

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales Escuela de Ingeniería Industrial

“DESARROLLO Y MONTAJE DE UNA
NUEVA PLANTA DE SECADO DE LA
AISLACIÓN SÓLIDA EN
TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS
DE POTENCIA”

Autor: de Arteaga, Javier

Matrícula: 34456308

Tutor: Ferrayoli, Carlos Guillermo

CÓRDOBA, Octubre 2016

TABLA DE CONTENIDOS

1. AGRADECIMIENTOS	4
2. RESUMEN	5
3. OBJETIVOS	6
4. INTRODUCCIÓN	7
4.1 <i>Descripción del proceso de fabricación de transformadores eléctricos.</i>	8
5. PLAN DE TRABAJO	20
6. DESARROLLO DEL PROYECTO	21
6.1 <i>Análisis del efecto de la humedad en la aislación eléctrica de transformadores.</i>	23
6.2 <i>Análisis del sistema de vacío (línea de vacío) y de calefacción (línea de calor).</i>	25
6.3 <i>Análisis de métodos de ensayos para el control y eficiencia del proceso de secado.</i>	29
6.4 <i>Descripción funcional y operacional del proceso general de secado actual.</i>	32
6.5 <i>Diseño, desarrollo y detalle del proceso general de secado propuesto. Diagrama de flujo y equipos. Comparación con el proceso actual.</i>	35
6.6 <i>Medioambiental</i>	51
7. ANALISIS Y FACTIBILIDAD ECONOMICA-FINANCIERA	52
7.1 <i>Duración del proceso. Lead time</i>	52
7.2 <i>Energía eléctrica consumida</i>	54
7.3 <i>Gas natural consumido</i>	56
7.4 <i>Insumos (Aceite consumido)</i>	57
7.5 <i>Residuo sólido peligroso (Y09)</i>	58
7.6 <i>MOD empleada</i>	59
7.7 <i>Indicadores (Resumen de tablas anteriores)</i>	60
7.8 <i>Disminución del costo global</i>	61
8. CONCLUSIONES	62
8.1 <i>Tecnológico</i>	62
8.2 <i>Económico</i>	62
8.3 <i>Medioambiental</i>	62
8.4 <i>Apreciaciones personales</i>	63
9. ANEXO	64

AGRADECIMIENTOS

Amigos, familia y demás personas especiales en mi vida; Son todo un conjunto que actúa de benefactor en mi vida.

No puedo más que agradecer el inmensurable apoyo que me han aportado, desde que tengo memoria.

Dedico el esfuerzo plasmado en estas páginas a aquellos que siempre estuvieron y estarán.

Espero comenzar así a devolver un poco de tanto que he recibido.

Y una mención especial a mis favoritos, ustedes saben quiénes son.

RESUMEN

El motivo del proyecto consiste específicamente en mejorar el proceso de secado de la aislación sólida en transformadores de potencia en la empresa Tubos Trans Electric (TTE). Los procesos de fabricación demandan varios días de trabajo en los que el principal material aislante sólido (papel) queda expuesto al medio ambiente, absorbiendo una notable cantidad de humedad. El agua es el principal enemigo de la aislación sólida ya que, además de su propiedad conductora, durante el servicio del equipo induce reacciones químicas destructivas sobre la celulosa del papel, afectando seriamente su capacidad aislante e induciendo a graves fallas que afectan seriamente el funcionamiento del equipo.

De acuerdo a esto es necesario someter a un intenso y minucioso proceso de secado de varios días en condiciones de temperatura y de alto vacío a la parte activa del transformador, compuesta por: núcleo (Hierro silicio), bobinas (cobre) y material aislante en general (papel, madera.). Como puede deducirse la eficiencia de dicho proceso es de suma importancia en la fabricación de transformadores de potencia para garantizar la calidad, performance y vida útil del transformador.

Uno de los objetivos de este proyecto es eliminar los residuos tóxicos que se generan inherentes al funcionamiento del actual proceso de secado de la parte activa, en transformadores de potencia.

El objetivo tecnológico es diseñar, desarrollar y montar una nueva planta de secado de la parte activa de los transformadores que garantice condiciones óptimas de temperatura y vacío, que además de eliminar la generación de residuos disminuya los tiempos de operación reduciendo de esta forma el consumo energético.

El objetivo económico del proyecto es disminuir los significativos costos que actualmente se desprenden del consumo de los insumos necesarios y el manejo y disposición de los residuos. A su vez estimar la ganancia por las mejoras en eficiencia y rendimiento que se logrará con la tecnología aplicada al nuevo proceso. En el desarrollo del PI se justificará la inversión económica para la implementación de este proyecto en TTE a través de la reducción en el consumo de los siguientes insumos: Energía (Eléctrica y por combustión de gas natural); Aceite mineral; Mano de obra directa empleada y tratamiento de residuos tóxicos generados.

OBJETIVOS

General

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y desarrollo de un moderno proceso de secado para las partes activas de transformadores eléctricos de potencia.

Específicos

- I. La eliminación de los residuos tóxicos que se generan durante el funcionamiento del actual proceso de secado.
- II. La reducción del consumo energético en dicho proceso.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca en una demanda concreta de la Empresa situada en Córdoba, Tubos Trans Electric (TTE), dedicada a la fabricación y comercialización de transformadores eléctricos de distribución y equipos de baja, media y alta potencia. Esta condición implica que el desarrollo aquí propuesto, debe contemplar la viabilidad tecnológica y económica.

La empresa TTE dispone hoy de un proceso o planta de secado de transformadores de potencia por temperatura y alto vacío, pero por tener una relegada tecnología (ineficiente), y encontrarse en el límite de su vida útil deriva en diversos y serios problemas tecnológicos y económicos. Cabe destacar las inevitables y costosas implicaciones debidas al tratamiento de residuos sólidos peligrosos.

El proceso resulta largo y no garantiza una correcta deshidratación de la parte activa de los transformadores. Esto provoca un aumento en los costos productivos que se refleja en un precio más alto del producto terminado.

La mayoría de defectos detectados en el proceso actual provienen de la bomba principal de la línea de vacío. El sistema trabaja con una bomba de aceite mineral mecánica de un caudal de 360m³/h.

A pesar de la existencia de condensadores, que deben ser depurados periódicamente, el elevado volumen de aire y humedad a eliminar del autoclave resulta en un inevitable ingreso de agua en la bomba, contaminando el aceite y disminuyendo significativamente su rendimiento. Esto se debe a que el aceite combinado con agua deviene en una emulsión, cuyas propiedades físico químicas se modifican disminuyendo drásticamente su eficiencia.

Este problema se agrava si no se anticipa la caída del rendimiento del aceite en pleno proceso de secado, es por esto que se cambia el aceite de las bombas constantemente.

Este aceite con agua es tipificado como un residuo tóxico Y09 el cual requiere una gestión y costo acorde para su disposición. A este costo se le suma el correspondiente al aceite nuevo que lo reemplaza.

Uno de los efectos secundarios propios al uso de aceite incluye eventuales derrames; cuya limpieza implica el uso de materiales absorbentes, gestión del enterramiento de dichos materiales, equipos adecuados para el personal de limpieza involucrado y tanques especiales de almacenamiento de aceites.

En el marco de estas consideraciones y el proceso existente se propuso desarrollar un sistema de secado nuevo, moderno y ecológicamente más amigable.

El agua es el principal enemigo de la aislación sólida ya que, además de su propiedad conductora, durante el servicio del equipo induce reacciones químicas destructivas sobre la celulosa del papel, afectando seriamente su capacidad aislante e induciendo a graves fallas que afectan seriamente el funcionamiento del equipo.

De acuerdo a esto es necesario someter a un intenso y minucioso proceso de secado en condiciones de temperatura y de alto vacío a la parte activa del

transformador compuesta por: núcleo (hierro silicio), bobinas (cobre) y material aislante en general (papel, madera).

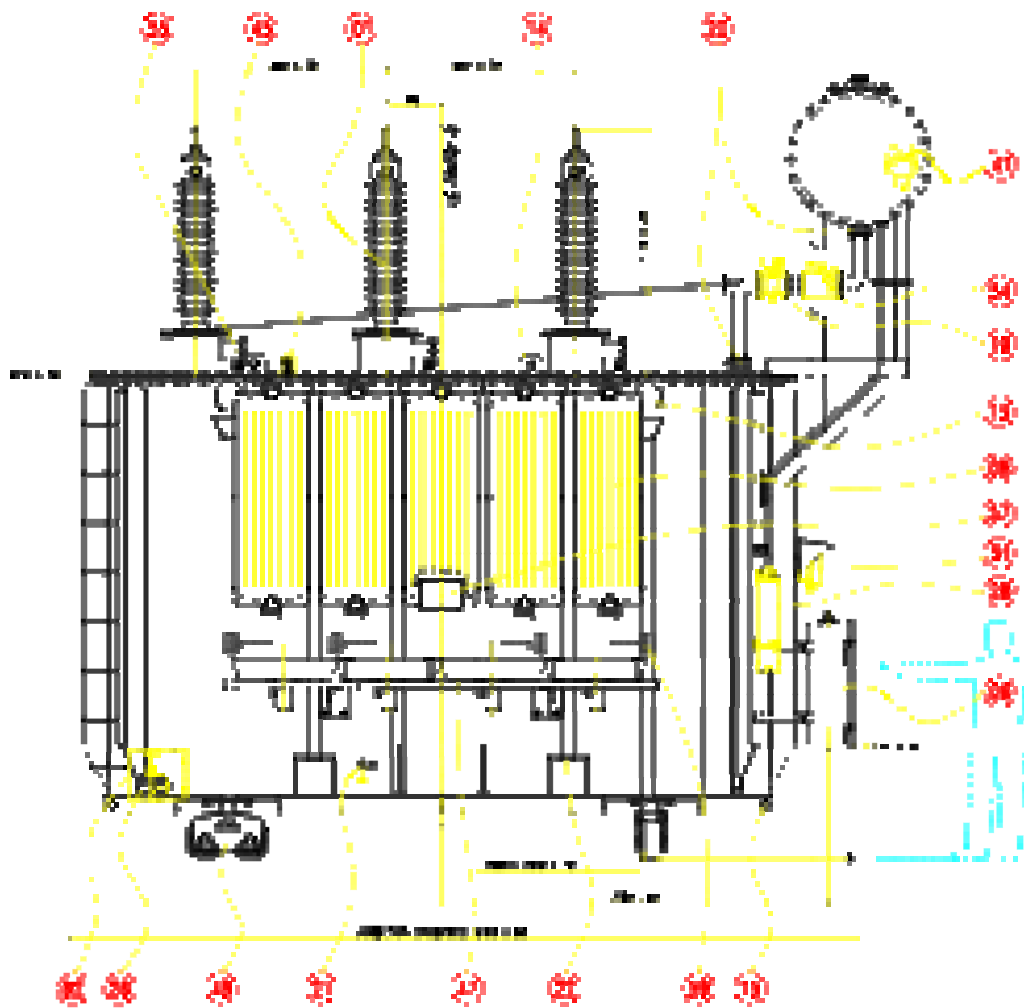
Se demostrará que la eficiencia de dicho proceso es de suma importancia en la fabricación de transformadores de potencia para garantizar la calidad, performance y vida útil del transformador.

Descripción del proceso de fabricación de transformadores eléctricos.

Con la idea de enmarcar el proceso de secado de las partes activas en el proceso general de fabricación de transformadores se detalla una descripción resumida de las etapas de fabricación de los transformadores de potencia que incluye el bobinado, preestabilizado, armado de núcleos, montaje de partes y cableado. Tareas muy específicas y artesanales que demandan varios días de trabajo en los cuales el material aislante sólido (papel, maderas, otros) queda expuesto al medio ambiente, absorbiendo un alto porcentaje de humedad.

Para esta descripción y el desarrollo de este trabajo se ha tomado como ejemplo un transformador tipo de 40MVA de potencia y 132/34,5/13,8 KV de tensión.

Figura 1: Esquema Transformador Tipo de 40MVA de potencia.

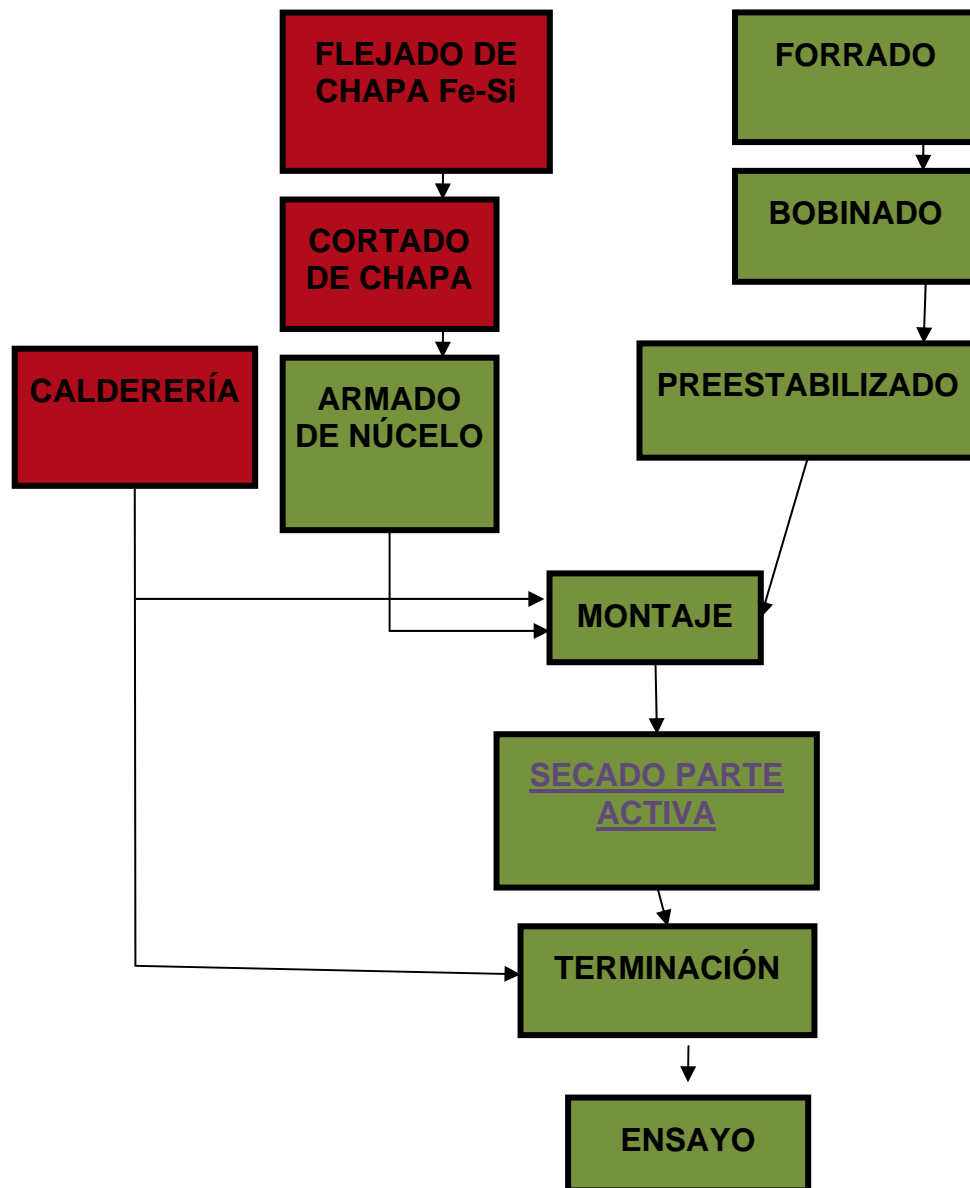


Este esquema fue extraído del gestor documental de TTE. El documento incluye el plano general del transformador y el listado de partes que lo componen. (Figura 1)

Figura 2: Transformador Tipo de 40 MVA Terminado.



Figura 3: Esquema del proceso de fabricación. En recuadros rojos las operaciones que se tercerizan en este momento.



A los efectos de simplificar la comprensión del proceso se describen las operaciones no tercerizadas en una secuencia lineal, aunque en la práctica se superponen las tareas que no presentan dependencia entre sí. (Figura 3). El alcance de este proyecto no abarca operaciones posteriores al secado de la parte activa.

Entonces partiendo de la materia prima solicitada al depósito:

1. Forrado
2. Bobinado

3. Pre estabilizado
4. Armado del núcleo
5. Montaje
6. Secado de parte activa

1. El proceso se inicia con la preparación y envoltura con papel kraft aislante del conductor de cobre necesario para bobinar. Sala de **forrado**. (Figura 4)

Se utilizan los siguientes tipos de papel:

- Kraft común de 50, 75 y 100 micrones
- Kraft termo estabilizado de 65 micrones
- Microcrepado

Figura 4: Sala de trefilado y forrado.



2. Luego, en la sala de **bobinado** los operarios bobinadores construyen y ensamblan las bobinas de baja, media y alta tensión (También regulación fina y gruesa cuando corresponda) de acuerdo al diseño elaborado por el departamento de Ingeniería. (Figuras 5 y 6)

En el bobinado se utilizan los siguientes tipos de papel:

- *Crepado* – Forrado manual luego de realizar transposiciones, cambio de carretes o cualquier otra operación que exija intervenir en el cobre pelado.
- *Prespan* 0,3 y 0,5mm – Entre capas

Figura 5: Sala de bobinado. Bobinado del tipo Hélice Múltiple.



Figura 6: Sala de bobinado. Bobinado del tipo Continuo Entrelazado.

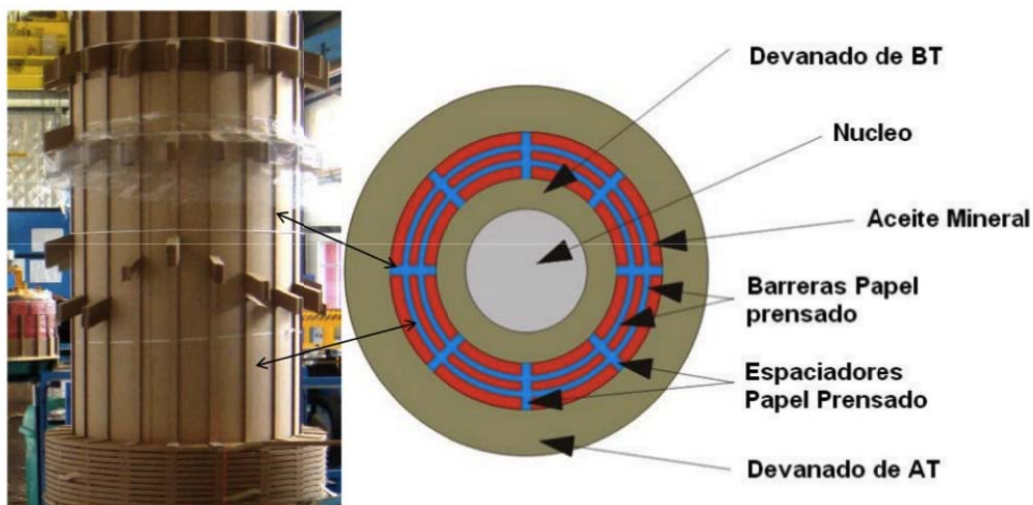


Se ensamblan las bobinas de baja, media, alta, regulación fina y gruesa de manera concéntrica, con todas sus conexiones. La figura 7 esquematiza las partes que componen una fase completa de una parte activa.

Esta bobina es la mas simple que se puede presentar desde el punto de vista constructivo, ya que consiste únicamente de un devanado de alta tensión y uno de baja. Es decir dos devanados por fase.

Algunos transformadores incluyen hasta cinco devanados distintos por fase.

Figura 7: Esquema simplificado de una fase completa de una parte activa vista desde un corte transversal.



3. Posteriormente en el área de **pre estabilizado** se colocan las bobinas en prensas para ajustar su altura y lograr las dimensiones de diseño. Luego se las ingresa en los hornos para eliminar gran parte de la humedad contenida en el papel, lo cual a su vez provoca que la altura de las mismas disminuya aún más.

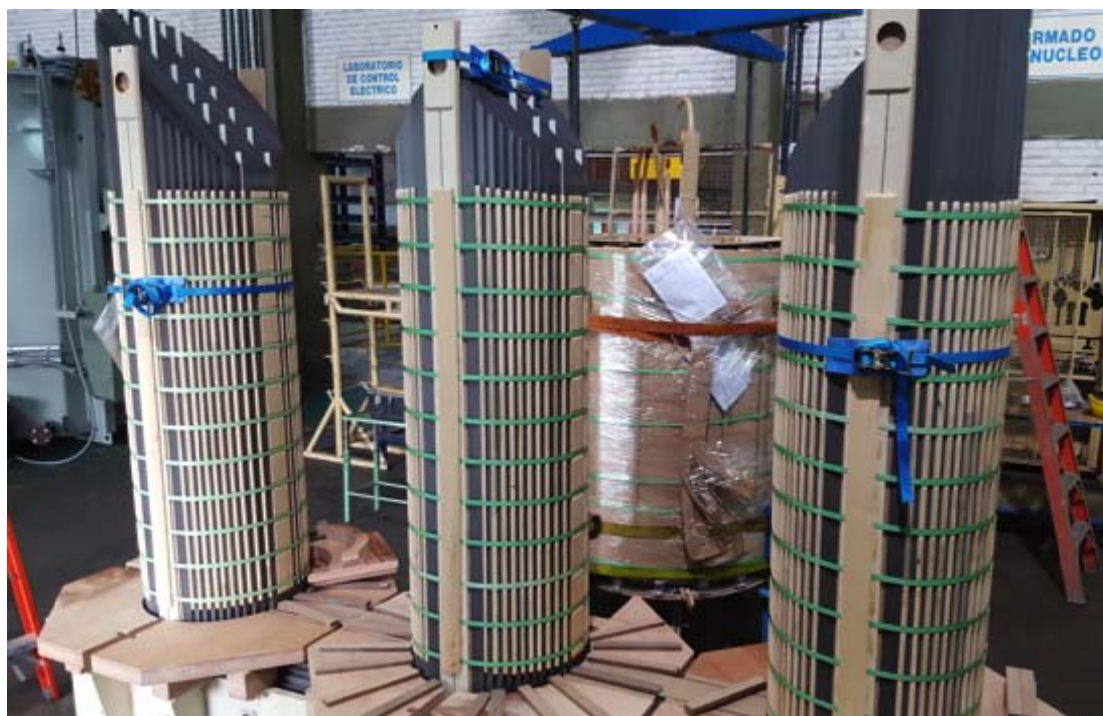
Durante el pre estabilizado se aplican esfuerzos de compresión variables a las bobinas mediante gatos hidráulicos y se las somete a condiciones de temperaturas elevadas y ocasionalmente vacío. Los valores de tracción, temperatura y vacío, así como la duración de cada proceso se definen con anterioridad por el área de Ingeniería. (Figura 8)

Figura 8: Pre estabilizado. Prensas neumáticas.



4. Se procede entonces con el **armado del núcleo** apilando chapas de hierro silicio en la mesa de armado, se verticaliza mediante un dispositivo que se acopla al prensayugos (estructura metálica donde apoyan las chapas) y luego se traslada el núcleo a la zona de montaje. (Figura 9)
Esta operación es independiente de las 1,2 y 3 por lo que puede realizarse simultáneamente a las mismas.

Figura 9: Núcleos armados y verticalizados sobre su prensayugos.



5- Luego se montan las bobinas en el núcleo y se colocan el prensayugos superior, conmutador y la tapa del transformador.

El **montaje** de la parte activa consiste en el armado del parante que combina las bobinas y el núcleo de ferro silicio. (Figuras 10 y 11)

Para manipular las partes que componen a la parte activa se utilizan puentes grúa de 40 toneladas, cuando la carga a izar excede esta capacidad se manejan los puentes en tándem, lo cual permite una capacidad de carga combinada de hasta 80 toneladas.

Figura 10: Instante previo al montaje. Se ensambla la parte activa uniendo el núcleo a las bobinas.



Figura 11: Montaje finalizado.



6- El **SECADO** en autoclave, por vacío y temperatura, de las bobinas montadas en el núcleo, es la etapa final del proceso de armado. (Figura 12) Como se explicó, la eficiencia de esta etapa de secado es de suma importancia y es el motivo de este trabajo tecnológico cuyo desarrollo es detallado en adelante.

Figura 12: Secado de parte activa en autoclave.



Para finalizar la fabricación del transformador restan las siguientes operaciones:

- **TERMINACIÓN:** se coloca la parte activa en la cuba y se ensambla el tanque de expansión, los aisladores, radiadores, tableros, etc. Finalmente se coloca el aceite dieléctrico para que se impregne en las bobinas, mediante vacío.
- **ENSAYO:** Se realizan ensayos eléctricos de cortocircuito, en vacío y atmosféricos (con el generador de impulso).

La fabricación de transformadores es a menudo considerada “artesanal”, esto hace referencia a que la producción es mayoritariamente manual. Los tiempos de fabricación varían de acuerdo a la habilidad del operario y al ritmo aplicado a las tareas que le corresponden.

Este proceso artesanal que por lo general dura semanas, somete al papel aislante a la humedad ambiente por lo tanto, este material, absorbe la mayor cantidad de agua durante la fabricación del transformador y es el motivo del posterior proceso de secado que desarrollamos en este PI.

PLAN DE TRABAJO

- Análisis del efecto de la humedad en la aislación eléctrica de transformadores.
- Análisis del sistema de vacío (línea de vacío) y de calefacción (línea de calor).
- Análisis de métodos de ensayo para el control y eficiencia del proceso de secado.
- Descripción funcional y operacional del proceso general de secado actual.
- Diseño, desarrollo y detalle del proceso general de secado propuesto. Diagrama de flujo y equipos. Comparación con el proceso actual.
- Análisis y factibilidad económica-financiera del proceso propuesto. Estudio comparativo con el proceso actual.

DESARROLLO DEL PROYECTO

Con la idea de abaratar costos de inversión, el diseño y desarrollo de este nuevo proceso se realiza considerando la posibilidad de reutilizar y recuperar algunos equipos existentes en el proceso actual de la empresa TTE. Como ejemplo destacamos la existencia de un autoclave cuyas dimensiones son 4.20 m de largo por 2,75 de ancho y 3.75 m de profundidad, es decir un volumen de 44 m³. Está construido en chapa con doble pared y aislación térmica, con costura reforzada para vacío, rodeado interiormente con una serpentina de calentamiento por donde circula aceite y una tapa de hierro con una bisagra. (Figura 13)

Además, por una cuestión de mayor facilidad operativa para el ingreso de la parte activa del transformador dicho autoclave, se sitúa dentro de un pozo de manera que la tapa queda mínimamente elevada respecto al nivel del suelo. Puede inferirse que una estructura de estas características supone un costo significativo.

Figura 13: Autoclave



Importancia de hermeticidad del autoclave

El proceso de secado de la parte activa de transformadores de potencia en TTE exige un autoclave que sea capaz de lograr un vacío del orden de 0,2 milibares.

Para tener una noción de lo que representa este valor debe considerarse que la presión atmosférica a la altura de la ciudad de Córdoba es de aproximadamente 1 bar (1000 milibares), la relación de presión exterior/interior es entonces de $1000/0,2 = 5000$. Es decir que en condiciones isotérmicas, el aire atmosférico que ingrese a la cámara del autoclave, por cualquier defecto de hermeticidad, aumentará 5000 veces su volumen.

Análisis del efecto de la humedad en la aislación eléctrica de transformadores.

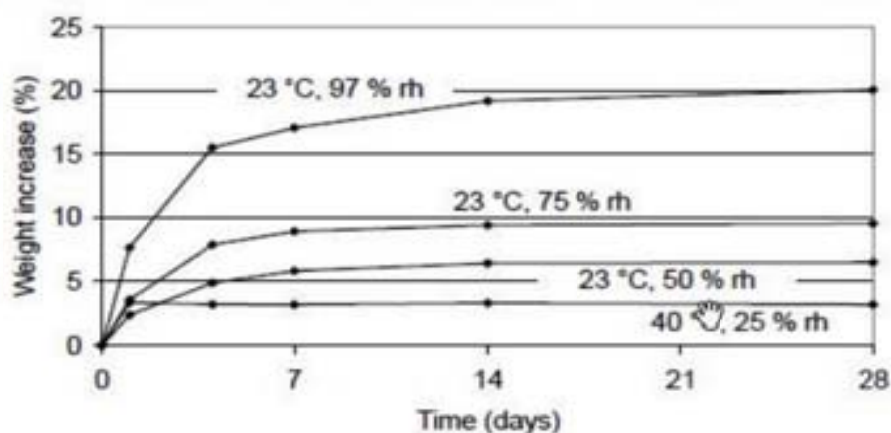
Como se expreso anteriormente todo el proceso artesanal de bobinado y montaje de la parte activa se realiza en permanente contacto con el medio ambiente de la amplia nave de armado y montaje y es durante este proceso, que el material aislante sólido higroscópico como papel, maderas y otros absorbe la mayor cantidad de humedad de dicho medio. Esta humedad es el principal enemigo de la aislación sólida ya que, además de afectar su propiedad conductora, durante el servicio del equipo induce reacciones químicas destructivas sobre la celulosa del papel, afectando seriamente su capacidad aislante e induciendo a graves fallas que afectan seriamente el funcionamiento y vida útil del equipo. Es por esto que dicha humedad debe ser eliminada hasta valores permitidos por medio de un muy eficiente sistema de secado.

En la figura 14 se puede observar un estudio realizado por Megger sobre la velocidad de absorción de humedad de cuatro muestras de papel aislante de alta densidad y 3mm de espesor. Características similares al papel crepado utilizado para el forraje manual en TTE.

Las muestras se ensayan en distintas condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.

De acuerdo al estudio 15 kilogramos de agua son absorbidos en un lapso de 16 horas, exponiendo el papel a un medio de 20°C y una humedad relativa de 97%.

Figura 14: Migración de la humedad hacia el papel aislante en transformadores de potencia.



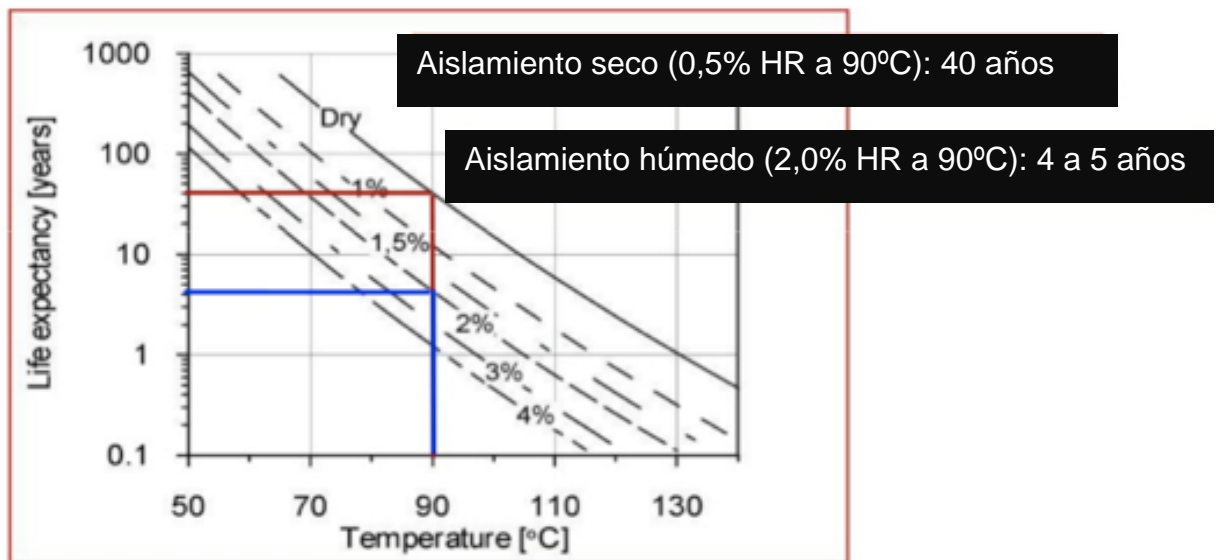
1

Las reacciones destructivas que produce la presencia de humedad en la aislación sólida son catalizadas por la temperatura. En La gráfica de la figura

¹ Matz Ohlen - Megger Sweden (2014): "Moisture in Power Transformers - How to Estimate and What to Do"
<http://www.energy-support.de/en>

15 se observa la relación entre la vida útil esperada de un transformador de potencia, la cantidad de agua alojada en su aislamiento sólido y la temperatura de trabajo. Esto demuestra también que un bajo contenido de humedad permite que el equipo trabaje a mayor temperatura resultando más eficiente la difusión del calor generado en las bobinas.

Figura 15: Relación entre la vida útil esperada de un transformador de potencia de según la cantidad de agua alojada en su aislamiento sólido y la temperatura de trabajo.



2

² Matz Ohlen - Megger Sweden (2014): "Moisture in Power Transformers - How to Estimate and What to Do"
<http://www.energy-support.de/en>

Análisis del sistema de vacío (línea de vacío) y de calefacción (línea de calor).

Además del proceso de extracción de humedad por vacío y temperatura, motivo de este proyecto, existen otros como el “secado por circulación de aceite” y el “secado por circulación de gases”. El método de secado mediante temperatura y vacío es considerado el más eficiente y en nuestro caso se justifica además por la posibilidad de trabajar con algunos equipamientos existentes.

Todos los procesos de secado de los aislamientos sólidos celulósicos en los transformadores de potencia se basan en lograr un desequilibrio termodinámico al generar gradientes de temperatura y de concentración de humedad o de presión de vapor de agua entre los aislamientos sólidos y su medio circundante. Estos gradientes se regulan por el parámetro definido como la humedad de saturación para condiciones de trabajo determinadas.

La humedad de saturación es la cantidad máxima de agua en estado gaseoso que puede estar contenida en un kilogramo de aire a una presión y temperatura determinada. La tabla en la figura 16 muestra valores de contenidos de humedad para distintas presiones y temperaturas.

A mayor vacío y temperatura, mayor será la humedad de saturación.

Figura 16: Humedad de saturación del aire para condiciones de presión y temperatura dadas.

Presión [mm Hg]	H (-20°C)	H (0°C)	H (20°C)	H (40°C)
100	0,0048	0,0299	0,1327	0,7726
200	0,0024	0,0146	0,0599	0,2386
300	0,0016	0,0097	0,0387	0,1411
400	0,0012	0,0072	0,0286	0,1001
500	0,0010	0,0057	0,0277	0,0776
600	0,0008	0,0048	0,0188	0,0633
700	0,0007	0,0041	0,016	0,0535
760	0,0006	0,0038	0,0147	0,0489

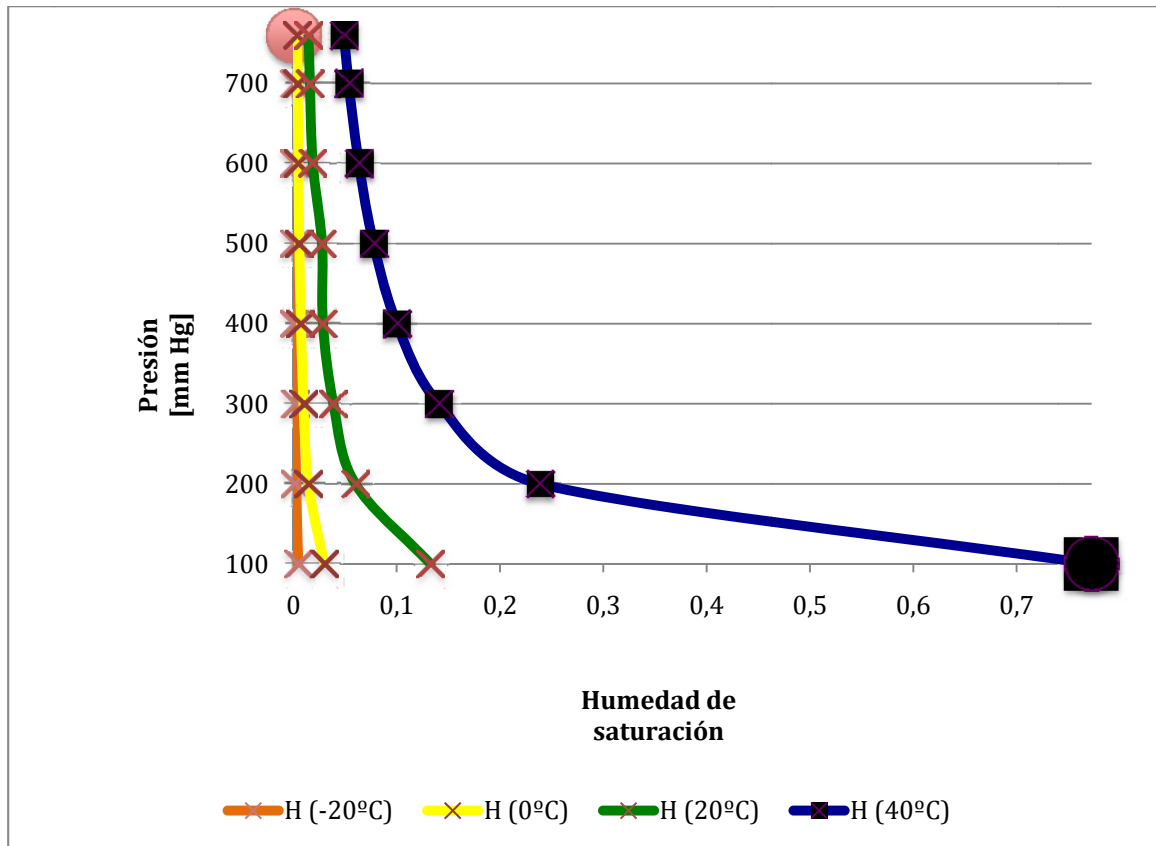
³

Observando la tabla de la figura 16 resulta claro que a mayor temperatura y menor presión, la humedad de saturación del aire es mayor.

³ Enrique Martines L., Leonel Lira C. - Centro Nacional de Metrología Cenam. (2008): “Cálculo de la temperatura de punto de rocío a diferentes valores de presión”

www.cenam.mx

Figura 17: Gráfico de los valores tabulados en la figura 16.



Es decir que el aire es capaz de absorber mayor cantidad de humedad a mayor temperatura y menor presión, antes de alcanzar el punto de rocío.

Para forzar la desorción de humedad desde el aislamiento sólido durante el secado, es necesario que se produzca alguna de las siguientes condiciones:

- Que el aislamiento celulósico tenga mayor temperatura que el medio circundante.
- Que el aislamiento tenga una mayor presión de vapor de agua que el medio circundante.
- Que la saturación relativa de humedad del aislamiento celulósico sea menor que la del medio circundante.

Cuando aparece un desequilibrio termodinámico, la humedad es forzada a moverse desde el interior del aislamiento hacia el medio circundante y de allí es transportada hacia el exterior del transformador y desalojada del mismo.

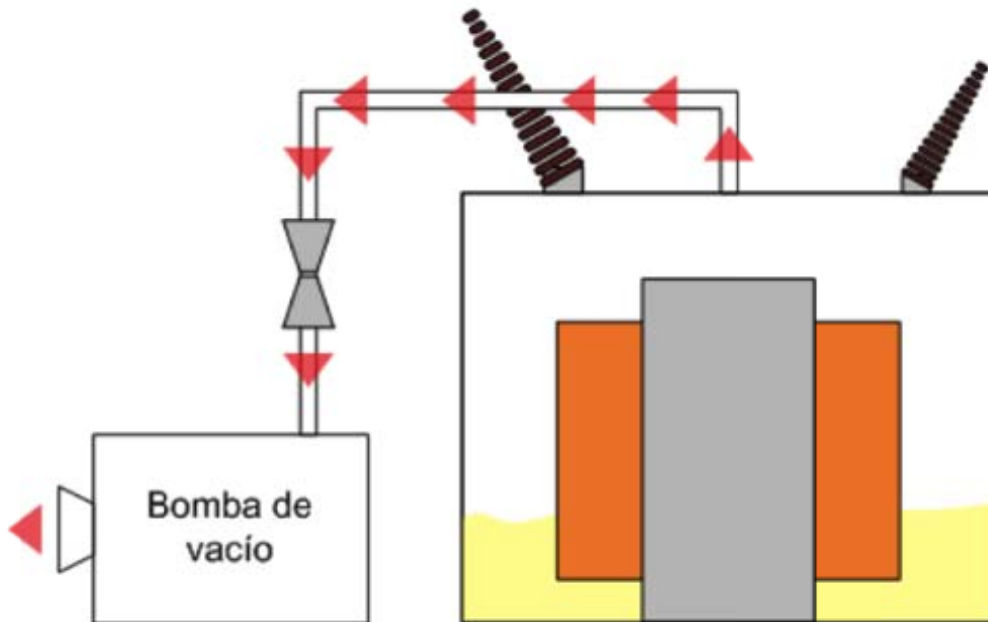
Método de secado por vacío

En TTE se utiliza el método de secado por vacío. Este consiste en extraer la humedad del material aislante generando, en el ambiente que contiene la aislación sólida, una presión muy por debajo de la atmosférica para que la humedad contenida en el aislamiento se evapore fácilmente y pueda ser extraída por bombeo.

La aplicación del vacío tiene dos propósitos:

- a) Expansión y extracción del gas (en su mayoría aire) contenido dentro de un espacio cerrado, en este caso el tanque del autoclave. Esta expansión de gases conduce a la expulsión de la humedad presente.
- b) Reducción del punto de ebullición del agua contenida en forma de humedad dentro de los aislamientos, facilitando su evaporación. Al convertirse el agua en vapor, este puede ser evacuado rápidamente, junto con los gases por medio de la bomba de vacío.

Figura 18: Ilustración de un transformador eléctrico dentro del autoclave y la migración de los gases hacia el exterior de la cuba mediante una bomba de vacío.



Para mejorar el proceso de secado se aumenta la temperatura en el interior del autoclave, por medio de un sistema de calefacción por circulación de aceite. Esto provoca la desorción de la humedad presente en el aislante sólido. De esta manera se aumenta la capacidad de transportar humedad a

través de la masa de aire y vapor de agua bombeada hacia el exterior del autoclave.

Cuando el agua contenida en el aislamiento se evapora, gran parte del calor aportado que provoca el cambio de fase sale del transformador con el vapor. Esto provoca que la temperatura del transformador baje bruscamente.

Es necesario seguir aportando calor continuamente dentro del transformador. Si el aporte de calor es discontinuado se podrían ocasionar congelamientos parciales en el agua que queda dentro del transformador. Una vez ocurrido el congelamiento el agua debe ir desde la fase sólida a la gaseosa lo cual requiere mucho más calor, por lo tanto el proceso se atasca. Cuando esto sucede los sensores de humedad indicarían que no hay más agua en el transformador. Al entrar de nuevo en servicio el hielo se derretiría y el transformador volvería a estar húmedo.

Tampoco se puede aportar calor excesivo para garantizar que no ocurran congelamientos. Por las características constructivas de los materiales hay que tener cuidado de no dañarlos en el calentamiento. Hay que buscar un punto intermedio de aporte de calor entre estos dos extremos.

Análisis de métodos de ensayos para el control y eficiencia del proceso de secado.

Tangente delta

La prueba o ensayo de la tangente de delta (o factor de potencias) es aplicable antes y después del proceso de secado, también se la denomina factor de disipación y es una medida de las pérdidas dieléctricas en un aislante sólido o líquido.

Es un indicador confiable del estado del aislamiento del transformador en su conjunto. Se obtiene un valor de referencia para ser utilizado posteriormente en otras etapas de la fabricación, y eventualmente durante el servicio del transformador.

Su magnitud depende del tipo de aislamiento y de las condiciones del mismo y es independiente de su volumen. La desventaja de esta prueba es que sólo determina la condición promedio del aislamiento, es decir, no detecta el punto de peor condición. Su valor puede verse afectado por la humedad y suciedad en la superficie del aislamiento que permita una circulación de corriente a tierra a través de la superficie del mismo aumentando las pérdidas.

La idea es que en un aislamiento perfecto (ideal) la tangente delta no varíe con la tensión. La medida proporcionará información del grado de humedad y contaminación del dieléctrico.

El autoclave está provisto de los accesos necesarios para comunicar sondas desde el instrumento de medición del fabricante Megger a tres electrodos que corresponden a un devanado de baja tensión, uno de alta y masa (Núcleo de la parte activa).

En TTE se utilizaba el ensayo de Tangente delta simultáneamente al secado de la parte activa, de acuerdo a los estándares de secado impuestos por Toshiba, hasta que se consideró innecesario por Siemens que en su lugar impuso el uso de tablas empíricas de acuerdo a la tensión y potencia del transformador en cuestión.

Esto se debe a que no resultaba beneficioso en relación a los problemas ocasionados por frecuentes roturas en los sensores, sondas y demás equipamientos necesarios; además de las eventuales inoperancias propias de la mano de obra no tan especializada para realizar este tipo de ensayos. Muchas veces los valores del factor de disipación no coincidían con los valores reales de humedad en las aislaciones de las partes activas.

De acuerdo a Toshiba cuatro horas sin cambios significativos en la curva del ensayo suponen una estancamiento en la migración de moléculas de agua que no cambiará sin modificar condiciones de vacío o temperatura.

Valores aceptables de tangente delta para aislamientos sólidos de transformadores de potencia en TTE son 0,3% o menor, corregidos a 20 grados Celsius.

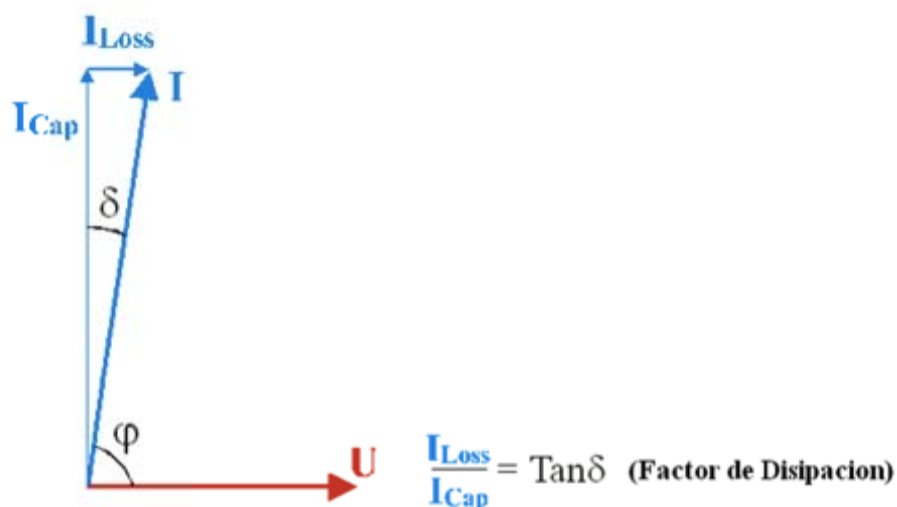
Haciendo un leve repaso acerca del comportamiento frente a la tensión alterna, se entiende que la corriente que circula a través del dieléctrico es

definida por un parámetro que depende de él y de su geometría, que se denomina capacidad eléctrica.

Esa corriente se encuentra desfasada y en adelanto a la tensión de alimentación, pero ese ángulo no es exactamente 90° sino un valor ligeramente menor. Ese pequeño ángulo es delta, tal como se muestra en la figura 21 y representa el parámetro que habla de la bondad del dieléctrico: la tangente delta.

Lógicamente un dieléctrico de calidad tendrá un delta mínimo, que tienda a cero.

Figura 21: Desfasaje entre la corriente que circula a través del dieléctrico y la tensión de alimentación.



4

Punto de rocío

El concepto de punto de rocío o temperatura de rocío refiere al momento a partir del cual se condensa el vapor de agua que hay en la atmósfera y se genera, de acuerdo a la temperatura neblina o rocío. En caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha.

La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua en el aire y la cantidad máxima de agua que podría contener el aire, a tal temperatura, antes de que se produzca saturación.

El ensayo de punto de rocío se utiliza para determinar el grado de humedad que presenta la aislación de un transformador.

Se puede determinar la humedad del aislamiento monitoreando la humedad del gas, esto es después del período de 12 a 24 horas a temperatura constante, tras el cual parte de la humedad alojada en el papel migra hacia el gas, equilibrando la concentración de vapor de agua en todo el sistema.

⁴ Matz Ohlen - Megger Sweden (2014): "Moisture in Power Transformers - How to Estimate and What to Do"
<http://www.energy-support.de/en>

Se monitorea el contenido de humedad en la superficie de la aislación a partir del contenido de humedad en el gas dentro de la cuba, expresado por su temperatura de punto de rocío.

En un transformador nuevo, la humedad de la superficie del papel debe estar debajo del 0,8%.

Descripción funcional y operacional del proceso general de secado actual.

Luego de colocada la parte activa en el horno se cierra la tapa y se da inicio a la primera etapa del proceso, el calentamiento.

Se ha mencionado antes como al aumentar la temperatura del aire aumenta su capacidad para absorber agua, también crece la presión de vapor de las moléculas de H₂O retenidas en los aislantes, esta humedad generada migra al ambiente del horno.

Para optimizar el proceso es conveniente realizar un barrido con aire seco caliente mientras aumenta la temperatura del autoclave, de este modo se va retirando humedad de la cámara, evitando la oxidación y facilitando la etapa de vacío posterior. Como alternativa se puede dejar levemente abierta la tapa para que parte del aire húmedo salga al exterior del autoclave.

El controlador de temperatura ambiente del horno debe ser calibrado a 110°C. Por debajo de esta temperatura el proceso es menos eficiente y por encima se acelera el envejecimiento de la aislación y puede llegar incluso a degradarse o quemarse.

Además del ambiente del horno, se mide la temperatura de los arrollamientos y del núcleo. Cuando la temperatura medida por todas las sondas (Ambiente, bobina y núcleo) alcanzan o superan los 80°C se comienza a contabilizar el tiempo de secado. Si en algún momento la temperatura cae por debajo de 80°C se suspenderá la cuenta de tiempo hasta que dicho valor sea nuevamente alcanzado.

Aún con la parte activa caliente, en el orden de 100°C, todavía quedan moléculas de H₂O en el interior de la aislación que deben ser removidas.

Para esto se disminuye la presión dentro de la cámara del autoclave, de modo que la acción combinada de vacío y temperatura logre extraer dichas moléculas. Al aplicar vacío aumenta la diferencia de presión entre moléculas de agua retenidas en la celulosa y el vapor de agua en la atmosfera circundante, facilitando la migración de la humedad del papel al medio.

En primera instancia el fluido es bombeado por la bomba mecánica Pfeiffer, la cual reduce la presión hasta alcanzar un valor inferior a 8 milibares y luego se puede activar la bomba Roots conectada en serie a la bomba principal, alcanzando un vacío de hasta 0,2 milibares.

Es importante no conectar la segunda etapa a presiones superiores a 8 milibares, ya que sobre exigiríamos el equipo pudiendo producirse daños.

En el circuito de vacío se intercalan filtros y condensadores a los efectos de separar la humedad que se va retirando con el volumen que evacuan las bombas para lograr un buen rendimiento de las mismas.

Estos condensadores deben ser purgados periódicamente durante el proceso de secado.

A pesar de esto, parte de la humedad llega a la bomba y se mezcla con el aceite de la misma. Por esta razón se debe controlar el estado del aceite y cambiarlo cuando se haya degradado por estar emulsionado con agua.

En el comienzo del tratamiento, antes de conectar la bomba Roots, los cambios de aceite suelen ser más frecuentes, hasta que una vez seca la parte activa no se genera más emulsión.

Generalmente las iteraciones de cambio de aceite y purgado se realizan juntas.

A diferencia del calentamiento, el tiempo se comienza a contar a partir de haber establecido vacío en el autoclave a valores por debajo de 0,5 milibares, suponiendo que no hay pérdidas y que los equipos rinden correctamente, la parte activa todavía tiene humedad.

Esto es porque aun cuando las bombas extraigan aire de la cámara, el material aislante sigue desprendiendo vapor casi con la misma velocidad que la bomba lo extrae. Tener en cuenta que a bajas presiones, el caudal de cualquier bomba se reduce notablemente.

Tiempos y rangos admisibles del proceso de secado actual

Básicamente el proceso se compone de dos etapas: Calentamiento y vacío. El tiempo mínimo de cada etapa viene establecido en función de potencia y tensión.

La figura 22 confeccionada por Siemens, indica los tiempos mínimos del proceso para partes activas de transformadores de potencia. De acuerdo a su potencia y tensión.

Tabla 22: Tiempos de secado de acuerdo a Potencia y tensión del transformador.

Tiempos mínimos de calentamiento y vacío ⁵					
TENSIÓN [KV]	POTENCIA [MVA]		TIEMPO DE CALENTAMIENTO [HS]	TIEMPO DE VACÍO [HS]	TIEMPO TOTAL [HS]
	DESDE	HASTA			
0 - 30	10	20	24	24	48
	20	50	24	24	48
30 - 60	1	20	24	24	48
	20	50	36	36	72
	50	125	36	36	72
	125	315	48	48	96
60 - 150	20		48	48	96
	20	50	60	60	120
	50	125	60	60	120
	125	315	60	84	144
150 - 220	50		60	60	120
	50	125	60	84	144
	125	315	60	84	144
220 - 360	50		60	84	144
	50	125	72	96	168
	125	315	72	96	168
380 - 700	50		96	96	192
	50	125	96	96	192
	125	315	96	120	216

⁵ Extraída de manual de secado Siemens.

Diseño, desarrollo y detalle del proceso general de secado propuesto. Diagrama de flujo y equipos. Comparación con el proceso actual.

Se estableció entonces que el método utilizado para extraer la humedad del aislante sólido es mediante el aumento de temperatura y la disminución de la presión dentro de la cámara del autoclave donde se confina la parte activa. Es lógico entonces aseverar que el grado de efectividad de este proceso dependerá fundamentalmente de:

- Las calorías aportadas en forma de energía térmica al sistema (Caldera).
- El vacío final y el caudal de masa de aire extraído del mismo (Bomba).

Línea de vacío actual

Figura 23: Línea de vacío actual compuesta a grandes rasgos por una bomba mecánica, un condensador y dos bombas roots.



Bomba mecánica

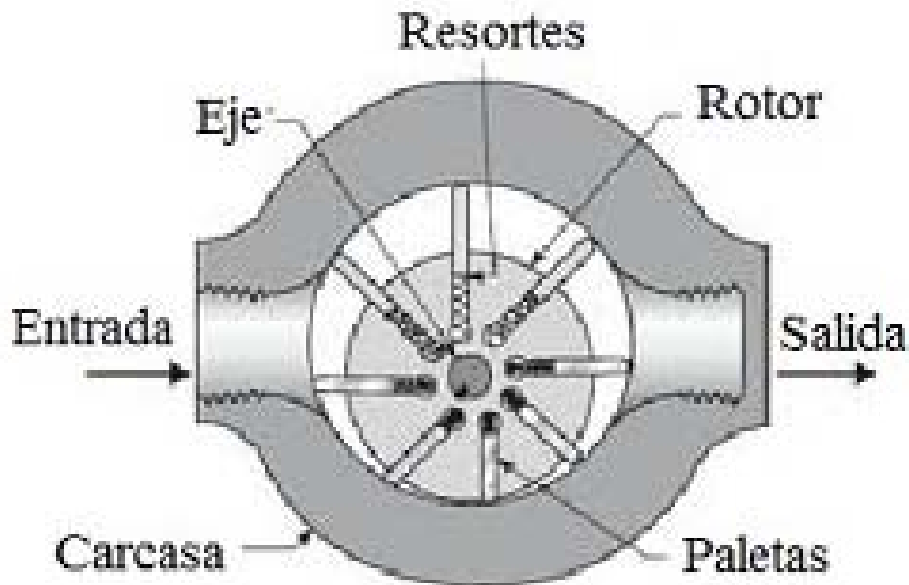
Actualmente la línea de vacío cuenta con una bomba rotativa de paletas. (Figura 24).

Este tipo de bomba tiene un rotor cilíndrico alojado excéntricamente en el estator también cilíndrico. El eje de giro del rotor coincide con su eje

geométrico y tiene dos ranuras longitudinales por donde se deslizan entrando y saliendo paletas que se mantienen separadas y rozando el estator por acción de resortes.

Las paletas suelen ser de un material liviano, minimizando así el nivel de vibración de la bomba.

Figura 24: Esquema de componentes de bomba rotativa a paletas.



6

Con esta geometría quedan definidas la cámara de admisión que tiene un conducto para la conexión al sistema de vacío y la cámara de compresión con una válvula de escape.

El conjunto está montado en un cárter y sumergido en aceite, de modo que la válvula de escape quede a unos centímetros por debajo de la superficie del mismo. *El aceite cumple las funciones de lubricación, refrigeración y sellado de las diversas partes móviles.*

Según su tamaño y características constructivas, las velocidades de rotación oscilan entre 300 y 1500rpm, en tanto que el vacío que puede alcanzar ronda los 5mbar.

TTE cuenta con una bomba rotativa marca Pfeiffer de 360m³/h y 11Kw. *Necesita de una bomba de respaldo (Roots) para aumentar su caudal.*

⁶ Extraído de <http://www.portaleso.com/>

Figura 25: bomba rotativa marca Pfeiffer de 360m³/h y 11Kw.

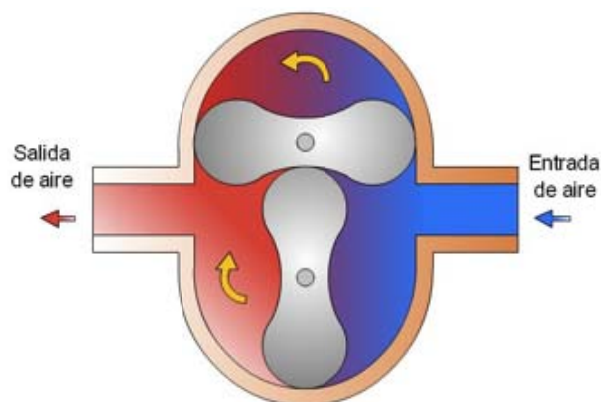


Bombas Roots

Bombas de respaldo para asistir a bomba mecánica.

Está constituida básicamente por dos rotores en forma de “ocho” alojados en un recinto formado por la carcasa y una camisa.

Figura 26: Esquema de componentes de bomba rotativa a paletas.



7

⁷ Extraído de <http://www.portaleso.com/>

Debido a la inexistencia de contacto físico entre las partes móviles y a la geometría balanceada de sus rotores, este tipo de bombas puede operar a velocidades mayores que la bomba mecánica. Por el contrario, para funcionar necesita de una bomba que genere un vacío inicial ya que puede operar únicamente en un rango de entre 10 y 0,1 mbar.

En TTE se usan actualmente dos bombas Roots marca Repicky conectadas en paralelo entre si y vinculadas en serie a la bomba mecánica Pfeiffer.

Figura 27: Bombas Roots marca Repicky.



Línea de vacío propuesta

La bomba a tornillo

En base a la disponibilidad a corto plazo de bombas de vacío secas en el mercado internacional se propone la adquisición de una bomba a tornillo marca Edwards modelo GXS750. A priori se adecua al proceso llevado a cabo por TTE, debido a características fundamentales como el caudal de bombeo, valor de vacío alcanzado y potencia. (Figura 28).

Ventajas del tipo de bomba

- Requisitos mínimos de mantenimiento
- Períodos extendidos entre la intervención del usuario
- Menores costos de insumos
- Sin eliminación de aceite
- Sin emisiones de aceite a la atmósfera
- Velocidad de bombeo muy estable que entrega capacidad de repetición a los procesos
- Bombeo continuo a la atmósfera
- El secado elimina el reflujo con lo que protege las aleaciones reactivas de la contaminación.
- Niveles de ruido discretos
- Sin derrames de aceite
- Sin vapores de aceite peligrosos

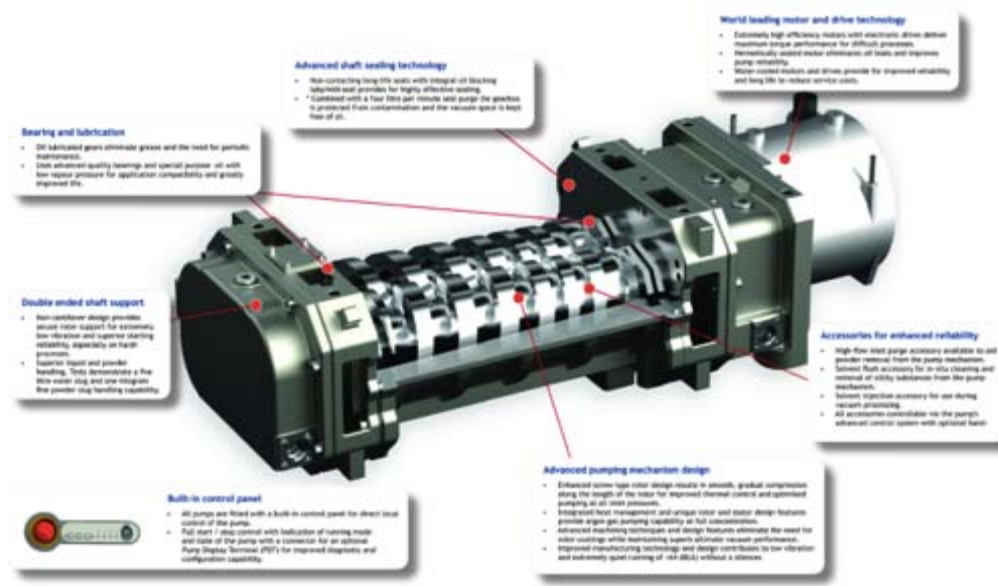
Figura 28: Características técnicas relevantes.

GXS750		Unidades	Valor
Velocidad de bombeo Pico		M3/H	740
Máximo valor de vacío alcanzado		mbar (Torr)	3x10 ⁻³ (2.3x10 ⁻³)
Potencia	Presión final	HP	11,8
	Carga de bombeo pico	HP	35,1
Masa		kg	640
Nivel sonoro - Con silenciador		dB	<70
Temperatura de trabajo		°C	may-40
Presión de salida del escape(MAX)		mbar	1400
Lubricación	Tipo		PFPE Drynert® 25/6
	Volumen	Litros	2.4

8

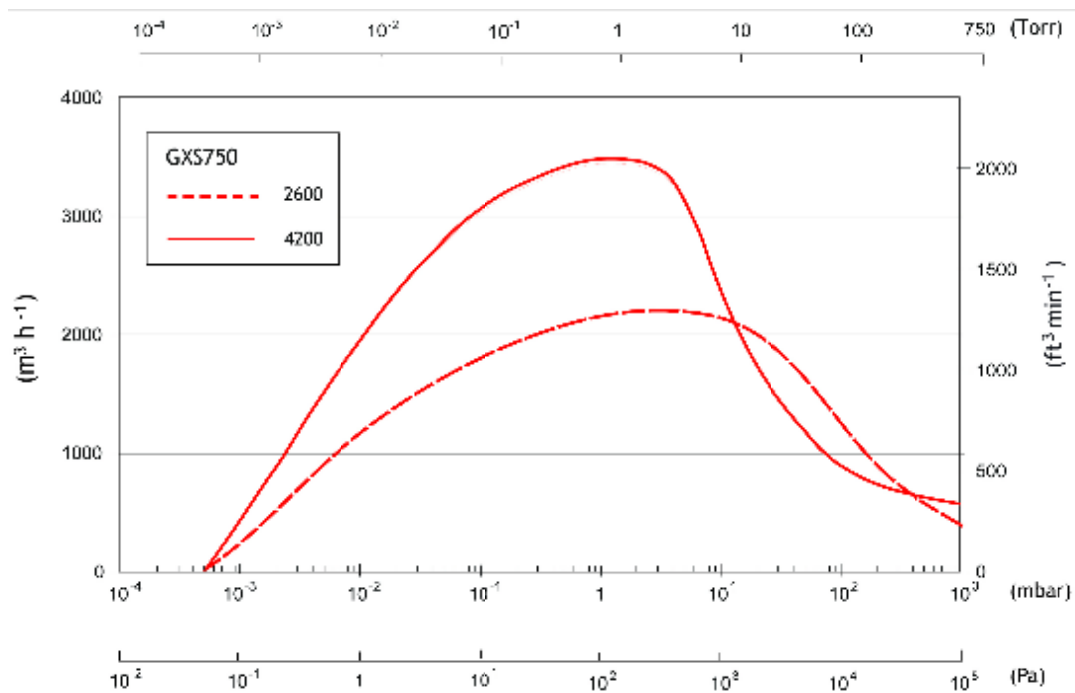
⁸ <https://www.edwardsvacuum.com/es/GXS/>

Figura 29: Componentes de bomba Edwards modelo GXS750.



9

Figura 30: Gráfico de caudal a distintas presiones de trabajo para bomba Edwards.



10

⁹ <https://www.edwardsvacuum.com/es/GXS/>

¹⁰ <https://www.edwardsvacuum.com/es/GXS/>

Gas Ballast

El uso de este recurso está destinado a bombas que trabajan con gases con contenido de vapores condensables. Las bombas de vacío poseen una relación de compresión muy grande. Si en la aspiración hay presente vapor, este se condensará si la presión llega a su punto de saturación. Si se da esta situación parte del vapor pasa al estado líquido mezclándose con el aceite y a partir de este momento la presión de vapor del fluido de sello pasa a ser la del líquido condensado.

El uso de gas ballast se logra mediante una válvula que inyecta aire atmosférico a la cámara de compresión antes que el vapor sea comprimido totalmente, con lo cual se obtiene una dilución del vapor presente en el gas bombeado y puede terminarse la compresión sin que el vapor llegue a su punto de rocío, evitando la condensación.

El uso del gas ballast afecta la curva característica de una bomba sobre todo a bajas presiones, debido a que existen pequeñas fugas inevitables entre las partes móviles de la bomba.

Condensador

Debido a que la cantidad de vapor condensable es alta, se intercala un condensador en el conducto de aspiración de la bomba a tornillo.

Dicho dispositivo condensa el vapor en base a una disminución de la temperatura y permite disminuir la proporción de vapor del gas bombeado, posibilitando en muchos casos una compresión posterior hasta la presión atmosférica sin que se produzca condensación dentro de la bomba. (Figura 31).

Figura 31: Condensador (parte superior) y tanque receptor del líquido condensado (parte inferior).



La bomba produce un incremento inicial de presión del gas bombeado, para que la presión parcial del vapor sin llegar a ser la de saturación, sea lo suficientemente alta como para obtener eficiencia en el condensador. El condensador a través de la disminución de temperatura lleva fluido al punto de rocío condensando una parte importante del vapor. Una vez que el gas abandona el condensador y vuelve a la temperatura ambiente, disminuye la presión parcial del vapor condensable, posibilitando su compresión por parte de la bomba hasta la presión atmosférica, sin llegar al punto de rocío.

Medidores de presión

Los instrumentos para medir vacío se clasifican de acuerdo al principio de funcionamiento que utilizan:

- Sensores Hidrostáticos – Dependen de la fuerza ejercida por el gas sobre un líquido.
- Sensores Mecánicos – Dependen de la fuerza ejercida por el gas sobre un dispositivo mecánico.
- Sensores de conductividad térmica – Dependen de los cambios que experimenta la conductividad térmica del gas con la presión.

El instrumento de medición óptimo será un sensor de conductividad térmica. Operan con el principio de que la pérdida de calor desde un filamento caliente en vacío, a través de la conductividad térmica del gas, es función de la densidad o presión del gas.

Para el secado de transformadores TTE usa los denominados vacuómetros Pirani. Sensores de conductividad térmica. (Figuras 32 y 33).

Este instrumento es simple, robusto, permite realizar lectura continua y tiene rápida respuesta a los cambios de presión.

Figura 32: Cabezal de vacuómetro tipo Pirani marca Pfeiffer.



Figura 33: Controlador digital para vacuómetros tipo Pirani. Cuatro canales independientes.



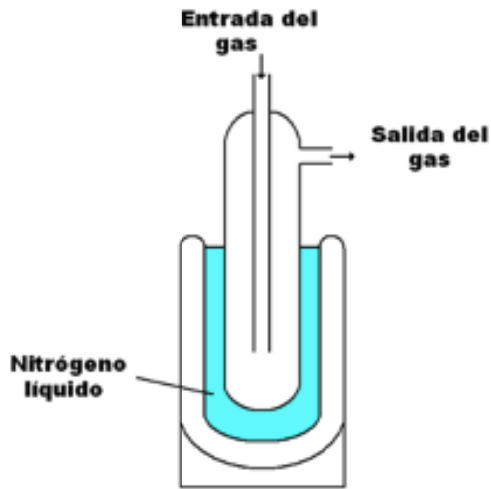
Trampa fría

La humedad contenida en el aislamiento se puede sacar directamente a través de la bomba de vacío o añadiendo antes de la misma una trampa fría (cold trap).

En aplicaciones de secado por vacío, la trampa fría condensa los gases que circulan a través de ella, previniendo que lleguen a la bomba vapores de aceite y humedad que la puedan deteriorar. Adicionalmente, la trampa fría aumenta la desorción de humedad desde el interior del transformador al crear un mayor gradiente de concentración de humedad entre el aislamiento sólido y la atmosfera que le rodea; también sirve para estimar la cantidad de humedad extraída del transformador.

En la Figura 34 se muestra un esquema del funcionamiento de la trampa fría; el gas entra a la trampa fría y antes de salir pasa por una zona a muy bajas temperaturas, sea con nitrógeno líquido o hielo seco. El vapor condensa y se queda en el fondo. El aire sale por el otro conducto para pasar por la bomba de vacío ya sin humedad.

Figura 34: Esquema simplificado del funcionamiento de una trampa fría.



Elementos reemplazados

- Bomba mecánica
- Bombas Roots
- Gas ballast

Conductancia

Las pérdidas por conductancia en las tuberías o mangueras bajo vacío pueden ser relevantes durante un proceso de evacuación de aire y gases. Para lograr valores de "alto vacío" es necesario tener presente que los diámetros de las tuberías aguas abajo, deben corresponder a la capacidad de las bombas de vacío así como a la longitud de estas tuberías o mangueras, puesto que tanto las mangueras como las propias tuberías no pueden ser directas y rectas entre la bomba de vacío y el tanque del transformador los cambios de dirección aumentan las pérdidas por conductancia. Como regla general se recomienda adicionar un factor de 12 por cada 100 en cambios de dirección aplicado al diámetro, utilizando y agregando esta cantidad como longitud extra (pulgadas) de manguera en el cálculo de pérdidas.

Línea de calentamiento

Figura 35: Componentes principales del sistema de calefacción.



En la figura 35 se observan los componentes principales del sistema de calefacción utilizado en el autoclave destinado al proceso de secado.

En la caldera, sea a gas o eléctrica, se calienta el fluido (aceite) mediante quemadores de gas o resistencias eléctricas, respectivamente. En TTE se usa comúnmente la caldera a gas, cuyo consumo resulta notablemente mas económico que su par eléctrico. No obstante se conserva el último como un sistema de calentamiento secundario por si acaso fallara el principal.

La caldera tiene termostatos que controlan la temperatura del fluido térmico que deben ser regulados a 150°C como máximo, por dos razones:

- Para no deteriorar el fluido.
- Por seguridad. Cabe aclarar que este mismo año se produjo un incendio en TTE causado por el error operativo de no tener los termostatos prendidos estando el sistema de calentamiento en funcionamiento.

Además dispone de un tanque para permitir la expansión del fluido debido al calentamiento.

El fluido térmico caliente es forzado por las bombas a circular por la serpentina de caños colocada en el interior del autoclave.

El calor del aceite pasa por conducción desde el interior del caño al exterior del mismo, donde por convección calienta el aire del recinto.

La temperatura del horno es controlada por un termo controlador con termo sondas distribuidas en el material a secar y el ambiente interior.

Flow sheet planta de secado propuesta

Figura 36: Flow sheet planta de secado. Línea de vacío.

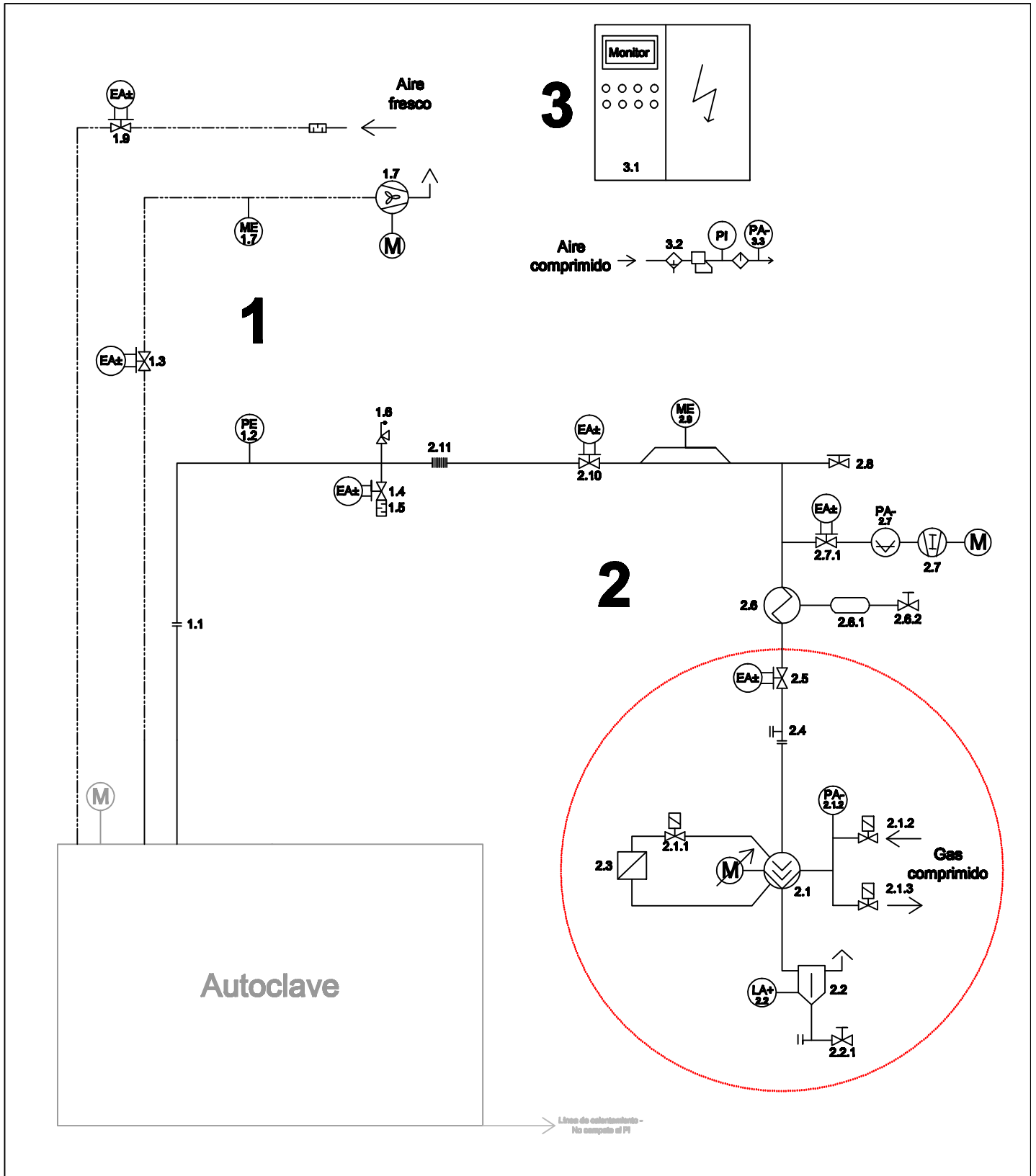


Figura 37: Listado de partes de a planta de secado propuesta.

LISTADO DE PARTES - UNIDAD DE BOMBEO DE VACÍO A TORNILLO EN EQUIPO DE AIRE CALIENTE SECO EXISTENTE	
SUBMONTAJE 1 - GENERAL	
1.1	Conexión por Brida
PE 1.2	Sensor de vacío
1.3	Válvula de aislamiento electro neumática
1.4	Válvula de aislamiento electro neumática para ingreso de aire al tanque de vacío
1.5	Silenciador
1.6	Válvula de seguridad para sobrepresión
1.7	Extractor de aire con capacidad mejorada
ME 1.7	Dispositivo de medición de humedad
1.9	Válvula de aislamiento electro neumática
SUBMONTAJE 2 - UNIDAD DE BOMBEO DE VACÍO	
2.1	Bomba seca a tornillo
2.1.1	Electroválvula para refrigerante
2.1.2	Electroválvula para aire comprimido - Entrada de gas
2.1.3	Electroválvula para aire comprimido - Escape de gas
PA 2.1.2	Conmutador de presión

2.2	Ciclón - Trampa de escape
LA+ 2.2	Sensor de nivel
2.2.1	Válvula de drenaje manual
2.3	Enfriador
2.4	Conexión por Brida
2.5	Válvula de aislamiento electro neumática
2.6	Intercambiador de calor
2.6.1	Tanque receptor del líquido condensado
2.6.2	Válvula de drenaje manual
2.7.1	<i>Válvula de aislamiento electro neumática</i>
PA 2.7	<i>Vacuoestato</i>
2.7	<i>Bomba roots (No incluida en este proyecto)</i>
2.8	válvula de admisión de aire con boquilla para conectar calibre de medición
ME 2.9	Medidor de la presión relativa del agua-vapor
2.10	Válvula de aislamiento electro neumática
2.11	Fuelle flexible
SUBMONTAJE 3 - CABINA DE CONTROL	

3.1	Cabina de control - Provista de una carcasa de chapa de acero (protección tipo IP43), interruptor principal, interruptores protectores del motor, contactores, fusibles y controlador lógico programable PLC (Siemens o Allen Bradley), cableado a la regleta de bornes
3.2	Equipo de aire comprimido que consta de controlador de presión y servicio de aire comprimido, con lubricador y separador de condensados
3.3	Interruptor de presión

La figura 37 incluye las tablas donde se indican los componentes que integran la planta de secado esquematizada en el flowsheet de la figura 36.

Funcionamiento del sistema de secado

En el diagrama de la figura 36 pueden visualizarse la cámara de secado, con sus respectivos equipos de medición para monitorear las condiciones de la atmósfera inducida dentro de la cuba, la planta de calentamiento, la de vacío y la cabina de control.

La simbología se adoptó de acuerdo a las normas alemanas DIN 1946, 2429 y 2481.

Este PI se limitó a la reingeniería de la planta de vacío, de la cual se desprende también la necesidad de una nueva cabina de control, provista de las condiciones requeridas para la automatización de muchos de sus accesorios, mediante el uso de un controlador lógico programable que interactúe de manera remota con las partes que componen al nuevo sistema. Se dividen las partes del diagrama en tres submontajes para simplificar la comprensión de cada uno:

Submontaje 1

Para empezar un ciclo de secado se debe primero garantizar una presión positiva (>1 bar) dentro de la cuba. Se abre la válvula 1.9 que permite el ingreso de aire seco a la cámara (o nitrógeno originalmente en estado líquido). De manera simultánea se abre la válvula 1.3 que libera el aire contenido dentro de la cuba impulsado por el extractor de aire 1.7; ME 1.7 es el sensor que medirá el punto de rocío de la masa de aire expulsada de manera tal que se aseguren condiciones ideales dentro del autoclave, esto es un ambiente seco y presión positiva. Luego se cierran ambas válvulas aislando el sistema de las condiciones atmosféricas.

El sensor PE 1.2 mide el vacío de la cámara de secado y la válvula 1.4 es responsable de mantenerla aislada de la unidad de bombeo de vacío, se complementa mediante la inclusión de un silenciador y una válvula de seguridad para el eventual caso de una sobrepresión.

Submontaje 2

La bomba a tornillo 2.1 posee integrado un separador ciclónico 2.2 que separa las partículas de agua del aceite evitando que se forme una emulsión, recirculando así el lubricante indefinidamente. LA 2.2 es un sensor de nivel de aceite, u “ojo de buey” y la válvula 2.2.1 necesaria para drenar manualmente el agua acumulada.

La refrigeración de la unidad se realiza circulando agua mediante el enfriador 2.3, se incluye una válvula para habilitar el uso del enfriador siempre que se considere necesario.

El conmutador de presión PA 2.1.2 comanda la apertura y cierre de las válvulas 2.1.2 y 2.1.3 inyectando y descargando aire desde la atmosfera a la bomba y viceversa, reduciendo la relación de compresión del vapor, evitando así la condensación del mismo. Esto es un gas ballast automático.

Hasta acá se mencionaron las partes que componen la unidad de bombeo adquirida en Hedrich, inmediatamente después se encuentra una brida 2.4 y válvula 2.5 que deberá permanecer cerrada en el eventual caso de alternar la unidad de bombeo por otra durante un proceso de secado.

El intercambiador de calor o condensador 2.6 reduce considerablemente la concentración de agua del aire entrante a la bomba desde la cámara del autoclave, el agua se deriva al vaso colector 2.6.1 que luego se descarga abriendo manualmente la válvula de drenaje 2.6.2.

Aunque este PI propone una planta de vacío sin bombas de diafragma se incluye la 2.7 a los efectos de una posible sustitución de la bomba a tornillo, situación que pueda ocurrir para realizar tareas de mantenimiento preventivo por nombrar un ejemplo. La válvula 2.7.1 permanecerá cerrada siempre que no sea necesario activar la bomba roots; El vacuoestado PA 2.7 garantiza que la bomba no entre en servicio hasta que no se logren las condiciones de alto vacío requeridas para su correcto funcionamiento (1mbar o menor).

La válvula de admisión de aire con boquilla 2.8 es un punto de control donde se conecta un vacuómetro tipo Pirani. ME 2.9 es el sensor que medirá la presión relativa del agua-vapor. Una última válvula 2.10 permite el cierre de todo el submontaje 2.

2.11 es un fuelle flexible que amortigua los esfuerzos mecánicos a los que se somete la cañería principal.

Medioambiental

Se enumeran a continuación los beneficios inmediatos para el ambiente, que se desprenden de la implementación de este proyecto:

1. Consumo de materias primas, materiales auxiliares e insumos

Se elimina completamente el consumo de aceite al cambiar la bomba mecánica por una a tornillos.

2. Consumo de energía, combustibles y agua

Al mejorar las condiciones de vacío, disminuye el ciclo de secado y con este el consumo eléctrico y de gas natural para el quemador de la caldera.

3. Gestión de residuos líquidos

Como el nuevo proceso a adoptar no consume aceite, no se genera Y09 (Emulsión de aceite y agua).

4. Toxicidad, peligrosidad y demás riesgos asociados a materiales

Eliminación del aceite de origen mineral, necesario en el proceso actual, que presenta cierto grado de toxicidad para el operario que lo manipula.

5. Contaminación atmosférica

Al acortar el ciclo de secado se disminuyen las horas de trabajo de la caldera, por lo cual disminuyen también las emisiones contaminantes derivadas de la combustión de gas natural.

6. Riesgos asociados a la actividad productiva

Se elimina el riesgo de derrame de grandes cantidades de aceite en el proceso productivo.

7. Gestión de residuos sólidos y semisólidos

Se elimina el uso de material absorbente para la limpieza de un eventual derrame de aceite. Además de papel absorbente, guantes, etc, que requieren de una gestión adecuada al desecharlos.

8. Contaminación de suelos

Esta innovación produce la no contaminación del suelo, ya que los materiales absorbentes y otros desechos sólidos propios del manejo del aceite derramado terminan siendo enterrados en predios para su futura degradación.

9. Generación de ruido

La bomba mecánica actual trabaja a unos 70 decibeles mientras que su reemplazo a tornillos genera una contaminación sonora notablemente menor

ANALISIS Y FACTIBILIDAD ECONOMICA-FINANCIERA

El mayor desafío de este proyecto es asumir una hipótesis realista para cuantificar la disminución en la duración del proceso de secado debido al logro de mejores valores de vacío, no obstante obteniendo la concentración de agua requerida en la celulosa de la parte activa del transformador, de acuerdo a los estándares exigidos por Siemens.

La duración total del proceso depende de las siguientes variables:

T: Temperatura dentro de la cuba [°C]
 P: Presión (Vacío) dentro de la cuba [mbar]
 K: Tipo y geometría de celulosa
 Te: Tensión del transformador [kva]
 Po: Potencia del transformador [Mva]

Entonces

t: Duración del proceso [h]

$t = f(T; P; K; Te; Po)$

Duración del proceso. Lead time

Figura 38: Cálculo de la duración del proceso de secado.

	Actual	Propuest o
Horas servicio línea de temperatura (>110°C) [Hs/Un]	48	48
Fórmula aproximada para determinar el tiempo de bombeo t	$t = KxV/S$	
K: Coeficiente de perdidas por conductancia. Debido al cambio de diámetro y/o dirección de las tuberías	9,2	
V: Volumen de la cámara [m³]	44	
S: Caudal de la bomba a la presión final requerida [m³/h]	360	740
Tiempo de bombeo para un recambio en la cámara del autoclave [Hs]	1,12	0,55

Horas servicio línea vacío (<0,2Mbar) + temperatura (>110°C) [Hs/Un]	95,6	47
Cantidad de recambios del volumen de aire y vapor en cámara del autoclave	85,4	
Lead time del proceso [Hs/Un]	143,6	95

Se desprecia la diferencia entre los tiempos necesarios para lograr el caudal a la presión final requerida entre las dos plantas comparadas. Se suponen similares.

$$^{11} V = txS/K$$

Esta es una fórmula utilizada por el fabricante de autoclaves chino, Hedrich Xiamen. Estima el volumen de aire desalojado en un determinado tiempo para un sistema de vacío, mediante el caudal a la presión de funcionamiento de la bomba y un coeficiente K de la misma.

¹¹ <http://www.hedrich.com/worldwide/hedrich-xiamen-china.html>

Energía eléctrica consumida

Figura 39: Cálculo de la energía eléctrica consumida por en un proceso de secado.

	Voltaje [380 V]	Actual			Propuesto		
		Equipo	Potencia [HP]	Uso [Hs]	Equipo	Potencia [HP]	Uso [Hs]
Línea de vacío	380	Motor Bomba Mecánica Pfeiffer	15	95,6	Motor Bomba a Tornillo Edwards	11,8	47
		Motor Bomba Roots 1	3		Motor Bomba Roots 1	-	
		Motor Bomba Roots 2	3		Motor Bomba Roots 2	-	
Línea de frío	380	Equipo de Frío	5	143,6	Equipo de Frío	5	95
		Motor Bomba de Agua	0,5		Motor Bomba de Agua	0,5	
		Ventilador	0,5		Ventilador	0,5	
Línea de calor	380	Motor Bomba 1	2	143,6	Motor Bomba 1	2	95
		Motor Bomba 2	2		Motor Bomba 2	2	
		Motor Bomba 3	3		Motor Bomba 3	3	

Figura 40: Cálculo del costo debido al consumo de energía en un proceso de secado.

	Actual	Propuesto
¹² Potencia Total de las líneas combinadas del sistema [HP]	34	24,8
Consumo Total para el secado de un trafo [Kw/Un]	5235,7	2418,4
Tarifa Epec [\$/Kw]	0,38	
Costo del consumo eléctrico por trafo [\$/Un]	1989,6	919
Ahorro [\$]	1070,6	

1 HP = 736 W = 0.74 kW
* Para Factor de Potencia de 0.8 - Trifásica

¹² Se toman valores potencia para la presión final de la bomba a tornillo, es decir sin considerar subas de potencia por eventuales sobrecargas.

Gas natural consumido

Figura 41: Cálculo del gas natural consumido en un proceso de secado y su correspondiente coste.

	Actual	Propuesto
Tiempo funcionamiento de caldera a gas [Hs] ¹³	114,9	76
Consumo del quemador [Kcal/H]	291,0	
Propiedades del gas [Kcal/M3]	9,3	
Consumo del quemador [M3/H]	31,3	
Consumo total del proceso [M3]	3596,4	2378,8
Tarifa de gas [U\$/M3] ¹⁴	0,2	
Costo en consumo de gas por trafo [\$/Un] ¹⁵	10789,2	7136,4
Ahorro [\$]	3652,8	

¹³ La caldera trabaja 80% la duración del servicio de la línea de calor para mantener la temperatura sobre los 110°C.

¹⁴ Se hace un promedio anual sin considerar las fluctuaciones estacionales (diferencia entre tarifa verano/invierno).

¹⁵ <http://themoneyconverter.com/ES/USD/ARS.aspx> - Se toma la conversión del día 01/07/2016: 1 dólar = 15 pesos.

Insumos (Aceite consumido)

Figura 42: Cálculo del aceite consumido en un proceso de secado y su correspondiente coste.

	Actual	Propuesto
Aceite nuevo por Trafo [L/Un]	500	0
Costo por litro [US\$/L]	1,5	
Costo por Trafo [\$/Un]	11250	0
Ahorro [\$]	11250	

Residuo sólido peligroso (Y09)

Figura 43: Cálculo del residuo Y09 resultante de un proceso de secado y los costes que conlleva.

	Actual	Propuesto
Y09 Emulsión aceite + Agua por Trafo [L/Un]	600	0
Costo tratamiento de residuos por litro [\$/L] ¹⁶	2	
Costo por Trafo [\$/Un]	1200	0
Ahorro [\$]	1200	

¹⁶ Costo por transporte y tratamiento de emulsiones de desechos de aceite más agua con Hidrocarburos – Sin considerar costos logísticos internos.

MOD empleada

Figura 44: Cálculo de la mano de obra empleada en un proceso de secado y su costo correspondiente.

	Actual	Propuesto
Lead time del proceso [Hs]	143,6	95
Ocupación del operario autoclavador [%]	100%	
Ocupación del supervisor [%]	33%	
MOD autoclavador empleada [HH]	143,6	95,0
MOD supervisor empleada [HH]	47,4	31,4
MOD total empleada [HH]	191,0	126,4
¹⁷ Costo total por hora hombre operario [\$/HH]	144	
Costo total por hora hombre supervisor [\$/HH]	175	
Costo de MOD por trazo [\$/Un]	28971,3	19166,25
Ahorro [\$]		

¹⁷ Datos extraídos del gestor documental de TTE: Los costos totales por hora hombre incluyen gastos por retenciones, aportes, comidas, licencias, etc.

Indicadores (Resumen de tablas anteriores)

Figura 44: Resumen de los consumos y emisiones mas significativos.

Valores tomados para el proceso de secado de un espécimen transformador de 40 MVA				
Indicador	Actual		Propuesto	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Consumo de energía eléctrica por trafo	5235,7	Kw/Un	2418,4	Kw/Un
Consumo de gas por trafo	3596,4	M3/Un	2378,8	M3/Un
Consumo de aceite por trafo	500	L/Un	0	L/Un
Generación de Y09 por trafo	600	L/Un	0	L/Un
MOD por trafo	191	HH/Un	126,4	HH/Un

Disminución del costo global

La capacidad productiva de TTE se mide sumando el total de MVA correspondientes a todos los transformadores de potencia fabricados en el periodo de un año.

La capacidad productiva equivalente queda entonces definida como 1920 MVA anuales.

Figura 45: Ahorros globales debidos a la implementación de la nueva planta de secado.

Ahorros para una capacidad productiva de 1920 MVA anuales [€]

Concepto	Por trafo [€]	¹⁸ Anual equivalente [€]
Energía eléctrica consumida	1070,6	51388,8
Gas consumido	3652,8	175334,4
Aceite consumido	11250	540000
Desechos de Y09 emitidos	1200	57600
MOD empleada	9805	470642
TOTAL	26978,4	1294965,2

¹⁸ Es una práctica común en la industria de la energía eléctrica evaluar la producción en términos del anual equivalente. En TTE el anual equivalente se aproxima a 1920 MVA.

CONCLUSIONES

Tecnológico

Con la exclusiva tecnología de la bomba de tornillo se garantiza una mejora del proceso de secado del transformador, tanto en eficiencia como efectividad, que permite el control avanzado de temperatura e intervalos prolongados de servicio. Garantiza las mejores velocidades de bombeo en su clase y reduce los costos de funcionamiento durante los próximos años.

Económico

De acuerdo a lo que muestran los cálculos realizados el costo de la fabricación de un transformador se disminuye en alrededor de \$ 27.000; mientras que el ahorro anual resulta en alrededor de \$ 1.300.000. (Figura 45).

Medioambiental

Los beneficios para el medioambiente se resumen en una considerable disminución del consumo eléctrico y de gas natural.

Se elimina por completo la generación del residuo Y09 y los riesgos que implica su disposición.

Prescindir del uso de aceite evita diversos riesgos que conlleva el mismo.

También la contaminación sonora resulta notablemente menor.

Apreciaciones personales

Una consecuencia fundamental de este proyecto es la notable disminución de costos que actualmente generan los insumos necesarios y el manejo y disposición de los residuos. A esto se le agrega la ganancia por las mejoras en eficiencia y rendimiento que se logrará con la tecnología aplicada al nuevo proceso.

Durante el desarrollo del PI se justificó la inversión económica para la implementación de este proyecto en TTE a través de la reducción en el consumo de los siguientes insumos: Energía (Eléctrica y por combustión de gas natural); Aceite mineral; Mano de obra directa empleada y tratamiento de residuos tóxicos generados.

El fabricante de instrumentos para ensayos eléctricos Megger lanzó al mercado un instrumento llamado Idax que mide la humedad en aislamientos sólidos mediante la combinación de ensayos de tangente delta a distintas temperaturas (0°C, 20°C, 40°C) de referencia, un amplio rango de frecuencias (De 1mH hasta 1kH), auto correctores en función de curvas características que se asimilen las medidas y la aplicación de un logaritmo . Idax permite registrar y transmitir la concentración de agua contenida en la celulosa simultáneamente al proceso de secado en autoclave.

Esta tecnología es muy reciente pero ya fue aplicada con éxito en ABB Noruega, Suecia y Suiza.

Este registro permitiría entregar registros mas detallados del proceso de fabricación al cliente y facilitar futuros servicios técnicos, entre muchas otras aplicaciones posibles.

ANEXO

Instructivo para el uso del autoclave

La empresa cuenta con un sistema de calidad unificado en una intranet que contiene diversos documentos destinados a estandarizar las operaciones llevadas a cabo. El documento destinado principalmente a los operarios “autoclavadistas”, establece instrucciones para la correcta operación del autoclave en los procesos de secado de parte activa para transformadores de potencia.

Algunas de las acciones definidas en el instructivo:

- Supervisor montaje - Debe completar planilla de seguimiento de producción; indicando horno (Autoclave), datos de la parte activa a tratar, temperatura, tiempos del proceso. Entregar planilla a operador de autoclave.
- Operador Autoclave - Colocar Parte activa dentro del autoclave, tratando de que la misma se ubique equidistante a los laterales del horno.
- Operador Autoclave - Colocar sondas termométricas (tres).
 1. N°1 en núcleo.
 2. N°2 en ambiente de la cámara de secado.
 3. N°3 en bobina.Se verifica el correcto funcionamiento de las sondas acercando una llama al instrumento. El controlador de temperatura se ajusta de modo que el canal N°2 ambiente corte a 110°C
- Personal laboratorio eléctrico - Realizar conexionado de las bornas pasatapa para medición de factor de pérdidas cuando sea requerido. Este control Tangente Delta se detalla en un instructivo distinto.
- Operador Autoclave – Cerrar tapa del autoclave. Conectar tubo de salida, abrir válvula de escape de gases y encender extractor. Conectar el equipo de aire y abrir la válvula de ingreso al autoclave.
- Operador Autoclave – Encender la bomba de circulación de aceite y la caldera. Los termostatos que controlan la caldera en ningún caso deberán regularse por encima de los 150°C. Durante todo el proceso deben controlarse los indicadores de presión y temperatura en la caldera, no pudiendo superarse 0,8kg/cm² y 160°C respectivamente. A temperatura normal de funcionamiento, el nivel de fluido térmico se debe ubicar aproximadamente a la mitad del tanque de expansión.

- Operador Autoclave – Controlar y asentar en planilla la temperatura indicada en las tres sondas cada hora. El tiempo de calentamiento solicitado empieza a contarse desde que las tres sondas alcanzan los 80°C. Si en algún momento una desciende por debajo de esta temperatura se suspende la cuenta del tiempo hasta restituirse.
- Operador Autoclave - Encender la bomba de vacío aproximadamente media hora antes de finalizar el tiempo previsto de calentamiento, manteniendo cerradas las válvulas que conectan al interior del autoclave.
- Purgar condensador. Encender sistema de refrigeración de la bomba y el equipo de frío de los condensadores. Verificar rendimiento a válvulas cerradas, debe lograrse un vacío menor a 4 milibares.
- Operador Autoclave – Hermetizar autoclave. Cerrar ingreso de aire seco, cerrar válvula de salida de gases y apagar extractor. Ajustar tapa mediante pernos hasta que se asiente bien sobre el marco del horno.
- Operador Autoclave – Iniciar tratamiento con vacío abriendo válvula de salida de la bomba seca. Si se normaliza el valor de vacío no hay pérdidas en la bomba y se abre la válvula que comunica el circuito de vacío con el interior del autoclave.
- Operador Autoclave – Realizar seguimiento del proceso, controlando temperatura indicada por sondas. Reajustar los pernos de cierre de la tapa del autoclave.
- Operador Autoclave – En ciertas ocasiones será beneficioso realizar un seguimiento del factor de pérdidas. Para esto se conectan los distintos arrollamientos a borneras pasa tapas. Al iniciar la etapa de vacío se realiza la primera medición de tangente delta repitiéndose cada 4 horas. Cuando la variación de los valores medidos es menor o igual al 0,5% se considera que la parte activa está seca.
- Operador Autoclave – Para finalizar el tratamiento de secado deben cumplirse todas las siguientes condiciones:
 1. Cumplir el mínimo de horas de vacío indicadas en tabla de tiempos mínimos de calentamiento y vacío.
 2. Alcanzar un valor de vacío de 0,5 milibares.
 3. En el caso que se haya realizado el seguimiento de medición del factor de pérdidas debe cumplirse el criterio de aprobación y rechazo indicado en la indicación correspondiente por el cliente.

Alcanzadas estas condiciones apagar la caldera, la bomba de circulación de aceite, las bombas de vacío y el sistema de enfriamiento.

Romper el vacío mediante el ingreso controlado de aire seco caliente en el interior del autoclave hasta eliminar la diferencia de presiones interior/externo, o utilizar nitrógeno seco.

Quitar pernos de la tapa, abrir el autoclave, desconectar las sondas termométricas y las conexiones para medición de factor de potencia y retirar parte activa del horno.

- Operador Autoclave – Cumplir con aspectos ambientales de acuerdo a documentos correspondientes a la contención y remediación de derrames, así como también a la gestión de residuos).

Depurado en tareas del operario autoclavadista

Debido a los cambios planteados en este PI se disminuyen recursos de mano de obra directa inherentes a ciertas acciones del proceso de secado.

A los fines prácticos de poder dimensionar las horas hombre que demandan estas tareas se realizó un sondeo con los mismos autoclavadistas.

Se estiman los siguientes valores:

- Una vez encendida y caliente la bomba verificar estado del aceite, completar nivel o reemplazar si hay emulsión con agua. *Tres horas considerando un promedio de 6 cambios de aceite.*
- Controlar estado del aceite de la bomba de vacío. Purgar los condensadores siempre que se reemplace el aceite emulsionado de la bomba. *Una hora para el mismo promedio de 6 purgas del condensador.*
- Conectar la segunda etapa de vacío (Bombas Roots) cuando se alcance un vacío menor a 8milibares. Cerrar la válvula By Pass y abrir la válvula de entrada de las bombas Roots. Verificar que la temperatura en las Roots no supere los 80°C. *Una hora entre encendido y controles de temperatura periódicos.*

19

¹⁹ Estos valores no incluyen el tiempo consumido en el manejo de aceite y los eventuales operativos derivados a los derrames de aceite.