete Pelton de la Central Pucará

El control del horno toma lecturas de los datos del proceso en intervalos de un minuto; del tratamiento térmico realizado al rodete Pelton de la Central Pucará se selecciona la lectura del horno a las 6:39 horas en la etapa de enfriamiento con las siguientes temperaturas:

$$T_{setpoint} = 575.82 \text{ } ^\circ\text{C} = 848.97 \text{ K}$$

$$T_{promedio} = 578.8 \text{ } ^\circ\text{C} = 860.95 \text{ K}$$

$$T_{\infty} = 18^\circ\text{C} = 291.15 \text{ K (Temperatura ambiente)}$$

La variación de temperatura es:

$$dT = T_{setpoint} - T_{promedio}$$

$$dT = 575.82 \text{ } ^\circ\text{C} - 578.8 \text{ } ^\circ\text{C} = -2.98^\circ\text{C} \approx -3^\circ\text{C}$$

Considerando que se requiere corregir ese error en un tiempo estimado de 3 minutos a una razón de 1°C por minuto.

$$q_T = -C_p * m_r * \frac{dT}{dt}$$

Dónde:

$$m_r = 2925 \text{ kg}$$

$$C_p = -0.12 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}$$

$$dT = -3^\circ\text{C}$$

$$dt = 3 \text{ min} = 0.05 \text{ h}$$

Reemplazando:

$$q_T = \frac{-0.12 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 2925 \text{ kg} * (-3^\circ\text{C})}{0.05 \text{ h}}$$

$$q_T = 21060 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 24450.66 \text{ W}$$

El horno necesita disipar 24450.66 W que tendrán que ser liberados por medio de la convección forzada de los ventiladores y la convección natural del horno.

Para el calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada se considera una temperatura de la superficie de la pieza de 578.8 °C, una temperatura ambiente del aire aproximadamente 18 °C y una velocidad del aire de 0.6 m/s.

El promedio de las propiedades físicas del aire entre 160°C y 600°C son las siguientes, Anexo 1.

$$v = 4.775 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.0429 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Pr = 0.7 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

En base al Anexo 4 se obtiene la longitud característica D , con las dimensiones de la pieza del tratamiento térmico:

$$D = 0.55 \text{ m}$$

Reemplazamos para despejar el número de Reynolds.

$$Re = \frac{V * D}{v}$$

$$Re = \frac{0.6 \text{ m/s} * 0.55 \text{ m}}{4.775 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Re = 0.69 \times 10^4$$

De igual forma en el Anexo 4, se selección la ecuación característica para el número promedio de Nusselt:

$$Nu = 0.248 * Re^{0.612} * Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0.248 * 0.69x10^4^{0.612} * 0.7^{1/3}$$

$$Nu = 49.24$$

Al final se despeja el coeficiente de transferencia de calor.

$$Nu = \frac{h * D}{k}$$

$$h = \frac{Nu * k}{D}$$

$$h = \frac{49.24 * 0.0429 \frac{W}{m.K}}{0.55 m}$$

$$h = 3.84 \frac{W}{m^2.K}$$

Para la transferencia de calor por convección forzada a una temperatura de la superficie de la pieza a 578.8 °C, con velocidad del aire de 0.6 m/s el coeficiente de transferencia de calor de aire es $3.84 \frac{W}{m^2.K}$

Con los registrados de temperatura del horno y el coeficiente de convección forzada, se calcula el calor que pierde el rodete por medio de los ventiladores:

$$q_{ventiladores} = h * A_{\infty} * (T_s - T_{\infty})$$

$$q_{ventiladores} = 3.84 \frac{W}{m^2.K} * 11.2 m^2 * (860.94 K - 291.1 K)$$

$$q_{ventiladores} = 24118.8 W$$

Los ventiladores en ese instante con una velocidad de 0.6 m/s a una temperatura de la superficie de la pieza a 578.8 °C, pierden el calor de 24118.8 W.

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor natural con una temperatura de la superficie de la pieza de 578.8 °C y la temperatura ambiente del aire aproximadamente 18 °C.

Para la selección de las propiedades del aire se calcula la temperatura de película.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_f = \frac{578.8 \text{ °C} + 18 \text{ °C}}{2} = 298.4 \text{ °C} \approx 300 \text{ °C} = 573 \text{ K}$$

$$T_f = 300 \text{ °C} = 573.15 \text{ K}$$

Las propiedades físicas del aire a 300°C son las siguientes, Anexo 1.

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = \frac{1}{TK} = \frac{1}{573 \text{ K}} = 1.745 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$v = 4.765 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha = 6.871 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$k = 0.04418 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$$

En el Anexo 3, se obtiene la fórmula para calcular la longitud característica L_c con las dimensiones de la compuerta dadas por el fabricante:

$$L = \text{lado} = 0.7 \text{ m}$$

$$A = \text{area} = 0.49 \text{ m}^2$$

$$L_c = \frac{A_s}{p}$$

$$L_c = \frac{0.49m^2}{4 * 0.7m} = 0.175 m$$

Reemplazamos para despejar el número de Rayleigh.

$$Ra_L = Gr_l * Pr$$

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * L_c^3}{v * \alpha}$$

$$Ra_L = \frac{9.8 \text{ m/s}^2 * 1.745 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} * (853\text{K} - 291\text{K}) * (0.175 \text{ m})^3}{4.765 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} * 6.871 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2}$$

$$Ra_L = 1.5732 \times 10^7$$

De igual forma en el Anexo 3 se selección la ecuación característica para el número promedio de Nusselt considerando que Rayleigh está en los intervalos de $10^7 - 10^{11}$ y por lo tanto:

Número promedio de Nusselt

$$Nu = 0.15 * Ra_L^{1/3}$$

$$Nu = 0.15 * (1.5732 \times 10^7)^{1/3}$$

$$Nu = 37.585$$

Al final se despeja el coeficiente de transferencia de calor.

$$Nu = \frac{h * L_c}{k}$$

$$h = \frac{Nu * k}{L_c}$$

$$h = \frac{37.585 * 0.04418 \frac{W}{m.K}}{0.175 m}$$

$$h = \frac{37.585 * 0.04418 \frac{W}{m.K}}{0.175 m}$$

$$h = 9.48 \frac{W}{m^2.K}$$

Para comprobar este coeficiente se reemplaza la temperatura de la pieza en la Ec.

11:

$$y = 1.9095E^{-17} * x^7 - 4.8309E^{-14} * x^6 + 4.9592E^{-11} * x^5 - 2.6662E^{-8} * x^4 + 8.1177E^{-6} * x^3 - 0.0014307 * x^2 + 0.14795 * x + 0.79181 \quad \text{Ec. (11)}$$

$$y = 9.53 \frac{W}{m^2.K}$$

Para la transferencia de calor por convección natural con una temperatura de la superficie de la pieza a 578.8 °C y una temperatura ambiente de 18°C, el coeficiente de transferencia de calor de aire es $9.48 \frac{W}{m^2.K}$.

El calor que requiere ser disipado por las compuertas es el siguiente:

$$q_T = q_{\text{ventiladores}} + q_{\text{compuertas}}$$

$$q_{\text{compuertas}} = q_T - q_{\text{ventiladores}}$$

$$q_{\text{compuertas}} = 24450.66 W - 24118.8 W$$

$$q_{\text{compuertas}} = 331.86 W$$

Se calcula el área de liberación de calor:

$$q_{\text{compuerta}} = h * A_{\infty} * (T_s - T_{\infty})$$

$$A_{\infty} = \frac{q_{\text{compuerta}}}{h * (T_s - T_{\infty})}$$

$$A_{\infty} = \frac{331.86 \text{ W}}{9.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * (860.94 \text{ K} - 291.1 \text{ K})}$$

$$A_{\infty} = \frac{331.86 \text{ W}}{9.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}} * (860.94 \text{ K} - 291.1 \text{ K})}$$

$$A_{\infty} = 0.0624 \text{ m}^2$$

Según la Ec. (12), se reemplaza el área de liberación de calor para determinar el ángulo de apertura de las compuertas.

$$y = 12847 * x^6 - 20950 * x^5 + 12537 * x^4 - 3057.6 * x^3 + 114.08 * x^2 + 74.302 * x + 0.0167 \quad \text{Ec. (12)}$$

$$y = 4.52^{\circ} \approx 5^{\circ}$$

El sistema de apertura de compuertas de ventilación superior deberá desplazar 5° una de sus compuertas para liberar el exceso de calor existente en ese instante.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Datos informativos

El proceso térmico en la actualidad no posee ningún control de sus compuertas de ventilación, las mismas que son manipuladas por los operadores de forma manual exponiéndolos a altas temperaturas y a sufrir un accidente laboral; la apertura las compuertas se las realiza utilizando cuerdas para anclar las compuertas y un puente grúa para levantarlas, Figura 34; además las compuertas son levantadas en tiempos del proceso escogidos de forma aleatoria por el operador, una vez que las curvas de temperatura poseen una desviación considerable.

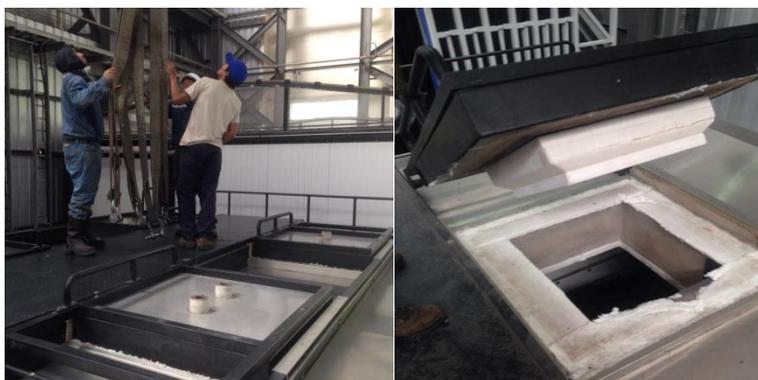


Figura 34. Apertura de compuertas forma manual

Estos factores provocan que el control de la apertura de la compuerta no sea el óptimo para el proceso de enfriamiento, ocasionando que las curvas de temperatura difieran de la curva ideal proceso; actualmente se estima un error absoluto promedio de 13.4 °C en la pendiente de enfriamiento.

Dentro de la parte del control del horno existe la problemática con la interacción del SCADA y el control del horno, ya que los parámetros y datos del proceso son ingresados mediante una interfaz por un computador, y al momento que este deja de conectarse al controlador lógico programable PLC, el proceso se aborta automáticamente y el registro de datos se pierde.

Por este motivo y bajo los requerimientos del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas “CIRT”, se requiere eliminar la interfaz del SCADA e ingresar los datos del proceso mediante su interfaz HMI y a su vez realizar una base de datos para almacenar el registro de temperatura en el controlador lógico programable PLC.

5.2. Justificación

La presente propuesta busca obtener una mejora en el proceso de tratamiento térmico para rodets y partes industriales, el mismo que tiene como fin diseñar un sistema automático para el control de la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del horno eléctrico HELT-300BSC, con ello se garantiza el control autónomo del horno en todas las etapas del proceso, eliminando la intervención de los operadores al momento de accionar las compuertas y evitando que estén expuestos a altas temperaturas; con un control óptimo de la compuertas de ventilación el margen de error de las curvas de temperatura disminuyen aproximándose a la curva ideal del proceso y por ende aumentado la eficiencia del sistema.

Con la eliminación del SCADA, el ingreso de los datos por la interfaz HMI y la recolección de datos mediante el controlador lógico programable, se logra independizar al proceso térmico del computador con la que interactúa actualmente, lo cual garantiza

la recolección de datos y que el sistema no aborte por problemas o desconexión del computador.

5.3. Objetivos

- Seleccionar la mejor alternativa para el diseño de un sistema para la apertura de compuertas de ventilación superior.
- Implementar un nuevo sistema HMI para el ingreso de los datos del proceso y monitoreo.
- Crear una base de datos mediante el controlador lógico programable para almacenar las temperaturas del proceso.
- Generar un protocolo de pruebas para comprobar la funcionalidad del sistema.

5.4. Fundamentación de la propuesta

5.4.1. Selección de la mejor alternativa para el diseño del sistema.

En esta parte se analizan todos los parámetros para seleccionar un sistema que realice la función de apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del horno, con referencia a las condiciones que determinan su diseño, se considera que existen muchos sistemas y formas de levantar compuertas, que a su vez debe estar acorde a la necesidad y restricciones que posee el horno.

Para lo cual se ha estudiado distintos tipos de soluciones y se presentó tres formas de diseño:

- Mecanismo accionado mediante pistón.
- Mecanismo accionado mediante motor.
- Sistema de poleas.

5.4.2. Mecanismo accionado mediante pistón.

Esta solución presenta un sistema conformado por un mecanismo y un pistón; el mecanismo que tiene como función abrir y cerrar las compuertas que a su vez recibe el movimiento del pistón para el control de la posición del sistema, como se presenta en la Figura 35.

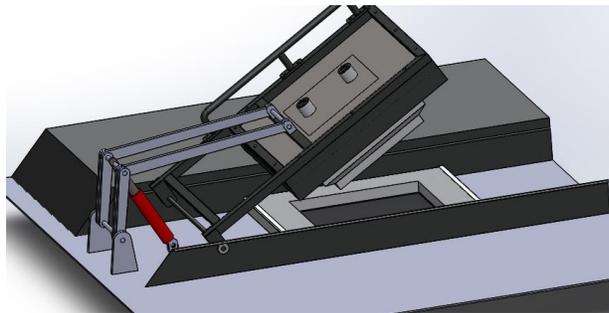


Figura 35. Mecanismo accionado mediante pistón

La compuerta posee dos posiciones abierta o cerrada como se visualiza en la Figura 36 y Figura 37; que a su vez se refleja con el desplazamiento de vástago; cuando el vástago está en su posición cero la compuerta está cerrada y cuando el vástago realice el máximo de su carrera la compuerta está abierta.

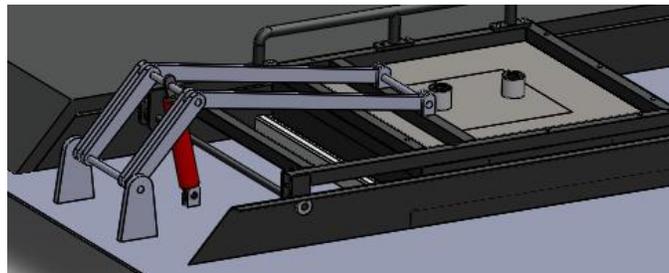


Figura 36. Compuerta cerrada (vástago posición cero)

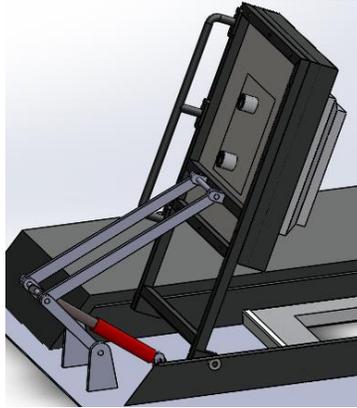


Figura 37. Compuerta abierta (vástago máxima de carrera)

A continuación se explicará las ventajas y desventajas que tiene el sistema:

Ventajas:

- Fuerza y presión muy regulables.
- El sistema levanta gran cantidad de carga.
- No existe riesgo de sobrecarga.
- Trasmisión de energía óptima.

Desventajas:

- Implementación de una unidad hidráulica.
- Implementación de un circuito de tuberías.
- Elevado costo en equipos hidráulicos.
- Elevado costo en mantenimiento.
- Baja velocidad en sus actuadores.

5.4.3. Mecanismo accionado mediante motor.

El segundo modelo posible para solucionar la apertura y cierre de las compuertas de ventilación, es el mecanismo manivela-balancín de 4 barras creado por Grashof el mismo que consta de tres barras móviles y una fija, dicho mecanismo debe estar acorde tanto a las dimensiones de las compuertas y al espacio que posee la tapa superior del horno, con el fin de restringir su geometría, Figura 38.

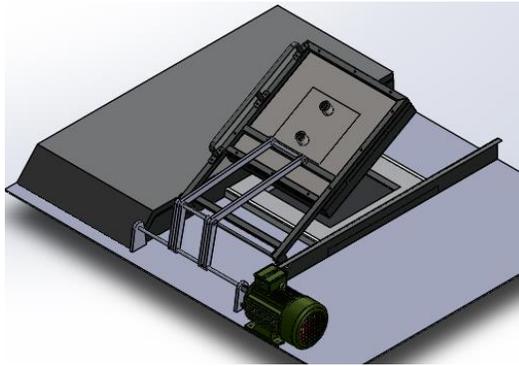


Figura 38. Mecanismo accionado mediante motor

El mecanismo es accionado mediante un motor eléctrico quien controla la posición de la compuerta, es el encargado de transmitir su movimiento al brazo más corto que es la manivela (L2), que está unido mediante el acoplador (L3) al extremo del balancín (L4) que por restricción de geometría es el marco de la compuerta; él un punto pivote es el eje de la compuerta mientras que el otro está limitado por las dimensiones de superficie de la tapa superior del horno, la distancia entre centros de los mismo conforma el eslabón fijo (L1); en la Figura 39, se observa la representación de los eslabones del mecanismo de 4 barras.

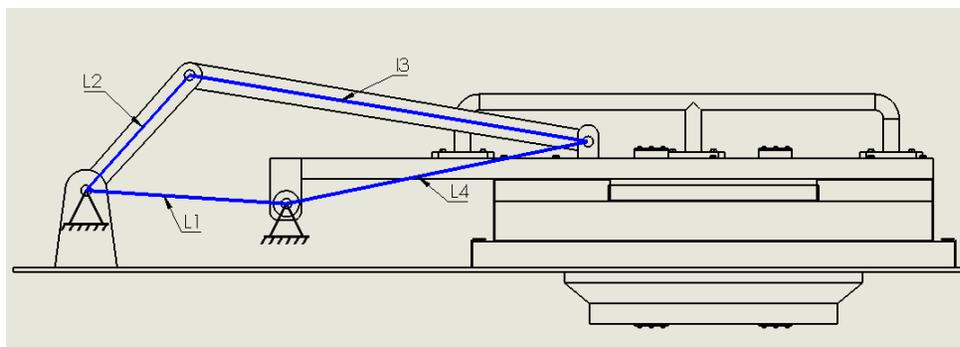


Figura 39. Representación de eslabones del mecanismo de 4 barras

Se explicara las ventajas y desventajas del mecanismo de 4 barras:

Ventajas:

- Mantenimiento e instalación sencilla.
- Poco espacio físico.
- Control de posición óptimo.

Desventajas:

- Posible flexión en eslabones.
- Caja reductora o variador de frecuencia para el motor.

Uno de los criterios de diseño del mecanismo de 4 barras es su ángulo de transmisión “ γ ” formado por el acoplador y el balancín, este ángulo indica la efectividad con la que el movimiento es transmitido al balancín y da una medida de calidad a nuestro mecanismo. Para obtener un óptimo resultado del ángulo de transferencia debería estar lo más próximo a 90° durante todo el movimiento de la manivela para que reduzca la flexión en los eslabones y la transmisión de fuerza sea la adecuada (Myszka, 2012).

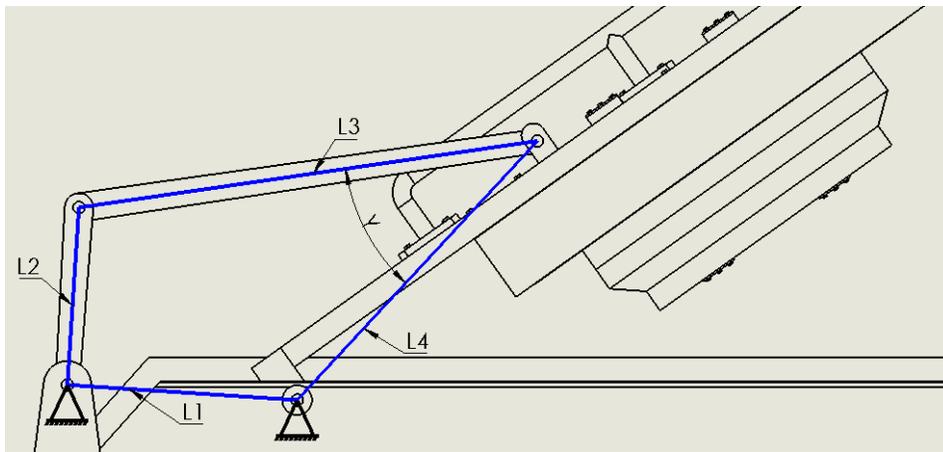


Figura 40. Ángulo de transmisión y

Las posiciones límites del mecanismo están definidas en el cierre y apertura de la compuerta, de igual forma generando el ángulo de transmisión mínimo y máximo, que se observa a continuación en la Figura 41.

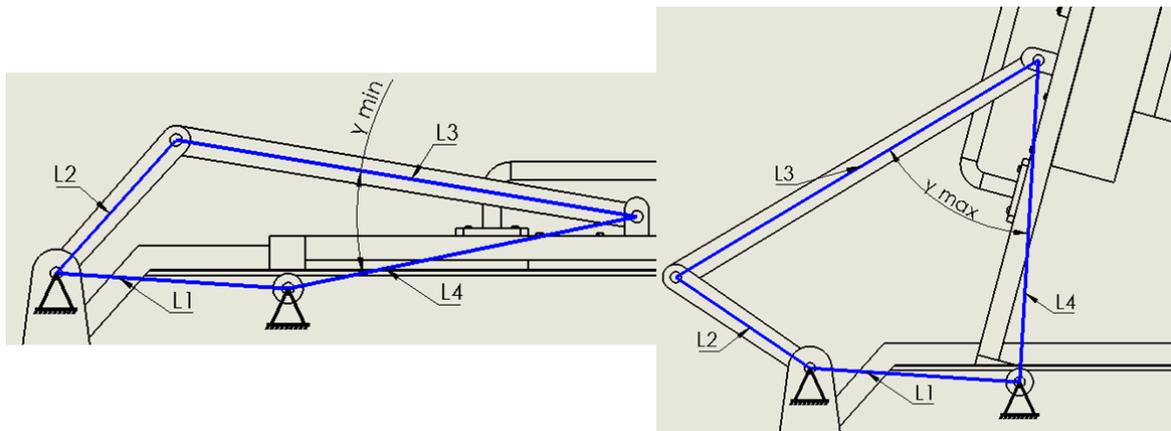


Figura 41. Límites de posición del mecanismo de 4 barras

Una regla en el diseño de este tipo de mecanismo menciona que si el ángulo de transmisión está fuera del rango de 45° a 135° , se debe descartar utilizar un mecanismo de 4 barras y buscar otra solución (Myszka, 2012).

Por el espacio limitado en este caso y la geometría de la compuerta; utilizando la herramienta de CAD podemos observar que no cumple la regla del ángulo de transmisión ya que se determinó un $\gamma_{min} = 22^\circ$ y $\gamma_{max} = 67^\circ$, provocando que el mecanismo está propenso a sufrir flexiones en sus eslabones y la transmisión de la fuerza no es la óptima.

5.4.4. Sistema de poleas.

La tercera alternativa es un sistema de poleas que mediante un motor y un juego de poleas y cables, tiran de la compuerta y hace que la misma se abra o se cierre; tal como se muestra en la Figura 42.

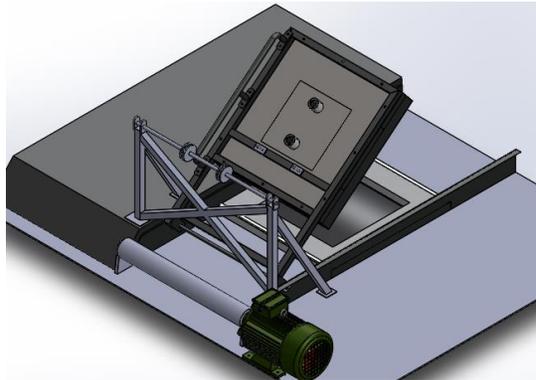


Figura 42. Sistema de poleas

El sistema es básicamente una estructura con puntos de apoyo en toda la superficie de la compuerta superior del horno, en donde van a descansar las poleas que van a transmitir el movimiento y unen la compuerta con el rodillo del motor, el rodillo debe tener la fuerza para levantar la compuerta y a su vez enroscar o saltar el cable según se requiera; todo el sistema está sujeto por dos cables de tensión que lo que hacen es dividir el peso en cada cable para levantar la compuerta.

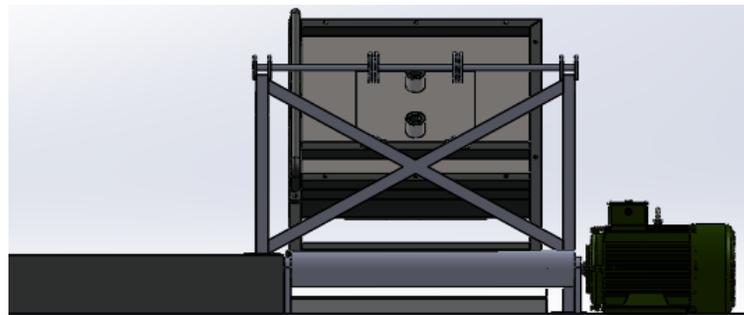


Figura 43. Vista posterior del sistema de poleas

Se detalla las ventajas y desventajas que presenta el sistema:

Ventajas:

- Fácil montaje y mantenimiento.
- Control óptimo de la posición.

- División del peso para los dos cables.
- Transmisión adecuada de la fuerza.

Desventajas:

- Espacio físico de la estructura de soporte.
- Espacio físico del rodillo.
- Caja reductora o variador de frecuencia para el motor.

5.4.5. Criterios a evaluar.

Para escoger una solución que se acorde a todas las necesidades y requerimientos del sistema, se han creado parámetros de selección los cuales nos van a permitir realizar una valoración cuantitativa considerando aspectos específicos de cada solución y de esta manera compararlos y llegar al sistema que genere el mayor número de beneficios.

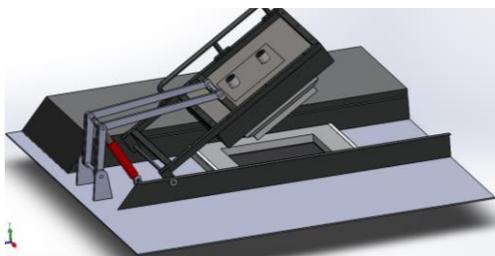
Los criterios a evaluar son los siguientes:

- Viabilidad Mecánica.
- Viabilidad Económica.
- Viabilidad de Instalación.
- Implementación de Equipos adicionales.
- Rediseños estructurados que demanden cambios actuales.
- Mantenimiento.
- Incorporaciones de obra civil.
- Demanda Energética.

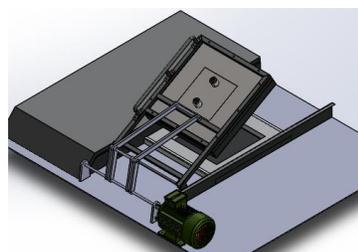
Estos criterios se evaluarán en una escala de 0 a 5, siendo 0 la ponderación más baja para designar a cada criterio y 5 la ponderación más alta, como ejemplo en la viabilidad mecánica se calificará con 0 si el sistema no es eficiente ni viable mecánicamente, y se calificará con 5 cuando el sistema es 100% viable mecánicamente.

Mecanismo accionado mediante pistón

Mecanismo accionado mediante motor

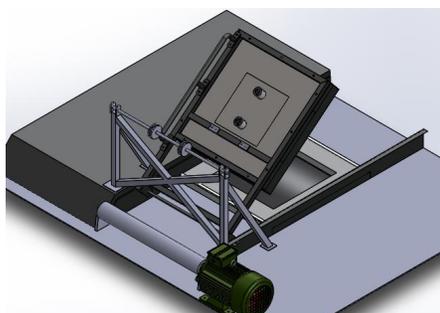


Solución 1



Solución 2

Sistema de poleas



Solución 3

Tabla 7

Evaluación de criterios para la selección del sistema

Criterios a evaluar	EVALUACION INDIVIDUAL		
	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Viabilidad Mecánica.	4	1	3
Viabilidad Económica.	1	2	3
Viabilidad de Instalación.	2	2	3
Implementación de Equipos adicionales.	2	3	3
Rediseños estructurados que demanden cambios actuales.	1	4	4

Mantenimiento.	1	2	2
Incorporaciones de obra civil.	2	3	3
Demanda Energética.	3	2	2
Sumatoria de la evolución	16	20	23

Con la Tabla 7, evaluación de criterios se concluye que la solución 1 obtuvo 16 puntos, la solución 2 obtuvo 20 puntos y la solución 3 obtuvo 23; siendo la solución 3 la que alcanzó un mayor puntaje sumatorio al final y generando la mejor alternativa para el diseño del sistema automático.

5.5. Diseño de la propuesta

5.5.1. Componentes del sistema de poleas

EL sistema seleccionado para la apertura y cierre de compuerta, es un sistema de poleas que consta de las siguientes partes, que se observan en Figura 44:

1. Estructura del sistema.
2. Motor.
3. Rodillo.
4. Poleas de transmisión.
5. Cable de tensión.
6. Ejes principales.

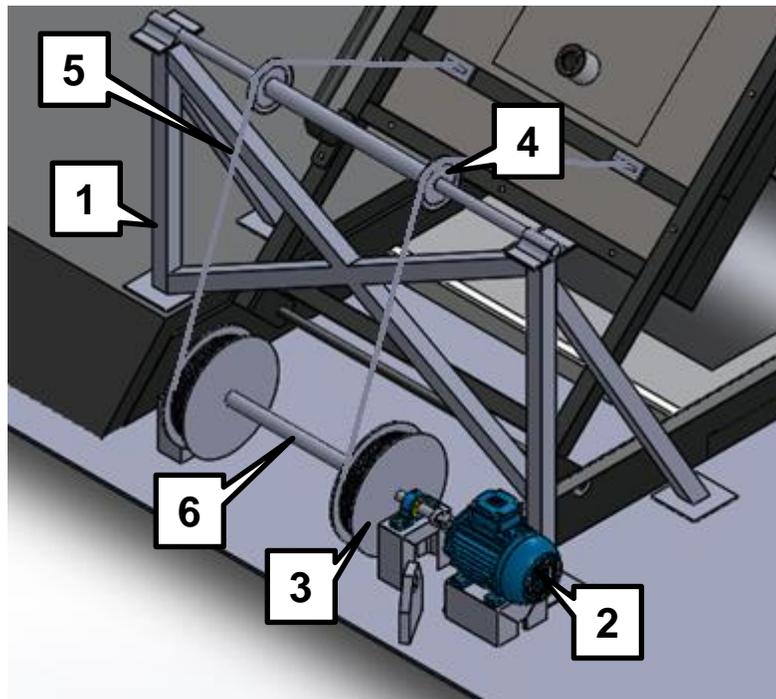


Figura 44. Partes del sistema de poleas

Los parámetros para el dimensionamiento del sistema son los siguientes:

- La capacidad de carga del sistema (compuerta de ventilación).
- Velocidad de apertura y cierre de la compuerta.
- Selección del tipo de cable adecuado.
- Diseño de las poleas de transmisión.
- Diseño del rodillo.

5.5.2. Selección del cable

La única carga que va a tener que soportar el sistema es el peso de la compuerta, el mismo que se analiza en un diagrama de cuerpo libre en la Figura 45.

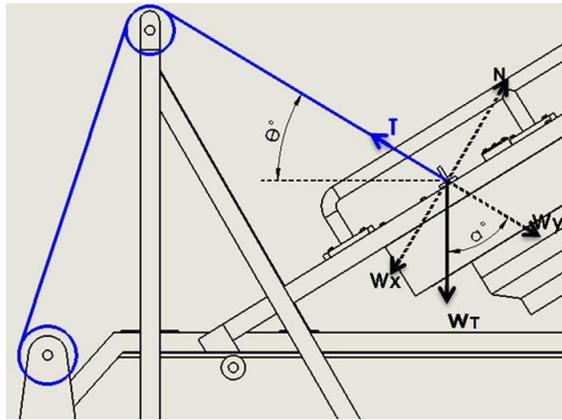


Figura 45. Diagrama de cuerpo libre del peso de la compuerta

$$\text{carga del sistema} = W_T$$

$$W_T = 128.27 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$W_T = 1257.046 \text{ N}$$

El sistema de poleas consta de dos cables con enrollamientos individuales, lo cual reducirá la carga de cada cable a la mitad.

$$W = \frac{W_T}{2}$$

$$W = \frac{1257.046 \text{ N}}{2}$$

$$W = 628.523 \text{ N}$$

En la Figura 45, se observa los ángulos θ y α los mismos que son complementarios; el ángulo θ se forma con el cable y la horizontal, y depende de la posición en la que se encuentra la compuerta.

$$\theta + \alpha = 90^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ - \theta$$

Mediante el software CAD se obtiene los ángulos θ límites que representan la posición cuando la compuerta está cerrada y abierta, los mismos que son 41.56° y 37.11° respectivamente. Con lo cual se calcula los ángulos α límites.

$$\alpha_{min} = 90^\circ - 41.56^\circ = 48.44^\circ$$

$$\alpha_{max} = 90^\circ - 37.11^\circ = 52.89^\circ$$

La carga que va a soportar el sistema es igual al peso de la compuerta por el coseno del ángulo de apertura.

$$T = \cos \alpha * W$$

$$T = 628.523 \text{ N} * \cos \alpha$$

Para encontrar la tensión máxima que debe soportar el cable a lo largo del movimiento de la compuerta se realiza una gráfica en función de los ángulos α_{min} y α_{max} .

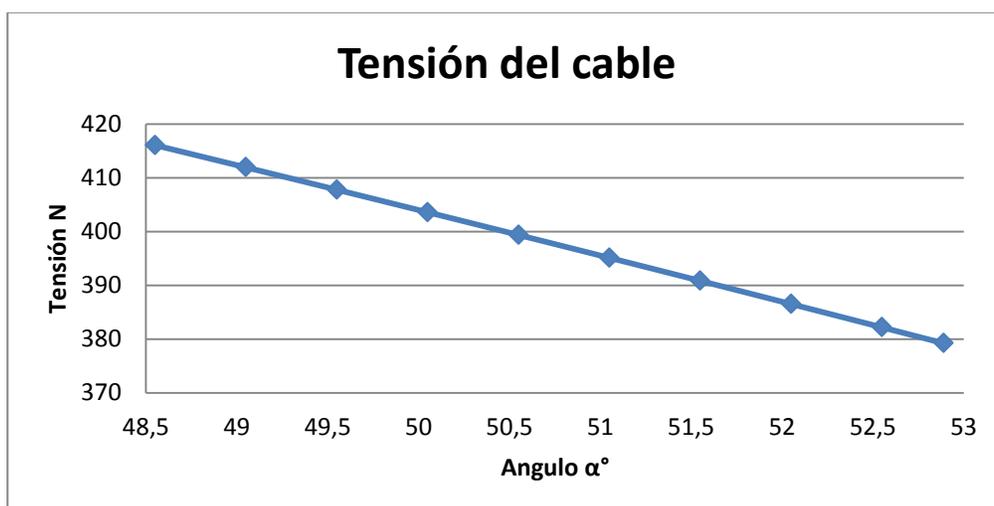


Figura 46. Tensión del cable con respecto al ángulo de apertura

En la Figura 46, se observa que con un ángulo $\alpha = 48.44^\circ$ se genera la tensión máxima en el cable de 416.061 N.

Según el Anexo 5, se obtiene un valor mínimo de seguridad para aplicaciones en malacates.

$$n = 7 \text{ malacates electricos}$$

$$T_n = T * n$$

$$T_n = 416.061 \text{ N} * 7$$

$$T_n = 2912.427 \text{ N}$$

$$T_n = \frac{2912.427 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2} = 297.186 \text{ kg}$$

$$T_n = 0.297 \text{ TON}$$

Tabla 8

Selección del diámetro de cable

Cable metálico	Diámetro (plg)	Resistencia Nominal a la rotura (TON)
6x7	1/4	2.39
6x19	1/4	2.48
6x37	1/4	2.35

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Con un valor de tensión $T_n = 0.297 \text{ TON}$, de la Tabla 8 sobre propiedades de cables para este caso se seleccionó un cable metálico 6x19 de diámetro 1/4 de pulgada que posee una resistencia nominal a la rotura de 2.48 TON.

El peso del cable viene dado por:

$$W_c = 1.6 * Dr^2 \text{ lbf/ pie}$$

$$W_c = 1.6 * \left(\frac{1}{4}\right)^2 \text{ lbf/ pie}$$

$$W_c = 0.09375 \text{ lbf/ pie}$$

$$W_c = 0.148 \text{ kg/m}$$

La longitud del cable es de 4m.

$$W_c = 0.148 \text{ kg/m} * 4m$$

$$W_c = 0.59 \text{ kg}$$

$$W_c = 0.59 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 5.8 \text{ N}$$

El valor de la fuerza de tensión total en el cable es:

$$T_{total} = \cos \alpha * W + W_c$$

$$T_{total} = \cos 48.44 * 628.523 \text{ N} + 5.8 \text{ N}$$

$$T_{total} = 422.764 \text{ N}$$

$$T_{total} = \frac{422.764 \text{ N}}{9.8 \text{ m/s}^2} = 43.13 \text{ kg}$$

5.5.3. Factor de seguridad para los cables de acero

El factor de seguridad de los cables de acero para varias aplicaciones se calcula dividiendo la carga de rotura máxima del cable que a su vez viene dado por el fabricante y la tensión total del cable.

$$n = \frac{T_{rot}}{T_{total}}$$

$$n = \frac{2480kg}{43.13 kg}$$

$$n = 57.5$$

5.5.4. Dimensionamiento del tambor y polea

Una de las ventajas al empelar el tambor y las poleas es que reduce por mucho la fatiga debida a los esfuerzos de flexión en el cable, esto dependiendo de la relación de diámetros que se utilice, un ejemplo muy práctico son los puentes grúas y sistemas de minería; su relación de dimensión y distintas propiedades están regidas por la Tabla 9.

Tabla 9

Propiedades de los cables de acero

Cable de acero	Diámetro recomendado (plg)	Diámetro mínimo (plg)	Diámetro de alambres (plg)	Área del metal (plg ²)	Módulo de elasticidad del alambre (MPsi)
6X7	72*d	42*d	0.111*d	0.038*d ²	13
6X19	45*d	26*d 34*d	0.067*d	0.040*d ²	12
6X37	27*d	18*d	0.048*d	0.040*d ²	12

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Dónde:

- D_s = Diametro del tambor
- D_r = Diametro del cable
- D_w = Diametro del alambre
- A_m = Area del metal
- E = Módulo de elasticidad del alambre

Según los datos obtenidos de la Tabla 9, se tiene:

$$D_s \text{min} = 26 * D_r$$

$$D_s \text{recomendado} = 45 * D_r$$

$$D_r = \frac{1}{4} plg$$

$$D_w = 0.067 * D_r$$

$$A_m = 0.04 * D_r^2$$

$$E = 12 \text{ MPsi}$$

Reemplazando se obtiene:

$$D_r = \frac{1}{4} plg \approx 0.635 \text{ cm}$$

$$D_s = 45 * \frac{1}{4} plg = 11.2 plg = 28.3 \text{ cm} \approx 28 \text{ cm}$$

$$D_w = 0.067 * \frac{1}{4} plg = 0.0167 plg \approx 0.0425 \text{ cm}$$

$$A_m = 0.04 * \left(\frac{1}{4} plg \right)^2 = 0.0025 plg^2 \approx 0.01613 \text{ cm}^2$$

Verificación a flexión:

$$\sigma_b = E * \frac{D_w}{D_s}$$

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_b = 12MPsi * \frac{0.0167plg}{11.2plg}$$

$$\sigma_b = 17.892 KPsi$$

El esfuerzo de tensión admisible:

$$\sigma_t = \frac{[F_t]}{A_m}$$

Dónde:

$$[F_t] = \text{Resistencia nominal a la rotura} = 2.48 TON \approx 4960 lb$$

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_t = \frac{4960 lb}{0.01613plg^2}$$

$$\sigma_t = 307.50 KPsi$$

El coeficiente de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_b}$$

$$n = \frac{307.50 KPsi}{17.892 KPsi}$$

$$n = 17.18$$

Verificación de aplastamiento entre cable y tambor.

$$p = \frac{2 * F_t}{D_r * D_s}$$

Dónde:

$$F_t = \text{Fuerza de tension del cable} = 43.01 \text{ kg} \approx 95.08 \text{ lb}$$

$$D_s = \text{Diametro del tambor} = 11.2 \text{ plg}$$

$$D_r = \text{Diametro del cable} = \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

Reemplazando se obtiene:

$$p = \frac{2 * 95.08 \text{ lb}}{\frac{1}{4} \text{ pulg} * 11.2 \text{ pulg}}$$

$$p = 67.91 \text{ Psi}$$

El Anexo 6, indica la presión de aplastamiento para el cable 6x19 de un material de acero fundido es 900 Psi.

$$[p] = 900 \text{ Psi}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{[p]}{p}$$

$$n = \frac{900 \text{ Psi}}{67.91 \text{ Psi}}$$

$$n = 13.25$$

5.5.5. Verificación de la tensión permisible a la fatiga

$$F_f = \frac{S_u * D_r * D_s}{2000}$$

Dónde:

$$S_u = \text{Resistencia ultima del cable} = 280 \text{ KPsi (tabulado)}$$

$$D_s = \text{Diametro del tambor} = 11.2 \text{ plg}$$

$$D_r = \text{Diametro del cable} = \frac{1}{4} \text{ plg}$$

Reemplazando se obtiene:

$$F_f = \frac{280 \text{ KPsi} * \frac{1}{4} \text{ plg} * 11.2 \text{ plg}}{2000}$$

$$F_f = 392 \text{ lb}$$

El coeficiente de seguridad será:

$$n = \frac{F_f}{F_t}$$

$$n = \frac{392 \text{ lb}}{95.08 \text{ lb}}$$

$$n = 4.12$$

5.5.6. Geometría del tambor y polea

Para la elaboración y construcción del tambor se requiere parámetros que definan su espacio, la profundidad de su ranura y la separación del cable entre otros. A continuación se definen todos estos parámetros de la Figura 47.

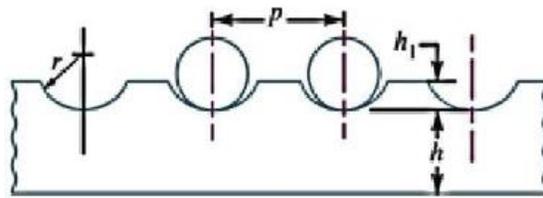


Figura 47. Geometría de tambor

Fuente: (Ernst, 1970)

En donde:

$$p = \text{separacion entre cables} = 1.15 * d$$

$$r = \text{radio de ranura} = 0.53 * d$$

$$h = \text{altura del tambor} = 1.1 * d$$

$$h_1 = \text{radio de ranura} = 0.25 * d$$

Donde d es el diámetro del cable y para este caso es de $1/4$ de plg, también se tiene que considerar el diámetro del tambor que ya fue calculado y es de 18 cm, reemplazando los datos se obtiene:

$$p = 1.15 * \frac{1}{4} plg = 0.287 plg \approx 7.3 \text{ mm}$$

$$r = 0.53 * \frac{1}{4} plg = 0.132 plg = 3.4 \text{ mm}$$

$$h = 1.1 * \frac{1}{4} plg = 0.275 plg = 7 \text{ mm}$$

$$h_1 = 0.25 * \frac{1}{4} plg = 0.0625 plg = 1.6 \text{ mm}$$

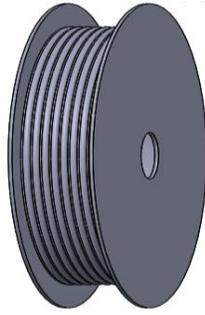


Figura 48. Tambor ranurado

De igual forma que el caso anterior la polea posee parámetros que la dimensionan para una construcción adecuada, que parte del diámetro del cable, en la Figura 49, se define estos parámetros.

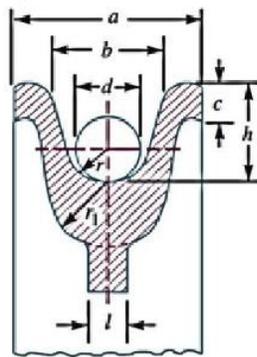


Figura 49. Geometría de la polea

Fuente: (Ernst, 1970)

Donde:

$$r = \text{radio externo} = 0.53 * d$$

$$r_1 = \text{radio interno} = 1.1 * d$$

$$a = \text{diametro exterior} = 2.7 * d$$

$$b = \text{diametro interior} = 2.1 * d$$

$$c = \text{separacion de diametros} = 0.4 * d$$

$$h = \text{altura} = 1.6 * d$$

$$l = \text{espesor} = 0.75 * d$$

Sabiendo que d es $1/4$ de plg y es el diámetro del cable se reemplaza en las ecuaciones anteriores:

$$r = 0.53 * \frac{1}{4}plg = 0.132plg = 3.4mm$$

$$r_1 = 1.1 * \frac{1}{4}plg = 0.275plg = 7mm$$

$$a = 2.7 * \frac{1}{4}plg = 0.675plg = 17mm$$

$$b = 2.1 * \frac{1}{4}plg = 0.525plg = 13mm$$

$$c = 0.4 * \frac{1}{4}plg = 0.1plg = 2.5mm$$

$$h = 1.6 * \frac{1}{4}plg = 0.4plg = 10mm$$

$$l = 0.75 * \frac{1}{4}plg = 0.187plg = 4.8mm$$



Figura 50. Polea estándar

5.5.7. Cálculo del motor

Para el dimensionamiento y selección del motor, se debe considerar el peso de la compuerta, la distancia del centro de masa de la compuerta, su eje principal y el torque que se genera por efecto del peso de la compuerta; se realiza un diagrama de cuerpo libre que se observa Figura 51.

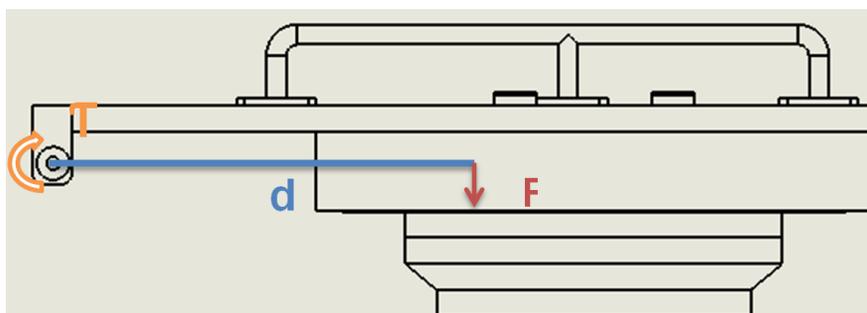


Figura 51. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas de la compuerta

Mediante el software CAD se obtiene la distancia exacta entre el centro de masa de la compuerta y el eje principal, Figura 52.

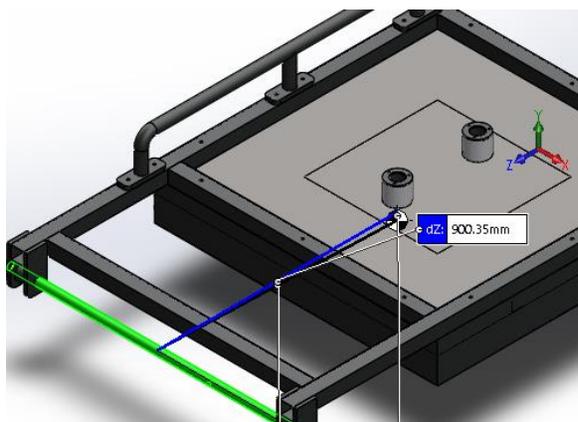


Figura 52. Distancia entre el centro de masa y eje principal

$$d = 900.35 \text{ mm} \approx 0.90035 \text{ m}$$

Torque generado en el eje de la compuerta:

$$\tau = F * d$$

Dónde:

$\tau =$ Torque generado en el eje

$F =$ Fuerza ejercida = W (peso de la compuerta)

$d =$ Distancia = 0.90035 m

$m =$ masa de la compuerta = 128.27 kg

Reemplazando se obtiene:

$$W = m * g$$

$$W = 128.27 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$W = 1257.046 \text{ kg} * \text{m/s}^2$$

$$F = 1257.046 \text{ N}$$

$$\tau = 1257.046 \text{ N} * 0.90035 \text{ m}$$

$$\tau = 1131.78 \text{ N} * \text{m}$$

El ángulo máximo de apertura de la compuerta es de 75 grados, y la longitud de cable que une la polea y la compuerta es de 1.208 metros; con el diámetro del tambor se encuentra el número de vueltas de que debe recorrer el tambor para que el cable sea enrollado y la compuerta se habrá por completo, con lo cual se genera una ecuación para calcular la velocidad angular en función del tiempo "t", que a su vez es el tiempo que se toma la compuerta en cambiar de la posición cerrada a abierta.

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

Dónde:

- ω = velocidad angular (rad/s)
- θ = desplazamiento angular (rad)
- t = tiempo (s)

Circunferencia del rodillo:

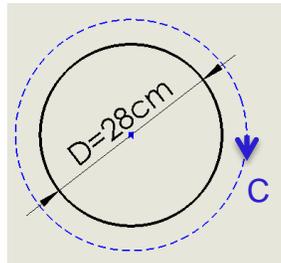


Figura 53. Circunferencia del rodillo

$$C = D * \pi$$

Donde:

$$C = \text{Circunferencia}$$

$$D = \text{Diámetro}$$

Reemplazando se tiene:

$$C = 28 \text{ cm} * \pi$$

$$C = 87.96 \text{ cm} = 0.879 \text{ m}$$

Con ayuda del software CAD se determina que el tramo de cable que une la polea con la compuerta es de 87.98 cm, por lo tanto el rodillo debe girar una revolución para enrollar el cable necesario.

$$\theta = 2\pi rad$$

Reemplazamos para obtener la velocidad angular:

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

$$\omega = \frac{2\pi rad/s}{t}$$

Obtenida la ecuación para la velocidad angular la transformamos en rpm:

$$\frac{2\pi rad/s}{t} * \frac{1 rev}{2\pi rad} * \frac{60s}{1 min}$$

$$rpm = \frac{60}{t} rev/min$$

Nota: Recordar que “t” está en segundos.

Una vez transformada la velocidad angular en rpm se procede reemplazar en la ecuación la cual permite seleccionar la potencia del motor (Hp), en función al tiempo (t) que se tarda la compuerta en levantarse.

$$\tau = \frac{P_m * 716}{rpm} kg.m$$

$$P_m = \frac{\tau * rpm}{716}$$

Dónde:

$$P_m = \text{Potencia del motor}$$

$$\tau = \text{Torque generado en el eje} = 1131.78 \text{ N.m} \approx 115.48 \text{ kg.m}$$

$$\text{rpm} = \text{velocidad del motor}$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$P_m = \frac{115.48 \text{ kg.m} * \frac{60}{t} \text{ rpm}}{716}$$

$$P_m = \frac{115.48 \text{ kg.m} * 60 \text{ rpm}}{716 * t}$$

Para obtener la gráfica utilizamos un rango de tiempo "t" de 5 a 25 segundos.

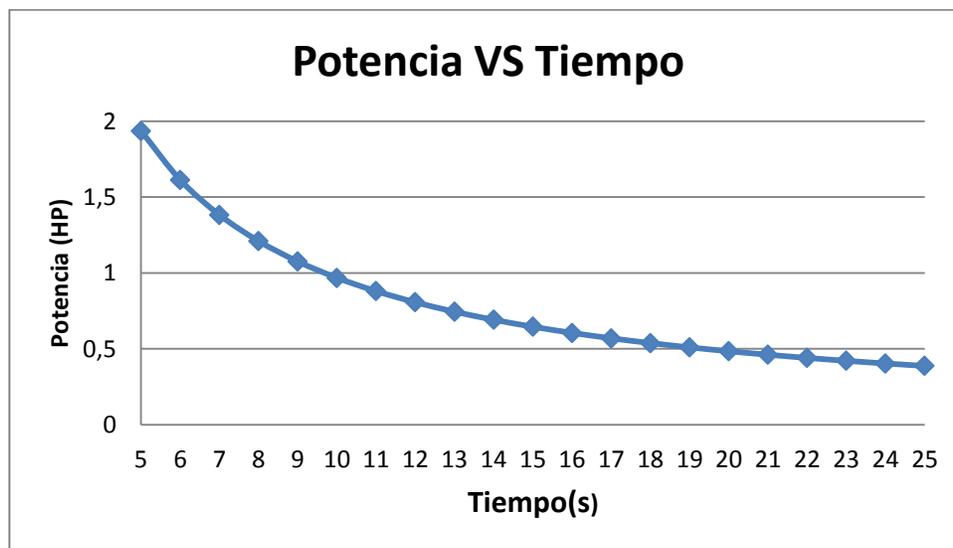


Figura 54. Curva para la selección de la potencia del motor

Con respecto a la Figura 54 y la necesidad que requiere el sistema se escoge un tiempo de apertura de la compuerta de 10 segundos a una velocidad de 6 rpm, se requiere una potencia de 0.967 HP.

Se debe utilizar un grado de seguridad por lo cual se duplica la potencia requerida para garantizar el funcionamiento del sistema y una vida infinita del mismo.

$$P_s = 2 * P_m$$

$$P_s = 2 * 0.967 \text{ HP}$$

$$P_s = 1.934 \text{ HP} \approx 2 \text{ HP}$$

El motor para levantar la compuerta de ventilación debe ser de 2 HP de potencia.

Para comparar y seleccionar el motor adecuado para la apertura y cierre de las compuertas se toman a consideración los catálogos de los Anexos 14,15 y16.

Tabla 10

Comparación de modelos de motores

Criterios a evaluar	Motores Nema	Motor	Servomotor Siemens
	Premium GP100	1LE0141	1FT1034
	Valor	Valor	Valor
Costo menor	9	9	7
Control integrado	6	5	9
Presión de freno	8	7	9
Bajo nivel de ruido	7	8	9
Máxima calidad e impermeabilidad	9	8	8
Alto rango de variación de velocidad	6	6	9
Mayor tiempo de garantía	8	8	8
Total	53	51	59

Según la Tabla 10, el motor adecuado para el sistema es un servomotor 1FT7034 de la marca Siemens, aunque su costo es elevado representa una ventaja con su control integrado, su gran precisión y variación tanto de velocidad y posición.

5.5.8. Diseño de eje principal para tambores

Para el diseño del eje de los tambor se debe considerar sus propiedades físicas y su aplicación, en este caso va a ser sometido a una carga no muy severa como es la compuerta, de igual forma debe poseer grados de tenacidad importantes como son el límite de la resistencia a la fatiga S_{ut} y la resistencia a la fluencia S_y .

En la Tabla 11, se muestran dos tipos de materiales con sus propiedades físicas, que son muy comunes y se pueden adquirir fácilmente en el mercado.

Tabla 11

Ejes de Acero DIPAC

Acero	Diámetro (plg)	Resistencia a la fatiga S_{ut} (N/mm ²)	Resistencia a la fluencia S_y (N/mm ²)
AISI 1018	3/8 – 6	465	235
AISI 4340 (705)	1-3	1200	900

Fuente: (DIPAC)

Se seleccionó un acero AISI 1018 de diámetro interno $d = 1.25$ plg, ya que sus propiedades mecánicas son acordes con el diseño y su precio es asequible.

Considerando que el eje a sus extremos debe tener un hombro para el alojamiento de los rodillos se debe tomar en cuenta la relación existente entre diámetros D/d estándar igual a 1.5.

$$\frac{D}{d} = 1.5$$

$$D = 1 \text{ plg} * 1.5$$

$$D = 1.5 \text{ plg}$$

El sistema funcionara con un motor de las siguientes características:

$$P = \text{Potencia del motor} = 2HP$$

$$rpm = \text{velocidad angular} = 6 \text{ rpm}$$

$$r = \text{radio del matrimonio} = 0.05 \text{ cm}$$

Fuerza de transmisión:

$$P = \frac{\tau * rpm}{716}$$

$$\tau = \frac{P * 716}{rpm}$$

$$\tau = F_m * r$$

$$F_m = \frac{P * 716}{rpm * r}$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$F_m = \frac{P * 716}{rpm}$$

$$F_m = \frac{2 \text{ HP} * 716}{6rpm * 0.0111m}$$

$$F_m = 21501.5 \text{ kg}$$

$$F_m = 21501.5 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$F_m = 210.714 \text{ kN}$$

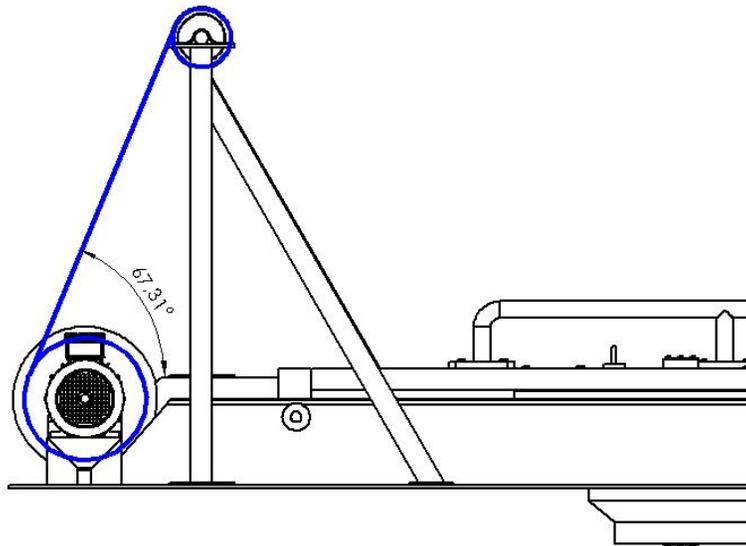


Figura 55. Angulo de inclinación β de la tensión del cable

Con ayuda del software CAD se obtuvo el ángulo $\beta = 67.31^\circ$, observar Figura 55; en la selección del cable se calculó una $T_{\text{total}} = 422.764 \text{ N}$.

Las componentes de las fuerzas de las tensiones T_1 y T_2 son:

$$T_{1y} = T_{\text{total}} * \sin \beta$$

$$T_{1z} = T_{\text{total}} * \cos \beta$$

$$T_{2y} = T_{\text{total}} * \sin \beta$$

$$T_{2z} = T_{\text{total}} * \cos \beta$$

Reemplazado se obtiene:

$$T_{1y} = 390.04\text{N}$$

$$T_{1z} = 163.08\text{N}$$

$$T_{2y} = 390.04\text{N}$$

$$T2_z = 163.08\text{N}$$

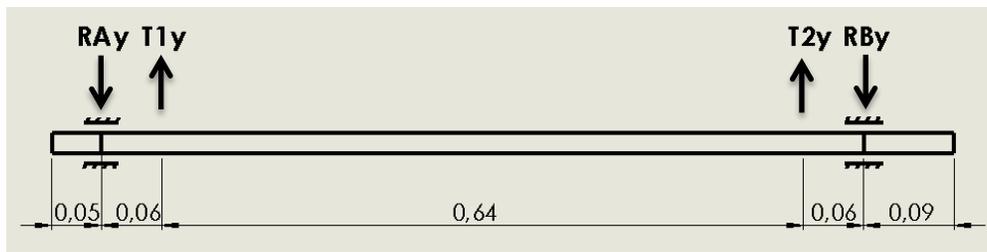


Figura 56. Diagrama de fuerzas en el plano XY

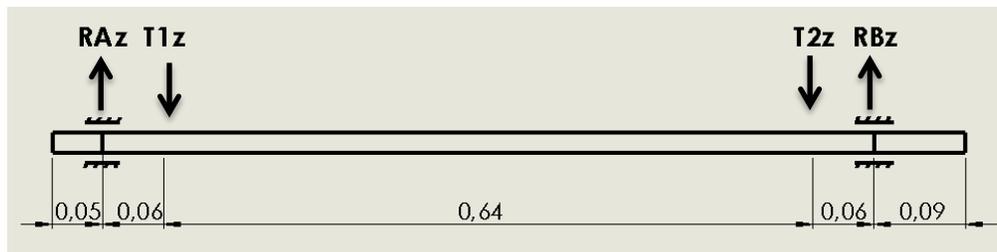


Figura 57. Diagrama de fuerzas en el plano XZ

Con las condiciones de equilibrio plateadas en la Figura 56 y Figura 57, se ingresa sus fuerzas al software MDsolids, el cual determina momentos máximos y reacciones.

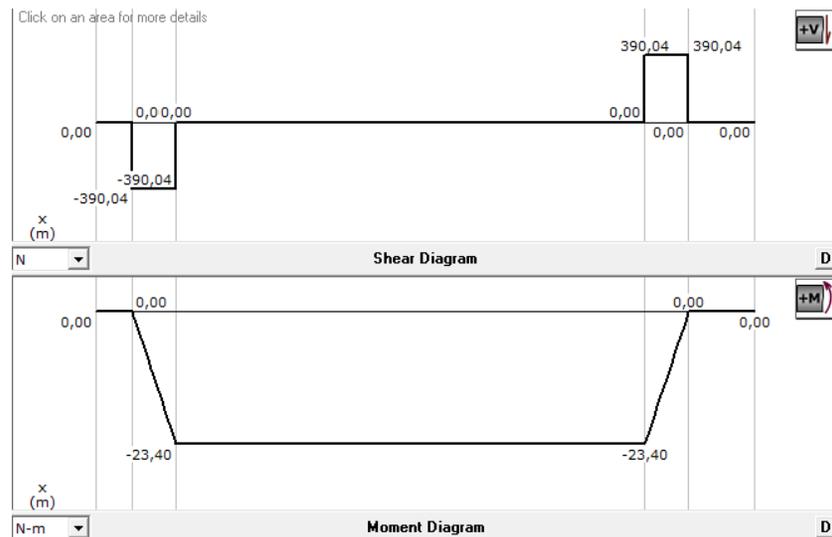


Figura 58. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XY

$$R_{Ay} = 390.04 \text{ N}$$

$$R_{By} = 390.04 \text{ N}$$

$$M_y = 23.4 \text{ N.m}$$

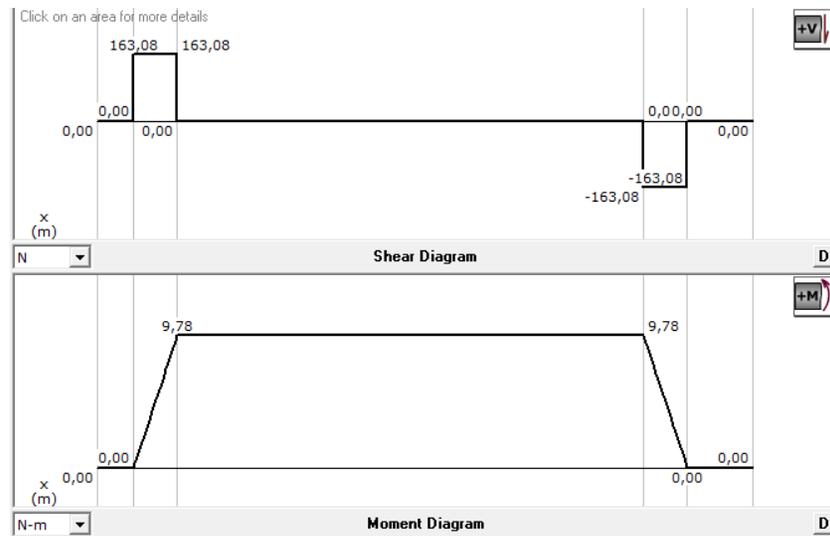


Figura 59. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XZ

$$R_{Az} = 163.08 \text{ N}$$

$$R_{Bz} = 163.08 \text{ N}$$

$$M_z = 9.78 \text{ N.m}$$

$$M_T = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

Reemplazando se obtiene:

$$M_T = \sqrt{23.4 \text{ N.m}^2 + 9.78 \text{ N.m}^2}$$

$$M_T = 25.36 \text{ N.m}$$

Límite de fatiga ecuación de Marin:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_{e'}$$

Dónde:

- k_a = Factor de modificación de la condición superficial
- k_b = Factor de modificación del tamaño
- k_c = Factor de modificación de la carga
- k_d = Factor de modificación de la temperatura
- k_e = Factor de modificación de confiabilidad
- k_f = Factor de modificación de efectos varios
- $S_{e'}$ = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
- S_e = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso
- Factor de modificación de la condición superficial:

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

Laminado en caliente, Anexo 7:

$$a = 57.7$$

$$b = -0.718$$

$$S_{ut} = 465 \text{ N/mm}^2 \approx 465 \text{ MPa}$$

Reemplazando se obtiene:

$$k_a = 57.7 * 465^{-0.718}$$

$$k_a = 0.701$$

- Factor de modificación del tamaño, Anexo 8:

$$k_b = 0.897 * d^{-0.107}$$

$$k_b = 0.897 * 1plg^{-0.107}$$

$$k_b = 0.897$$

- Factor de modificación de la carga, Anexo 9:

$$k_c = 0.59 \text{ a torsion}$$

- Factor de modificación de la temperatura:

Como no se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa:

$$k_d = 1$$

- Factor de modificación de confiabilidad, Anexo 10:

$$k_e = 0.897 \text{ confiabilidad del 90\%}$$

- Factor de modificación de efectos varios:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_{fs} = 1 + q_{contante}(k_{ts} - 1)$$

Según el Anexo 11 y Anexo 12, con los valores del eje de $r = 3$, $D/d = 1.5$ y $r/d = 0.12$, se obtiene:

$$q = 0.78$$

$$k_t = 1.6$$

$$q_{contante} = 0.95$$

$$k_{ts} = 1.38$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$k_f = 1 + 0.78(1.6 - 1)$$

$$k_f = 1.468$$

$$k_{fs} = 1 + 0.95(1.38 - 1)$$

$$k_{fs} = 1.361$$

- Límite de resistencia a la fatiga en una viga rotatoria:

$$S_{e'} = 0.5 * S_{ut}$$

$$S_{e'} = 0.5 * 465 \text{ MN/m}^2$$

$$S_{e'} = 232.5 \text{ MN/m}^2$$

Reemplazando todo se obtiene:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_{e'}$$

$$S_e = 0.701 * 0.897 * 0.59 * 1 * 0.897 * 1.468 * 232.5 \text{ MN/m}^2$$

$$S_e = 113.58 \text{ MN/m}^2$$

El esfuerzo de flexión es:

$$\sigma_f = \frac{32 * k_f * M_T}{\pi * d^3}$$

Dónde:

$$M_T = \text{Momento flexor maximo}$$

$$d = \text{Diametro menor del eje} = 1 \text{ plg} \approx 0.0254 \text{ m}$$

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_f = \frac{32 * 1.468 * 25.36 \text{ N.m}}{\pi * 0.0254 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_f = 23.14 \text{ MN/m}^2$$

El esfuerzo por torsión es:

$$\tau_f = \frac{16 * k_{fs} * T_T}{\pi * d^3}$$

Dónde:

$$T_T = \text{Momento torsor maximo}$$

$$T_T = 2 * T_{rodillo}$$

$$T_{rodillo} = \text{Momento torsor del rodillo} = F * r$$

$$T_{rodillo} = 422.764 \text{ N} * 0.14 \text{ m}$$

$$T_{rodillo} = 59.187 \text{ N.m}$$

$$T_T = 2 * 59.187 \text{ N.m}$$

$$T_T = 118.373 \text{ N.m}$$

Reemplazando obtenemos:

$$\tau_f = \frac{16 * 1.361 * 118.37 \text{ kN}}{\pi * 0.0254 \text{ m}^3}$$

$$\tau_f = 50.069 \text{ MPa}$$

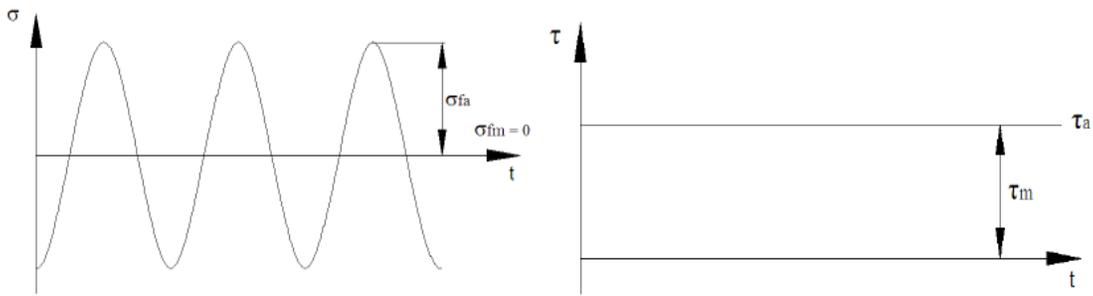


Figura 60. Fluctuación de esfuerzos eje principal para tambores

$$\sigma_{fa} = 23.14 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{fm} = 0$$

$$\tau_{Tm} = 50.069 \text{ MPa}$$

Ecuación de esfuerzos combinados según Von Mises H.

$$\sigma_a = \sqrt{(\sigma_{fa} + \sigma_{aa})^2 + 3(\tau_{Ta} + \tau_{ca})^2}$$

$$\sigma_a = \sigma_{fa}$$

$$\sigma_a = 23.14 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \sqrt{(\sigma_{fm} + \sigma_{am})^2 + 3(\tau_{Tm} + \tau_{cm})^2}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3(\tau_{Tm})^2}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3(50.069 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_m = 86.722 \text{ MPa}$$

Según la recta de Soderberg modificada se tiene:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{23.14 \text{ MPa}}{113.58 \text{ MPa}} + \frac{86.722 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$

$$n = 1.74$$

Con un eje de acero AISI 1018 de diámetro externo $D = 1.5$ plg se obtiene un factor de seguridad $n = 1.74$.

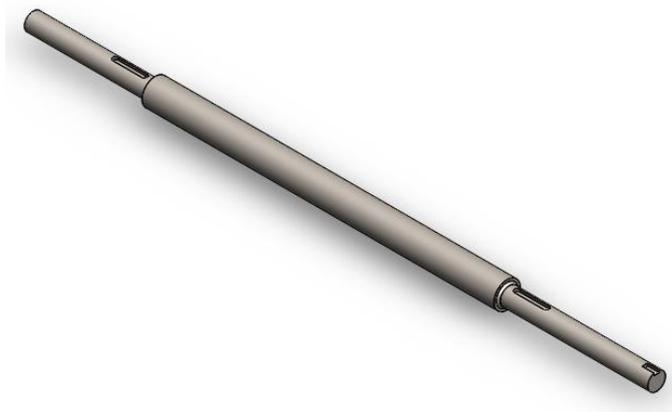


Figura 61. Eje principal para tambor

5.5.9. Diseño de eje para poleas

De igual forma que para el eje principal de los tambores, para el eje de las poleas se toma en consideración los mismos criterios de diseño y para la selección del material se basa en la Tabla 11.

Para el eje de las poleas se seleccionó un acero AISI 1018 de diámetro interno $d = 1.25$ plg.

De igual forma el eje debe poseer un hombro en cada extremo para alojar las poleas con la relación de diámetros D/d estándar igual a 1.5.

$$\frac{D}{d} = 1.5$$

$$D = 1.25plg * 1.5$$

$$D = 1.875 plg$$

El eje está sometido a la carga generada por la tensión del cable a cada lado de la polea, considerando que es el mismo cable las tensiones de cada lado serán las mismas lo único que cambia es su ángulo y por consiguientes cambian las componentes de tensión en los ejes Y, Z; como se observa en la Figura 62.

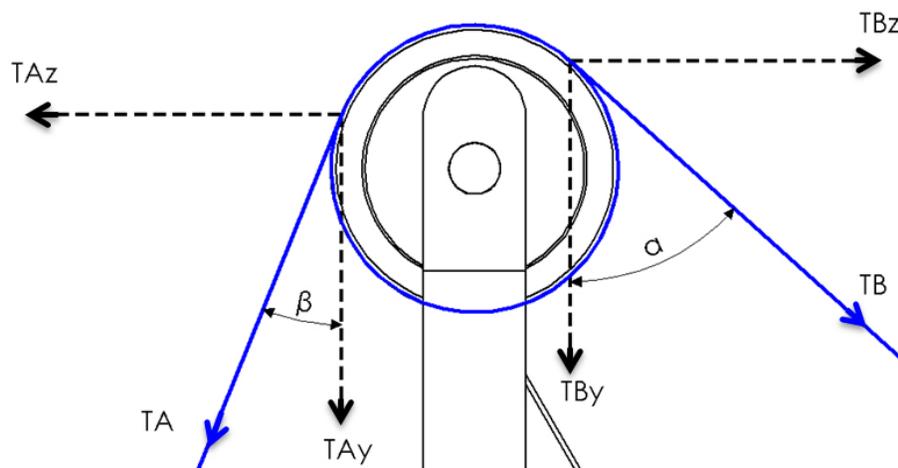


Figura 62. Distribución de fuerzas en las poleas

Donde $T_A = T_B$, y posee un valor de 422.764 N, de igual forma $\beta = 67.76^\circ$ y $\alpha = 48.44^\circ$, con lo cual se calcula sus componentes en Y, Z.

$$T_{Ay} = 160 \text{ N}$$

$$T_{Az} = 391.31 \text{ N}$$

$$T_{By} = 280.46 \text{ N}$$

$$TB_z = 316.33 \text{ N}$$

Sumando las fuerzas se obtiene:

$$T_y = T1'_y = T2'_y = 440.46 \text{ N}$$

$$T_z = T1'_z = T2'_z = 74.98 \text{ N}$$

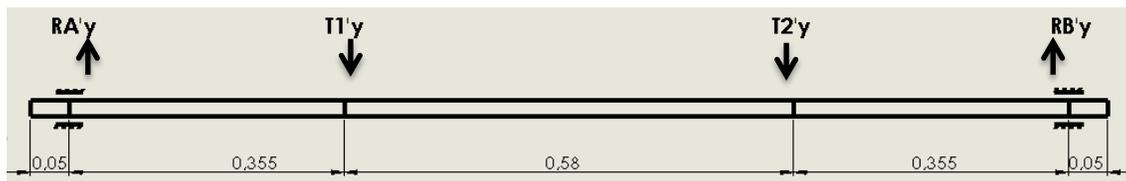


Figura 63. Diagrama de fuerzas en el plano XY



Figura 64. Diagrama de fuerzas en el plano XZ

Con el software MDsolids se ingresa las fuerzas de la Figura 63 y Figura 64, para determinar los momentos máximos y reacciones.

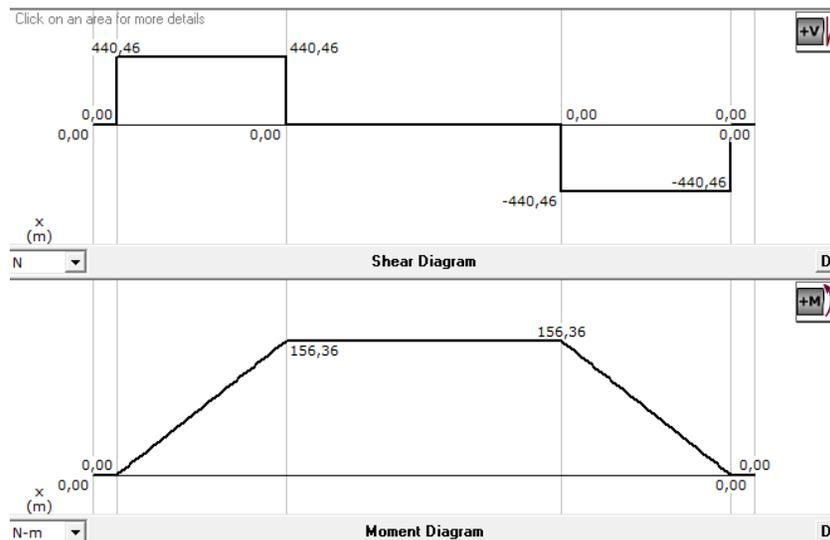


Figura 65. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XY

$$R_{A'y} = 440.46 \text{ N}$$

$$R_{B'y} = 440.46 \text{ N}$$

$$M'_y = 156.36 \text{ N.m}$$

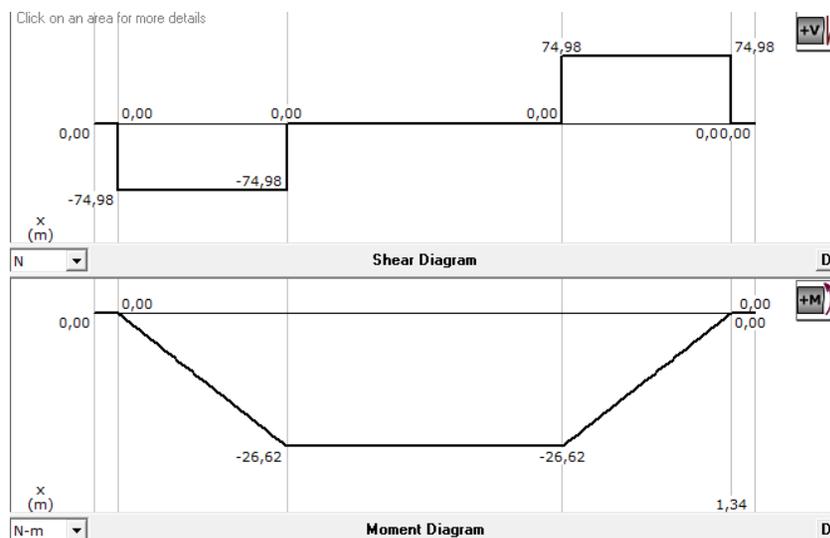


Figura 66. Diagrama de fuerza cortante y momento flector plano XZ

$$R_{A'z} = 74.89 \text{ N}$$

$$R_{B'z} = 74.89 \text{ N}$$

$$M'_z = 26.62 \text{ N.m}$$

$$M_T = \sqrt{M'_y{}^2 + M'_z{}^2}$$

Reemplazando se obtiene:

$$M_T = \sqrt{156.36 \text{ N.m}^2 + 26.62 \text{ N.m}^2}$$

$$M_T = 158.61 \text{ N.m}$$

Límite de fatiga ecuación de Marin:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_e'$$

- Factor de modificación de la condición superficial:

$$k_a = a * S_{ut}{}^b$$

Laminado en caliente, Anexo 7:

$$a = 57.7$$

$$b = -0.718$$

$$S_{ut} = 465 \text{ N/mm}^2 \approx 465 \text{ MPa}$$

Reemplazando se obtiene:

$$k_a = 57.7 * 465^{-0.718}$$

$$k_a = 0.7$$

- Factor de modificación del tamaño, Anexo 8:

$$k_b = 0.897 * d^{-0.107}$$

$$k_b = 0.897 * 1.25plg^{-0.107}$$

$$k_b = 0.875$$

- Factor de modificación de la carga, Anexo 9:

$$k_c = 0.59 \text{ a torsion}$$

- Factor de modificación de la temperatura:

Como no se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa:

$$k_d = 1$$

- Factor de modificación de la temperatura, Anexo 10:

$$k_e = 0.897 \text{ confiabilidad del } 90\%$$

- Factor de modificación de efectos varios:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_{fs} = 1 + q_{contante}(k_{ts} - 1)$$

Según el Anexo 11 y Anexo 12, con los valores del eje de $r = 2\text{mm}$, $D/d = 1.5$ y $r/d = 0.16$, se obtiene:

$$q = 0.75$$

$$k_t = 1.5$$

$$q_{contante} = 0.92$$

$$k_{ts} = 1.3$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$k_f = 1 + 0.75(1.5 - 1)$$

$$k_f = 1.375$$

$$k_{fs} = 1 + 0.92(1.3 - 1)$$

$$k_{fs} = 1.276$$

- Límite de resistencia a la fatiga en una viga rotatoria:

$$S_{e'} = 0.5 * S_{ut}$$

$$S_{e'} = 0.5 * 465 \text{ MN/m}^2$$

$$S_{e'} = 232.5 \text{ MN/m}^2$$

Reemplazando todo se obtiene:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_{e'}$$

$$S_e = 0.7 * 0.875 * 0.59 * 1 * 0.897 * 1.375 * 232.5 \text{ MN/m}^2$$

$$S_e = 103.627 \text{ MN/m}^2$$

El esfuerzo de flexión es:

$$\sigma_f = \frac{32 * k_f * M_T}{\pi * d^3}$$

Dónde:

$$M_T = \text{Momento flexor maximo}$$

$$d = \text{Diámetro menor del eje} = 1 \frac{1}{4} \text{ plg} \approx 0.03175 \text{ m}$$

Reemplazando se obtiene:

$$\sigma_f = \frac{32 * 1.375 * 158.61 \text{ N.m}}{\pi * 0.03175 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_f = 69.407 \text{ MN/m}^2$$

El esfuerzo por torsión es:

$$\tau_f = \frac{16 * k_{fs} * T_T}{\pi * d^3}$$

Donde:

$$T_T = \text{Momento torsor maximo}$$

$$T_T = 2 * T_{polea}$$

$$T_{polea} = \text{Momento torsor de la polea} = F * r$$

$$T_{polea} = 446.79 \text{ N} * 0.075 \text{ m}$$

$$T_{polea} = 33.5 \text{ N.m}$$

$$T_T = 2 * 33.5 \text{ N.m}$$

$$T_T = 67.01 \text{ N.m}$$

Reemplazando obtenemos:

$$\tau_f = \frac{16 * 1.276 * 67.01 \text{ kN}}{\pi * 0.03175 \text{ m}^3}$$

$$\tau_f = 13.605 \text{ MN/m}^2$$

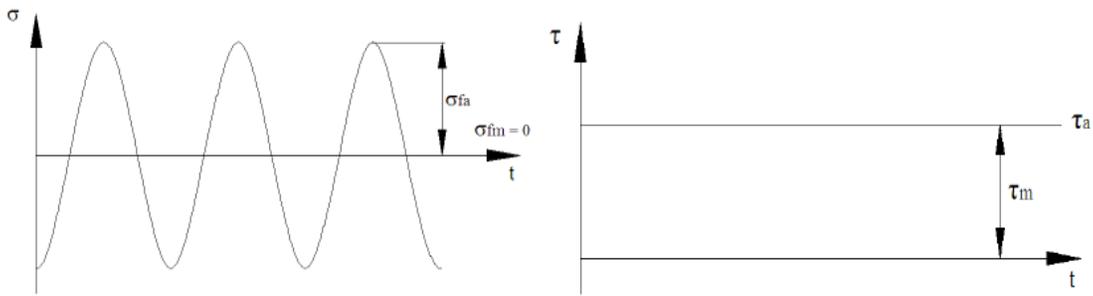


Figura 67. Fluctuación de esfuerzos eje para poleas

$$\sigma_{fa} = 69.407 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_{fm} = 0$$

$$\tau_{Tm} = 13.605 \text{ MN/m}^2$$

Ecuación de esfuerzos combinados según Von Mises H.

$$\sigma_a = \sqrt{(\sigma_{fa} + \sigma_{aa})^2 + 3(\tau_{Ta} + \tau_{ca})^2}$$

$$\sigma_a = \sigma_{fa}$$

$$\sigma_a = 69.407 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_m = \sqrt{(\sigma_{fm} + \sigma_{am})^2 + 3(\tau_{Tm} + \tau_{cm})^2}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3(\tau_{Tm})^2}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3(13.605 \text{ MN/m}^2)^2}$$

$$\sigma_m = 23.564 \text{ MN/m}^2$$

Según la recta de Soderberg modificada se tiene:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{69.407 \text{ MN/m}^2}{103.627 \text{ MN/m}^2} + \frac{23.564 \text{ MN/m}^2}{235 \text{ MN/m}^2} = \frac{1}{n}$$

$$n = 1.3$$

Con un eje de acero AISI 1018 de diámetro $D = 1.875$ plg se obtiene un factor de seguridad $n = 1.3$.



Figura 68. Eje para poleas

5.5.10. Análisis computacional de los ejes

Mediante el software ANSYS se puede analizar estructuras y componentes, observar sus puntos críticos y los propensos a falla, con lo cual se puede comprobar los cálculos anteriormente realizados.

En la Figura 69, se observa el factor de seguridad del eje para tambores determinado mediante el software que es de 1.72, y el factor de seguridad calculado es 1.74; por lo cual genera una diferencia de 0.02.

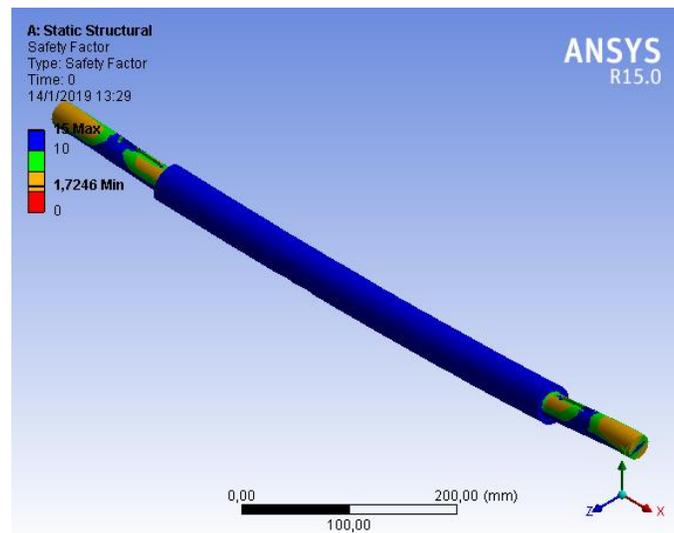


Figura 69. Factor de seguridad eje principal para tambores

De igual forma en la Figura 70, se determina la deformación máxima que sufrirá el eje que es de 0.13 mm, garantizando el funcionamiento del eje.

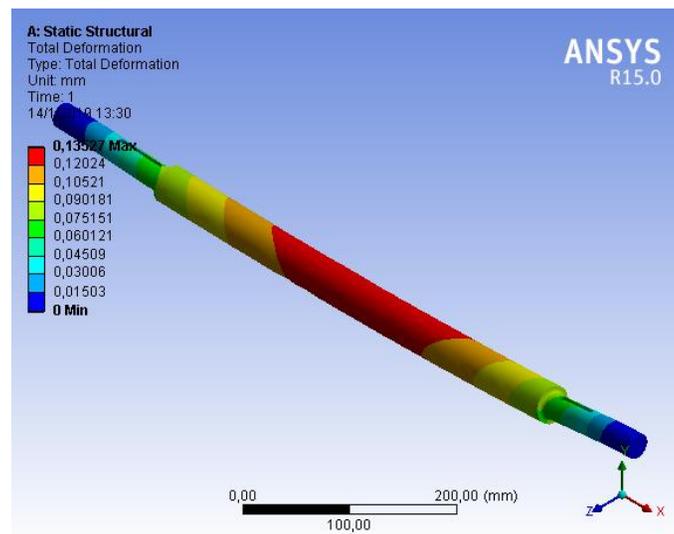


Figura 70. Deformación eje principal para tambores

En la Figura 71, se determina el factor de seguridad del eje para poleas con un valor de 1.34 arrojado por el software, mientras que el factor de seguridad calculado es de 1.3, obteniendo una diferencia de 0.04.

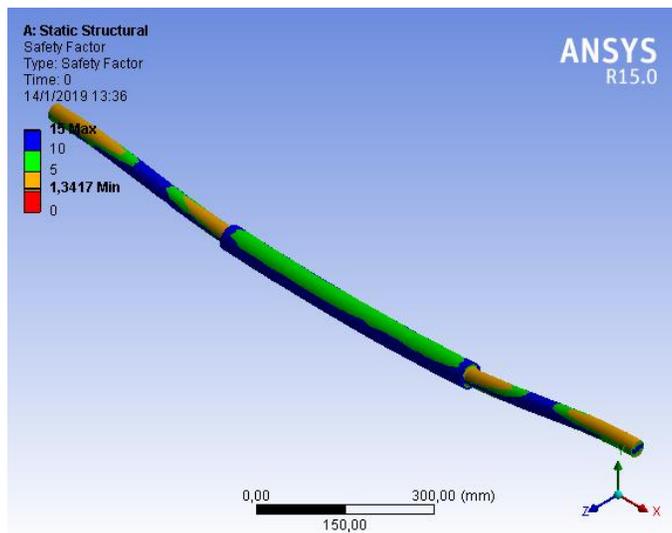


Figura 71. Factor de seguridad eje para poleas

Como se puede observar en la Figura 72, el eje para poleas demuestra una deformación máxima de 0.76 mm, demostrando la confiabilidad y el funcionamiento del eje.

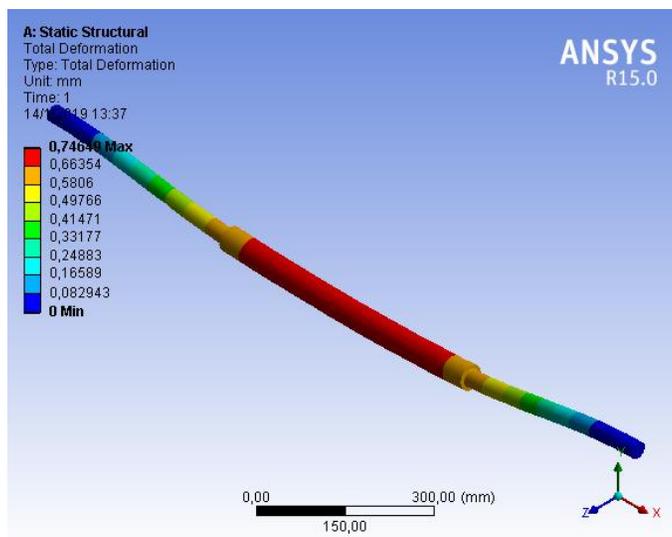


Figura 72. Deformación eje para poleas

5.5.11. Selección de chaveta del eje principal para tambores

Para el diseño de chavetas se tiene en consideración los datos obtenidos de la Figura 73.

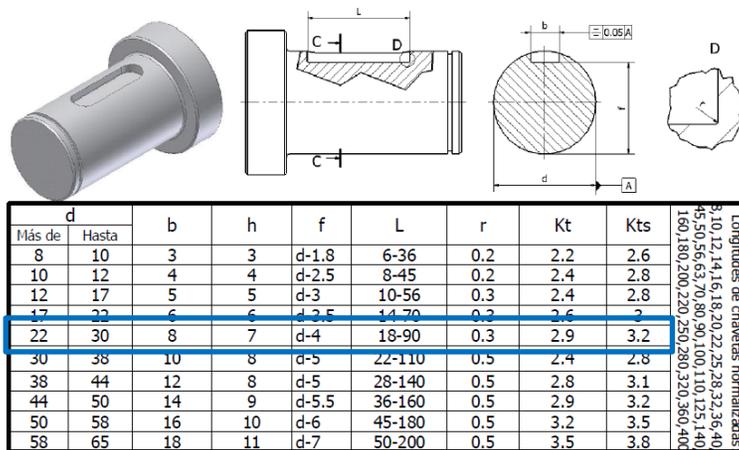


Figura 73. Demisiones de chaveta y chavetero estándar

Fuente: (Marin, 2008)

En la tabla anterior se encuentra la relación del espesor, longitud y alto de la chaveta dependiendo del diámetro del eje.

El eje seleccionado para los rodillos es de diámetro $d = 1 \text{ plg} \approx 25.4 \text{ mm}$, por lo tanto la selección de la chaveta y chavetero se observan en la Figura 74.

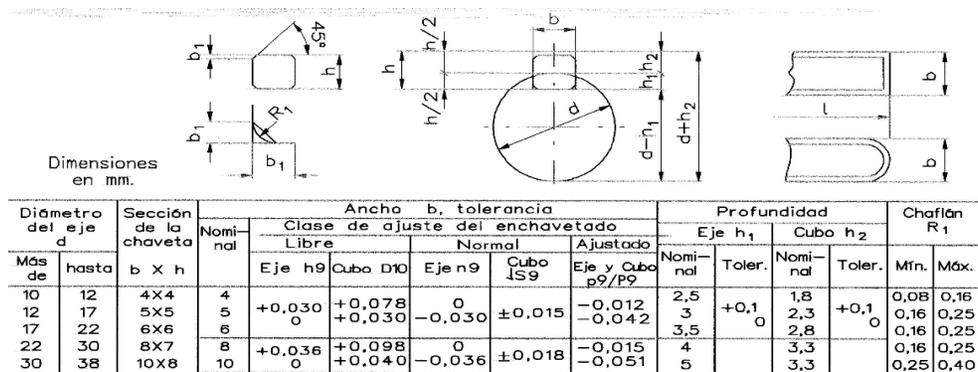


Figura 74. Selección de chaveta y chavetera

Fuente: (Marin, 2008)

$$b = 8 \text{ mm}$$

$$h = 7 \text{ mm}$$

$$f = 21.4 \text{ mm}$$

$$L = 50 \text{ mm}$$

$$r = 0.3 \text{ mm}$$

5.5.12. Selección de chumaceras

Para la selección de las chumaceras se basa en el catálogo de rodamientos y unidades de rodamientos SKF, donde dependiendo del diámetro del eje, cargas y aplicación se selecciona un rodamiento y soporte adecuado.

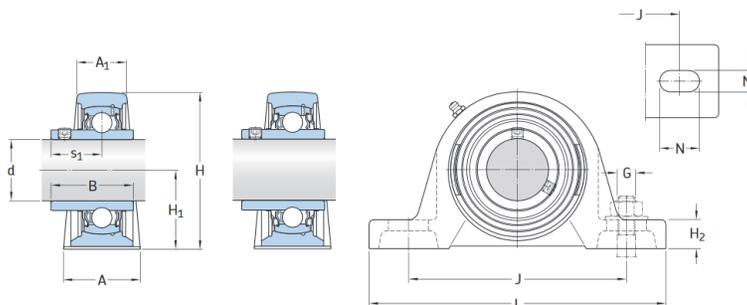


Figura 75. Rodamientos y Unidades de Rodamientos estándar SKF

Fuente: (SKF)

Con referencia en el Anexo 13, se escoge el rodamiento y soporte para el eje:

Tabla 12

Selección de rodamientos y chumaceras

Eje	Cant.	Ø Eje (ϕg)	Designación	Carga (kN)		Velocidad (rpm)	Soporte
				Dinámica (C)	Estática (Co)		
Rodillos	2	1	YAR205-100-2F	14	7.5	7000	SY1.TF

5.6. Análisis de costos

El análisis de costos ayuda a determinar el valor o costo total de recursos económicos que se debe invertir para la construcción del sistema automático de control para la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del horno.

Para la recopilación de información se utiliza a los principales proveedores de materia prima y equipos, considerando el mes de enero del 2019.

5.6.1. Costos directos

Los diferentes costos directos se dividen en los siguientes costos parciales:

Tabla 13

Costo de materiales y accesorios

Cantidad	Denominación	Características	Costo Uni.	Costo total (USD)
1	Eje de Acero AISI 1081 – tambor	Ø1 plg	37.37	37.37
1	Eje de Acero AISI 1081- polea	Ø2 plg	149.46	149.46
4	Tubo estructural cuadrado ASTM A-500	(50x50x1.2) mm	11.33	45.32
1	Viga UPN - ASTM A 36	UPN 80	67.18	67.18
1	Viga UPN - ASTM A 36	UPN 180	171.06	171.06
4	Acople de mordaza SKF	Tornillo de Fijación SKF-L095	28.29	113.16
8	Rodamiento SKF con soporte	YAR205-100-2F	43.39	347.12
8	Polea para cable de acero	¼ plg	11.15	89.2
TOTAL				1019.87

Tabla 14*Costos de mano de obra*

N°	Trabajador	N° de horas	Costo USD/h	Costo total (USD)
1	Técnico mecánico	25	5.5	137.5
1	Técnico soldador	16	8	128
1	Técnico eléctrico	10	5.5	55
1	Técnico electrónico	15	5.5	82.5
1	Pintor	6	3.4	20.4
TOTAL				423.4

Tabla 15*Costos de equipos utilizados*

Cantidad	Denominación	Características	Costo Uni.	Costo total (USD)
4	Servo motor	Siemens - 1FS6	550	2200
1	Material electrónico	Varios	50	50
TOTAL				2250

Tabla 16*Total costos directos*

Costo por:	Valor USD
Materiales y accesorios	1019.87
Mano de obra	423.4
Equipos utilizados	2250
TOTAL COSTOS DIRECTOS	3693.27

5.6.2. Costos indirectos

Los costos indirectos se desglosan en las siguientes tablas:

Tabla 17*Costos de materiales y accesorios indirectos*

Cantidad	Denominación	Características	Costo Uni.	Costo total (USD)
1	Pintura anticorrosiva	Galón	20.28	20.28
2	Tiñer	Litro	1.34	2.68
8	Electrodos para soldar 7018	Libra	2.1	16.8
TOTAL				39.76

Tabla 18*Costo por alquiler de maquinaria y equipos utilizados*

N°	Máquina herramienta	Tiempo (h)	Tarifa USD/h	Costo total (USD)
1	Soldadura eléctrica	8	10	80
1	Soldadura Tig	8	12	96
2	Taladro	5	5	50
1	Esmeril	2	5	10
2	Pulidora/Amoladora	15	5	150
1	Compresor	5	10	50
2	Otros equipos	5	10	100
TOTAL				536

Tabla 19*Costos por transporte*

Operaciones	Cantidad	Unidad	Costo Uni.	Costo total (USD)
Transporte de materiales a la empresa	1	Flete	50	50
Otros	5	Flete	5	25
TOTAL				75

Tabla 20*Costo de diseño*

Detalle	Cantidad (%CD)	Costo total (USD)
Ingenieriles (Diseño)	10%	369.327
Imprevistos	5%	184.66
TOTAL		554

Tabla 21*Total costos indirectos*

Costo por:	Valor USD
Materiales y accesorios indirectos	39.76
Alquiler de maquinaria y equipos	536
Transporte	75
Diseño	554
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	1204.76

5.6.3. Costos totales

Como se observa en la Tabla 22, los costos totales son la suma de los costos directos e indirectos, para el presente sistema automático se requiere una inversión de 4898.03 dólares.

Tabla 22*Costos totales*

Costos	Valor USD
Costos directos	3693.27
Costos indirectos	1204.76
TOTAL COSTOS	4898.03

5.7. Programación del ángulo de apertura de las compuertas

Para la creación del control de las compuertas de ventilación se utilizan los bloques de programa FB, que tiene como función ejecutar sus líneas de programa al ser llamados; esto nos garantiza que el código actual del horno en la parte de calentamiento permanencia y enfriamiento no sea alterada ni sufra cambios con la parte de la apertura de las compuertas.

En la Figura 76, se observa el bloque FB de control de las compuertas de ventilación del horno, el cual ejecuta su secuencia programada y almacena sus valores procesados; este FB es llamado por un OB que en este caso es el Main del programa.

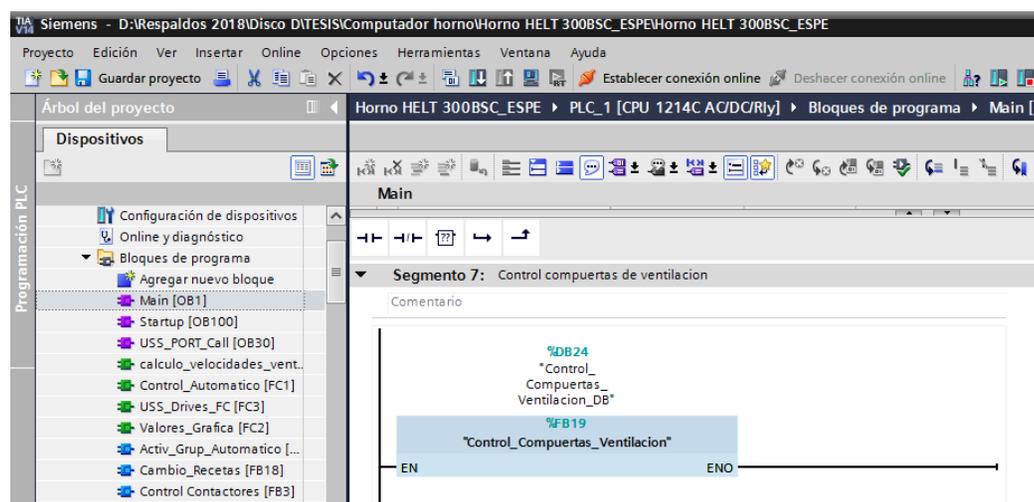


Figura 76. FB control de compuertas de ventilación

Dentro del FB del control de compuertas de ventilación se encuentra una secuencia que muestra la orden de inicio de la apertura de compuertas, la selección de la secuencia de apertura, el cálculo de la variación de temperatura y muestra de forma individual el ángulo de apertura que deben poseer cada compuerta, observar la Figura 77.

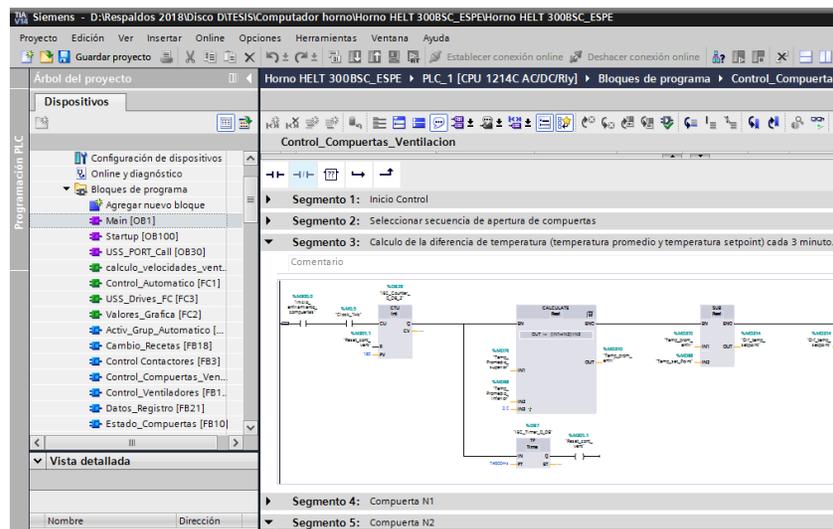


Figura 77. Estructuración FB control compuertas de ventilación

En el FB de control compuertas de ventilación existen 4 segmento de las compuertas de ventilación y en cada uno de ellos se encuentra otro FB llamado porcentaje de apertura que se fundición principal es incluir toda la parte matemática y ecuaciones despejadas en el análisis de la investigación, con lo cual nos arroja valores exactos de la apertura de las compuertas, observar Figura 78.

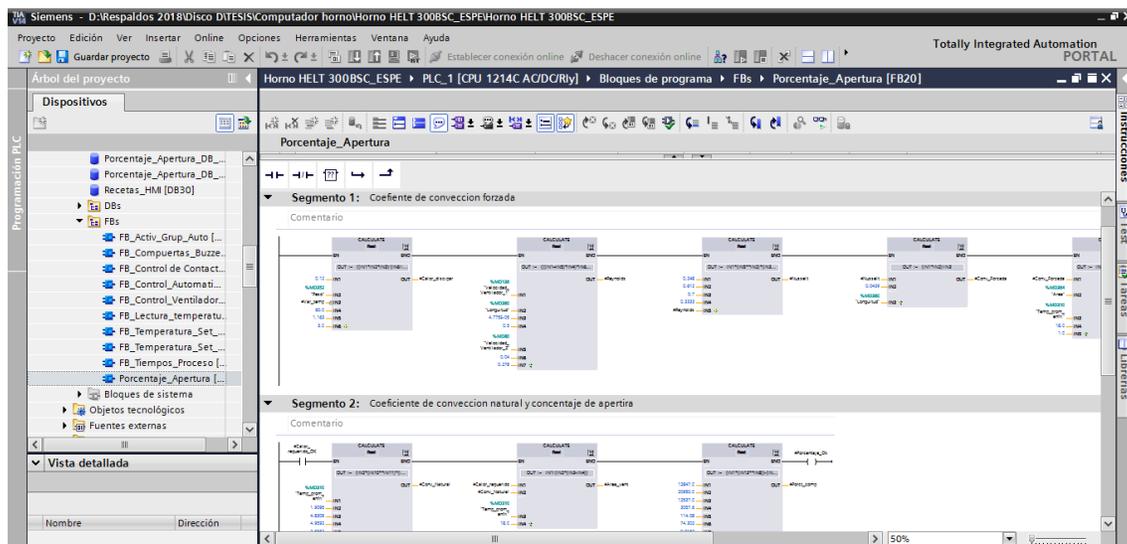


Figura 78. FB porcentaje de apertura

5.8. Almacenamiento de datos mediante el PLC

Con el almacenamiento de datos mediante el PLC se elimina la problemática al momento de adquirir los datos al término del proceso ya que anteriormente al existir algún fallo del proceso o una mala extracción de los datos, los mismos se perdían y no existía registro alguno del proceso.

Con se muestra en la Figura 79, con la ayuda de los Data Logger inicializamos la recolección de datos de forma continua al iniciar el proceso, eso quiere decir que los datos se almacenan en el PLC lectura tras lectura de sus temperaturas y esta recolección termina cuando el proceso haya finalizado, cuando existe alguna falla en el proceso o el PLC se desconecta, garantizando su almacenamiento y que el mismo este presto a descargarse en cualquier momento al conectarse con el PLC mediante su dirección IP.

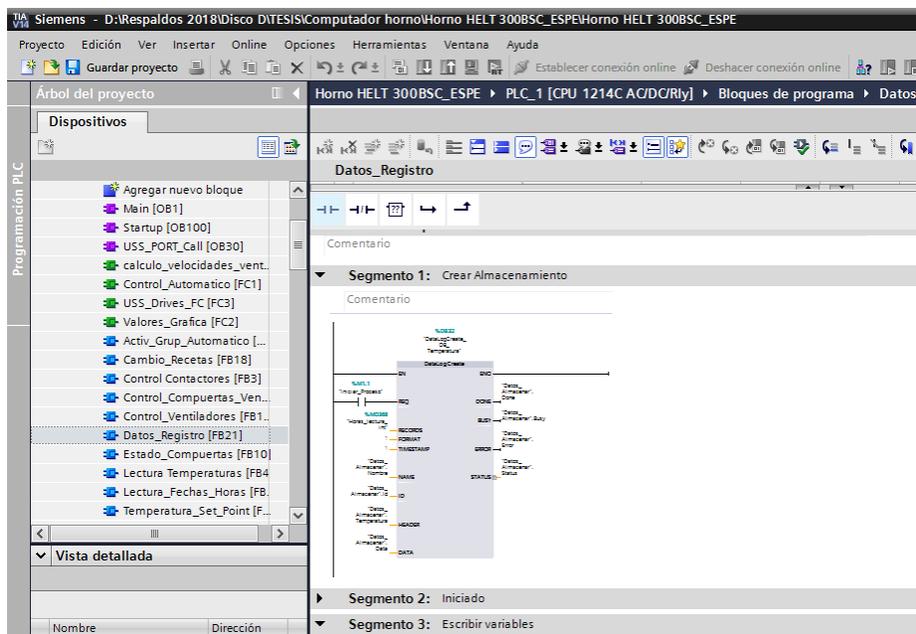


Figura 79. Data Logger almacenamiento de datos

5.9. Diseño de las pantallas del HMI

Para eliminar la interacción del computador que ingresa los datos del proceso térmico, se estable un diseño de imagen el cual permite al operador ingresar los parámetros del proceso mediante la interfaz HMI y el monitoreo de la misma forma con la que se interactuaba con el sistema SCADA.

En la Figura 80, se observa la imagen que fue creada para el ingreso de los parámetros de cada proceso térmico; el mismo que cuenta con las temperaturas de precalentamiento, de permanencia y pre enfriamiento; de igual forma se ingresa los tiempos de cada etapa en horas; adicionalmente se considera el ingre de nuevos parámetros como peso, área y alto de la pieza los mismos que son necesarios para el control de la apertura de las compuertas. Todos estos parámetros son almacenados por una base de datos del PLC que posee un límite de 20 recetas en el sistema.

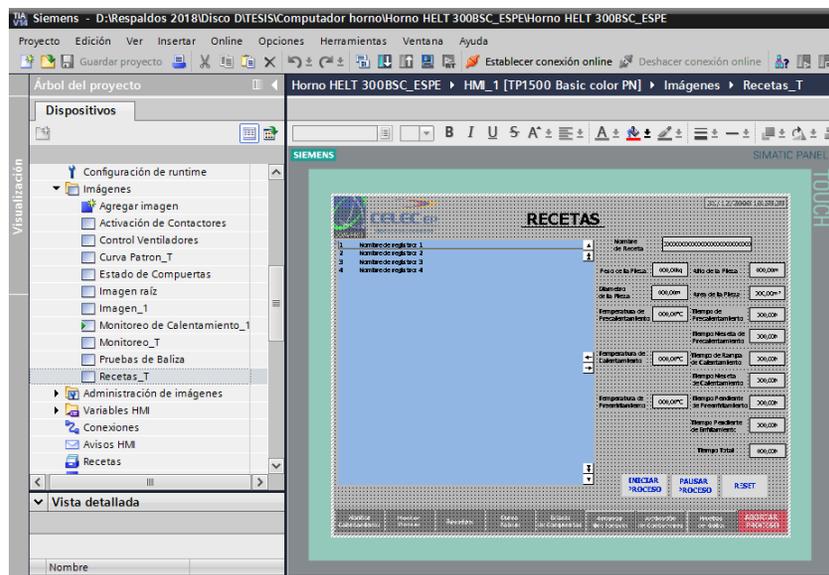


Figura 80. Ingreso de recetas HMI

De igual para la apertura de sus compuertas se adicione indicadores y selectores para visualizar el comportamiento de la apertura de las compuertas, le sistema cuenta con 3 formas de apertura de escotilla; apertura individual de escotillas, apertura doble de escotillas y apertura de todas sus escotillas a la vez, la interfaz del HMI le permite al operador selección cualquiera de estas 3 formas de apertura. Debajo de cada escotilla se encuentra un indicador que muestra el ángulo de apertura que la compuerta debe desplazarse para disipar el calor excedido dentro del horno, observar *Figura 81*.

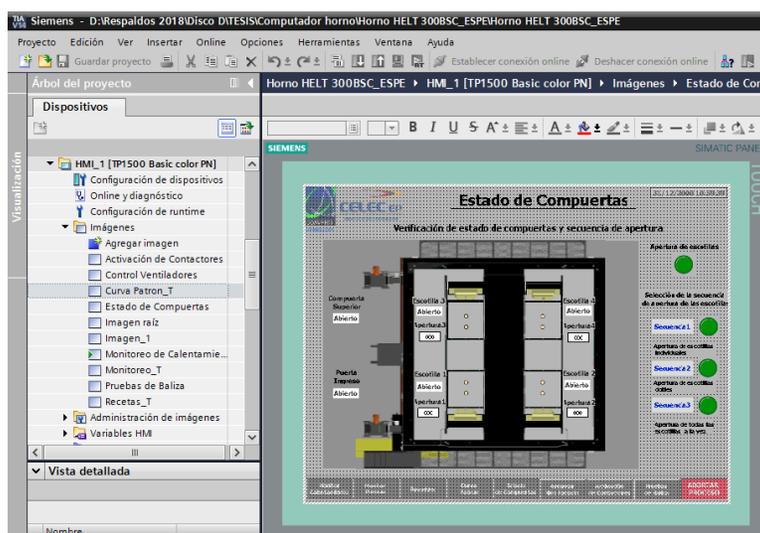


Figura 81. Estado de Compuertas HMI

Las nuevas imágenes HMI suplen las interfaz del SCADA, por el cual se monitoreaba temperaturas, tiempos y etapas del proceso; por ello se implementó nuevas imágenes tratando de optimizar las ya existentes en el HMI, logrando obtener un control total y monitoreo de los procesos térmicos únicamente por medio de su pantalla HMI, observar la Figura 82 y Figura 83.

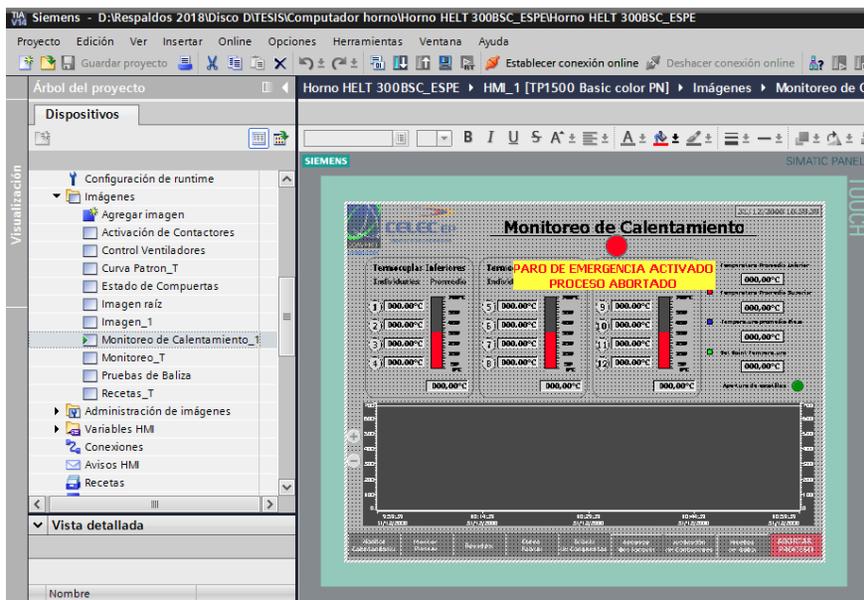


Figura 82. Monitoreo de calentamiento HMI

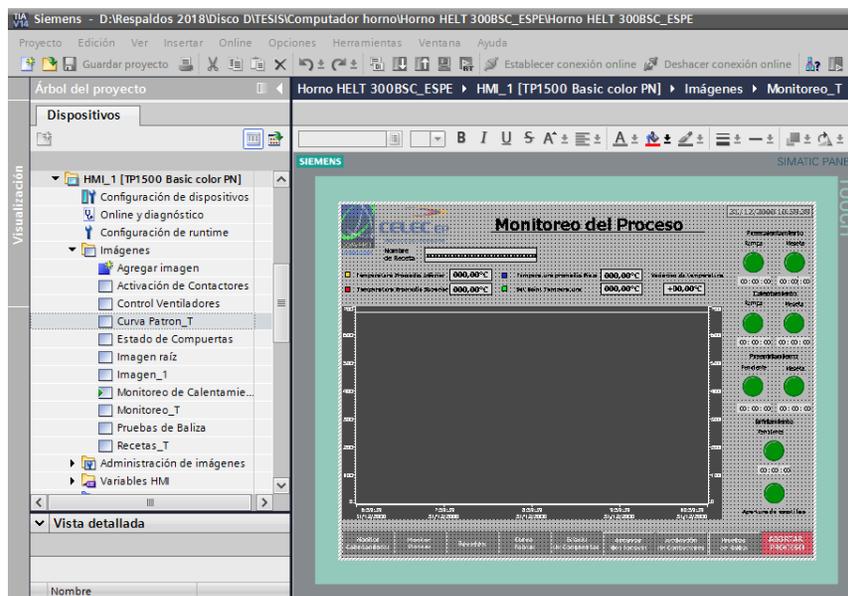


Figura 83. Monitoreo de proceso HMI

5.10. Prueba del sistema de control implementado

Para comprobar el funcionamiento del sistema es necesario realizar una prueba real con una pieza; hay que considerar que por la disponibilidad de los rodets, geometría

única de cada rodete y el tiempo que se emplea en repararlos para someterlos a un tratamiento térmico se excluye realizar dicha prueba a un rodete.

Por lo cual se escoge al cono superior de la Central Agoyán el mismo, que será sometido a un tratamiento de prueba elevándolo a una temperatura de deshumidificación de 250 °C, observar Figura 84.



Figura 84. Cono central Agoyán

En la Tabla 23, se encuentra el Instructivo del tratamiento con sus especificaciones.

Tabla 23

Instructivo del tratamiento Térmico del Cono de la Central Agoyán

Instrucción del Tratamiento Térmico	
Proyecto	PRUEBA
Equipamiento	CONO CENTRAL AGOYÁN
Cant. Pieza	1
Material	Acero inoxidable A743 CA-6NM
Tipo de Tratamiento Térmico	
<ul style="list-style-type: none"> • Deshumidificación 	
Dimensiones de la pieza (mm)	D641.68 x 990
Espesor a ser considerado (mm)	30
Área de la pieza (m ²)	3.33
Peso (kg)	724.17
Temperatura de inicio (°C)	19-21 (temperatura ambiente)
Velocidad de calentamiento (°C/h)	Max 50 hasta 250 °C

CONTINÚA 

Temperatura de tratamiento (°C)	250 (±5)
Tiempo del tratamiento (h)	1
Velocidad de enfriamiento (°C/h)	Max 55
Temperatura de salida de la pieza(°C)	150
Tiempo total TT – revenido (h)	6,5

Para lo cual como primer paso es retirar la tapa superior del horno e introducir el cono; después sellar nuevamente el horno, observar Figura 85.



Figura 85. Ingreso del cono al horno

El cono descansa sobre una base metálica dentro del horno y las termocuplas superiores e inferiores se distribuyen de forma uniforme en la superficie del cono como se observan en la Figura 86.



Figura 86. Distribución de termocuplas y soporte del cono

La Figura 87, representa la curva característica del proceso térmico del cono en función del tiempo y la temperatura a la que debe alcanzar la pieza, se detalla su rampa de calentamiento, meseta de permanencia y pendiente de enfriamiento; además cuando la pieza alcance los 150 °C las compuertas superiores se abren por completo y el horno se enfría de forma natural.

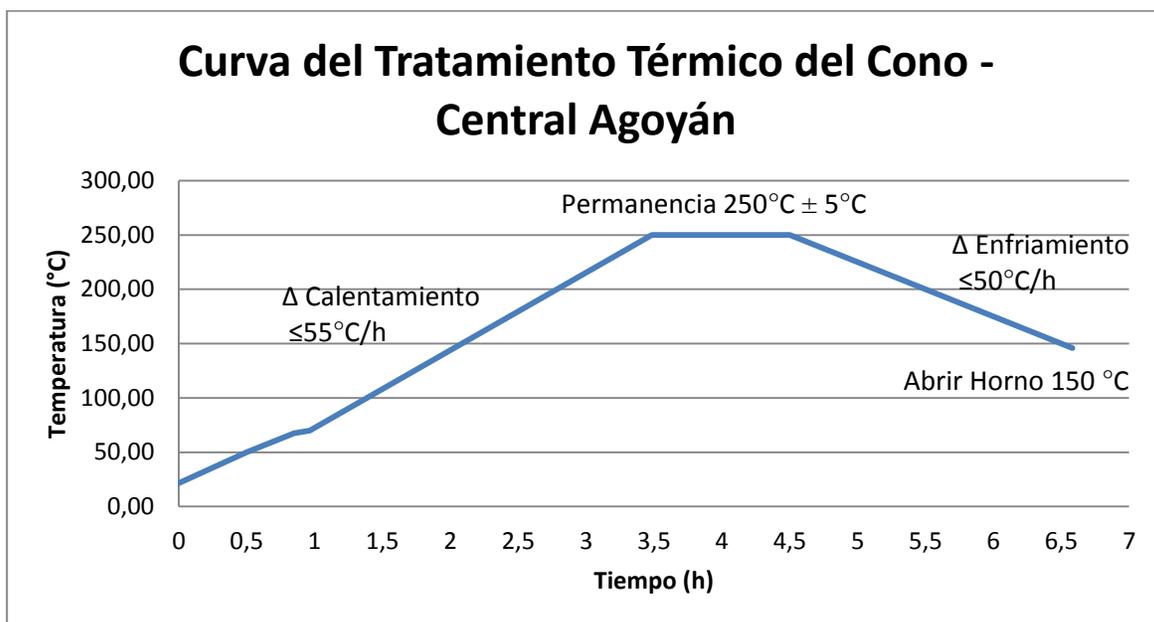


Figura 87. Curva de Tratamiento Térmico del Cono Central Agoyán

En la Figura 88, se observa las temperaturas promedio registradas por las termocuplas al término del tratamiento térmico.

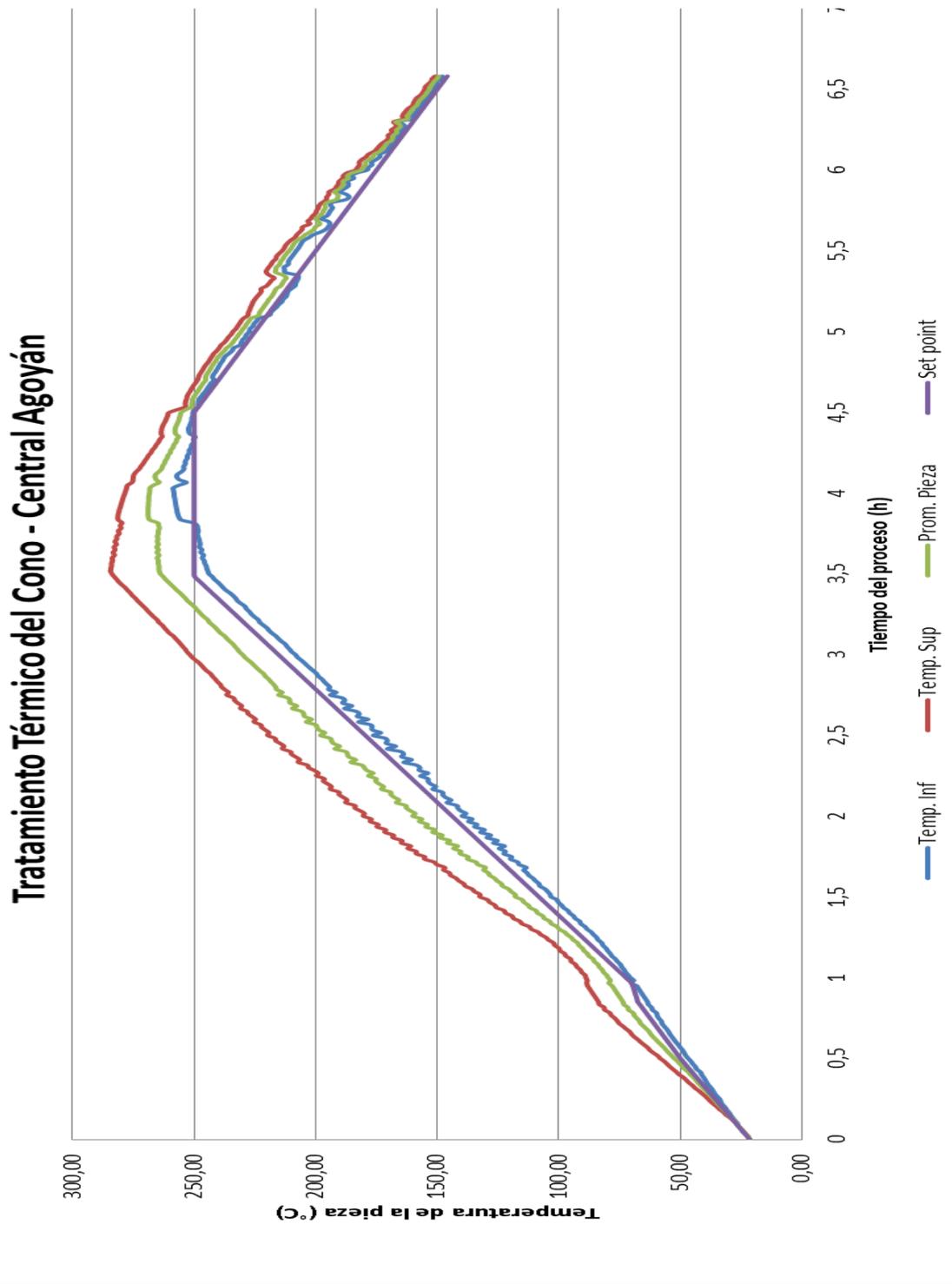


Figura 88. Curva de temperaturas tratamiento térmico Cono Agoyán

5.10.1. Cálculo de errores en el proceso térmico

Al determinar los errores absoluto medio y porcentual absoluto medio, se encontrar el error existente entre la curva ideal del proceso y los valores de temperatura registrados, con la parte de control del sistema de apertura de compuertas implementado.

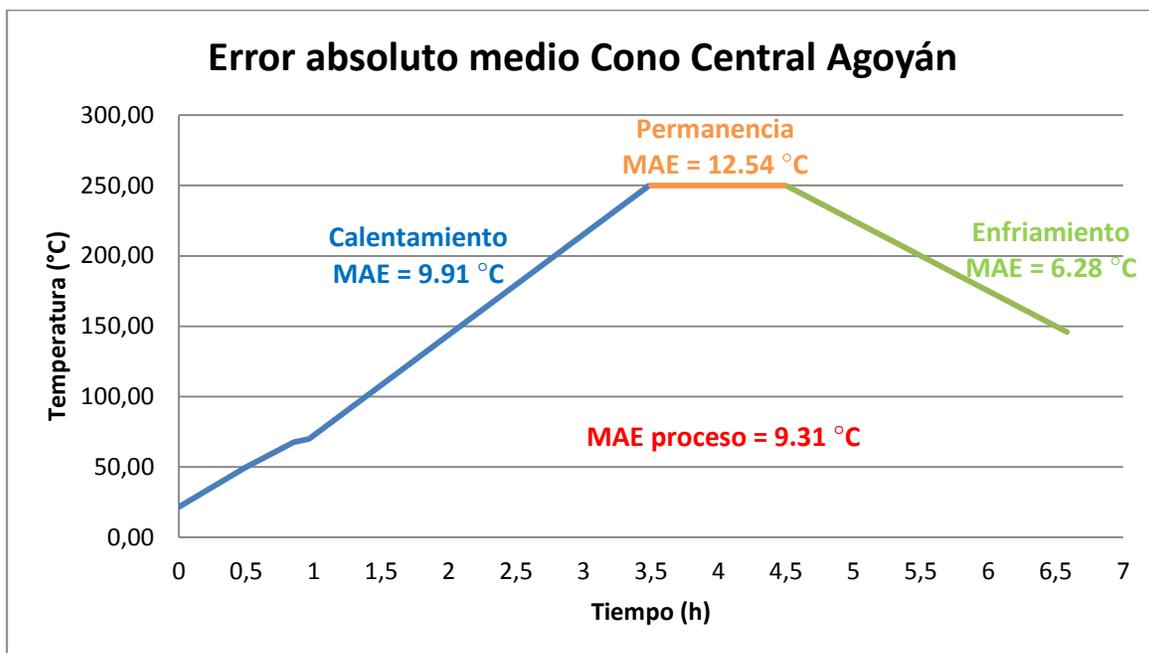


Figura 89. Error absoluto medio Cono Central Agoyán

En la Figura 89, se observa el error absoluto medio en el tratamiento térmico del Cono de la Central Pucará en sus 3 etapas con los siguientes valores; rampa de calentamiento 9.91 °C, meseta de permanencia 12.54 °C y pendiente de enfriamiento 6.28 °C; el proceso completo del tratamiento térmico posee un error absoluto medio de 9.31 °C.

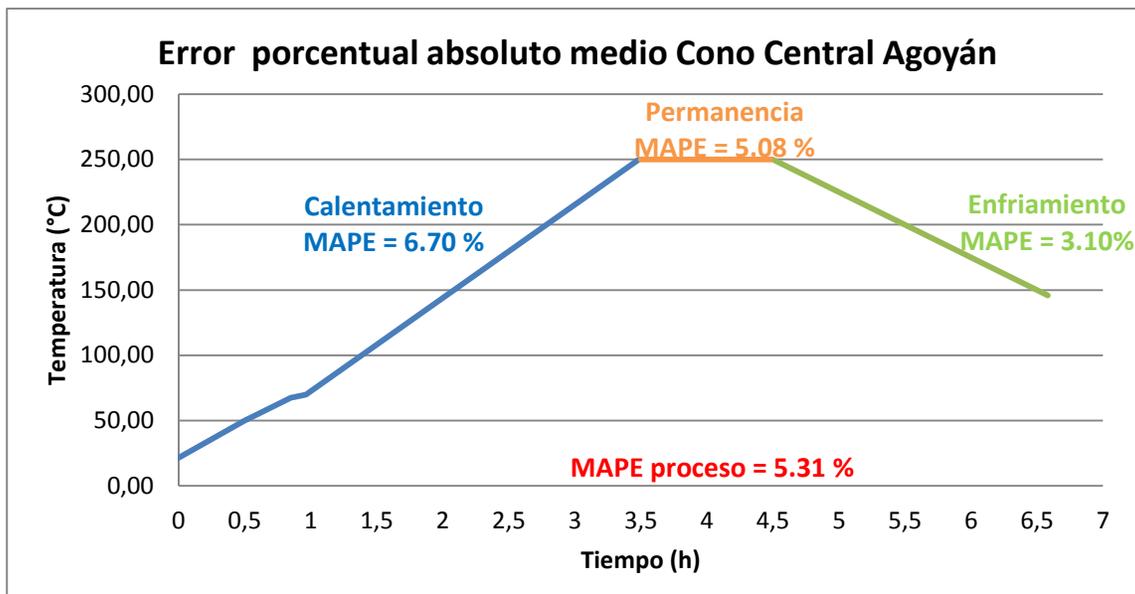


Figura 90. Error porcentual absoluto medio Cono Central Aگویán

En la Figura 90, se expresa el error porcentual absoluto medio en las siguientes etapas, rampa de calentamiento de 6.70%, en la meseta de meseta de permanencia 5.08% y en la pendiente de enfriamiento de 3.10%; todo el proceso de tratamiento térmico tiene un error porcentual absoluto medio de 5.31%.

5.11. Prueba de Hipótesis

Hipótesis:

Con el diseño y factibilidad de un sistema automático de apertura de compuertas superiores del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, se determinara la mejora que tendrá el proceso en los tratamientos térmicos en la turbinas hidráulicas y partes industriales.

Mediante el diseño del sistema automático de control, la simulación térmica de la trayectoria del fluido, el análisis de las curvas de proceso del tratamiento térmico, la implementación de las mejoras en su HMI y adquisición de datos; se obtiene la siguiente información:

- Con el diseño del sistema mecánico para el control automático de las compuertas de ventilación se obtiene una solución para eliminar la intervención del operador al momento de posicionar el puente grúa y levantar las compuertas de forma aleatoria, el sistema mecánico cuenta con un factor de seguridad de 1.74 en su eje de tambores y 1.3 en su eje de poleas.
- La simulación térmica de la trayectoria del fluido dentro del horno, permite conocer las temperaturas a las cuales está expuesta la parte superior del horno y sus compuerta, con una temperatura de 173.33 °C a la salida de sus compuertas y de 96.67 °C alrededor de sus compuertas; lo cual garantiza que la ubicación de un sistema en la parte trasera de la compuerta no será afectada por la temperatura que emana en horno.

- Mediante una prueba realizada al Cono de la Central de Agoyan, donde se implementó la parte de control de la apertura de sus compuertas, se obtuvo lecturas de temperatura con un error absoluto promedio 6.28 °C.
- La nueva interfaz de HMI implantada en el control general del horno facilita el ingreso de la receta del proceso térmico y de igual forma su extracción de datos mediante su controlador lógico programable PLC, optimizando el control de todo el sistema.

El diseño y la factibilidad del sistema automático de apertura de compuertas superiores del Horno Eléctrico HELT – 300BSC, contribuye a la corrección de los problemas existentes en el proceso con, una forma segura y eficiente de la apertura de sus compuertas de ventilación en los tiempos ideales del proceso, el ingreso de los parámetros del tratamiento mediante su interfaz HMI y la obtención de sus datos de temperatura mediante su PLC, mejorando en varios aspectos el control y monitoreo de los distintos procesos térmicos; de esta manera queda comprobada la hipótesis.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Con la implementación de la nueva interfaz de HMI, facilita el ingreso de las recetas de los procesos térmicos y a su vez con la obtención de sus datos mediante el controlador lógico programable, se elimina la interacción de un ordenador para dichos procesos; independizando y optimizando el sistema de control del horno.

De acuerdo al análisis estadístico de los datos de temperatura arrojados por el control del horno, con la implementación del control en el ángulo de apertura de sus compuertas de ventilación superior se obtuvo un error de 6.28 °C, realizados a una prueba de deshumidificación del horno.

El estudio termografico realizado con equipos del Instituto Geofísico permitió observar la influencia que provoca la apertura de las puertas de ventilación superior en la curva de enfriamiento del proceso, provocando una pequeña variación entre los 5°C a 10°C, en la pendiente de enfriamiento la misma que se estabiliza en dentro de 5 minutos; concluyendo que las compuertas de ventilación no influyen de forma directa en el proceso de enfriamiento.

Se diseñó un sistema mecánico para el control de la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del horno, bajo el principio de un sistema de poleas, conformado por dos ejes principales; el eje de sus tambores con un factor de seguridad de 1.74 y el eje de poleas con un factor de seguridad de 1.3, garantizando el funcionamiento del sistema.

Con base al análisis económico realizado para la implementación del sistema automático de control de la apertura y cierre de las compuertas de ventilación superior del horno, se determinó un costo del sistema de 4898.03 dólares, representando el 0.12% del costo total de un rodete y el 0.64% del costo total de la reparación de un rodete, demostrando la factibilidad del sistema para una futura implementación.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda en un futuro realizar el estudio de factibilidad para la implementación de un nuevo sistema de enfriamiento o sistema adicional, ya que los ventiladores y las compuertas de ventilación superior no abastecen los requerimientos para procesos más complejos en donde se necesita un enfriamiento más acelerado.

En un futuro se debe reestructurar de forma completa el control integral del horno ya que por la conexión de sus resistencias y el control de tiempos en el proceso, existen variaciones de temperatura lo cual disminuye la eficiencia del horno.

Es recomendable la implementación de un equipo para la impresión en tiempo real de los datos de temperatura registrados en las termocuplas, para garantizar la integridad de la información en los reportes al final de cada proceso térmico.

Para llevar un monitoreo óptimo de los tratamientos térmicos, es necesario la implementación de una cámara térmica la misma que realizara un control total del proceso, con el propósito de validar los datos registrados de las termocuplas del horno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alajo, D., & Anchatuña, E. (2013). *Diseño y construcción de una pico central hidroeléctrica en la hostería “Los Llanganates” ubicada en el sector Las Carmelitas en el kilómetro 65 de la carretera Salcedo - Tena para generar energía eléctrica limpia*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Asamblea Nacional Republica del Ecuador. (2 de Agosto de 2012). *Ley orgánica reformatoria a la ley de educacion superior*. Recuperado el 18 de Enero de 2019, de <https://www.caces.gob.ec/documents/20143/143750/LEY+ORG%C3%81NICA+REFORMATORIA+LOES.pdf/81b20b0b-4cad-84f7-7e42-7255c689ab4a>
- ASM Handbook. (1991). Heat Treating. *ASM Handbook*.
- ASM Internacional. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. *ASM Internacional*.
- ASM Internacional. (2015). Heat treating. *ASM Internacional*, 1-7.
- Aspilcueta, A. (2014). *Determinacion de la temperatura de precalentamiento utilizando el metodo tekken a fin de prevenir la fisuración en frío en la unión de planchas chronit t-1*. Arequipa: Universidad Nacional De San Agustín.
- Auz, J. (2017). *Estudio del Tratamiento Térmico Post Soldadura del Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 grado CA6-NM y su incidencia en las Propiedades Mecánicas del Material aplicado a la Recuperación de Rodetes Hidráulicos*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Bahrami, M. (2009). *Forced Convection Heat Transfer*. SFU.

Betancourt, R. (2003). *Transferencia molecular de calor masa y/o cantidad de movimiento*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Shigley's mechanical engineering design (Vol. 8)*. New York: McGraw-Hill.

Cáceres, A., & Andree, A. (2016). *Determinación predictiva de la cavitación por Parámetros Sónicos*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico*. Mc Graw Hill.

Chasi, M. (2011). *Elaboración de un Manual sobre la capilaridad de los materiales de aporte usado en Soldadura Fuerte para soldar aceros, de acuerdo a la Norma AWS A5.8*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

COAVPRO. (2013). *HORNO ELECTRICO HELT-300BSC*. Ecuador: COAVPRO.

DIPAC. (s.f.). *Ejes*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2018, de DIPAC Productos de acero: <http://www.dipacmanta.com/ejes>

Enríquez, J., & Tremps, E. (2009). *Colada de acero*. Madrid: Monografías sobre Tecnología del Acero.

Ernst, H. (1970). *Apartados de elevacion y transporte*. Madrid: Blume.

Esther, J. (2012). *Desarrollo de un sistema HMI para un almacén automatizado*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.

- FLIR. (2019). *Cámaras infrarojas para investigación y desarrollo*. Recuperado el 15 de Enero de 2019, de FLIR: <http://pdf.directindustry.es/pdf/flir-systems/camaras-imagen-termica-aplicaciones-i-d/7945-441899.html#open>
- Flores, R. (2002). *Estudio de la propagación de fisuras en materiales dúctiles*. Madrid: Escuela Técnica Superior De Ingenieros Aeronáuticos .
- García, G. (2014). *Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs vibración*. Pamplona: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- Gedeon, M. (2010). *Thermal Strengthening Mechanisms*. New York: Brush Wellman Inc.
- Hernández, J. (2009). *Modificaciónd e las propiedades químicas de lodos residuales de MET-MEX Peñoles con lombrices*. Torreón: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Hinrichsen, E. (2016). *What is the Difference between Heat Treatment, Annealing, and Tempering?* Recuperado el 15 de Enero de 2019, de Manufacturing Technology: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/74097-heat-treatment-annealing-and-tempering/>
- Jirapure, S., & Borade, A. (2014). Heat Treating of Non Ferrous Alloys. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 84-88.
- Krauss, G. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. ASM International.
- López, C. (2013). Análisis de falla por corrosión bajo tensión en la tubería de un intercambiador de calor . *Revista Politécnica* , 39-46.

Lopez, P. (2004). POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO. SCIELO.

López, V., & Ramirez, W. (2011). *Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina francis (celec unidad de negocio hidroagoyán)*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.

Manna, R. (2012). *Heat Treatment*. Cambridge: University of Cambridge.

Marin, J. (2008). *Apuntes de diseño de máquinas*. Barcelona: Club Universitario.

Martínez, M., & Yanchaliquín, A. (2013). *Construcción de una bancada didáctica para el PLC Siemens S7-1200 con interface HMI Touch*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Mayorga, A., & Sánchez, R. (2011). *Estudio de los tratamientos térmicos que se realizan en las partes de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Agoyán para minimizar los costos de reparación*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Micro Capacitación. (2013). *Controlador Lógico Programable*. Buenos Aires: Micro Capacitación.

Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y mecanismos*. Pearson Educación.

Ordoñez, S. (2013). *Técnicas Experimentales en Metalurgia*. Madrid: Universidad de Madrid.

Rodriguez, O. (2016). *Análisis de cavitación en bombas que trasiegan carbonato de níquel en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. México, D.F.: ISMMM.

- Rueda, F., Toledo, M., & Carvajal, M. (2007). Estudio teórico de la erosión mecánica en un álabe rotor del último paso de la sección de baja presión de una turbina de vapor de 300 MW. *Científica*, 135-142.
- Ruiz, J. (2010). *Estudio sobre el tratamiento térmico de las soldaduras de tubería de acero al carbono (API 5L X52) realizadas mediante el proceso por arco de metal y electrodo revestido (SMAW)*. México, D.F.: Comimsa.
- Sarrate, L. (1995). *Metalografía y Tratamientos Térmicos*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Siemens. (2012). *El sistema de control de procesos SIMATIC PCS*. SIEMENS.
- Siemens. (2015). *SIMATIC S7 Controlador programable S7-1200*. Siemens.
- Solís, M. (2014). *Determinación de los esfuerzos residuales mediante la constante acústico-elástica en aceros cementados y soldados por el proceso GMAW*. Saltillo: Comimsa.
- Tomé, M., & Yury, R. (2006). *Manual de procedimientos para tratamientos térmicos de la empresa Industrias Varias Nacionales(INVANAL)*. Costa Rica: Tecnológico de Costa Rica.
- Zúñiga, J. (2014). *Control y monitoreo de temperatura para el templado de metales en la fase de enfriamiento*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Montero Mena, Anibal Santiago.

En la ciudad de Latacunga, a los veinte y cinco días del mes de enero de 2019.

Aprobado por:

Latacunga, 25 de enero del 2019

Ing. Álvaro Mullo
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Katya Torres
DIRECTORA DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADEMICO