

**DISEÑO MECATRÓNICO DE LA UNIDAD DE CALENTAMIENTO
CONTROLADO PARA UN HORNO DE PREFORMAS PLÁSTICAS**

**D. I. CESAR AUGUSTO RINCÓN SILVA
I. M. MIGUEL ÁNGEL REYES O.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

**DISEÑO MECATRÓNICO DE LA UNIDAD DE CALENTAMIENTO
CONTROLADO PARA UN HORNO DE PREFORMAS PLÁSTICAS**

**D. I. CESAR AUGUSTO RINCÓN SILVA
I. M. MIGUEL ÁNGEL REYES O.**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Ingeniería Mecatrónica**

**Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

DEDICATORIA

A Dios,
A mi esposa y mi hijo,
A mis padres.

DEDICATORIA

A Dios,

A mi esposa, con todo mi amor,

A mis hijos,

A mis padres (q.p.d.)

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. MARCO CONCEPTUAL	7
2.1 ESTADO ACTUAL	7
2.2 ESTADO DEL ARTE	9
2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.3.1. Proceso de transformación del plástico y conformado de envases	11
2.3.2 Análisis de sistemas térmicos	20
3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	24
3.1 SISTEMAS MECATRONICOS	24
3.2. CONSIDERACIONES DE FABRICACION	25
3.2.1. Materiales	25
3.2.2. Normalización y estandarización de componentes	29
3.2.3. Mecanismos y sistemas de sujeción	29
3.2.4. Determinación de variables del proceso	30
3.2.5. Componentes, elementos de mando y señalización	31

3.3. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	38
3.3.1. Requerimientos técnicos-productivos para el diseño	38
3.3.2. Requerimientos formales	39
4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN	41
4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA EN EL PROCESO.	41
4.2. PLANTEAMIENTOS DE ALTERNATIVAS.	45
4.2.1. Evaluación de alternativas (ventajas y desventajas)	46
4.2.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.	46
4.2.3. PROPUESTA DE DISEÑO MECATRÓNICO	47
4.3. COMPONENTES.	51
4.3.1. Generación de calor	51
4.3.2. Captura de datos.	47
4.3.3 Interfaz hombre - maquina	55
4.4. MANTENIMIENTO	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Comparación de componentes para el calentamiento de probetas.	33
Cuadro 2. Diversos transductores de temperatura.	34
Cuadro 3. Comparación sensores	35
Cuadro 4. Análisis de alternativas.	46
Cuadro 5. Tipos de termocuplas	54
Cuadro 6. Tiempos dados en minutos para algunas operaciones de mantenimiento.	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Envase plástico (estirado – soplado) preformas y materia prima	1
Figura 2. Fases del proceso de estirado – soplado	2
Figura 3. Proceso completo línea de producción envases.	4
Figura 4. Esquema Horno lineal de resistencias.	8
Figura 5. Horno lineal de resistencias comercial.	8
Figura 6. Trenes de transporte convencionales de última tecnología	11
Figura 7. Preforma inyectada – envases soplador	12
Figura 8. Proceso de inyección	13
Figura 9. Proceso de extrusión – soplado	14
Figura 10. Proceso de inyección – soplado	14
Figura 11. Proceso de estirado – soplado	15
Figura 12. Partes de la preforma	16
Figura 13. Estado termoplásticos amorfos	19
Figura 14. Ejemplo estados termoplásticos amorfos	19
Figura 15. Conducción a través de un cilindro	23
Figura 16. Esquema de diseño mecatrónico	24

Figura 17. Resistencias comerciales	32
Figura 18. Esquema controlador	36
Figura 19. Esquema de un diseño mecatrónico	47
Figura 20. Esquema propuesta de diseño Mecatrónico unidad de calentamiento	48
Figura 21. Esquema Calentamiento de las preformas	49
Figura 22. Esquema Sistema de sujeción y rotación de las preformas	50
Figura 23. Esquema Distribución de temperaturas.	50
Figura 24. Lámparas halógenas de cuarzo.	52
Figura 25. Panel de calentamiento y sistema de fijación y regulación lámparas halógenas	52
Figura 26. Ubicación elementos de captura de datos – propuesta diseño	53
Figura 27. Ubicación sensores	54
Figura 28. Panel operador	55
Figura 29. Diagramas de uso para mantenimiento de modulo de calentamiento – diseño propuesto	56

GLOSARIO

- **CUERPO NEGRO:** es aquel que tiene la capacidad de absorber toda la energía radiante que incide sobre él, independientemente de la fuente, la longitud de onda, la dirección. A su vez tal cuerpo emite un máximo de energía para una temperatura y longitudes de onda dadas.

- **EMISIVIDAD:** las sustancias reales y sus superficies difieren en cierto rango de proporción a las leyes que rigen a los cuerpos negros descritos por s-b y Plank, pues según mediciones experimentales estas absorben y emiten menor cantidad de energía radiante que un cuerpo negro. Esta diferencia correspondía a cierto valor llamado emitancia o conocido también como emisividad hemisférica, la cual es función de la temperatura y de las condiciones superficiales del cuerpo. También es aceptado que el valor de esta es la relación que hay entre la energía del cuerpo / la energía del cuerpo negro a las mismas condiciones.

NORMALIZACIÓN: uniformidad o unificación de dimensiones, tolerancias, ensayos y especificaciones técnicas de los productos o piezas mecánicas

PANEL: marco estructural que se utiliza para contener otros componentes, además de cumplir la función de protección de los mismos

- **STEFAN-BOLTZMANN:** es la rapidez con la cual la energía es radiada por unidad de área desde un cuerpo negro es proporcional la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO MECATRÓNICO DE LA UNIDAD DE CALENTAMIENTO CONTROLADO EN UN HORNO PARA PREFORMAS PLÁSTICAS *

AUTORES:

D. I. Cesar Augusto Rincón Silva
I. M. Miguel Ángel Reyes O.**

PALABRAS CLAVES:

Preformas, Horno, Convección, Control, Mecatrónica.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es el de mejorar el proceso de fabricación de envases plásticos en una empresa local, mediante la optimización de la etapa de calentamiento de las preformas que se utilizan en envases para líquidos.

Para dar solución a este problema se estudio el equipo actualmente construido y se propuso el cambio de una parte de la tecnología implementada, la cual no permitía un rápido y efectivo mantenimiento, principalmente en el recambio de componentes averiados. Igualmente se propuso el uso de un control automático adecuado, con el fin de controlar la temperatura en el modulo de calentamiento, logrando de esta forma que las preformas con defectos por calentamiento inadecuado sean mínimas, para disminuir el tiempo utilizado en la detección de las fallas y el tiempo para el mantenimiento correctivo.

La unidad (cámara) de calentamiento propuesta esta basada en un diseño mecatrónico que combina desde la fase inicial los conceptos mecánicos, electrónicos y de software, lo cual permite considerar las diferentes posibilidades de construcción, así como una adecuada distribución de componentes, sin la necesidad previa de un prototipo. En general la propuesta esta basada en un diseño modular, que facilita el mantenimiento y que permite ahorrar energía, con lo cual disminuirán los rechazos de preformas dañadas, mejorando la productividad y minimizando la intervención del operador.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Omar Gálvez Arocha

SUMMARY

TITLE:

DESIGN MECATRONICO OF THE UNID CONTROLLED HEATING IN AN OVEN FOR YOU PREFORM PLASTIC *

AUTHORS:

D. I. Cesar Augusto Rincón Silva

I. M. Miguel Ángel Reyes O.**

KEY WORDS:

Heat Transfer, Conduction, Convection, Radiation.

DESCRIPTION:

The objective of this project is the one to improve the process of manufacture of plastic packages in a local company, by means of the optimization of the stage of heating of the performs that are used in packages for liquids.

In order to give to solution to this problem study the equipment at the moment constructed and was applied the change of a part of the implemented technology, which did not allow to an express and effective maintenance, mainly in the replacement of damaged components. Also it intended the use of a suitable automatic control, with the purpose of controlling the temperature in the heating module, obtaining of this form that the performs with defects by inadequate heating are minimum, to diminish the time used in the detection of the faults and the time for the corrective maintenance.

The unit (camera) of heating proposed has a mecatronic design that combines from the initial phase the mechanical, electronic concepts and a lot of software, which allows considering the different ones construction possibilities, as well as a suitable distribution of components, without the previous necessity of a prototype. In general the proposal is based in a modular design, that it facilitates the maintenance and that allows to save energy, with which the rejections will diminish by damaged performs, improving the productivity and diminishing the intervention of the operator.

* Degree Work.

** Facultad de Engineering Physical-Mechanical, School of Mechanical Engineering Ing. Omar Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

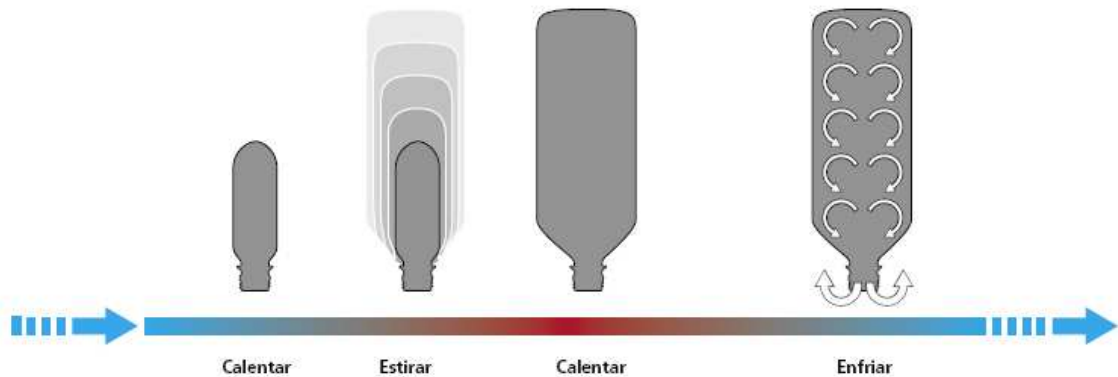
Este trabajo monográfico va orientado a satisfacer una necesidad de productividad, para una empresa local de plásticos, que fabrica envases en materiales poliméricos como; PVC, PP, PET, como producto final (contenedor o envase) para proveer otras industrias como por ejemplo: aceites de cocina, lubricantes o desinfectantes. La mayoría de este tipo de empresa posee generalmente tres líneas de producción, una para la fabricación de envases por soplado convencional, otra compuesta por inyectoras para la fabricación de preformas o tapas y una tercera línea de estirado soplado, con sopladoras manuales y hornos de resistencias para el calentamiento de las preformas. En la fig. 1 se observa los estados o fases del producto: materia prima granular, preforma y envase final.

Figura 1. Envase plástico (estirado - soplado) preformas y materia prima



En el ámbito de la fabricación de cuerpos huecos o contenedores, se presentan problemas casi inevitables, para la aplicación de la técnica de inyección de plásticos. Por ello, fuera de la técnica de moldeo rotacional, que resulta lenta para la producción de las grandes cantidades, necesarias para la fabricación de envases y otros productos similares, solicitados actualmente por el mercado nacional, se ha acudido a tecnologías multi - fase, en las que se fabrica primero un material tubular (preforma o primera forma) mediante el proceso de inyección y luego se modifica su cuerpo a través de la aplicación de temperatura sobre su superficie; para mediante la inyección de aire por una boquilla, en un molde hueco, cerrado y frío, se solidifique el plástico en su forma definitiva al contacto con las paredes de dicho molde (ver figura 2)

Figura 2. Fases del proceso de estirado - soplado



En la industria local, en el proceso de inyección - estirado - soplado (IES) existe una etapa de calentamiento de las preformas por medio de resistencias, ubicadas a lo largo del tren de transporte; estas preformas son calentadas mediante la variación del voltaje de entrada a las resistencias, utilizando potenciómetros accionados por un operario quien visualiza la temperatura alcanzada mediante el registro tomado por medio de una termocupla.

Esta etapa requiere de una supervisión permanente, para evitar la inadecuada transferencia de calor a la preforma, lo que origina una temperatura inestable y solo superficial que ocasiona que esta presente fallas en su conformado durante el proceso de soplado y ocasione el rechazo del producto por no cumplir con las características técnicas requeridas.

Así pues, se planteará una propuesta diseño Mecatrónico de un panel de calentamiento controlado en un horno para preformas plásticas, que por medio de algún tipo de emisor de calor, permita distribuir adecuadamente la temperatura para las diferentes zonas de la preformas (cuello, cuerpo, base) bajo requerimientos técnicos ya establecidos para el proceso de estirado soplado, en la elaboración de envases y que dicha fase calentamiento del proceso sea regulado y controlado mediante un microcontrolador, eliminando la manipulación sobre dicho proceso, al igual que el volumen de rechazo de preformas defectuosas, este sistema debe contar con una estructura de montaje de ensamble modular y de sencillo mantenimiento

El desarrollo de este trabajo se basa en la solución de una necesidad en una industria local para uno de sus subprocesos. Es necesario entonces señalar que durante la observación, planteamiento y descripción de algunas de las fallas existentes en el diseño funcional de los equipos actualmente utilizados, surgieron varias alternativas de solución para lograr mejoras en el mismo, con el fin de obtener un diseño apropiado que permita realizar y controlar un calentamiento de las preformas ajustado a los requerimientos de producción.

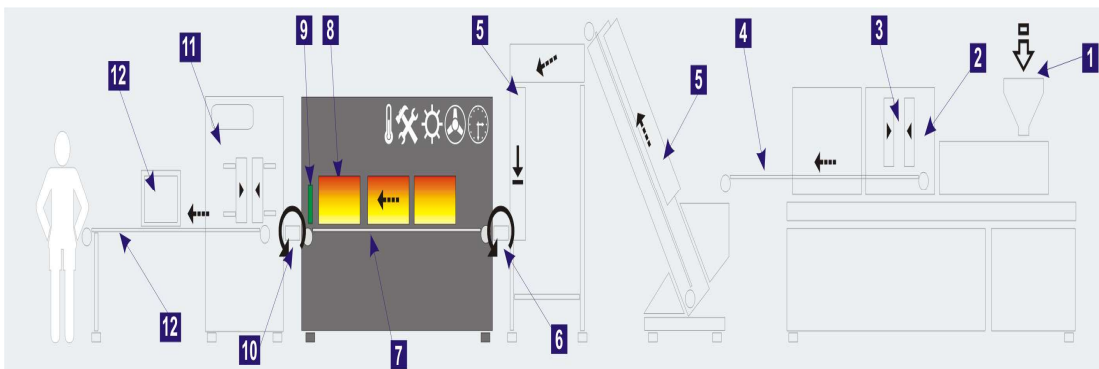
El control del calentamiento es un requisito indispensable para obtener un producto final de buena calidad, y que para asegurar esta calidad hay que lograr un adecuado balance entre la permanencia de las preformas en el

interior del horno y la productividad misma, realizando para ello mediciones permanentes que requieren a menudo maniobras que perturban el proceso, y por lo tanto no son representativas de las reales condiciones del horno durante la producción normal.

En la realidad actual, a menudo se prueba con un ajuste de los parámetros con que se controla el horno, y en la medida en que se obtienen resultados aceptables se adoptan esos parámetros como práctica convalidada por la experiencia. Para luego, si la potencia del horno lo permite, se intenta aumentar la productividad disminuyendo el tiempo de ciclo y compensando esta acción con un incremento de las temperaturas de zona. Si resulta que como consecuencia de esto la tasa de defectos aumenta demasiado, se vuelve a la práctica anterior, o se adopta un ajuste entre ambas.

Con este trabajo se quiere presentar una propuesta para una unidad de calentamiento de preformas, donde se aplique y los cambios tecnológicos que han mejorado los procesos de producción en este tipo de industria.

Figura 3. Proceso completo línea de producción envases.



1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proporcionar una solución a una industria local para el mejoramiento del proceso productivo de una línea de fabricación de envases plásticos, enfocándonos en el proceso de estirado-soplado, principalmente en su etapa de calentamiento de preformas, con el fin de disminuir el volumen de preformas rechazadas por un inadecuado control de temperatura, desarrollando una propuesta para esta etapa, mediante un panel de calentamiento controlado, basados en la aplicación de conceptos mecatrónicos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar un diseño Mecatrónico de un panel de calentamiento controlado para un horno de preformas plásticas, para a una industria local, que cumpla entre otros los siguientes aspectos:

- Presentar una propuesta de calentamiento de preformas que disminuya el consumo energético en por lo menos un 30 %, respecto del proceso utilizado en la actualidad por una empresa de plásticos de la ciudad.
- Desarrollar un modelo de panel de calentamiento que permita reducir en por lo menos un 50%, los tiempos de parada por mantenimiento para reparación y cambio del sistema de calentamiento de preformas, mediante un sistema modular que facilite el acceso a la zona emisora de calor y permita un rápido recambio de los componentes del mismo.

- Realizar una renovación y apropiación tecnológica adecuada, que mejore la operación general del equipo, el monitoreo de temperatura, la visualización de indicadores de operación, la detección oportuna de fallas, mejoramiento del sistema de transferencia de preformas, para disminuir en por lo menos un 50%, los rechazos de producto caliente (preformas a la salida del horno) por operación deficiente, los cuales en la actualidad están alrededor del 12% de la producción. (Dato suministrado por la empresa).

2. MARCO CONCEPTUAL

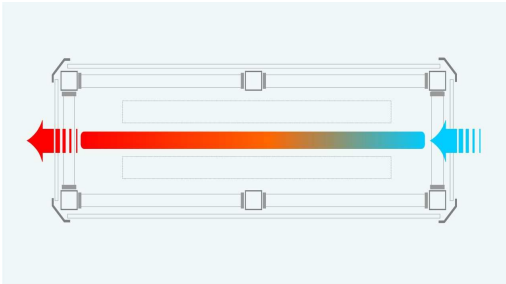
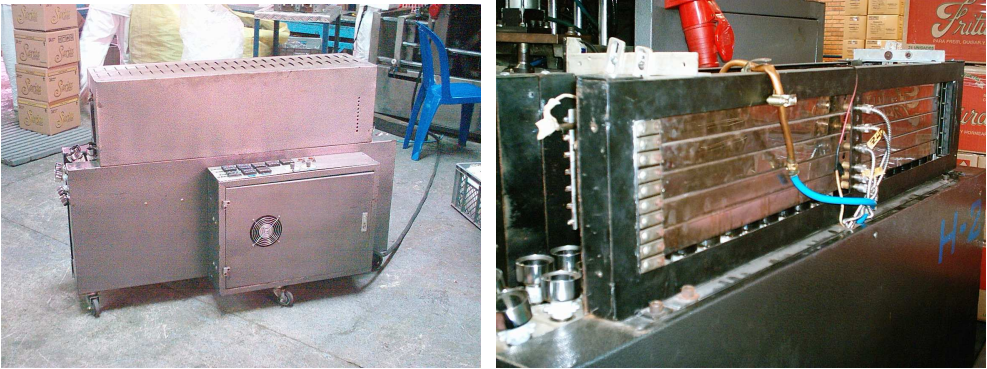
2.1 ESTADO ACTUAL

La empresa de plásticos, sobre la cual realizaremos esta experiencia monográfica tiene una capacidad total de producción que comprende un rango entre 400.000 - 600.000 envases por mes, en sus diferentes presentaciones, y cuenta con una planta de personal de 40 a 60 operarios. El mercado que atiende este tipo de empresa se extiende al área local y nacional, principalmente la zona norte del país. Existen algunos convenios de exportación de envase para la industria venezolana y otras de Centroamérica. Su ubicación esta en el área industrial de la zona metropolitana, donde aprovecha algunas ventajas logísticas y de comercialización propias de una zona industrial.

Uno de los métodos utilizados en el proceso de fabricación de envases es el de inyección - soplado de preformas (o proceso de dos etapas: una etapa es la inyección donde se elaboran las preformas y otra etapa es la de soplado de las mismas). En este proceso existe un subproceso que consiste en precalentar las preformas a unas condiciones especiales que permita su posterior soplado. Este precalentamiento es realizado en un horno.

En el caso que nos ocupa, este horno basa su proceso de calentamiento por medio de resistencias tubulares, ubicadas a los costados de un tren de conducción de preformas, las cuales se van calentando a su paso por el horno.

Figura 4. Esquema Horno lineal de resistencias.



Fuente: empresa analizada - autores

Figura 5. Horno lineal de resistencias comercial.



Fuente: Internet

Las principales fallas detectadas en esta operación son de diversa índole, entre las cuales se encuentran:

- Presenta una distribución de temperaturas no uniforme en la sección transversal de la preforma, lo cual genera permanentes rechazos de preformas en el proceso de soplado.
- El proceso de mantenimiento genera elevados tiempos muertos, debido a la difícil localización de la falla y el tiempo requerido para el enfriamiento de las resistencias para el cambio de las mismas.
- El consumo de energía es muy elevado debido al encendido innecesario de resistencia para el calentamiento de algunas preformas de pequeño tamaño.
- El control del proceso de calentamiento es básicamente manual, donde el operario de la maquina registra, modifica, ajusta los parámetros, etc. permanentemente.

2.2 ESTADO DEL ARTE

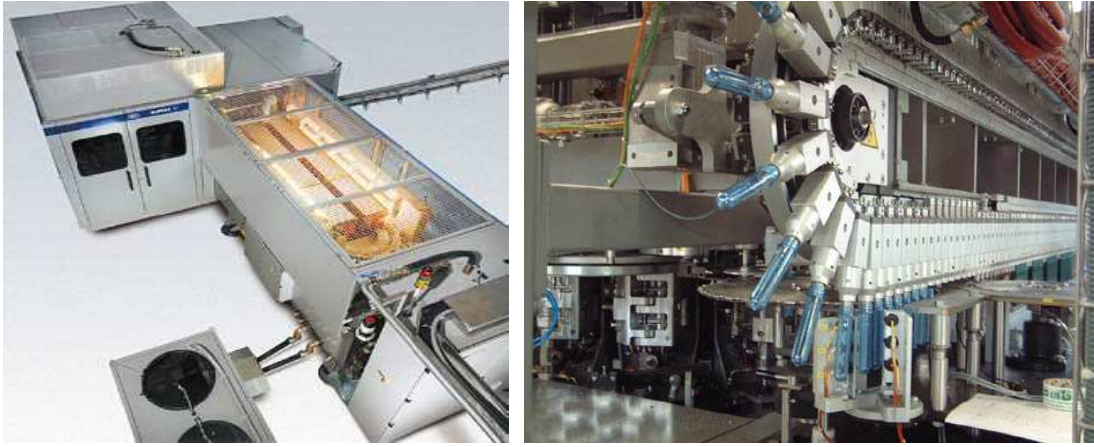
En la actualidad el uso de productos poliméricos en la industria de envases para bebidas y otros productos, esta permitiendo el desarrollo de empresas especializadas en el campo de la fabricación de maquinaria y equipos para el ramo. Se encuentran algunas de renombre como SIG CORPOPLAST GMBH & CO; KRONES AG. ; GRUPO SIDEL; HIGA SOPLADORAS ARGENTINAS S.A. entre otras.

Se manejan algunos conceptos tecnológicos que difieren de los utilizados en la empresa local.

- El sistema de calentamiento por resistencias hace algunos años dejó de utilizarse, y en su lugar se hace uso de tecnología de radiación lumínica infrarroja, como lámparas halógenas.
- Se hizo más práctico el desarrollo de sistemas integrales de procesamiento, donde se incorpora una etapa de preformado, una etapa de calentamiento y una etapa de soplado en un mismo equipo constructivo. Lo cual plantea que las industrias de plástico con sistemas independientes deberán tender hacia esta modalidad.
- Diferentes modalidades de movilización y transferencia de preformas entre las diferentes etapas del proceso, tanto en forma de rotación longitudinal como rotación transversal, en forma independiente y/o combinada.
- Utilización de tecnología de punta en control de parámetros como la temperatura, la velocidad de operación, entre otros.
- Versatilidad en los equipos que permiten manejar diferentes tamaños de preformas con solo unos pequeños cambios en la línea de transferencia.

Parte de estas mejoras en el proceso se pueden apreciar en la figura 6 donde se ve los trenes de transporte de preformas y las diferentes configuraciones de los mismos.

Figura 6. Trenes de transporte convencionales de ultima tecnología fuente:



Internet - www.sidel.com

2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.3.1 Proceso de transformación del plástico y conformado de envases. Los procesos de transformación de los plásticos se basan principalmente en la producción de piezas inyectas, sopladas o deformadas por temperatura. Normalmente no se necesita ningún tipo de acabado o mecanizado posterior. Los procedimientos posibles de transformación dependen del tipo de plástico, ya sea termoplástico, termoestable o elastómero.

En esta propuesta de diseño mecatrónico se requiere intervenir en una de las etapas del proceso de fabricación de envases, por medio del control de la temperatura de exposición para el calentamiento zonal de la preforma para el posterior soplado de envase, dicha preforma es un producto de primera forma, es decir que resulta del primer moldeo de pieza (proceso de inyección) a partir de materia prima en forma granular.

Figura 7. Preforma inyectada – envases soplados

especificaciones	preforma	envase	preforma	envase	preforma	envase
materia	PP		PP		PET	
peso	10,5 gr.		23,5 gr.		60 gr.	
altura total	100 mm		100 mm		100 mm	
altura cuello / anillo	21 mm		21 mm		21 mm	
diámetro exterior cuerpo	25,7 mm		30,95 mm		26 mm	
diámetro interior preforma	23 mm		21,7 mm		29,7 mm	
diámetro anillo soporte	32,8 mm		32,7 mm		32,7 mm	
espesor pared	1,5 mm		4,9 mm		4,25 mm	
tipo cuello	PCO		PCO		PCO	
rosca	28 mm		28 mm		28 mm	
capacidad	250 c.c.		500 c.c.		3000 c.c.	

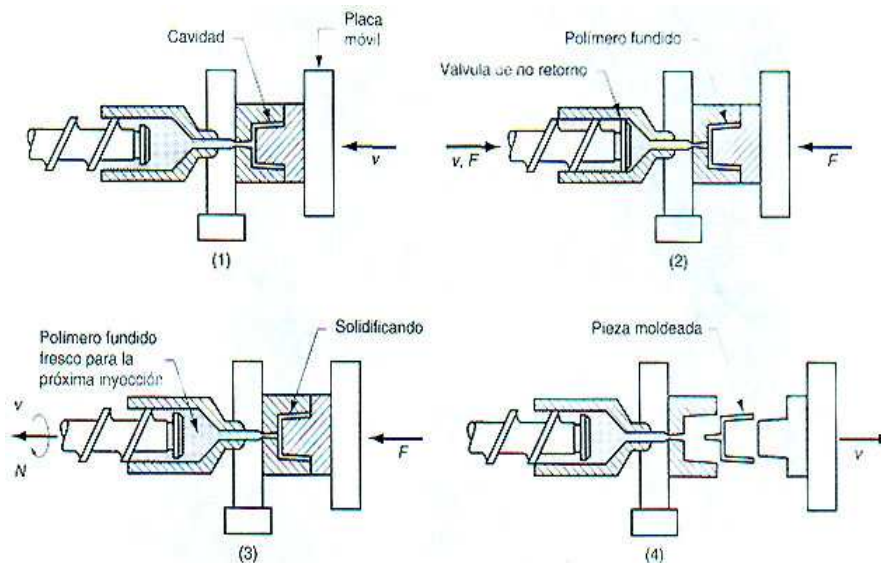
La primera forma de un termoplástico se consigue por procesos de moldeo físicos (reversibles), en ellos, el material normalmente granulado, se funde, se moldea y después se enfría; este es el caso de la preforma, una vez terminada de conformar debe pasar por una fase de calentamiento para luego realizar el proceso de estirado soplado. A continuación se dará una breve descripción de estos procesos.

El plástico es un material que cuando se calienta a temperaturas y tiempos adecuados se ablanda y puede adoptar diferentes formas. Al enfriarse recobra su rigidez y conserva la forma que se le ha dado. Los costos de equipos y moldes son relativamente bajos y se pueden obtener formas bidimensionales y tridimensionales por medio de una amplia variedad de procesos productivos.

Termo conformado. Es un proceso de moldeo por vacío, doblado y plegado a temperaturas cercanas al intervalo de fusión de las cristalitas. Deformando el material por medio de la acción de aire comprimido.

Inyección. Consta de tres fases inyección, enfriamiento - plastificación y desmoldeo. El material termoplástico es suministrado o dosificado en forma de gránulos, este se funde en una cámara de calentamiento, una vez fundido y homogeneizado es inyectado por medio de un husillo que hace pasar el material a través de una boquilla hasta la cavidad del molde, luego el material copia la forma de la cavidad, se plastifica y posteriormente es expulsado después de enfriarse.

Figura 8. Proceso de inyección.



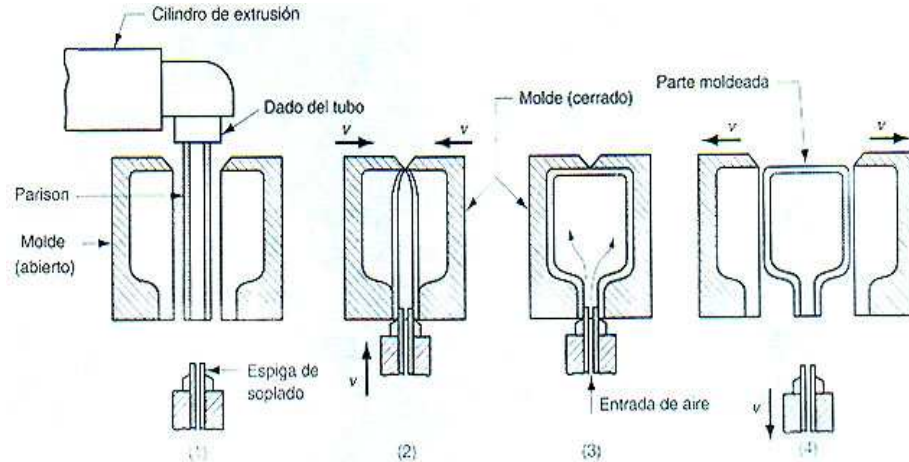
Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

Extrusión-soplado. Este proceso es complementario, pues los dos como tal existen por separado, es decir, solo Extrusión cuyo producto final es un perfil; O el soplado que parte de un producto prefabricado, el cual se calienta y luego se sopla, el producto final es un cuerpo hueco.

En el proceso de Extrusión soplado el material extruido en forma tubular (de diversos espesores según la boquilla utilizada) es atrapado por las paredes

del molde antes que se plastifique y por medio de una aguja se le inyecta aire a alta presión para que conforme el producto hueco según la forma de la cavidad del molde.

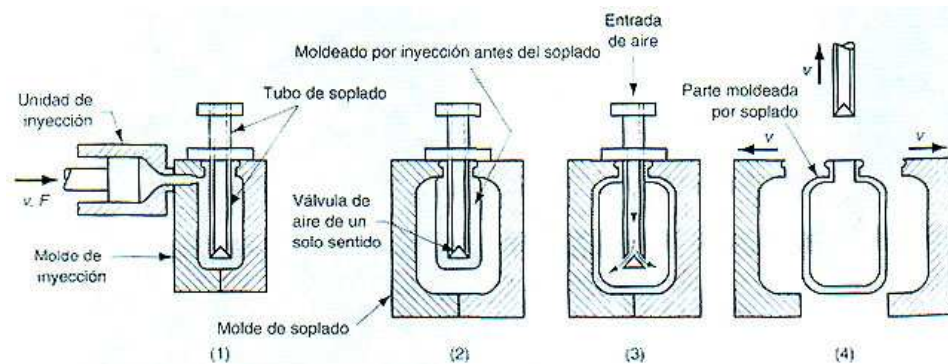
Figura 9. Proceso de extrusión - soplado



Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

Inyección-soplado. El proceso es muy similar al de Extrusión - soplado, en este caso se produce una preforma por inyección en un primer molde, posteriormente pasa a un segundo molde donde se sopla y se convierte en un cuerpo hueco.

Figura 10. Proceso de inyección - soplado

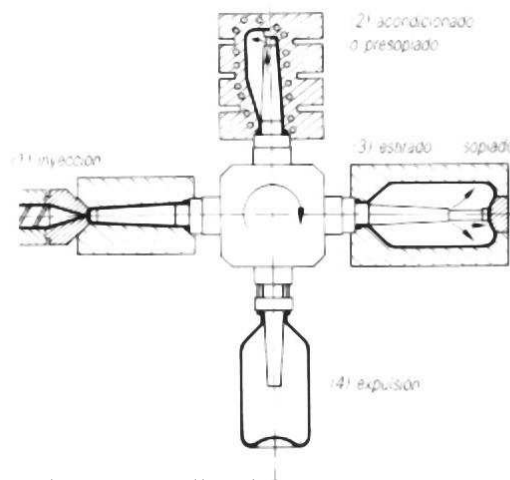


Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

Estirado-soplado. Este proceso parte de una pieza ya prefabricada, la preforma, ya plastificada y terminada como producto de primera forma, en este proceso dicha preforma es calentada a cierta temperatura en un horno y luego pasa a una estación de soplado donde una aguja o vástago la estira en el interior de un molde y posteriormente es soplada para que forme el cuerpo hueco según la cavidad.

Es importante destacar que en este proceso no existe retal o material residual del proceso por lo cual se convierte en económico y de mayor índice de productividad, por lo cual es de interés mejorar las condiciones de control de temperatura del horno para un óptimo soplado de la preforma, mediante una propuesta de diseño mecatrónico.

Figura 11. Proceso de estirado - soplado



Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

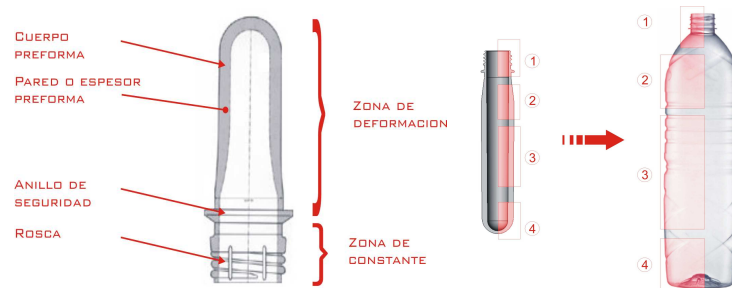
El proceso de inyección - estirado - soplado nació para dar una respuesta optima para la manufactura de envases para líquidos en materiales transparentes. Por sus características físicas, mecánicas, organolépticas el PET y el PP son los materiales más adecuados, para los cuales es preciso establecer

un proceso con una alta rapidez de transformación y enfriamiento. Para este efecto, se desarrolló un proceso en el que se producen las preformas con espesores de pared variables controlados, moldeadas por inyección.

En una segunda fase, la preforma llega a una zona de calefacción, luego es estirada de forma también controlada y dando paso finalmente por medio de una aguja o boquilla al aire para que al contacto con las paredes frías del molde, endurezca la película del envase de modo casi instantáneo. Los moldes de preforma se fabrican con cavidades múltiples. El producto final de PET tiene un costo algo mayor que los productos de inyección o extrusión soplados en PP.

Las preformas se inyectan cíclicamente sobre el mandríl con un cuello formado con precisión y un cuerpo con espesor de pared variable que depende de la cavidad de cada una de las mitades del molde, aquí se dispone de una estación de acondicionamiento para el estirado biaxial; generalmente una banda transportadora traslada las preformas desde la inyectora hasta la unidad de almacenaje, alimentación, orientación y carga de las mismas, por ultimo el envase ya conformado es llevado por una banda transportadora hasta la unidad de estanqueidad donde se realizan pruebas de calidad para dar fin el proceso.

Figura 12. Partes de la preforma



Comportamiento mecánico y térmico de los plásticos. Las propiedades fundamentales de los plásticos pueden deducirse de su estructura interna. Ya que en esta propuesta de diseño mecatrónico solo se trataran las Poliolefinas, que son termoplásticos semicristalinos y los Poliésteres lineales, se expondrá a continuación las diferentes peculiaridades del comportamiento mecánico y térmico de estos plásticos, información importante para entender el comportamiento de la preforma bajo condiciones de temperatura y deformación y a su vez conocer sus diferentes propiedades técnicas. En general los termoplásticos de constitución semicristalina son opacos y lechosos en sus fragmentos cristalinos; se dejan moldear fácilmente a temperaturas no muy elevadas, por lo cual su estabilidad al calor es limitada; son elementos aislantes, malos conductores de calor y electricidad; su densidad es comparativamente mas baja que la de otros materiales; su resistencia química es muy buena, pues no precisan de protección superficial especial; pueden ser reforzados y tinturados.

Comportamiento mecánico. La constitución de los plásticos y la índole de las fuerzas de unión (enlaces), explica que tengan una estructura menos compacta (estructura molecular) que la presentada por los metales (estructura atómica), de ahí que estos sean de una resistencia mecánica menor, modulo de rigidez menor, presentando una marcada dependencia de la temperatura y gran sensibilidad al impacto. Algunos termoplásticos como el PP, el PE y los Poliésteres lineales como el PET, pueden someterse a estirado, con lo cual las moléculas o zonas cristalinas se orientan en la dirección del estirado, la gran robustez del enlace de valencias se deja notar en este fenómeno, que se manifiesta en una excelente resistencia en la dirección del estirado.

El comportamiento mecánico de los materiales poliméricos depende en forma muy especial de la temperatura y de la duración de los esfuerzos estáticos o la frecuencia de los dinámicos. En la teoría del comportamiento visco elástico se describen los procesos de modificación de las materias poliméricas en la que participan las deformaciones forzadas de las macromoléculas y su deslizamiento mutuo, como superposición de las modificaciones de cuerpos de Hook actúa como resortes y de la fluidez viscosa del líquido newtoniano que actúa como amortiguador. Resortes y amortiguadores actúan conjuntamente como si estuvieran conectados.

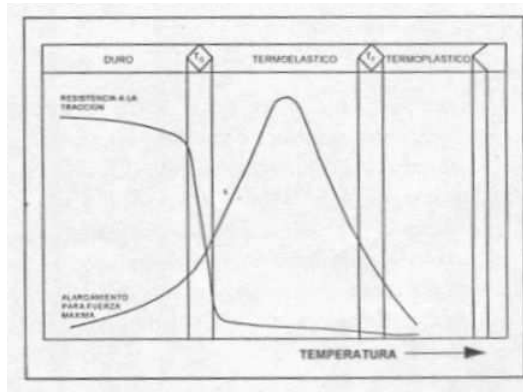
Al aumentar la temperatura se hacen menos rígidos los resortes, y los líquidos amortiguadores menos viscosos. Al aumentar el tiempo de actuación de una tensión produce el mismo efecto que el aumento de temperatura. Presentan altos valores de resistencia sobre un intervalo de temperaturas considerables por una parte los polímeros de alta flexibilidad como el PVC, y por otra parte los plásticos rígidos armados mediante insertos reforzantes. Actualmente se dispone de diagramas de líneas de alargamiento y de tensión en función del tiempo para todos los plásticos utilizables en construcción y en todo el intervalo de temperaturas de aplicación.

Comportamiento térmico. Los termoplásticos se vuelven quebradizos a bajas temperaturas, si la temperatura aumenta, se produce inicialmente un descenso constante en el módulo de elasticidad (disminución de la rigidez). Los termoplásticos semicristalinos poseen en el intervalo de temperaturas de uso fragmentos amorfos (reblandecidos) y cristalinos (rígidos). Al aumentar la temperatura será posible darles un cambio de forma solo si los fragmentos cristalinos alcanzan el estrecho intervalo de la temperatura de fusión de las cristalitas KSB, cristalización (margen de 105-140 °C para el PE., o 114 - 124 °C

para el PP). Inmediatamente después sigue el estado termoplástico (primera forma, soldadura), que se caracteriza por la transparencia que adopta el plástico antes opaco. Esta zona linda con la temperatura de descomposición ZT (290 °C para el PE, 135 °C para el PP).

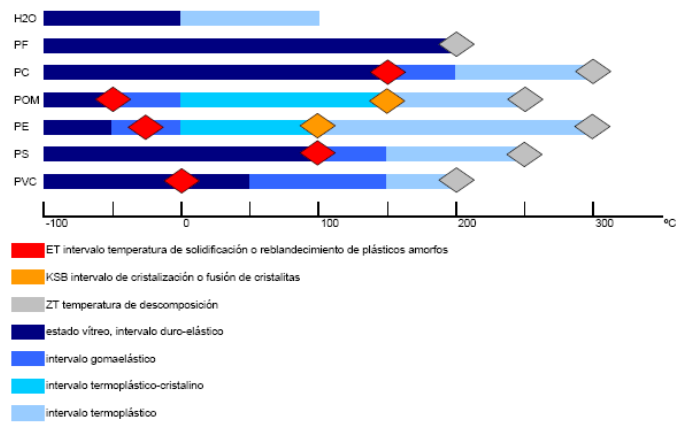
Los plásticos, por su estructura, producen con el aumento de la temperatura una dilatación volumétrica relativamente grande.

Figura 13. Estado termoplásticos amorfos



Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

Figura 14. Ejemplo estados termoplásticos amorfos



Fuente: guía de materiales plásticos - Hellerich

2.3.2 Análisis de sistemas térmicos. En este caso la aplicación va dirigida a la transmisión de calor de un elemento a otro. Esta transferencia se realiza de un elemento de más alta temperatura (emisor) a otro de menor temperatura (receptor), el cual debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas para ser utilizado en un determinado proceso de transformación.

Conceptos y ecuaciones básicas. El calor puede fluir de una sustancia a otra o transmitirse de un elemento a otro de tres maneras diferentes:

Convección: es una forma de transmisión del calor de un lugar a otro por movimiento de la materia caliente; consiste en la transmisión del calor en un fluido por el movimiento de capas con diferente nivel calorífico. La transferencia de calor por corrientes de convección en un líquido o en un gas, está asociada con cambios de presión, debidos comúnmente a cambios locales de densidad.

Un aumento de temperatura en un fluido va acompañado por un descenso de su densidad. Por ejemplo si aplicamos calor en la base de un recipiente, el fluido menos denso en esta parte debido al calentamiento, será continuamente desplazado por el fluido más denso de la parte superior. (Movimiento de masa).

También es importante saber que existe la convección normal y la forzada, donde el movimiento de masa se produce de manera artificial. El efecto de la convección se determina por la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = hA (dT)$$

Donde:

Q: flujo de calor [Kcal./seg.]

h: coeficiente de transferencia de calor [Kcal./m²-seg. °C]

dT: gradiente de temperatura en la dirección del flujo del calor

A: área normal a la dirección del flujo de calor [m²]

Radiación: este tipo de transferencia de calor no requiere ningún medio material intermedio en el proceso. Transferencia de calor sin necesidad de contacto inmediato. Energía de esta naturaleza la emiten todos los cuerpos. (Transferencia de calor mediante la propagación de ondas electromagnéticas). Un cuerpo que absorbe esta energía radiante la convierte en calor, como resultado de un aumento de su velocidad molecular. Todos los cuerpos calientes emiten energía radiante. La energía radiante calorífica es similar en su naturaleza a la luz, aunque difiere de la luz únicamente en la longitud de onda.

El intercambio de calor sin reflexión alguna (cuerpos negros) esta determinado por la ley de radiación térmica de Stefan - Boltzmann:

$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$, donde:

Q: flujo de calor radiado [Kcal./s]

A: área normal (directamente opuesta) a la dirección del flujo de calor [m²]

σ : Constante de Stefan - Boltzmann [$5,669 \times 10^{-8}$ W/ (m²-K⁴)]

($T_1^4 - T_2^4$): temperaturas absolutas del emisor y receptor respectivamente [K]

La expresión queda simplificada así:

$Q = \sigma r (T_1)^4$, donde:

Donde:

Q: flujo de calor radiado [Kcal./seg.]

σ_r : coeficiente de temperatura de radiación [Kcal./seg.K⁴]

T⁴: diferencia de temperatura [K]

Debido a que la constante σ_r es un número muy pequeño, la transferencia de calor por radiación solo es apreciable si la temperatura del emisor es muy alta.

Conducción: Puesto que el calor es la energía de la actividad molecular, esta es la forma más simple de transferencia del mismo, y es la comunicación directa de la energía molecular a través de una sustancia por medio de colisiones entre sus moléculas (Contacto).

$$Q = kA(dT/dx)$$

Donde:

Q: flujo de calor [Kcal./seg.]

dT/dx: gradiente de temperatura en la dirección del flujo del calor

A: área normal a la dirección del flujo de calor [m²]

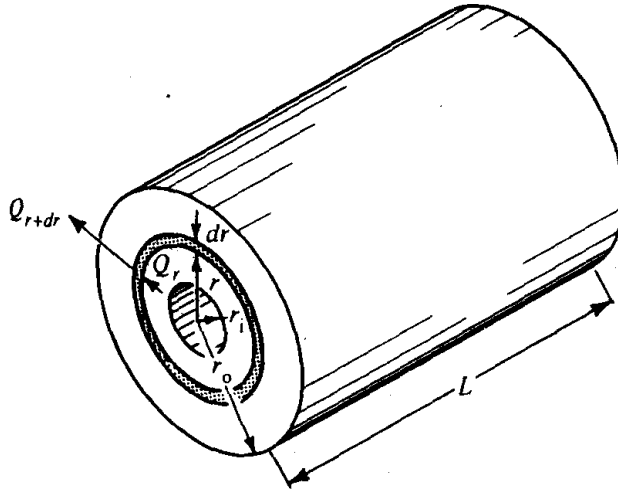
k: conductividad térmica del material [Kcal./m-seg. °C]

La cantidad de calor que fluye a través de un cuerpo por conducción depende del tiempo, del área a través de la cual fluye, del gradiente de temperatura y de la clase de material, con la intención de lograr un equilibrio térmico en el cuerpo.

Se ha establecido una ecuación que representa este comportamiento de la transferencia del calor en un cuerpo de sección cilíndrica, similar a la preforma para envases plásticos, que estamos describiendo en este trabajo.

Donde es la conductividad térmica del material, T la variable de temperatura externa e interna y r los radios para una pared tubular como se representa en la figura.

Figura 15. Conducción a través de un cilindro



Fuente: transferencia de calor - B.V. Karlekar

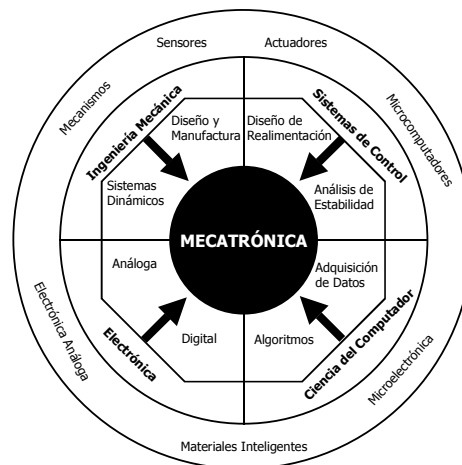
El perfil de temperatura para un elemento en forma tubular como es el caso de la preforma, tendera representar una trayectoria específica, como se representa en la figura anterior, ya que a medida que se desplaza en forma radial hacia afuera, se ve caracterizada por el área interna, ya que esta aumenta con el radio, incrementando la conducción y reduciendo el gradiente térmico.

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

3.1 SISTEMAS MECATRONICOS

Dentro de un proceso de diseño es necesario contemplar las diferentes variables que afectan el proceso en si. Estas variables son de múltiple naturaleza, para el caso que nos ocupa es importante entender la relación entre estas y el proceso. El desarrollo de un diseño mecatrónico debe cumplir con algunas características de relación entre elementos mecánicos, electrónicos y de programación que permitan un control adecuado del proceso.

Figura 16. Esquema de diseño mecatrónico



Fuente: memorias especialización Mecatrónica - UIS

En la mecatrónica como su nombre lo dice están involucradas la mecánica y la electrónica. Eso implica que en esta rama de las ingenierías lo que se busca

es complementar la una de la otra. Este proyecto es un claro ejemplo de ello porque antes en el horno en estudio teníamos un sistema donde la parte mecánica y la parte electrónica estaban totalmente separadas (la parte electrónica solo se dedica a ser una interfase para el operador, su único aporte al proceso es activar, encender, parar o apagar el proceso y a su vez visualizar una que otra variable pero solo para que el observador pueda conocerlas, es decir, al proceso en si no aporta nada, todo el proceso se realiza entre el operador y la parte mecánica). Ahora, si implementamos un sistema mecatrónico, la parte mecánica y electrónica van a depender la una de la otra debido a que la electrónica va a ejercer el control de las acciones que el sistema mecánico va a realizar condicionándolo a la programación que la electrónica lleva. Por esta razón, la gráfica nos muestra que en un diseño mecatrónico se combinan la mecánica y la electrónica y de esta manera optimizar de la mejor manera cualquier proceso.

Para realizar un correcto diseño es necesario tener en cuenta ciertos aspectos relevantes dentro de los cuales tenemos: materiales, normas, mecanismos de sujeción, determinación de variables, componentes de control y señalización.

3.2 CONSIDERACIONES DE FABRICACION

3.2.1 Materiales. En este aspecto existen dos tipos de materiales a considerar el material implementado para las preformas y el material para la fabricación del horno.

Materiales de de las preformas: es importante tener en cuenta que la principal variable o requerimiento para la propuesta de diseño mecatrónico es la preforma plástica, que es el producto a transformar y sobre el cual se

van a regular otra serie de variables, como temperatura, tiempo de exposición, velocidad de avance, entre otros aspectos a tener en cuenta durante la fase de calentamiento, antes del estirado soplado, por lo cual es importante mostrar un resumen breve de los plásticos, específicamente de los materiales con los cuales se elaboran las preformas estándar en su condición de material técnico.

Los plásticos son materiales de peso molecular elevado (polímeros) que en la actualidad se fabrican casi exclusivamente por vía sintética. Plástico es un concepto genérico que abarca a los termoplásticos, los termoestables, y los elastómeros y sus propiedades resultan de su propia estructura química y de la estructura física.

La denominación de los plásticos y su normalización en esta monografía se basará en la norma DIN 7728. Para el caso de las preformas solo se dará una breve descripción de los termoplásticos Poliolefinas y Poliésteres lineales, los cuales poseen alto peso molecular, es decir tienen una cadena molecular extensa o larga de tipo lineal, creando una elevada resistencia mecánica.

Poliolefinas. Las Poliolefinas son termoplásticos semi -cristalinos que se caracterizan por una buena resistencia química y un buen aislamiento eléctrico. Se pueden transformar con casi todos los procedimientos convencionales y son materiales muy económicos.

Polietileno (PE) DIN 16776: es un polímero termoplástico del etileno, es un material incoloro y traslucido muy estable, insoluble en agua y en la mayoría de los disolventes orgánicos a temperaturas moderadas. Permanece inalterable con el aire, es impermeable al agua y a su vapor, posee dos

presentaciones; El polietileno de alta densidad es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural). Es muy versátil y se lo puede transformar de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión, o Rotomoldeo. La segunda presentación es el polietileno de baja densidad el Se produce a partir del gas natural. Al igual que el PEAD es de gran versatilidad y se procesa de diversas formas: Inyección, Soplado, Extrusión y Rotomoldeo.

Su transparencia, flexibilidad, tenacidad y economía hacen que esté presente en una diversidad de envases, sólo o en conjunto con otros materiales y en variadas aplicaciones.

Polipropileno (PP) DIN 16774: es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando etileno durante el proceso. El PP es un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y de más baja densidad. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.), se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería.

Es un plástico ligero muy resistente al calor, disolventes orgánicos y a los agentes orgánicos activos pero sensibles a la luz solar en la actualidad se fabrican gran cantidad de objetos a base de este material, como recipientes, muebles, tubos, películas de embalaje entre otros.

Poliésteres lineales. Los Poliésteres saturados lineales son termoplásticos, son materiales de ingeniería y se utilizan especialmente cuando se requiere de estabilidad dimensional y resistencia a largo plazo.

Polietilentereftalato (PET) DIN 16779: se produce a partir del Ácido Tereftálico y Etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella. Para el grado botella se lo debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos.

Es un material termoplástico, inodoro y muy transparente que mediante el uso de aditivos puede adquirir diferentes tipos de color si así se requiere, presentan gran estabilidad dimensional y resistencia al largo plazo; sus inconvenientes residen en la fragilidad, inflamabilidad y poca resistencia a los rayos solares, ver ficha técnica materiales.

Lo mas importante para la selección de un material es establecer las condiciones de operación, estas deben estar bien definidas, como requerimientos de diseño, el uso de materiales apropiados en la fabricación de este panel de calentamiento serán definidos básicamente por la temperatura. Los componentes o elementos auxiliares a su vez deben ser resistentes al calor y a la manipulación controlada de los operarios en operaciones de mantenimiento y montaje

Materiales para la construcción del horno: en este aspecto se hace referencia a materiales ferrosos de diferentes composiciones.

Acero inoxidable: este material se utiliza en la fabricación de las recamaras laterales internas donde se encuentran ubicados las lámparas, debido a sus características de reflexión y las propiedades antioxidantes que presenta en los rangos de humedad y temperatura que se manejan al interior del horno.

Acero estructural: este tipo de material se utiliza como elementos de soporte y marco estructural, para soportar el peso y las diferentes fuerzas que se generan en el proceso de calentamiento de las preformas.

Acero galvanizado: este material se utiliza en la fabricación de las recamaras laterales exteriores y las tapas del horno, bajo un aspecto principalmente económico, comparado frente al uso de acero inoxidable

3.2.2 Normalización y estandarización de componentes. Se consideraran medidas comerciales para las materias primas, elementos semi - transformados y partes comerciales, esto con el fin de optimizar su aprovechamiento, eliminando procesos de fabricación y mecanizado, a su vez permitiendo su fácil consecución en el mercado. También se deben estandarizar componentes mediante la modulación de elementos para simplificar los procesos productivos, teniendo en cuenta la posibilidad de versatilidad funcional.

3.2.3 Mecanismos y sistemas de sujeción. Un aspecto a tener en cuenta son los principios mecánicos, eléctricos y de control que se aplicaran para dar funcionalidad al sistema, se analizaran varios requerimientos como la sujeción de elementos emisores, conformación de las cámaras de calentamiento, y el sistema controlado de temperatura.

Para el caso de la selección de los sujetadores mecánicos apropiados se debe tener en cuenta no solo la dependencia de las piezas que se requieren unir, sino el factor funcional entra a formar parte esencial de su elección, teniendo en cuenta las limitaciones de espacio, las cargas de operación, que en este caso no son muy elevadas, actúan cargas estáticas y dinámicas mínimas,

también es muy importante cubrir las necesidades de montaje y mantenimiento. La principal aplicación será graduación de ubicación de los emisores de temperatura y la sujeción de la estructura de montaje de los mismos. Se aplicaran sujetadores roscados, pasadores como puntos de articulación y en algunos puntos uniones soldadas.

3.2.4 Determinación de variables del proceso. Como uno de los aspectos esenciales para la propuesta de diseño mecatrónico, es la determinación de las diferentes variables a controlar que influyen en la etapa de calentamiento, se hará una breve descripción de las mismas

Material: tipo de material de la preforma que condicionara el perfil de temperatura.

Dimensiones preforma: Longitud de la preforma para tener en cuenta durante el proceso de encendido de los generadores de calor.

Temperatura: temperatura a la cual debe calentarse la preforma para llegar a un estado plástico de deformación específico para el proceso de estirado soplado del envase.

Tiempo: duración de la preforma en el horno.

Cantidad: número de preformas a calentar.

Velocidad de rotación: velocidad de giro de la preforma para su calentamiento periférico.

3.2.5 Componentes, elementos de mando y señalización. Para la medición y control de las diferentes variables durante la etapa de calentamiento de las preformas es importante conocer algunos aspectos de los elementos que pueden ser utilizados para la propuesta de diseño que van ligados con la temperatura.

Generación de calor: dentro de las posibilidades de realizar el calentamiento de la preforma, se decidió hacer una comparación entre las resistencias (actualmente) y las lámparas infrarrojas.

Lámparas Infrarrojas: los emisores infrarrojos pueden calentar un producto sin contacto físico o sin la necesidad de un medio como el aire para calentar el objeto. Además por medio de este sistema se puede calentar en vacío.

En el calentamiento por radiación infrarroja las pérdidas de calor al aire o a los alrededores son muy pequeñas. Así como la luz la radiación infrarroja puede ser reflejada, concentrada, dirigida, etc.

Debido a la baja inercia térmica de los emisores infrarrojos no hay necesidad de largos periodos de precalentamiento. En la mayoría de los casos este periodo es solo de algunos minutos. La respuesta a señales de control es rápida.

Este sistema reduce los ciclos de tiempo de calentamiento. Mediante este sistema se puede reducir a 1/3 el tiempo requerido para calentamiento en un horno de convección.

Los emisores infrarrojos ofrecen la clase de control que simplemente ningún otro método de calentamiento puede ofrecer.

El calentamiento por infrarrojos puede ser instalado para cualquier tipo de movimiento de material: vertical, horizontal, inclinado, etc. Puede ser instalado sobre vigas, rieles, etc. en caso de falta de espacio. Además puede ser instalado en tiempos muy cortos y se puede hacer adiciones posteriores para producciones más altas debido a su construcción modular.

Debido a la construcción simple y compacta, los sistemas de calentamiento infrarrojo tienen a reducir los costos de mantenimiento.

Resistencias: el calentamiento por resistencias generalmente emplea un medio de transmisión para realizar el proceso de calentamiento.

Figura 17. Resistencias comerciales



Fuente: Resistencias Santander

El calentamiento de las resistencias es un proceso inercial que requiere de tiempos muy prolongados para su precalentamiento y su respuesta para el control.

En el calentamiento por resistencias el medio, el aire, debe calentarse primero, y únicamente la capa de aire en contacto con la superficie transfiere calor a los productos. Y esto interfiere en el proceso de transferencia de calor.

Es necesario disponer de un espacio físico mayor para la instalación de las resistencias para el proceso de calentamiento.

Cuadro 1. Comparación de componentes para el calentamiento de probetas.

	Calentamiento por resistencias	Calentamiento por lámparas (ultravioleta)
Distribución de la temperatura	Se observa una distribución no homogénea a lo largo del eje de la preforma, debilitando la parte del cuello	El cambio de la temperatura es atenuado a lo largo del eje, siendo menor en el cuello y la base y máximo en el centro del cuerpo
Tiempos de calentamiento a condiciones iguales	Es mayor el tiempo de calentamiento en aprox. un 30 %	El comportamiento es menos inercial y por tanto es menor
Enfriamiento	Es lento y no homogéneo	Es gradual y distribuido

Toma de datos: es necesario obtener información del sistema para poder realizar el control de este, esta información tiene que ver con la temperatura y presencia de las preformas.

Transductores de temperatura: son componentes que miden la temperatura basándose en diversos efectos físicos. Existe una gran variedad de estos los cuales son ilustrados en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Diversos transductores de temperatura.

	RTD	Termistor	Sensor de IC	Termopar
Descripción	Detector resistivo de temperatura que usa como elemento un alambre de metal puro.	Usa óxidos metálicos a manera de bulbos o pequeños capacitares.	Son sensores inteligentes basados en circuitos integrados.	Utilizan dos hilos de metal puros diferentes.
Ventajas	Más estable. Más preciso. Más lineal que los Termopares.	Alto rendimiento Rápido Medida de dos hilos	El más lineal El de más alto rendimiento Económico	Autoalimentado Robusto Económico Amplia variedad de formas físicas Amplia gama de temperaturas
Desventajas	Caro. Lento. Precisa fuente de alimentación. Pequeño cambio de resistencia. Medida de 4 hilos Autocalentable	No lineal. Rango de Temperaturas limitado. Frágil. Precisa fuente de alimentación. Autocalentable	Limitado a < 250 °C Precisa fuente de alimentación Lento Autocalentable Configuraciones limitadas	No lineal Baja tensión Precisa referencia El menos estable El menos sensible

Sensores de presencia: este tipo de sensor es capaz de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado. Esta detección puede hacerse con o sin contacto con el objeto. En el segundo caso se utilizan diferentes principios físicos para detectar la presencia, dando lugar a los

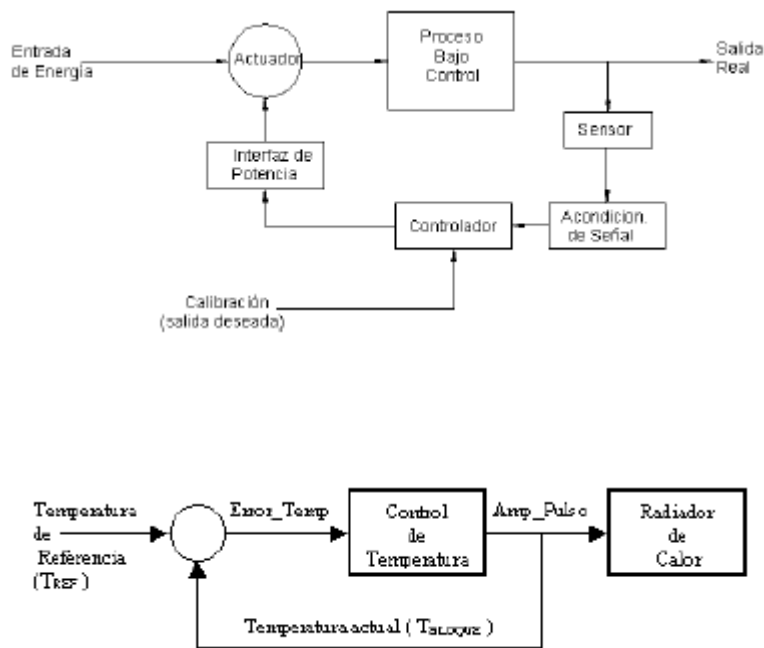
diferentes tipos de sensores. En el caso de detección con contacto, se trata siempre de un interruptor, normalmente abierto o normalmente cerrado según interese, actuando mecánicamente a través de un vástago u otro dispositivo. Los detectores de presencia se utilizan en robótica principalmente como auxiliares de los detectores de posición, para indicar los límites de las articulaciones y permitir localizar la posición de referencia de cero de estos en el caso de que sean incrementales.

Cuadro 3. Comparación sensores

	Inductivos	Capacitivos	Magnético	Fotoeléctricos
Descripción	Se basa en la tensión generada en la bobina cuando se la somete a una variación de un campo magnético.	Detectan la variación de la capacidad de un condensador en respuesta a la variación de alguna magnitud física.	Fabricados con materiales semiconductores generan una señal eléctrica cuando son sometidos bajo la influencia de un campo magnético.	
Principio Físico	Detecta Objetos Metálicos cercanos	Detecta Objetos cercanos Metálicos y No Metálicos como Plásticos, Papel, Líquidos, Granulados, Polvos - - pero es bastante más costoso.	Detecta Objetos Magnéticos como Pistones en Cilindros Neumáticos	Detecta Objetos mas Distantes, opacos o reflectantes
Alcance	hasta 100 mm	hasta 40 mm	hasta 60 mm	hasta 20 metros

Controlador. La propuesta de diseño mecatrónico se basara en un control de lazo cerrado, en el cual las variables a ser controladas como temperatura, tiempo, etc. serán medidas continuamente y comparadas con las variables de referencia hasta que sean tan precisas como sea posible con estas, con el fin de lograr un proceso optimo de calentamiento. Para el caso de la temperatura esta se establecerá mediante un ajustador de referencia (potenciómetro), esta será medida mediante un sensor de temperatura que suministrara los valores para que el controlador seleccionado permita establecer una realimentación adecuada para el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 18. Esquema controlador



Fuente: memorias especialización Mecatrónica - UIS

Salida de datos: una vez manipulada la información es necesario salir al sistema, para esto se utilizan algunos componentes.

Circuito de Conmutación o de salida: el circuito de salida contiene los dispositivos semiconductores de potencia con su correspondiente circuito excitador. Este circuito será diferente según queramos conmutar CC, CA.

Actuadores: un relé es un dispositivo que ejecuta una acción lógica con el fin de conectar y desconectar circuitos del sistema de control; ordenando al elemento que maneja la potencia que ejecute una acción de conexión y desconexión, permitiendo a su vez controlar una potencia mucho mayor con un consumo en potencia muy reducido.

Elemento de protección: dentro de los cuidados de se deben tener a los circuitos eléctricos esta el aislarlos de sobrevoltaje generados por sobrecargas, retornos o corrientes parasitas, una opción muy implementa para este propósito es el de opto acopladores que independizan el circuito de potencia del circuito de control.

Confiabilidad y versatilidad: para los principios de funcionamiento de un sistema la confiabilidad hacia el equipo, hace parte fundamental en un proceso productivo, para este caso que el control de temperatura sea efectivo, que las lecturas sean las reales y que el control este en un rango fiable permiten al operador y al equipo ser mas eficientes y no deteriorar la materia prima a transformar.

En cuanto a la versatilidad se refiere a la posibilidad que algunos elementos e instrumentos, generalmente los modulares puedan desempeñar varias funciones.

3.3 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

3.3.1. Requerimientos técnicos-productivos para el diseño. En la actualidad la mayoría de las empresas en el campo del procesamiento y transformación del plástico, utilizan una serie de variables que deben ser medidas y controladas permanentemente, convirtiéndose estas variables en aspectos fundamentales dentro de diferentes procesos productivos.

En esta monografía se establecen una serie de criterios de diseño que para este caso van en función de la variable temperatura y el material a transformar, por lo cual es importante tener en cuenta una serie de conceptos sobre los diferentes elementos, componentes y fenómenos físicos que intervienen en la etapa de calentamiento de preformas para el proceso de estirado soplado, cuyo fin es el de obtener envases de diferentes pesos y capacidades para el embotellado de productos líquidos alimenticios.

Cada uno de los componentes que se plantearan para este proceso tiene una función determinada, que al integrar debe permitir obtener un calentamiento óptimo de un material plástico en este caso la preforma. En conjunto debe permitir la medición y control de temperatura durante el proceso (realizando un control de lazo cerrado, posibilitando una regulación precisa y rápida) y permitir establecer perfiles de temperatura para los diferentes formatos de preformas plásticas. A su vez debe ser un sistema modular de componentes mecánicos que permitan ensamblar los diferentes partes de la unidad de calentamiento. El diseño inicial de estos componentes mecánicos se realizara mediante la aplicación de herramientas CAD y CAE, para un modelamiento tridimensional muy cercano a la propuesta de diseño de fabricación final.

Antes de establecer las pautas para la propuesta del diseño mecatrónico del panel de calentamiento controlado para las preformas plásticas, es importante tener en cuenta todos los componentes, aspectos y variables que pueden intervenir en él, partiendo desde el producto mismo, como elemento a transformar durante la etapa de calentamiento; la preforma plástica, posee una serie aspectos a conocer como lo son: sus características físicas, comportamiento, propiedades y sus condiciones de trabajo, datos esenciales para establecer los criterios de diseño tanto formales como funcionales y el control de los mismos.

3.3.2. Requerimientos formales. También necesario cumplir algunos requerimientos con respecto a la forma.

Modularidad: se debe implementar un sistema modular con el cual se mejore los pasos de desarme y ensamble, logrando de esta forma mejorar la disposición para el mantenimiento y reubicación.

Unidad: se debe hacer énfasis en este concepto de unidad, para proporcionar debidamente los diferentes objetos y componentes del panel de calentamiento, de tal forma que puedan ser organizados y graduados para diferentes alternativas de solución, ya que la propuesta de diseño va dirigida a una familia de productos (preformas de diferentes formatos).

Componentes: el sistema debe tener los suficientes componentes que garanticen un trabajo autónomo en la producción.

Estructurabilidad: se debe proveer de una estructura lo suficientemente estable para el trabajo, y una forma acorde con la función a efectuar.

Manipulación: dos posibilidades de uso: automático y manual. Se debe suministrar suficiente información a los operarios respecto al estado en el que se encuentre el sistema.

Mantenimiento: el sistema debe disminuir el tiempo utilizado en el proceso de mantenimiento correctivo.

Seguridad: debe brindarse seguridad a los operarios cercanos al sistema y el sistema debe proporcionar un funcionamiento adecuado estableciendo alarmas en el proceso, evitando de esta manera reprocesos y/o daños.

4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.1 JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA DE MEJORA EN EL PROCESO

En muchas ocasiones durante el programa de estudios de la especialización en Ingeniería Mecatrónica, nos preguntamos que oportunidades para su aplicación tendríamos en la empresa local; cuando los factores producción, rentabilidad y calidad tienden a ser los parámetros que rigen un diseño, ya sea de una maquina, de un sistema o de un proceso productivo. Un punto fundamental en estos aspectos es el control, claro sin descuidar la funcionalidad del equipo, esto con el fin de eliminar la probabilidad de error y mejorar las condiciones de trabajo.

Con una correcta relación o integración entre el control, el diseño formal y el diseño funcional del equipo, se puede lograr las mejoras en un proceso productivo, como en el caso de este proyecto, buscando establecer mejores condiciones en la transformación del plástico, para la fabricación de envases semirígidos, ofreciendo un eficiente control de las diferentes variables que intervienen en su ejecución, variables que para esta aplicación, van en función del manejo de la temperatura sobre un objeto plástico en forma tubular fabricado (preforma) en polipropileno (PP), teniendo en cuenta que este sistema debe poseer una estructura de montaje versátil, de componentes estándar y de fácil mantenimiento.

En la actualidad estos sistemas están muy bien desarrollados en el exterior, claro con una constante evolución técnica para mejorar los procesos. Es muy

fácil decir que estos elementos y otros de gran tecnología existen en el exterior, pero su adquisición por parte de las microempresas locales se ha hecho prácticamente imposible, debido a los altos costos de los equipos.

En algunas de estas microempresas se da vía a la evolución de los procesos mediante la aplicación de nuevos conceptos, ideas, rediseños y la fácil consecución de algunos instrumentos, equipos y elementos comerciales a costos menores que los equipos extranjeros, aclarando que los resultados se van dando proporcionalmente a medida que aumente la experiencia y se mejoren las aplicaciones, generalmente planteando propuestas de automatización parcial o realizando diseño mecatrónico, así como la fabricación de prototipos de prueba, que bajo una continua evaluación, permiten mejorar alguna parte del proceso, para ser aplicado a la industria, permitiendo mejor competitividad mediante la obtención de resultados prácticos, económicos y funcionales.

Este procedimiento, presenta varios inconvenientes: Uno es que los productos a calentar pueden variar en geometría, tipo de material, dimensión, etc., lo cual requiere generar más juegos de parámetros, tarea que consume esfuerzos y recursos. El otro inconveniente, es que todo lo dicho es aplicable a estados estacionarios, mientras que a menudo se producen paradas, arranques, cambios de producto, etc., que alteran el estado del horno y de la carga (preforma). El control del horno se transforma entonces en una práctica artesanal que queda librada a la experiencia e intuición del operador.

La alternativa que se requiere desarrollar para lograr el control adecuado del calentamiento, se puede resumir en los siguientes pasos:

- Desarrollo de un modelo de los procesos que ocurren durante el calentamiento y, sobre su base, la determinación de la evolución de temperatura posible y deseable para cada tipo de preforma. Una etapa indispensable para un posterior proyecto en el cual se aplique la propuesta de diseño que estableceremos con este trabajo de grado, consistiría en realizar una validación del modelo planteado, es decir mediante la verificación de sus resultados que deben describir satisfactoriamente lo que ocurre durante el proceso, mediante mediciones realizadas en situaciones representativas del funcionamiento del horno

- Evaluar por medio de software el comportamiento de la preforma por acción de la temperatura, utilizando para ello toda la información disponible (fichas técnicas en las cuales se establecen sus parámetros característicos) con el fin de calcular en tiempo real la evolución térmica durante el proceso, recabando en forma automática los datos obtenidos sobre el funcionamiento del horno, a medida que avanza el calentamiento.

- El ajuste de las temperaturas zonal delimitadas para evitar que existan piezas que se aparten del rango de calentamiento deseado.

- La predicción de la variación del tiempo para que una preforma salga del horno para cada una de las configuraciones, con el fin de evitar que resulten preformas con un valor de variación excesivo.

También se busca plantear un diseño Mecatrónico que aplique un cambio tecnológico integrando los requerimientos funcionales con la parte de control, presentando un panel modular que logre disminuir costos generados por mantenimiento, y energía relacionada con el proceso productivo y sobre todo

asegurar productos de calidad que cumplan con los requisitos de buenas prácticas de manufactura y requerimientos de calidad ISO aplicables a la industria local en el campo de envases para productos alimenticios.

Al desarrollar este tipo de proyectos, adicionalmente se busca que a futuro pueda ser integrado a un sistema de comunicación que adquiera y administre datos del proceso que anteceden y preceden a una línea de producción completa, como en este caso lo es el calentamiento en el horno para preformas, todo esto con el fin obtener un proceso más productivo (menor gestión de mantenimiento, menor cantidad de productos no conformes) y mayor rentabilidad (reducción de costos de producción) para la empresa local.

Los alcances esperados para esta monografía involucran estudiar y proponer diferentes alternativas de solución, según los requerimientos estipulados para el calentamiento de preformas en polipropileno, para el proceso de estirado soplado en la fabricación de envases semirígidos; que planteen la configuración de un horno modular compacto y a su vez desarmable, que utilice principios funcionales mecánicos y electrónicos que sean confiables y versátiles, que permitan la adecuada manipulación de cada uno de sus componentes, minimizando el tiempo y número de actividades para su mantenimiento y/o reparación.

También se quiere proponer una serie de materiales y accesorios comerciales estándar de fácil consecución; que soporten condiciones de trabajo para altas temperaturas: Otro aspecto a considerar es el diseño de un sistema de control de temperatura que pueda ser simulado y evaluado por medio de software aplicados durante el estudio de esta especialización, permitiendo establecer

un diseño Mecatrónico integrado que mejores las condiciones del proceso productivo de estirado soplado.

4.2 PLANTEAMIENTOS DE ALTERNATIVAS

- Alternativa 1. Consistiría en el desarrollo de un tren completo que permita la transferencia de las preformas directamente de la inyectora hasta la sopladora.

Pero los costos, por manufactura, las condiciones del mercado no permiten tener continuidad en la fabricación, si no que se hacen por lotes que se almacenan, mientras se monta otro tipo de producción para aprovechamiento de los equipos.

- Alternativa 2. Consistiría en dejar el calentamiento por resistencias y convertir el horno en un sistema modular para mejorar el manejo de mantenimiento, reutilizando parte de lo existente.

Pero queda el problema del ahorro energético y el control de temperatura es más inercial,

- Alternativa 3. Consistiría en desarrollar un sistema modular para el proceso de calentamiento, que permita el ensamble en el tren de transporte de las preformas que actualmente existe, pero cambiando el sistema de calentamiento de resistencias a un sistema de lámparas de fácil acople y desacople disminuyendo de esta manera el tiempo muerto en el mantenimiento preventivo; para la optimización de gasto energético tener en cuenta la longitud de la preforma con el fin de saber cuales lámparas se

requiere que estén activas; disponer de dos líneas de preformas aumentando de esta manera la productividad.

4.2.1 Evaluación de alternativas (ventajas y desventajas). La evaluación de las alternativas se realizó siguiendo la metodología QFD dando como resultados los ilustrado en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Análisis de alternativas.

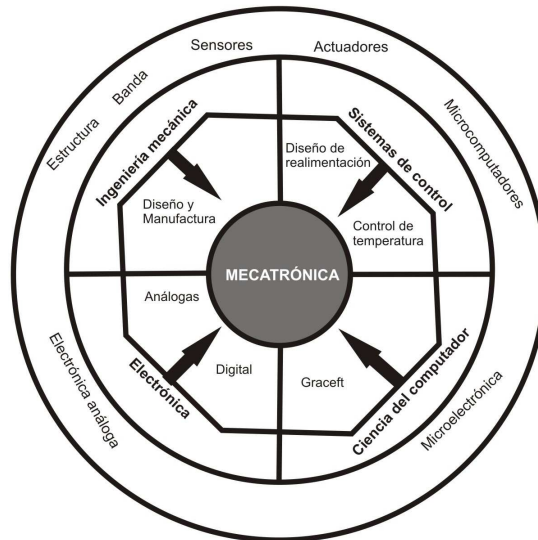
	Peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Renovación Tecnológica	3	4	2	4
Inversión	4	1	5	4
Rapidez de Implementación	4	1	4	5
Modularidad	5	4	3	4
Total		40	57	68

VER ANEXO 1. Evaluación de alternativas según requerimientos

4.2.2 Selección de alternativa. La propuesta de trabajo que consideramos en este proyecto se basa en la alternativa 3, principalmente fundamentada en la renovación tecnológica y el cumplimiento de los requerimientos que permitan satisfacer la necesidad planteada por una industria local. El posterior nivel de desarrollo e implementación requerirá la atención y el concurso de la administración de la empresa interesada en la solución propuesta y el desarrollo de un prototipo de pruebas, el cual no se encuentra en el alcance inicial de este trabajo monográfico.

4.2.3. Propuesta de diseño mecatrónico

Figura 19. Esquema de un diseño mecatrónico



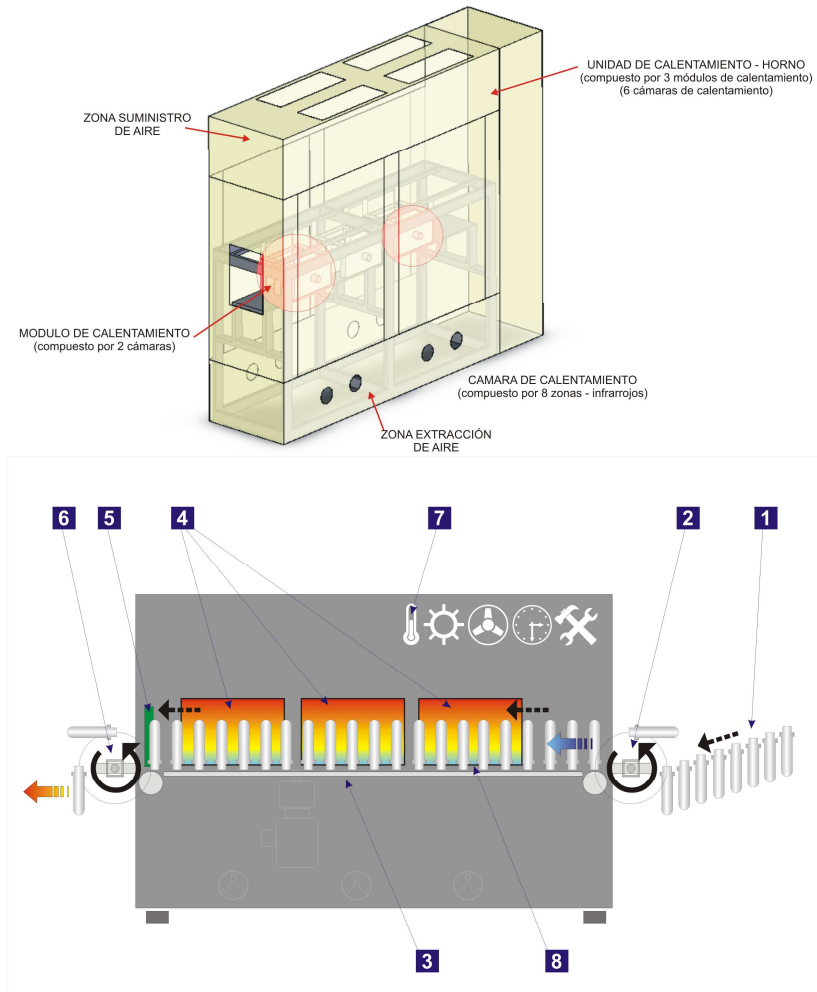
Fuente: Autores, memorias especialización Mecatrónica - UIS

Elementos mecánicos del diseño:

Horno. El aire dentro del horno es recirculado por medio de un ventilador que aspira el aire circundante a la preforma y lo hace pasar por las lámparas por medio de mangueras, haciendo que este aire llegue de nuevo al ambiente circundante a las preformas.

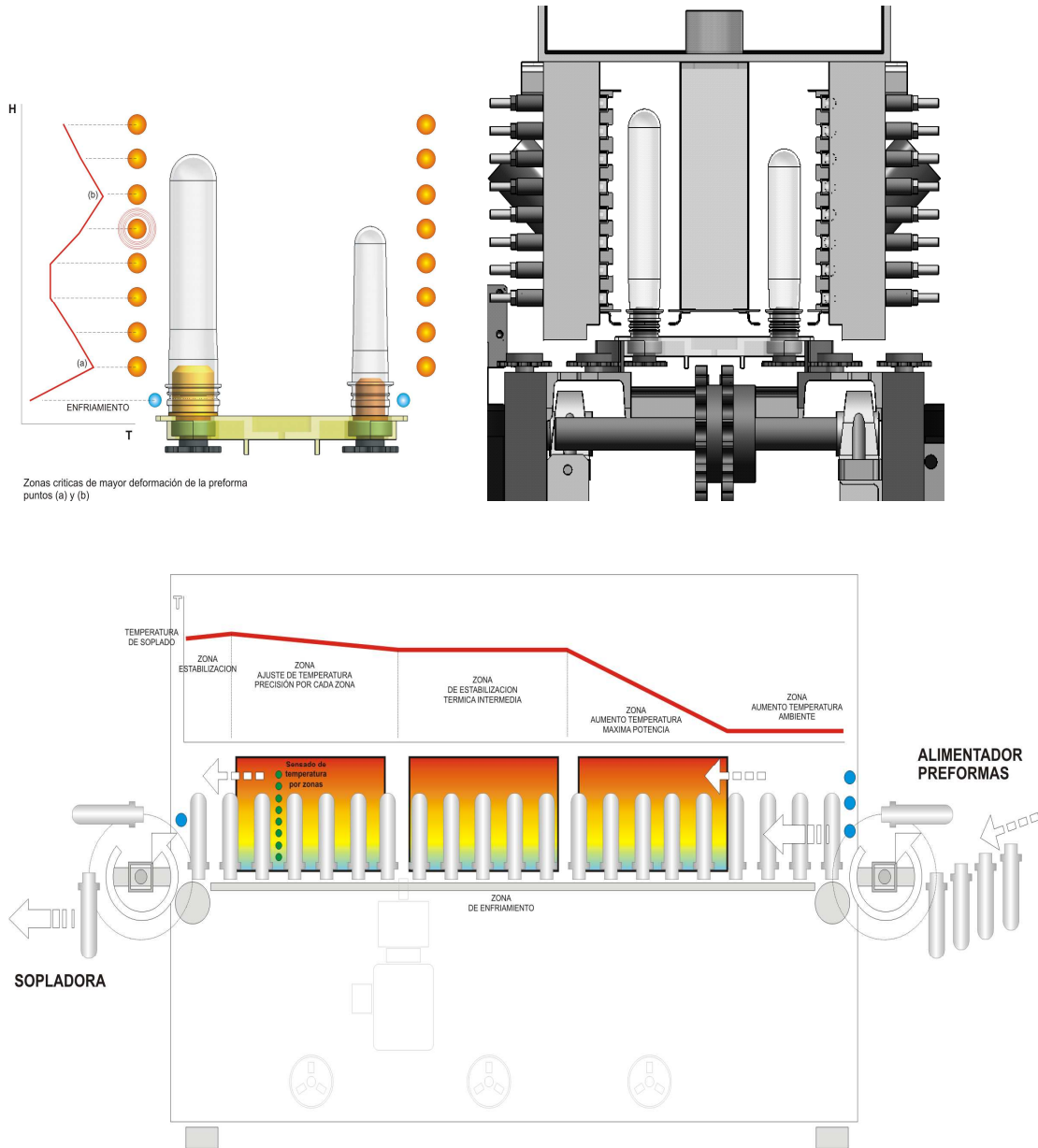
El horno consta de tres zonas divididas por medio de una placa reflectora. Cada zona tiene un valor máximo de temperatura diferente, para que las preformas puedan tener un calentamiento de forma homogénea evitando así daños causados por efectos térmicos.

Figura 20. Esquema propuesta de diseño Mecatrónico unidad de calentamiento



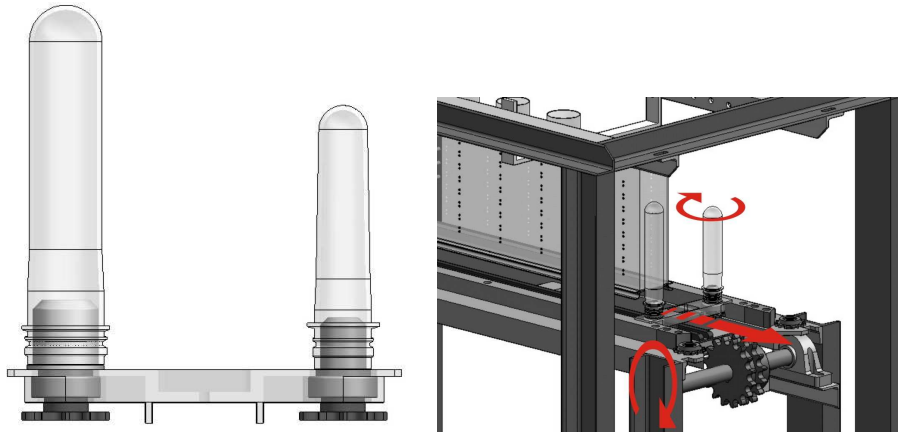
El calentamiento se realiza de la siguiente manera: las preformas son alimentadas dentro del modulo de calentamiento por medio de un sistema de transmisión por cadena que desplaza las preformas a través del modulo. Al entrar, las preformas quedan expuestas a la radiación de un numero determinado de lámparas, este número depende de la altura de la preforma.

Figura 21. Esquema Calentamiento de las preformas



Las preformas son colocadas en un sistema que permite la rotación mientras se van desplazando a través del modulo, permitiendo de esta manera un calentamiento uniforme de la preforma en todo su volumen.

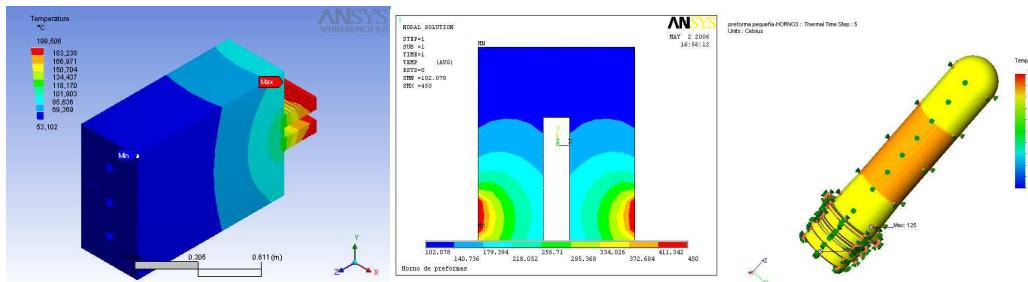
Figura 22. Esquema Sistema de sujeción y rotación de las preformas



Para evitar un calentamiento de la rosca de la preforma se dispone de un sistema de refrigeración por agua, que esta dispuesto por debajo del sistema de sujeción.

Para obtener una información de cual es el la forma de la distribución de temperaturas, se realizo un análisis en Ansys, con esta información se puede localizar los puntos clave para los sensores de temperaturas, logrando así ubicarlos de la mejor forma y logrando medir una temperatura acorde con la preforma.

Figura 23. Esquema Distribución de temperaturas.



Elementos de automatización del diseño. La creación de este proyecto estuvo muy relacionado con la propuesta de diseño mecatrónico, donde existe una interrelación entre lo mecánico, el sistema de control y lo electrónico, lo cual puede relacionarse de la siguiente manera:

- Elementos definidos en un diagrama de control. Se relaciona en la elaboración de los respectivos graficet de nivel 1 y nivel superior, los cuales se indican en el anexo 2.
- Componentes electrónicos y eléctricos básicos. Se relacionan en el respectivo panel de operador, el cual contiene la distribución aproximada de los indicadores, selectores y visualizadores requeridos en la propuesta.
- Programa de control básico. Se describe la rutina de un programa de control básico que relaciona las diferentes variables de entrada y salida del sistema propuesto, utilizando como base un PLC SIEMENS.

Datos y variables de entrada y salida. La temperatura es la variable más importante en este sistema, pero adicional a esta se tienen en cuenta otras variables como los son unos sensores dispuestos en la entrada del módulo de calentamiento con el propósito de conocer el tamaño de la preforma a entrar y así encender solo las lámparas necesarias. El listado de variables de entrada y salida se muestra en el ANEXO 3.

4.3 COMPONENTES

4.3.1 Generación de calor. El calentamiento de las probetas para su posterior estirado soplado consta de 8 lámparas de emisión infrarroja dispuestas

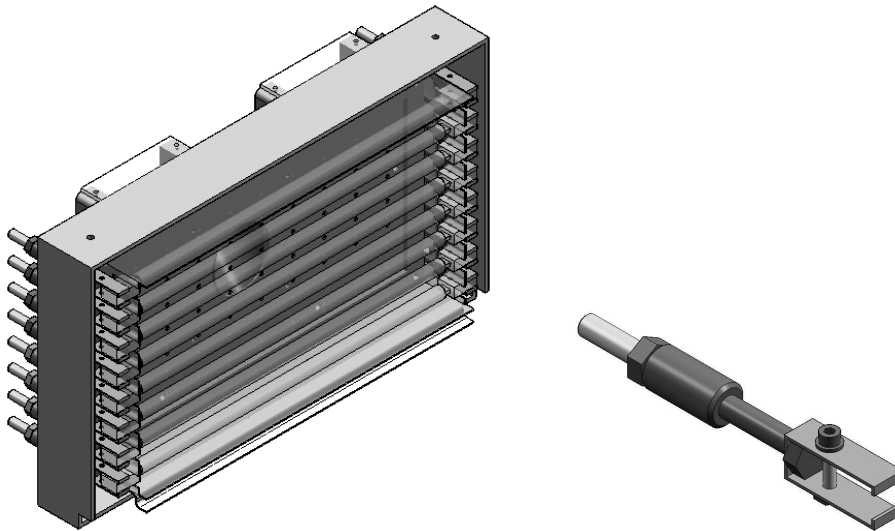
longitudinalmente dentro del módulo. La emisión puede penetrar la pared de las preformas y calentar desde el interior hacia la superficie al mismo tiempo.

Figura 24. Lámparas halógenas de cuarzo.



Fuente: T-3 Quartz Halogen Lamps - Ushio America Inc.

Figura 25. Panel de calentamiento y sistema de fijación y regulación lámparas halógenas



Las lámparas utilizadas son llamadas Lámparas halógenas de cuarzo con las siguientes características:

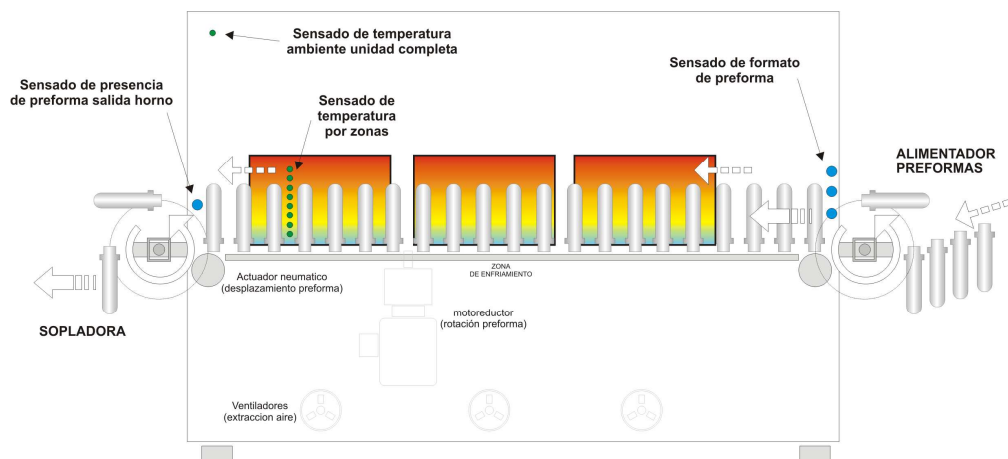
- Utilizan un filamento de Tungsteno de baja masa para proveer una fuente de alta temperatura que responde rápidamente a los cambios de voltaje, lo

que permite un control preciso en situaciones de estado estable o situaciones dinámicas.

- Las lámparas están selladas herméticamente y en su interior están llenas de un gas inerte.
- Son considerados como un calentador infrarrojo (longitud de onda corta).
- Aproximadamente el 90% de la potencia consumida (Watts) por la lámpara es transformada en rayos infrarrojos y calor.

4.3.2 Captura de datos

Figura 26. Ubicación elementos de captura de datos – propuesta diseño



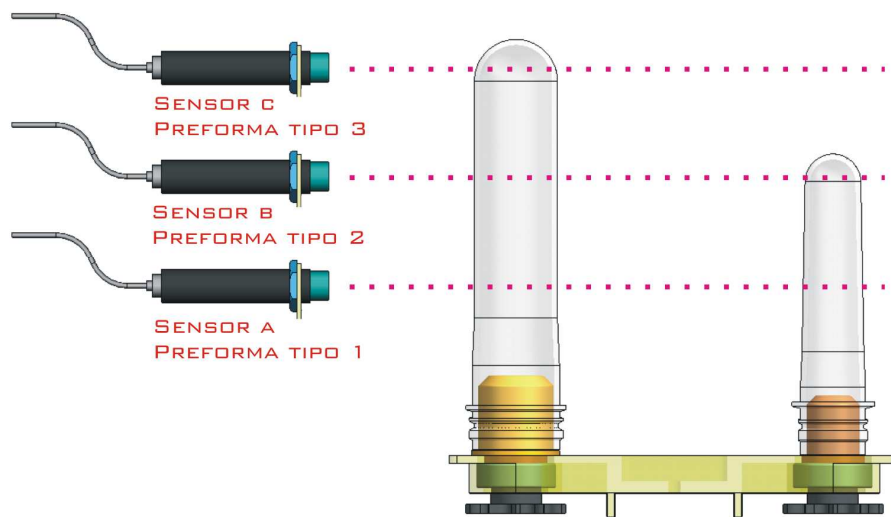
Termocuplas: Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Estas se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente).

Cuadro 5. Tipos de termocuplas

Termocupla	Cable + Aleación	Cable - Aleación	Rango Temperatura (min., Máx.) [°C]	Tensión Máx. [mV]
J	Hierro	cobre/níquel	(0, 750)	42.2
K	Níquel/cromo	Níquel/aluminio	(-180, 1372)	54.8
T	Cobre	cobre/níquel	(-250, 400)	20.8
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 767)	18.65
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814

Sensores de presencia:

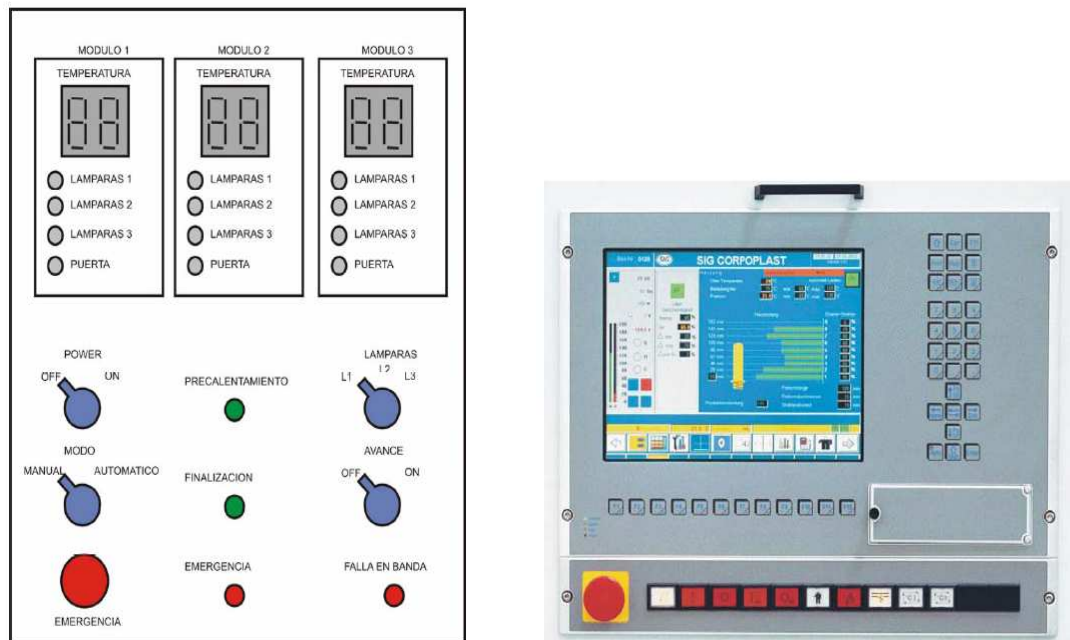
Figura 27. Ubicación sensores



Sensores de fin de carrera. Se utilizaran en el análisis de la posición de las puertas de las cámaras de calentamiento, e indicaran cuando las puertas estén abiertas, lo cual debe detener la operación y generar una alarma, hasta que el operario reponga la posición de trabajo de las puertas.

4.3.3 Interfaz hombre - maquina. Fue necesario implementar una interfaz hombre - maquina sencilla, donde el operario pueda manipular las mayor cantidad de funciones sin tener que alejarse de los displays.

Figura 28. Panel operador

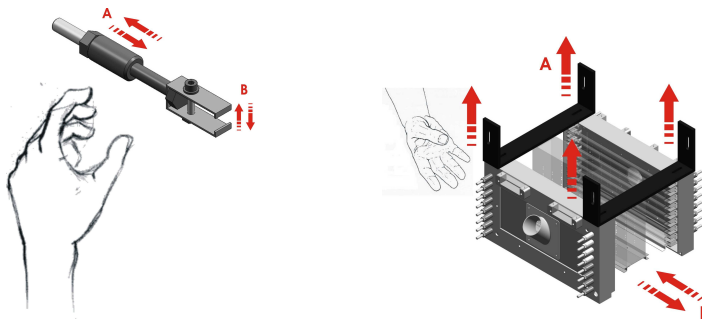


Fuente: Internet

4.4 MANTENIMIENTO

El desarrollo de la propuesta incorpora el concepto de sistemas modular de mantenimiento, donde se espera que la labor del operario se simplifique desde el punto de vista de desarme y armada de las cámaras de calentamiento. La idea es que el recambio de piezas averiadas sea rápido principalmente por el diseño de los sujetadores de las lámparas, en forma de pinza de presión, así como el acceso a la cámara desde el exterior se simplifica por adaptarse a unas puertas abatibles que pueden asegurarse para el trabajo en forma rápida mediante herrajes tipo clamp. Ver figura 29

Figura 29. Diagramas de uso para mantenimiento de modulo de calentamiento – diseño propuesto



En el cuadro 6 se observan algunos tiempos específicos para algunas operaciones de mantenimiento correctivo en la sección de cámaras de calentamiento, que compara las acciones realizadas en el proceso actual, versus las acciones propuestas en el desarrollo de este proyecto.

Cuadro 6. Tiempos dados en minutos para algunas operaciones de mantenimiento.

Actividad	Tiempo actual (datos de la empresa) *	Tiempo estimado propuesta *
Parar la maquina y poner en marcha manual	1	1
Esperar enfriamiento de la zona de calentamiento	3	1
Retirar las preformas de la línea de calentamiento	4	1
Retirar guardas externas de seguridad	2	2
Desmontar cámara de calentamiento	4	1
Reemplazar elemento averiado (uno solo)	6	2
Invertir el procedimiento para instalación y puesta en marcha	10	5
Imprevistos	2	2
<i>Total tiempo estimado</i>	32 min.	15 min.

* Los tiempos aquí consignados varían dependiendo de la habilidad y entrenamiento del operario.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El presente desarrollo mecatrónico ofrece el control específico de la temperatura en las zonas críticas de la preforma, que permite regular su calentamiento en función de la pared, la forma y la deformación, para minimizar los rechazos al no cumplir con especificaciones físicas y dimensionales, causados por una distribución inadecuada de la temperatura
- Se desarrolló un sistema de tipo modular, para que las operaciones de mantenimiento sean menos complejas y el operario tenga facilidad de acceso a la cámara de calentamiento y pueda realizar los recambios de los elementos averiados en un tiempo muy inferior al actual. La disminución en el tiempo de mantenimiento correctivo se estima en unos 16 minutos (aproximadamente el 53%) de reducción
- Debido al cambio en el sistema de calentamiento, pasando de resistencias a lámparas infrarrojas (halógenas) se obtiene un considerable ahorro energético por cuanto estas lámparas consumen un 30 % menos energía para lograr el mismo nivel de temperatura en la preforma, ya que aumenta la eficiencia del proceso ya que la temperatura se distribuye sobre toda la sección de la pared de la preforma y no solo sobre la superficie como lo hacen las resistencias, así mismo el uso de estas lámparas permitió desarrollar un dispositivo de anclaje tipo pinza el cual permite cambiar las lámparas averiadas en un tiempo mínimo. A su vez dicha modularidad permite la regulación y adaptación del sistema a otros formatos de preformas, diferentes a los establecidos inicialmente, ya que permite la completa graduación de

los módulos, las cámaras y las lámparas ampliando su versatilidad para futuras aplicaciones.

- La unidad de calentamiento a demás permite su fácil adaptación a otros equipos pertenecientes a las líneas de producción ya que tiene integrado un sistema de acople rápido tanto para la sopladora como al sistema de transporte y alimentación de preformas
- Utilizando tecnología de ultima generación en forma apropiada se logra un control efectivo del calentamiento de la preformas, donde el operario minimiza su intervención directa, agilizando la operación.
- Se recomienda establecer un control de temperatura de forma independiente para cada modulo y para cada zona de la preforma, ya que esto mejoraría la curva de temperatura a un nivel mas exacto, pues el factor critico en este caso es la estabilización de la temperatura en un corto tiempo, esto solo se puede lograr estableciendo tres fases de calentamiento (calentamiento rápido, estabilización y ajuste final), en función de las preformas que tienen generalmente poseen un perfil no muy homogéneo tanto en su sección transversal y como en su forma longitudinal.
- Se recomienda utilizar el cuadro comparativo de requerimientos para analizar cualquier otro sistema de calentamiento diferente a las resistencias y las lámparas halógenas.

BIBLIOGRAFÍA

B.V., Karlekar y R.M., Desmond, Transferencia de calor. Mc. Graw Hill. 1994
pag. 4-26, 319 - 389

HELLERICH, Walter. Guía de materiales plásticos. Propiedades, ensayos y
parámetros. Hanser. 1989 pag. 22 - 34, 39 - 86

LARBURU, Nicolás. Maquinas Prontuario. Técnicas de maquinas
herramientas. Editorial Paraninfo. 1992.

POPE, Edward. Manual de soluciones practicas para el ingeniero mecánico.
Mc. Graw Hill. 2000.

RODRIGUEZ, Gerardo. Manual de diseño Industrial. Curso básico. Ediciones
G. Gili S.A. 1989. pag. 31-102

ROSALER, Robert y RICE, James. Manual de Mantenimiento Industrial. Mc.
Graw Hill. 1988 pag. 2_102-130, 9_57-75, 11_1-5, 14_32-40

SHIGLEY, Joseph Edward y MISCHKE, Charles. Diseño en Ingenieria
Mecánica. Mc. Graw Hill. 1990. pag. 207-256, 750-783

SHIGLEY, Joseph Edward y MITCHELL, Larry. Manual de Diseño Mecánico.
Mc. Graw Hill. 1989. pag. 4-26, 191 - 200, 290 - 296

SMITH, Carlos y CORRIPIO, Armando. Control Automático de Procesos, Aplicaciones y Prácticas. Limusa. 1999.