

Diseño y construcción de red hidráulica para conducción de agua en proceso industrial

A.J. Cordero-Escamilla¹, J.M. Martínez-Burrola¹, V.E. Manqueros Avilés¹.

Resumen— Una de las funciones de la ingeniería es orientar los conocimientos para su uso en actividades industriales, teniendo como reto llevar la teoría del aula a la realidad de la práctica. El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir una red hidráulica para conducir agua en un proceso industrial, cumpliendo los requisitos inherentes a un proceso productivo ya establecido. La metodología usada consistió primeramente en la definición de las condiciones de diseño, realización de diseño preliminar, cálculo de pérdidas de carga por flujo en tuberías, así como la selección de equipos y componentes requeridos, para luego efectuar la construcción; una vez instalada la red hidráulica, se hizo el diseño, fabricación e instalación del sistema eléctrico de control, efectuando finalmente las pruebas de operación. Al terminar se logró el diseño, construcción, instalación y prueba de una red hidráulica para extraer en 7 máquinas de proceso industrial un flujo de 3 GPM de agua para cada una; recolectando los flujos en un tanque intermedio y bombeándose con una rapidez de 26 o 52 GPM hacia un tanque final. Al terminar, se cumplieron todas las condiciones de diseño especificadas al inicio del proyecto.

Palabras claves— Bomba centrífuga, diseño, pérdidas en tuberías, red hidráulica.

Abstract— One of the functions of engineering is to guide knowledge for use in industrial activities, with the challenge of bringing classroom theory to the reality of practice. The objective of this work was to design and build a hydraulic system to conduct water in an industrial process, satisfy the requirements inherent to an already established productive process. The methodology used consisted primarily in the definition of design conditions, preliminary design, calculation of flow losses in pipelines, as well as the selection of required equipment and components, and then the construction; once the hydraulic system was installed, the design, manufacture and installation of the electrical control system was carried out, finally carrying out the tests of operation. At the end, the design, construction, installation and testing of a hydraulic system was achieved to extract in 7 industrial process machines a flow of 3 GPM of water for each one; collecting the flows in an intermediate tank and pumping with a speed of 26 or 52 GPM towards a final tank. When finished, all the design conditions specified at the beginning of the project were fulfilled.

Keywords— Centrifugal pump, design, losses in pipes, hydraulic system.

LI. INTRODUCCIÓN

El primero paso para efectuar un diseño es identificar la necesidad. Existen muchas condiciones intrínsecas que dependen del entorno particular del diseñador o de la propia naturaleza del problema, por ejemplo, los procesos de fabricación de que se dispone, así como las instalaciones y condiciones de operación de las plantas industriales, vienen a ser restricciones a la libertad de acción del diseñador y por tanto, forman parte de las condiciones intrínsecas. Todo lo que limite la libertad de elección del diseñador es una condición o restricción [1].

En el caso del diseño de una red hidráulica, es necesario que la instalación proyectada cubra ciertos aspectos para asegurar que la construcción, instalación, operación, y mantenimiento cumplan los requisitos definidos tanto para la propia red como para el área o proceso donde se instalará, asegurando que se realicen estas actividades de forma eficaz y eficiente. Debido a que el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo ha realizado trabajos para diferentes empresas de la región, es que tiene el vínculo con una empresa del sector alimenticio. Es a partir de una necesidad de dicha empresa, que surge este proyecto; consistiendo en el diseño y construcción de una red hidráulica para conducción de agua en proceso industrial.

A. Red hidráulica

Una red hidráulica incluye tuberías de diferentes diámetros unidas entre sí para controlar la razón de flujo, así como bombas para presurizar el fluido, y diferentes elementos (válvulas, tanques, codos, etc.) que se conectan entre sí. En una red hidráulica se debe poner particular atención a la fricción, que se relaciona directamente con la caída de presión y las pérdidas de carga [2]. Las pérdidas de carga en las tuberías son de dos clases: primarias y secundarias. Las pérdidas primarias tienen lugar en flujo uniforme, principalmente en los tramos de tubería de sección constante. Las pérdidas secundarias tienen lugar en las transiciones (estrechamientos o expansiones de la corriente), codos, válvulas y en toda clase de accesorios de tubería [3].

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. El régimen de flujo depende

¹ Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico s/n, Cd. Lerdo Dgo, C.P. 35158, Durango, México.
acordero@itslerdo.edu.mx

principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds (1) y se expresa para flujo interno en una tubería circular como:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1)$$

Donde V es la velocidad promedio de flujo, D es la longitud característica (diámetro para este caso), ν es la viscosidad cinemática, ρ es la densidad y μ la viscosidad dinámica. Para condiciones prácticas: el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \leq 2300$, turbulento para $Re \geq 4000$, y transicional entre ellos.

Un elemento de interés en el análisis de flujo de tubería es la caída de presión ΔP , porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo. En la práctica [3], es conveniente expresar la pérdida de presión para todos los tipos de flujos internos totalmente desarrollados en (2) como:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

donde f es el factor de fricción de Darcy, L es la longitud de la tubería, D el diámetro interno. En el caso de tuberías circulares con flujo interno laminar, el factor de fricción se define en (3) por:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

El factor de fricción de un flujo turbulento en tubería totalmente desarrollado en tubería circular depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa ϵ/D . La forma funcional de esta relación no se puede obtener a partir de un análisis teórico. A partir de los resultados experimentales de Colebrook, en (4) se tiene la siguiente relación implícita:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

En el análisis de los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión comúnmente se expresan en términos de la altura de la columna de fluido equivalente (5), llamada pérdida de carga h_L , por lo que la pérdida de carga es:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Esta pérdida primaria de carga h_L representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería.

En el caso de las pérdidas secundarias (o menores), éstas se deben a que el fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias, válvulas, codos,

ensanchamientos, etc., que interrumpen el suave flujo y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla de flujo que producen. Considerando el coeficiente de pérdida K_L (definido experimentalmente por el fabricante del accesorio), la pérdida (menor) de carga para un accesorio se define en (6) por:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

siendo V = velocidad promedio del fluido, g = constante gravitacional. Cuando ya están disponibles todos los coeficientes de pérdida, la pérdida de carga total en un sistema de tubería se muestra en (7):

$$h_{L,total} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_L \frac{V_j^2}{2g} \quad (7)$$

donde i representa cada tramo de tubería con diámetro constante y j representa cada accesorio que provoca una pérdida menor.

La ley de la conservación de la energía establece que en todo circuito fundamental en una red hidráulica, las pérdidas de energía son iguales a la energía externa que recibe el fluido. Cuando un sistema de tuberías incluye una bomba [4], la ecuación de energía de flujo estacionario sobre una base de masa unitaria se puede expresar como se muestra en (8):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (8)$$

Donde h_{bomba} es la carga de bomba útil entregada al fluido, α es el factor de corrección de energía cinética cuyo valor está cerca de 1.05 para la mayoría de los flujos (turbulentos) y h_L es la pérdida de carga total en las tuberías (pérdidas primarias y secundarias) entre los puntos 1 y 2. La mayoría de sistemas de tuberías prácticos incluyen una bomba para llevar un fluido de un depósito a otro. Cuando se considera que los puntos 1 y 2 están en las superficies libres de los depósitos, la ecuación de energía se reduce para la carga de bomba útil necesaria a

$$h_{bomba} = (z_2 - z_1) + h_L \quad (9)$$

debido a que las velocidades en las superficies libres son despreciables para depósitos grandes y las presiones están a presión atmosférica. Por lo tanto, la carga de bomba útil es igual a la diferencia de elevación entre los dos depósitos más las pérdidas de carga (primarias y secundarias).

Una vez que se conoce la carga de bomba útil, la potencia mecánica que necesita aplicarse al eje de la bomba se define en (10):

$$\dot{W}_{bomba,eje} = \frac{\rho \dot{V} g h_{bomba}}{n_{bomba}} \quad (10)$$

donde \dot{W} es la potencia mecánica necesaria, \dot{V} es el flujo volumétrico o caudal, y n_{bomba} es la eficiencia de la bomba.

LII. METODOLOGÍA

En el diseño y construcción de la red hidráulica para conducción de agua en proceso industrial, se llevaron a cabo de manera general las siguientes etapas: A. Definición de condiciones de diseño; B. Diseño hidráulico preliminar; C. Cálculo de pérdidas de carga por flujo en tubería; D. Selección de equipo y componentes; E. Construcción e instalación hidráulica; F. Diseño, fabricación e instalación de sistema de control; G. Pruebas de operación.

Debido a las características de operación donde se llevó a cabo este trabajo, se consideraron dos áreas: área de máquinas y área de tanque pulmón.

A. Definición de condiciones diseño

Dado que el trabajo se realizó en una empresa industrial, las condiciones fueron definidas en conjunto con los responsables de los procesos de producción, considerando entre otras cosas: disposición de equipos e instalaciones, condiciones de operación y mantenimiento de los procesos, políticas y normativa de la empresa, así como disponibilidad de materiales, equipos y proveedores. Aunque la necesidad parecía sencilla (transportar cierta cantidad de agua en forma constante de una sección de la planta a otra), fue necesario realizar varias inspecciones a los equipos e instalaciones, tener reuniones con personal de la empresa, así como investigar de forma preliminar, posibles materiales a utilizar. Las condiciones de diseño fueron: extracción a 7 máquinas de proceso un flujo de agua @ 40 °C de 3 GPM por máquina; operación de sistema 24h/día; uso de acero inoxidable y plástico; bombas centrífugas con accionamiento eléctrico 220VCA; potencia de motor eléctrico al mínimo requerido; la red hidráulica no debería de afectar la operación, mantenimiento y apariencia de los equipos de proceso instalados; la construcción, instalación y prueba de la red hidráulica en el área de máquinas debería de hacerse en los tiempos muertos del proceso y sin afectar las actividades productivas; adquisición de materiales y servicios con proveedores locales; sistema de control automático sin monitoreo de variables.

B. Diseño hidráulico preliminar

La propuesta preliminar del diseño se muestra a

continuación:

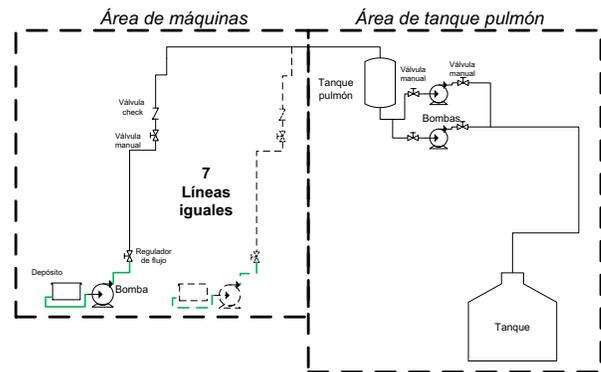


Figura 1. Diseño preliminar de red hidráulica

Para el área de máquinas se consideraron 7 líneas hidráulicas en paralelo para las correspondientes máquinas de proceso, hasta llegar a un cabezal donde se concentraban las líneas, para conducir el agua al tanque pulmón. Para el área de tanque pulmón, se consideró este como un tanque intermedio encargado de recolectar el agua proveniente de las 7 máquinas de proceso, para desplazar el agua hacia el tanque destino ubicado en otra parte de la planta.

C. Cálculo de pérdidas de carga por flujo en tubería.

Los elementos que conformaban una línea en el área de máquinas, se muestran en la siguiente tabla:

TABLA I
ELEMENTOS HIDRÁULICOS DE UNA LÍNEA EN ÁREA DE MÁQUINAS

Cantidad	Elemento
2	Reducción bushing 1-3/4", inox
6	Niple botella 3/4", inox
3	Cople 3/4", inox
2	Reducción bushing 3/4-1/2", inox
4	Niple 1/2x3", inox
2	Cople 1/2", inox
2	Tuerca unión 3/4-1/2", inox
6	Codo 45° 1/2", inox
6	Tuerca unión 3/4", inox
14	Codo 90° 1/2", inox
1	Válvula manual 3/4" esfera, inox
1	Válvula chek 3/4", inox
16 metros	Tubo inoxidable 3/4"
3 metros	Manguera 3/4", plástico

Considerando el flujo de 3 GPM y los elementos que conformaban cada línea de cada máquina, se determinó un flujo turbulento ya que $Re = 26\ 060$. Con la ecuación (4) se determinó que el factor de fricción $f = 0.026$, para a su vez con la ecuación (5) se determinó la pérdida primaria en esta sección. Para las pérdidas secundarias, los valores de K se tomaron de la referencia [3], y por medio de la ecuación (6) se determinaron las pérdidas de carga para cada tipo de accesorio. Al aplicar la ecuación (9) considerando la diferencia de alturas ($Z_2 - Z_1$) y la pérdida total h_L , se determinó que la carga de bomba útil para la

línea hidráulica en el área de máquinas era de $h_{bomba} = 12.3 \text{ mH}_2\text{O}$. Para el área de tanque pulmón, los elementos que conformaban la línea en esta área se muestran en la siguiente tabla:

TABLA II
ELEMENTOS HIDRÁULICOS DE LÍNEA EN ÁREA DE TANQUE PULMÓN

Cantidad	Elemento
13	Codo 90° 2", inox
4	Válvula manual 2" mariposa, inox
3	Válvula chek 2", inox
130 metros	Tubo inoxidable 2"

Aplicando el mismo procedimiento a las condiciones de la línea hidráulica en el área de tanque pulmón, se determinó que para un flujo de 21 GPM la carga de bomba útil requerida era de 7.5 mH₂O.

D. Selección de equipo y componentes;

A partir de los requerimientos y diseños realizados, se hizo la selección de todos los elementos requeridos. Como ejemplo, se muestra la selección del modelo de bomba centrífuga para las líneas en el área de máquinas. En este equipo, la dificultad se presentó ya que por el bajo flujo y carga alta, la mayor parte de opciones comerciales se referían a bombas de desplazamiento positivo; sin embargo, era requisito del proyecto que fuera bomba centrífuga con motor eléctrico.

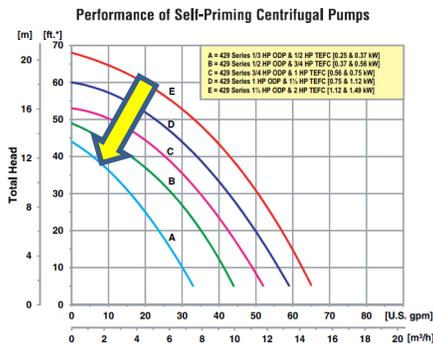


Figura 2. Curva de operación bomba AMT^R

A partir de las condiciones de diseño y los valores calculados de caudal y carga de bomba útil, se seleccionó la bomba marca AMT modelo 4294-98 (curva A de la figura 2) de 1/3 HP 1φ 220 VAC, autocebante, para emplearse en las 7 líneas del área de máquinas. De igual forma y con la correspondiente curva del fabricante, para el área de tanque pulmón se seleccionó la bomba centrífuga marca Q-Pumps, modelo QC-100, 1 HP, 3φ, 220/440 VAC, para un flujo de 26 GPM y una carga de 15 mH₂O, para usarse dos equipos en paralelo.

E. Construcción e instalación hidráulica

Los autores de este artículo fueron responsables de la supervisión de la construcción e instalación, así como de asegurarse que al terminar se cumplieran las condiciones

especificadas para el proceso, ya que los trabajos fueron subcontratados a un especialista en acero inoxidable,

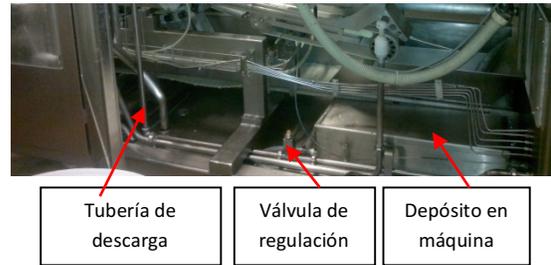


Figura 3. Instalación dentro de máquina de proceso

En la figura 3 se muestra el depósito del cual se succionaba el agua hacia la bomba (ubicada en la siguiente sección de la máquina de proceso), para luego enviarla a través de la tubería de descarga hacia el cabezal. Dadas las limitadas condiciones de espacio y accesibilidad del compartimiento de la máquina donde se ubicaría la bomba centrífuga de 1/3 HP, fue necesario hacer las conexiones de succión y descarga por medio de manguera; dicha situación se muestra en figura 4.



Figura 4. Bomba ubicada en compartimiento de máquina

El agua proveniente de la bomba se conduce por la tubería en diferentes secciones de la máquina hasta llegar a un panel de servicio, saliendo hacia la parte superior y subiéndose varios metros hasta llegar al tubo cabezal.

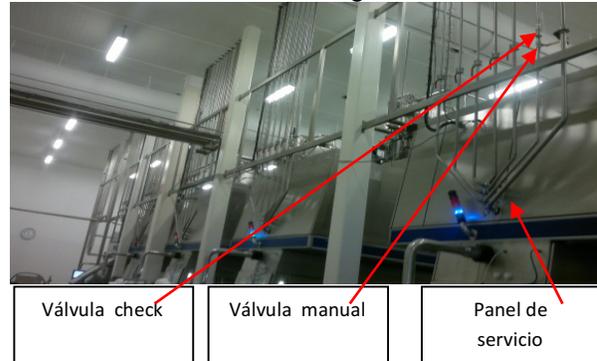


Figura 5. Tuberías de descarga hacia tubo cabezal

Como se muestra en la siguiente figura (6), las descargas de cada máquina llegaban a un tubo cabezal, el cual dirige el fluido hacia el tanque pulmón.

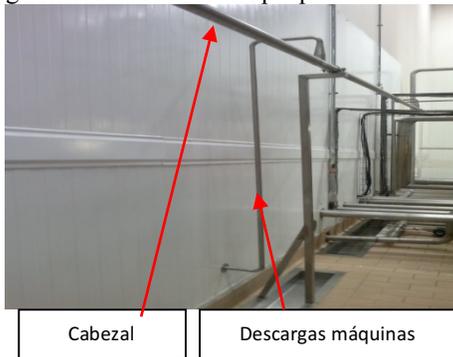


Figura 6. Tuberías de descarga hacia tubo cabezal

Para terminar la red hidráulica en el área de máquinas, la tubería conecta al tanque pulmón.

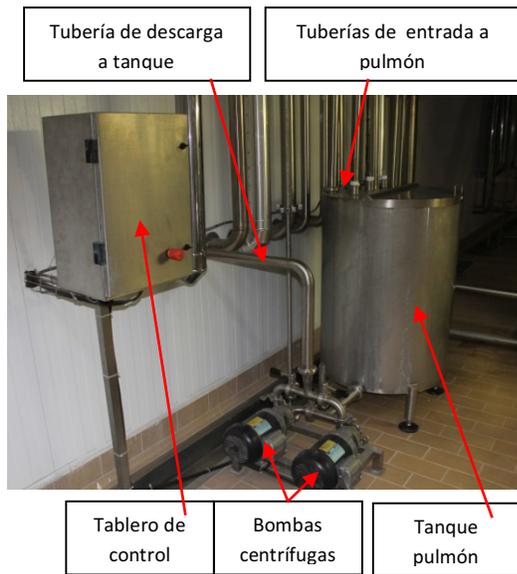


Figura 7. Tuberías de descarga hacia tubo cabezal

En la figura 7 se muestra el tanque pulmón conectado a la succión en paralelo de bombas centrífugas de 1 HP. Las descargas de dichas bombas se conectan a la tubería de 2” que dirige el agua hacia el tanque destino, ubicado en otra parte de la planta.

F. Diseño, fabricación e instalación de sistema de control

Por parte de los autores, se diseñó e implementó el control para las bombas del tanque pulmón. Se buscó que el sistema opere con dos bombas de 1 HP las cuales son activadas dependiendo del nivel que tenga el tanque pulmón, para lograr dicha acción se usaron controladores de nivel (Telemecanique modelo RM4LA32M) de conductividad los cuales están conectados a tres varillas las cuales fijan el nivel de arranque de las bombas. Es

decir las bombas están en paro si el nivel del tanque esta en vacío (es decir, ninguna de las varillas tiene conductividad), si la primera de ellas es alcanzada por el nivel del agua se acciona la bomba 1 disminuyendo el nivel; no obstante si la cantidad de flujo de las máquinas de proceso hacia el pulmón es considerable, el nivel del pulmón subirá más rápido y la varilla número dos alcanza a tener contacto con la solución, entrando así a la par de la bomba 1 también la bomba 2; y al descender el nivel y perder contacto solo se detendrá la bomba dos.

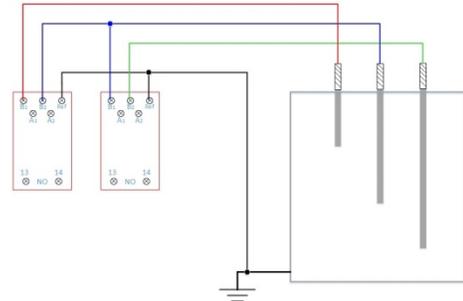


Figura 8. Interconexión de relevadores de nivel

Para lograr el arranque de la bomba 1 y conforme el pulmón alcance mayor nivel y arrancar la bomba dos, se realizó el circuito de control mostrado en la figura (9), y se puede apreciar que se dotó al circuito de un paro de emergencia para la seguridad del personal y equipo.

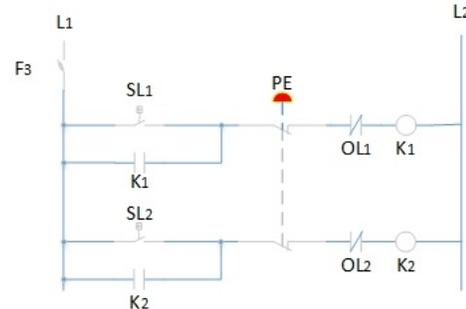


Figura 9. Control de paro y arranque de bombas de 1HP



Figura 9. Tablero de control para bombas en tanque pulmón.

G. Pruebas de operación.

Una vez terminada la instalación, fue necesario realizar pruebas para revisar el buen funcionamiento, así como inspeccionar en busca de alguna anomalía. En el caso de las líneas en el área de máquinas, fue necesario ajustar por medio de la válvula de restricción los flujos de cada equipo.

LIII. RESULTADOS

Se logró el diseño, construcción, instalación y prueba de una red hidráulica para extraer en 7 máquinas de proceso industrial un flujo de 3 GPM de agua para cada una; recolectando los flujos en un tanque pulmón y bombeándose con una rapidez de 26 o 52 GPM hacia un tanque final. El sistema es capaz de operar de forma continua, y contiene elementos que son fáciles de adquirir. Además, los trabajos se hicieron sin afectar la operatividad de la planta industrial.

LIV. CONCLUSIÓN

El sistema construido cumplió todas las condiciones de diseño especificadas al inicio del proyecto. Desde el punto de vista hidráulico, el arreglo de la red de conductos y accesorios en el área de máquinas presenta demasiadas pérdidas secundarias, sin embargo fue necesario realizarlo así para poder cumplir las condiciones requeridas en la operación, mantenimiento y estética de los equipos ya instalados.

LV. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

LVI. REFERENCIAS

- [74] Shigley, J. (1990). *Diseño en Ingeniería Mecánica*, 5ª. Edición. Mc Graw Hill. México D.F.
- [75] Cengel, Y., Cimbala J. (2012). *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*, 2a. edición. Mc Graw Hill. México D.F.
- [76] Mataix C. (1986) *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, 2ª, Edición. Harla. México D.F.
- [77] IMSS, Guías técnicas de construcción: instalaciones hidráulicas, sanitarias y especiales. Tomo 3, 2004.
- [78] Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas. Obtenido de: <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/747.htm>
- [79] Grundfos, *Guía de productos Bombas*, Grundfos de México S.A. de C.V., 2014, Apodaca N.L.
- [80] Andrade M., Zarza N. "Cálculo de la red hidráulica para el circuito de enfriamiento de un proceso de inyección de plásticos". Tesis de Ingeniería, ESIME, Instituto Politécnico Nacional.

LVII. BIOGRAFÍA



Cordero Escamilla Armando José. Nació el 14 de Julio de 1975 en San Luis Potosí, Mex. Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en el Instituto Tecnológico de Durango en 1998. Posteriormente logró la Maestría en Ingeniería con especialidad en Sistemas de Calidad, en 2008. Ha cursado diplomados en Gestión de Tecnología, Habilidades Gerenciales y Sistemas Fotovoltaicos.

Actualmente se desempeña como Profesor de Carrera de Enseñanza Superior Titular A, impartiendo clases en las carreras de Ingeniería Electromecánica, Electrónica y Ambiental del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, en el estado de Durango. También colabora en el área de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la misma Institución, al participar en proyectos vinculados con empresas de la región y Centros de investigación nacionales. Las áreas de interés son: térmica, hidráulica, energías renovables y procesos industriales, entre otras. El M.I. Cordero recibió el Premio Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación Durango 2012 en el área de Desarrollo Industrial, por parte del Gobierno del Estado



Martínez Burrola, Juan Manuel. Nació el 12 de Noviembre de 1985 en Matehuala, San Luis Potosí, Mex. Obtuvo el título de Ingeniero Químico en Alimentos en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, en la Cd. de Chihuahua, Mex., en Junio de 2009. Posteriormente concluyó sus estudios de posgrado en la Especialidad de Mecatrónica en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL), en cd. Lerdo, Dgo. Méx., en febrero de 2016.

Él actualmente labora como Profesor de Tiempo Completo en el ITSL en la División de Ambiental, donde su principal responsabilidad es el Laboratorio de Ambiental. Además colabora activamente en el Departamento de Investigación y Desarrollo del ITSL en proyectos ambiciosos de distintas áreas como la mecánica, electrónica y tratamiento de agua.

El Ing. Martínez ha publicado el artículo: "Effect of cooking on the capsaicinoids and phenolics contents of Mexican peppers" para la revista arbitrada Food Chemistry, Volume 119, Issue 4, 15 April 2010, Pages 1619-1625. Ha participado en diferentes congresos exponiendo los trabajos de I +D del ITSL.

Manqueros Avilés Víctor Edi. Nacido en la ciudad de Durango, Durango el 23 de Diciembre de 1976. Radica actualmente en Cd. Lerdo, Durango. Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de Durango en el 2001, Obtuvo el grado como Maestro en Ciencias En Ingeniería Electrónica en Control, en el 2006 en el Instituto Tecnológico de Durango.



Actualmente trabaja como docente e Investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, dentro de la división de posgrado, en donde imparte asignaturas en la especialización en ingeniería mecatrónica, participa también desde el 2009 en la subdirección de investigación y desarrollo del tecnológico, en donde ha desarrollado en alrededor de 10 proyectos vinculados con empresas y centros de investigación. Áreas de interés: Control, Automatización, Mecatrónica, Robótica, Instrumentación, entre otras.