

Volumen 2, Número 3 — Abril — Junio -2015

ISSN -2410-3454

Revista de
Aplicaciones de la
Ingeniería

ECORFAN[®]

Bases de datos

Google Scholar.



ECORFAN-Bolivia

Directorio

Principal

RAMOS ESCAMILLA- María, PhD.

Director Regional

SERRUDO GONZALES- Javier, BsC

Director de la Revista

ESPINOZA GÓMEZ- Éric, MsC

Relaciones Institucionales

IGLESIAS SUAREZ- Fernando, BsC

Edición de Logística

DAZA CORTEZ- Ricardo, BsC

Diseñador de Edición

RAMOS ARANCIBIA- Alejandra, BsC

Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, Volumen 2, Número 3, de Abril a Junio 2015, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Santa Lucía N-21, Barrio Libertadores, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: www.ecorfan.org, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: Ramos Escamilla-María, Co-Editor: Serrudo González-Javier. ISSN-2410-3454. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. Escamilla Bouchán- Imelda, Luna Soto-Vladimir, actualizado al 30 de Junio 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Consejo Editorial

GALICIA-PALACIOS, Alexander, PhD.
Instituto Politécnico Nacional

NAVARRO-FRÓMETA, Enrique, PhD.
*Instituto Azerbaidzhan de Petróleo y
Química Azizbekov*

BARDEY, David PhD.
University of Besançon

ROCHA-RANGEL, Enrique, PhD.
Oak Ridge National Laboratory

TUTOR-SÁNCHEZ, Joaquín, PhD.
Universidad de la Habana

VERDEGAY-GALDEANO, José PhD.
Universidad de Granada

OROZCO-GUILLÉN, Eber PhD.
*Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y
Electrónica*

QUIROZ MUÑOZ, Enriqueta, PhD.
El Colegio de México

Consejo Arbitral

DIONISIO-ZACARIAS, José, PhD.
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

JIMENEZ, Pedro, PhD.
Posgrado - Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - IPN, México

HERNANDEZ-HERNANDEZ, Ana,
MsC.
CINVESTAV - Unidad Mérida, México

SANABRIA-MONTAÑA, Christian,
MsC.
CINVESTAV - Unidad Mérida, México

ROMERO-RAMIREZ, Salvador, MsC.
Universidad de Londres, México

ZAVALA, Manuel, MsC.
Universidad de Londres, México

BLANCO-COCOM, Luis, MsC.
Universidad Autónoma de Yucatán, México

CHAN-CHI, Noe, Mtro.
Universidad Autónoma de Yucatán, México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en las áreas de Aplicaciones de la Ingeniería.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión del Editor en Jefe.

Como primer artículo esta *Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil* por SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús con adscripción Tecnológico Nacional de México, como siguiente artículo esta *Proyecto Dren Norponiente de la ciudad de Pachuca* por KAMPFNER, Oscar, SILVA, Martín, PAZ, Silvestre y REYES, José, como siguiente artículo esta *Sistema de Semáforos Inteligentes Utilizado Sensores de Presencia* por JACOBO, Armando, como siguiente artículo esta *Modelo de Planeación Estratégica para el Reciclado de Papel en el ITSSNP* por HERNÁNDEZ-CORONA, Sergio, LUNA-MIRANDA, Ana Bertha y GARRIDO-ROSADO Rafael con adscripción Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla, Universidad Autónoma de Tlaxcala, como siguiente artículo esta *Mejoramiento del OEE en la Línea de Producción siguiendo la Metodología Seis Sigma + Lean* por GONZÁLEZ, Martín y CUAUHTÉMOC, Lehi con adscripción Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, como siguiente artículo esta *Correlación de la Prueba de Indentación Miniatura contra pruebas mecánicas convencionales: Prueba de Impacto Charpy, Termofluencia y Tenacidad a la Fractura* por SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, RODRIGUEZ-CASTILLO, Mario, ORTIZ-MARISCAL, Arturo, LEDEZMA, Karen y LÓPEZ-HIRATA, Víctor, como siguiente artículo esta *Análisis de una máquina de inducción en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para determinar su desempeño con carga* por ARAGÓN, David, ESCARELA, Rafael, OLIVARES, Juan, HERNANDEZ, José, JIMENEZ, Víctor y GONZALEZ, Felipe con adscripción Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, como siguiente artículo esta *Diseño de un reductor de 746 W de acero de bajo C para una máquina de pruebas de abrasión* por RODRIGUEZ, Mario, PALACIOS, Luis, AVILA, Erika, RESENDIZ, Celerino y OCAMPO, Gabriel como siguiente artículo esta *Estudio del engrosamiento de precipitados en un acero HK40 envejecido a 800 y 900 °C* por ORTIZ-MARISCAL, Arturo, SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, LÓPEZ-HIRATA, Víctor, MARTINEZ-SANDOVAL, Uriel y ÁVILA-DÁVILA, Erika, como siguiente artículo esta *Control de movimiento de los divisores de salida de un separador tipo espiral empleando conexión directa y remota* por ESTRADA-RUIZ, Rosa, FLORES-CAMPOS, Rubén, RAMOS-CANO, Diego y VELARDE-SÁNCHEZ, Emma.

| Contenido | Articulo | Pag |
|---|-----------------|------------|
| Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús | | 127-138 |
| Proyecto Dren Norponiente de la ciudad de Pachuca KAMPFNER, Oscar, SILVA, Martín, PAZ, Silvestre y REYES, José | | 139-146 |
| Sistema de Semáforos Inteligentes Utilizado Sensores de Presencia JACOBO, Armando | | 147-152 |
| Modelo de Planeación Estratégica para el Reciclado de Papel en el ITSSNP HERNÁNDEZ-CORONA, Sergio, LUNA-MIRANDA, Ana Bertha y GARRIDO-ROSADO Rafael | | 153-167 |
| Mejoramiento del OEE en la Línea de Producción siguiendo la Metodología Seis Sigma + Lean GONZÁLEZ, Martín y CUAUHTÉMOC, Lehi | | 168-180 |
| Correlación de la Prueba de Indentación Miniatura contra pruebas mecánicas convencionales: Prueba de Impacto Charpy, Termofluencia y Tenacidad a la Fractura SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, RODRIGUEZ-CASTILLO, Mario, ORTIZ-MARISCAL, Arturo, LEDEZMA, Karen y LÓPEZ-HIRATA, Víctor | | 181-186 |
| Análisis de una máquina de inducción en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para determinar su desempeño con carga ARAGÓN, David, ESCARELA, Rafael, OLIVARES, Juan, HERNANDEZ, José, JIMENEZ, Víctor y GONZALEZ, Felipe | | 187-196 |
| Diseño de un reductor de 746 W de acero de bajo C para una máquina de pruebas de abrasión RODRIGUEZ, Mario, PALACIOS, Luis, AVILA, Erika, RESENDIZ, Celerino y OCAMPO, Gabriel | | 197-208 |
| Estudio del engrosamiento de precipitados en un acero HK40 envejecido a 800 y 900 °C ORTIZ-MARISCAL, Arturo, SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, LÓPEZ-HIRATA, Víctor, MARTINEZ-SANDOVAL, Uriel y ÁVILA-DÁVILA, Erika | | 209-214 |
| Control de movimiento de los divisores de salida de un separador tipo espiral empleando conexión directa y remota ESTRADA-RUIZ, Rosa, FLORES-CAMPOS, Rubén, RAMOS-CANO, Diego y VELARDE-SÁNCHEZ, Emma | | 215-223 |

Instrucciones para Autor

Formato de Originalidad

Formato de Autorización

Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil

SANDOVAL, Sergio*†, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús

Tecnológico Nacional de México, Modulo Cd. Guzmán, Departamento de Ingeniería Electrica-Electrónica, Av. Tecnológico N °100, Zapotlán El Grande, Jalisco, México.

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

En este trabajo, se pretende que la velocidad lateral siga a una maniobra del conductor que es una delta pero en sentido contrario. Se propone que el vehículo se encuentra realizando pruebas de manejo conocidas por normas internacionales ISO 3888-1 e ISO 7401, por ende el seguimiento de la velocidad longitudinal y la estimación de la velocidad lateral se puede realizar mediante un observador no lineal de tres grados de libertad ya que se supone la medición de la velocidad angular de viraje. Los actuadores que integraremos en este artículo serán los frenos (M_z) y el sistema frontal activo (AFS, por sus siglas en inglés). En esta investigación se realiza la formalización matemática del observador y se muestran por medio de la simulación de Matlab-Simulink-CarSim a la velocidad lateral, velocidad longitudinal y las perturbaciones de viento aplicadas en el automóvil, además de analizar la estabilidad de errores del observador por medio de una función candidata de Lyapunov.

Observador, velocidad lateral, velocidad angular de viraje.

Abstract

In this paper we aim that the lateral velocity follows to a driver's maneuver called "delta" but in a different direction. It's proposed that the vehicle makes a driving test known for international standards as the ISO 3888-1 and ISO 7401 and therefore the follow up of the longitudinal and lateral velocities can be performed with a no lineal observer with three degrees of liberty since it is supposed the measurement of the yaw velocity. The actuators that we will integrate in this paper will be the brakes (M_z) and the Active Front System (AFS). In this investigation we develop the mathematical model of this observer, and also we see the lateral velocity, the longitudinal velocity and the wind disturbances applied to the automobile through simulations in Matlab-Simulink-CarSim. Furthermore the stability in the observer's errors is analyzed using a Lyapunov function.

Observer, lateral velocity, yaw velocity.

Citación: SANDOVAL, Sergio, RUIZ, Daniel, TOPETE, Juan y MOLINAR, Jesús. Observador No Lineal de Tres Grados de Libertad en Matlab-Simulink-CarSim Aplicado al Automóvil. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 127-138

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ssandoval@itcg.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El control activo puede establecer una ayuda al conductor en el vehículo, sumando acciones futuras al incrementar la maniobrabilidad y seguridad, especialmente en situaciones críticas. Estas acciones activas incluyen la estabilidad de viraje o por sus siglas en inglés yaw (ver Acosta et al. (2007, 2008), Pan (2014)) y el control integrado del automóvil (Goodarzi et al. (2007), Lam (2010), Zakaria (2014)). Estas acciones de control pueden ser realizadas por un instante, haciendo uso de los actuadores como el sistema frontal activo AFS y el vector de torque trasero (RTV). Estos modifican las dinámicas del vehículo imponiendo fuerzas y momentos en el automóvil (Bianchi et al. (2010), Earl (2013), Tjonnas (2010), Rubin (2013)). La acción de control es usualmente determinada sobre las bases de modelos de aproximación que pueden ser simples para obtener una implementación de un controlador, pero capturando los aspectos principales de la física del problema del vehículo. Las dinámicas de la velocidad lateral y de viraje son usualmente consideradas en la síntesis del control, mientras que otras dinámicas son despreciadas. Por ejemplo las perturbaciones del viento son ignoradas, como en algunos casos de los vehículos que cuentan con controles activos, donde estos disturbios del aire no son analizados y deberían tomarse en cuenta para el diseño del control. En este artículo no se demuestra el control activo con AFS y RTV, pero se deberá diseñar este controlador con las consideraciones de las perturbaciones dinámicas del viento sobre el vehículo y así obtener una acción de control de alta eficiencia. Sin embargo otro problema que es considerado en este trabajo es el factor de algunas variables de estado necesarias para implementar las estrategias de control que no son usualmente medidas, por el costo y espacio de los sensores que se ocupan en el automóvil. Para un instante la velocidad lateral es raramente medida.

Aunque para obtener un control satisfactorio robusto, esta variable de estado debería ser determinada de otras mediciones tal como la aceleración longitudinal y lateral, velocidad longitudinal, velocidad angular de viraje y ángulo de maniobra del volante del conductor. Para un observador la velocidad lateral es tomada en cuenta para reconstruir las variables que no se pueden medir. Trabajos anteriores sobre observadores, limitados a la estimación de la velocidad lateral, se basan principalmente en técnicas lineales (Mudaliar et al. (2004), Oh (2012)) y en técnicas casi lineales (Ungoren et al. (2004), Yacine (2015)). Un observador no lineal, realizado para la linealidad de los errores dinámicos es propuesto en (Kiencke et al. (1997, 2000), Guo (2013)). Otro observador similar es presentado en (Hiemer et al. (2005)), forzando los términos de errores dinámicos no lineales estimados a los de un sistema de referencia lineal. Los observadores lineales y no lineales usan técnicas de modos deslizantes, los cuales son propuestos en (Baffet et al. (2007), Stephant (2007), Zhao (2014)). Otras propuestas de observadores están basadas en filtros extendidos Kalman (Ray (1995), Suissa (1996), Best et al. (2000), Ren (2014)). También un control activo de un vehículo es realizado en (Ohara et al. (2008)), mediante un controlador para activar el ángulo frontal de la rueda del automóvil, utilizando un modelo de referencia, basado en el método de un observador lineal. El trabajo de Tjonnas et al. (2010), presenta un algoritmo de estabilidad yaw, combinando AFS con un nivel bajo de control del ángulo de deslizamiento longitudinal de la rueda y una ley adaptativa que estima el valor máximo del parámetro del coeficiente de fricción de cada rueda. Bianchi (2010), combina el AFS y RTV en un controlador integrado garantizando la estabilidad del vehículo, haciendo uso de una retroalimentación adaptativa.

Hamzah (2012), presenta un algoritmo de control robusto mediante modos deslizantes, diseñado para mostrar que la conducción y estabilidad del vehículo puede ser mejorada mediante un control activo para la maniobra de las cuatro ruedas del automóvil. Un control de modelo predictivo (Gang 2011), es utilizado para obtener un controlador integrado para el vehículo en AFS y momento de viraje. Con la misma técnica, Di Cairano (2013), utiliza la diferencia de frenado y AFS, para el seguimiento de referencias diseñadas. Finalmente, Rubin (2013), direcciona el problema de control de viraje ó yaw del vehículo, usando un diferencial activo trasero, para minimizar el error de la velocidad angular de viraje y del error para el ángulo de deslizamiento del chasis del automóvil. En algunos de estos trabajos la influencia de las dinámicas de velocidades lateral y longitudinal es considerada para la estimación y control de las variables del vehículo. En lo que concierne al presente trabajo se tiene la siguiente organización. En la parte uno se muestra el modelo matemático del automóvil a utilizar con sus dinámicas de velocidad lateral, velocidad longitudinal y velocidad angular de viraje. En la sección dos se analizan las perturbaciones del viento sobre el automóvil mientras que en la parte tres se diseña el observador. En la sección de resultados se pueden ver las simulaciones en Matlab-Simulink-CarSim del observador no lineal de tres grados de libertad. Concluye el trabajo con anexos requeridos, agradecimientos, conclusiones correspondientes y referencias.

Modelo Matemático del Vehículo

El modelo matemático del vehículo puede ser en general un cuerpo rígido moviéndose en un espacio libre, de tres grados de libertad, conectado con la superficie terrestre a través de las llantas, el cual otorga un modelo de comportamiento no lineal.

Los actuadores para esta aplicación son los siguientes: (1) conducción frontal activo (AFS, Active Front Steer), o conducción por cable (SbW, Steer by Wire) y (2) frenos activos.

Esta complejidad de los sistemas no lineales puede ser disminuida considerando que para estudiar la estabilidad y/o la maniobrabilidad se revisarán solo las dinámicas de la velocidad lateral, v_y y la velocidad angular de viraje (yaw) $[\omega]_z$.

Por lo tanto, tomando en cuenta la Figura 1, y las dinámicas no lineales del vehículo que se generan en el llamado modelo de la bicicleta (Rajamani et al. (2006), Pacejka (2005)):

$$m(\dot{v}_x - v_y \omega_z) = m a_x + F_{dx} \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + v_x \omega_z) = \mu [F_{f,y}(\delta_c + \delta_d, x, \alpha_f) + F_{r,y}(x, \alpha_r)] + F_{dy} \quad (2)$$

$$J \dot{\omega}_z = \mu [l_f F_{f,y}(\delta_c + \delta_d, x, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)] + \mu M_z + M_{dz} \quad (3)$$

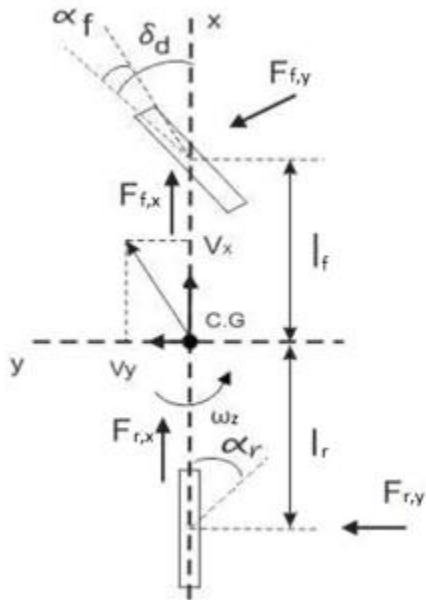


Figura 1 Modelo no lineal del vehículo (modelo de la bicicleta).

Donde:

- m Masa del vehículo [kg].
- J Momento de inercia del vehículo [kg m²].
- l_f, l_r Longitud desde el centro del vehículo hacia la llanta frontal y trasera [m].
- v_x Velocidad longitudinal del vehículo [m/s].
- v_y Velocidad lateral del vehículo [m/s].
- ω_z Velocidad angular de viraje [rad/s].
- $x = [v_y, \omega_z]$ Vector compacto del estado del vehículo.
- $\alpha_{f,o}$ Ángulo de deslizamiento de la llanta frontal [rad].

- α_f Ángulo de deslizamiento de la llanta frontal con control activo [rad].
- α_r Ángulo de deslizamiento de la llanta trasera [rad].
- δ_c Componente del ángulo de la llanta impuesto por el controlador [rad].
- δ_d Componente del ángulo de la llanta impuesto por el conductor [rad].
- M_z Momento de viraje resultado de los frenos activos [N·m].
- μ Coeficiente de fricción entre el suelo y el neumático.
- $F_{f,y}, F_{r,y}$ Fuerza lateral frontal y trasera de las llantas [N].
- $F_{f,x}, F_{r,x}$ Fuerza longitudinal frontal y trasera de las llantas [N].
- $F_{d,x}, F_{d,y}$ Fuerza aerodinámica longitudinal y lateral [N].
- $M_{d,z}$ Momento aerodinámico de viraje [N·m].

Y donde la fuerza lateral $F_{(f,y)}$, $F_{(r,y)}$ son funciones del ángulo impuesto a la llanta frontal, $[\delta = \delta_d + \delta_c]$, a los ángulos de deslizamiento lateral de las llantas definidos de la siguiente manera:

$$\alpha_f = \delta_c + \alpha_{f,o} = \delta_c + \delta_d - \frac{v_y + l_f \omega_z}{v_x} \tag{4}$$

$$\alpha_r = - \frac{v_y - l_r \omega_z}{v_x} \tag{5}$$

La fuerza lateral puede ser definida utilizando la conocida fórmula Mágica de Pacejka:

$$F_{j,y} = D_{j,y} \sin(C_{j,y} \arctan B_{j,y} \alpha_j). \quad (6)$$

Con $j = f, r$. Las constantes $B_{j,y}$, $C_{j,y}$, $D_{j,y}$ en (2) y (3) son determinadas experimentalmente.

Perturbaciones del viento externas

Las perturbaciones externas del aire son usualmente realizadas por el viento, las cuales pueden determinar situaciones peligrosas (Bosh (1996), Rajamani (2006)). En este artículo se proponen disturbios externos, los cuales pueden ser separados en tres dinámicas diferentes, F_{dx} , F_{dy} , M_{dz} afectando el eje longitudinal, lateral y angular de viraje del automóvil. Las perturbaciones externas afectan la estabilidad del vehículo, mientras este se mueve con respecto a una fuerza longitudinal (F_x), existiendo la fuerza de perturbación del viento F_{dx} en sentido contrario y con respecto a la fuerza lateral (F_y), también se aplica inversamente una fuerza F_{dy} . Dependiendo del punto de aplicación de la perturbación del viento, el disturbio del aire también crea un momento de viraje M_{dz} . Entonces con esta introducción de las perturbaciones del viento el modelo matemático en ecuaciones (1), (2), y (3), puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\dot{v}_x = v_y \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,x}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,x}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (7)$$

$$\dot{v}_y = -v_x \omega_z + \frac{\mu}{m} (F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) + F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_z = \left(\frac{\mu}{I}\right) (l_f F_{f,y}(x, \delta, \alpha_f) - l_r F_{r,y}(x, \alpha_r)) + \left(\frac{\mu}{J}\right) M_z + \frac{M_{dz}}{J} \quad (9)$$

Diseño del Observador

Se supone ahora que \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y , ω_z , \mathbf{v}_x , son medidas. Esta es una hipótesis aceptable en vehículos modernos, usualmente equipados con los sensores necesarios. La propuesta del observador no lineal se realiza como una copia de la planta en ecuación (1) y (2):

$$\dot{\hat{v}}_x = \hat{v}_y \omega_z + a_x + k_{o1} (v_x - \hat{v}_x) + \frac{F_{dx}}{m} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{v}}_y = -\hat{v}_x \omega_z + a_y + (k_{o2} - \omega_z) (v_y - \hat{v}_y) + \frac{F_{dy}}{m} \quad (11)$$

En donde, k_{o1} y k_{o2} son las ganancias del observador, que son determinadas utilizando la ecuación (7), (8) y (10), (11), mediante la estimación de los errores;

$$e_{vx} = v_x - \hat{v}_x \quad (12)$$

$$e_{vy} = v_y - \hat{v}_y \quad (13)$$

Siendo fácilmente calculados como:

$$\dot{e}_{vx} = -k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy} \quad (14)$$

$$\dot{e}_{vy} = -k_{o2} e_{vx} \quad (15)$$

Para las ecuaciones (14) y (15), es lineal y variante en el tiempo el término ω_z . A continuación se mostrará cómo determinar las ganancias, k_{o1} y k_{o2} , en (10) y (11).

Se debe además asegurar la convergencia exponencial de la estimación de error asumiendo que la velocidad angular de viraje $\omega_z \neq 0$, considerando $|\omega_z| \leq \omega_{z,max}$ y un cierto valor máximo $[(\omega)]_{z,max}$, para todo tiempo en un instante $t \geq 0$. Estas consideraciones físicas, son razonables, porque el vehículo es un sistema de energía finita, donde la máxima velocidad angular de viraje es acotada. Por lo tanto el diseño de este observador se considera, para $|\omega_z| > 0$. Además durante la maniobra de volanteo del automóvil, ω_z puede pasar a través del cero, pero no puede ser cero, en un intervalo finito de tiempo, siempre y cuando las fuerzas laterales no sean cero, mencionando con esto que el vehículo está estacionario. El diseño de las ganancias k_{o1} , k_{o2} en (10) y (11), se obtiene utilizando la siguiente función candidata de Lyapunov;

$$V(t, e) = \frac{1}{2} (\gamma_1 e_{vx}^2 + e_{vy}^2) - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vx} e_{vy} \tag{16}$$

Con $\gamma_1 > \kappa_1^2 > 0$, $\kappa_1 \neq 0$, y $\text{sign}(\cdot)$ la función signum:

$$\text{sign}(\omega_z) = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega_z > 0 \\ 0 & \text{si } \omega_z = 0 \\ -1 & \text{si } \omega_z < 0 \end{cases}$$

Derivando la función candidata de Lyapunov en (16), usando los errores dinámicos de (14) y (15), se obtiene;

$$\begin{aligned} \dot{V}(t, e) = & \gamma_1 e_{vx} (-k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy}) + e_{vy} (-k_{o2} e_{vx} - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vx} (-k_{o2} e_{vx}) - \kappa_1 \text{sign}(\omega_z) e_{vy} (-k_{o1} e_{vx} + \omega_z e_{vy}) - 2\kappa_1 \delta_D(\omega_z) \dot{\omega}_z e_{vx} e_{vy}. \end{aligned} \tag{17}$$

Donde la derivada, $\frac{d}{dt} \text{sign}(\omega_z) = 2\delta_D(\omega_z) \dot{\omega}_z$ siendo $\delta_D(\omega_z)$ la distribución de Dirac que para $|\omega_z| > 0$ se tiene $\delta_D(\omega_z) = 0$.

Se obtiene así:

$$\dot{V}(t, e) = (-k_{o1} \gamma_1 + \kappa_1 k_{o2} \text{sign}(\omega_z)) e_{vx}^2 - \kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 + (\gamma_1 \omega_z - k_{o2} + \kappa_1 k_{o1} \text{sign}(\omega_z)) e_{vx} e_{vy}. \tag{18}$$

La ecuación (18) se resuelve por el método de Cramer para determinar las ganancias del observador;

$$k_{o1} = \frac{\kappa_1 \omega_{z,max} + \kappa_1 \gamma_1 |\omega_z|}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \tag{19}$$

$$k_{o2} = \frac{\kappa_1^2 \text{sign}(\omega_z) \omega_{z,max} + \gamma_1^2 \omega_z}{\gamma_1 - \kappa_1^2} \tag{20}$$

Estableciendo las ganancias de las ecuaciones (19) y (20), en la derivada de la función candidata de Lyapunov (18);

$$\dot{V}(t, e) = -\kappa_1 \omega_{z,max} e_{vx}^2 - \kappa_1 |\omega_z| e_{vy}^2 \tag{21}$$

Donde se proponen los siguientes valores para ecuación (21);

$$\kappa_1 = \frac{1}{\omega_{z,max}} \lambda_s \tag{22}$$

$$\lambda_s > 0 \tag{23}$$

Acotando en (21), con las condiciones de (22) y (23), la derivada de la función de Lyapunov será estable:

$$\dot{V}(t, e) \leq -\lambda_s (e_{vx}^2 + e_{vy}^2) < 0 \tag{24}$$

Por lo tanto, el sistema de errores en (14) y (15) tiene el origen exponencialmente estable y la estimación de errores (12) y (13) tiende exponencialmente a cero con una constante de tiempo, $\tau = 1/\lambda_s$ propuesta por el diseñador. Además para el observador (10) y (11) con las ganancias en (19) y (20), asegura globalmente la conversión exponencial a cero la estimación de los errores.

Resultados

Maniobra doble volanteo

La Figura (2a) muestra la señal delta δ_d del conductor para una maniobra ISO 3888-1 con coeficiente de fricción neumático-suelo $\mu = 0.9$ (superficie seca) y $\mu = 0.5$ (superficie mojada), a los 3.5 segundos (ver Figura 2). Además las Figuras 3 y 4 muestran los resultados obtenidos con k_{o1}, k_{o2} en (10) y (11) considerando $\gamma_1 = 100, \lambda_s = 10$ en (19) y (20). Las perturbaciones de viento se muestran en la Figura 5.

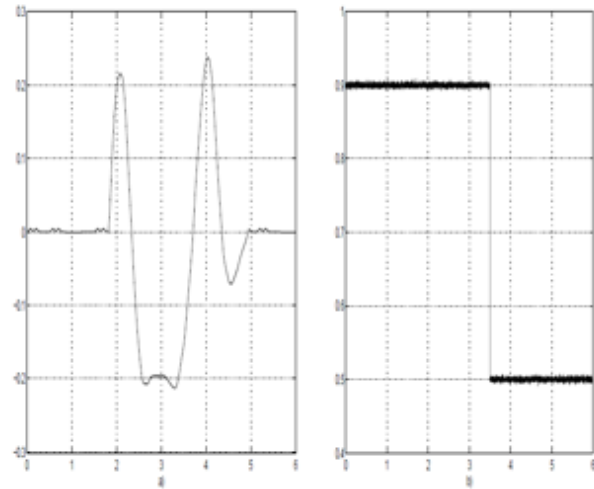


Figura 2 a) Señal δ_d delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción μ .

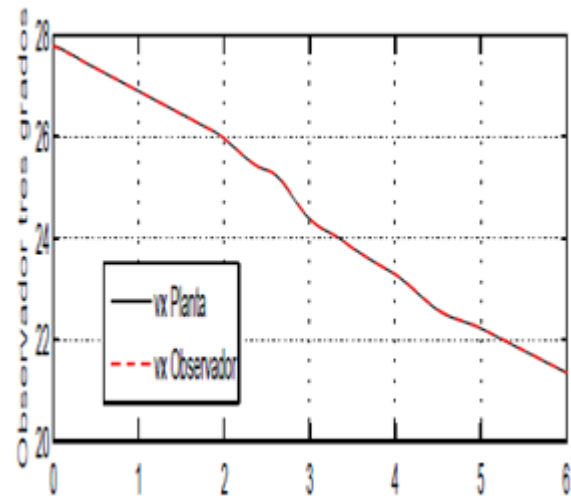


Figura 3 Velocidad longitudinal v_x (sólida) y \hat{v}_x (interlínea) [m/s vs s].

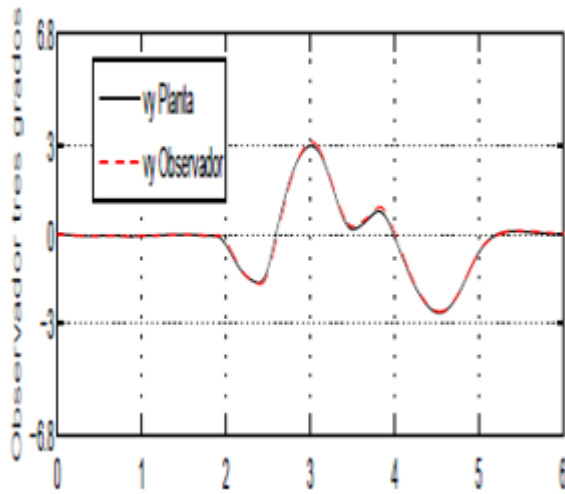


Figura 4 Velocidad lateral v_y (sólida) y \hat{v}_y (interlínea) [m/s vs s].

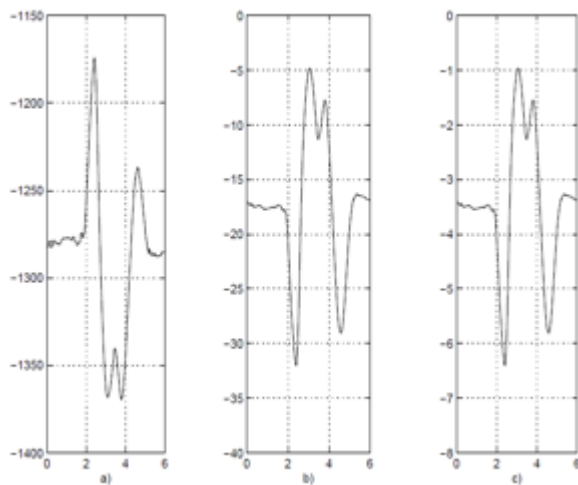


Figura 5 a) Fuerza de perturbación F_{dx} [N vs s]; b) Fuerza de perturbación F_{dy} [N vs s]; c) Momento de perturbación M_{dz} [N·m vs s].

Maniobra en una dirección.

Por lo tanto considerando los valores de las ganancias anteriores, también se simula el observador con una maniobra ISO-7401/2011 con un coeficiente de fricción neumático-suelo $\mu = 0.9$ (superficie seca) y $\mu = 0.5$ (superficie mojada) a los 3.5 segundos (ver Figura 6).

Obteniéndose así las Figuras 7 y 8 donde se puede ver el seguimiento correcto del observador, mostrándose un desempeño adecuado con respecto a las variaciones del sistema de la planta, en particular al coeficiente de fricción neumático-suelo, donde no se tiene una relevancia dependiente crucial de este parámetro.

Analizando la velocidad longitudinal del observador \hat{v}_x , con respecto a la velocidad longitudinal controlada del automóvil v_x en la Figura 7, se puede visualizar un error e_{vx} de aproximadamente cero, muy similar al error e_{vy} de la velocidad lateral del observador \hat{v}_y contra la velocidad lateral v_y , en la Figura 8.

Se determina así que el observador no lineal de tres grados de libertad propuesto funciona correctamente aún con las perturbaciones de viento F_{dx}, F_{dy}, M_{dz} , vistas en la Figura 9.

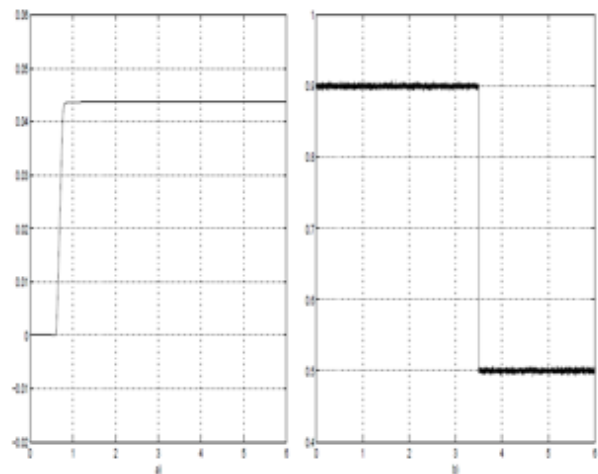


Figura 6 a) Señal δ_d delta del conductor [rad/s]; b) Coeficiente de fricción μ .

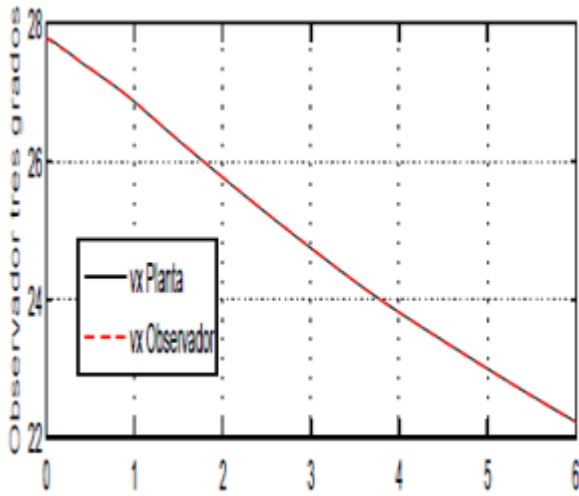


Figura 7 Velocidad longitudinal v_x (sólida) y \hat{v}_x (interlínea) [m/s vs s].

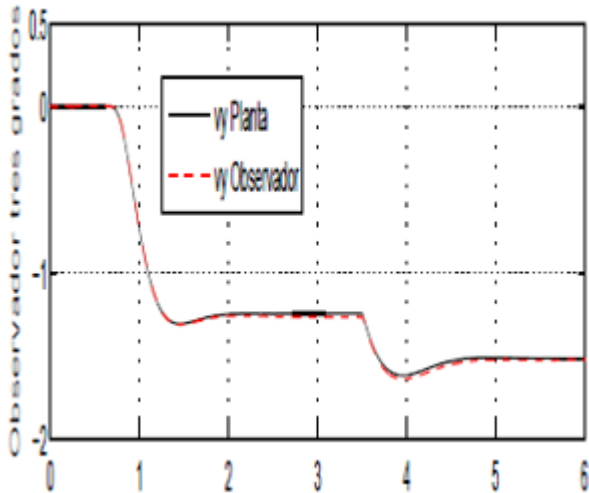


Figura 8 Velocidad lateral v_y (sólida) y \hat{v}_y (interlínea) [m/s vs s].

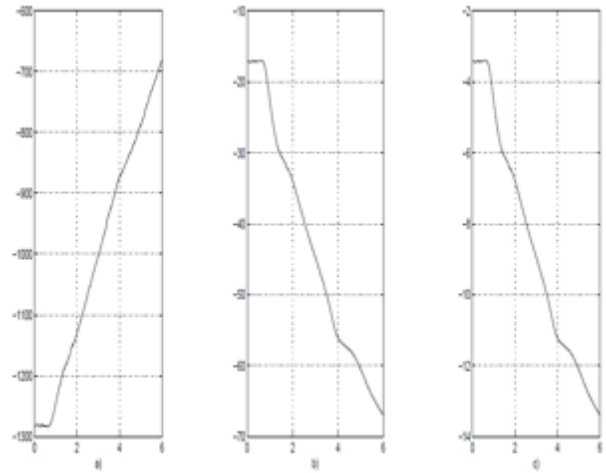


Figura 9 a) Fuerza de perturbación F_{dx} [N vs s]; b) Fuerza de perturbación F_{dy} [N vs s]; c) Momento de perturbación M_{dz} [N·m vs s].

Agradecimiento

Se agradece al Dr. C. Acosta Lúa del Centro Universitario de la Ciénega Modulo Ocotlán, Jalisco, México, por todos los conceptos obtenidos en la utilización del Software CarSim.

Conclusiones

Este trabajo se realiza con la finalidad de proponer un observador para el automóvil con velocidad lateral, partiendo del modelo matemático de la bicicleta, estableciendo las consideraciones antes mencionadas. El objetivo del observador será buscar la estimación de la velocidad longitudinal y velocidad lateral del vehículo. El algoritmo se diseña para establecer ganancias, las cuales, también se pueden cambiar para ampliar o disminuir la estimación de las dinámicas del observador, además está se puede proponer para algún controlador en el cual se necesita la dinámica de la velocidad lateral y no se puede medir, teniendo la robustez de trabajar correctamente a partir de un coeficiente de fricción variable como se puede ver en los resultados de este artículo de investigación.

Por lo tanto analizando las simulaciones de diferentes señales de entrada del conductor (ISO 3888-1, ISO 7401/2011), se puede mencionar que la estimación de la velocidad lateral y longitudinal utilizando el observador propuesto no lineal de tres grados de libertad trabaja en condiciones aceptables.

Referencias

- C. Acosta Lúa, B. Castillo Toledo, S. Di Gennaro, A. Toro., (2007). Nonlinear Robust Regulation of Ground Vehicle Motion, Proceedings of the [46] ^th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3871-3876.
- C. Acosta Lúa, B. Castillo Toledo, S. Di Gennaro., (2008). Nonlinear Output Robust Regulation of Ground Vehicle in Presence of Disturbances and Parameter Uncertainties, Proceedings of the [17] ^th IFAC World Congress, pp. 141-146.
- G. Baffet, A. Charara, G. Dherbomez., (2007). An Observer of Tire-Road Forces and Friction for Active Security Vehicle Systems, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 6, pp. 651-661.
- M. C. Best, T. J. Gordon, P. J. Dixon., (2000). An Extended Adaptive Kalman Filter for Real-Time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 34, No.1, pp. 57-75.
- D. Bianchi, A. Borri, G. Burgio, S. Di Gennaro., (2010). Adaptive Integrated Vehicle Control Using Active Front Steering and Rear Torque Vectoring, International Journal of Vehicle Autonomous Systems, Special Issue on: "Autonomous and Semi-Autonomous Control for Safe Driving of Ground Vehicles, Vol. 8, No. 2/3/4, pp. 85-105.
- R. Bosch., (1996). Automotive Handbook Robert Bosh GmbH, Stuttgart, Germany, 4th edition, 1996.
- S. Di Cairano, H.E. Tseng, D. Bernardini, A. Bemporad., (2013). Vehicle Yaw Stability Control by Coordinated Active Front Steering and Differential Braking in the Tire Sideslip Angles Domain, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 1236-1248.
- C. Earl Beal, J. Christian Gerdes., (2013). Model Predictive Control for Vehicle Stabilization at the Limits of Handling, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 4, pp. 1258-1269.
- Li Gang, Zong Chang-fu, Zheng Hong-yu, Hong Wei., (2011). Vehicle Active Front Steering and Yaw Moment Integrated Control, 2011 International Conference on Transportation, Mechanical and Electrical Engineering (TMEE), Changchun, China, pp. 787-790.
- A. Goodarzi, E. Esmailzadeh., (2007). Design of a VDC System for All-Wheel Independent Drive Vehicles, IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 6, pp. 632-639.
- H. Guo, H. Chen, D.Cao, W. Jin., (2013). Design of a reduced- order non- linear observer for Vehicle Velocities Estimation, IET Control Theory and Applications, Vol. 7, Iss. 17, pp. 2056-2068.
- N. Hamzah, Y.M. Sam, H. Selamat, M.K. Aripin, M.F. Ismail., (2012). Yaw Stability Improvement for Four- Wheel Active Steering Vehicle using Sliding Mode Control, 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 127-132.

- M. Hiemer, A. VonVietinghoff, U. Kiencke, T. Matsunaga., (2005). Determination of Vehicle Body Slip Angle with Non-Linear Observer Strategies, Proceedings of the SAE World Congress, Paper No. 2005-01-0400.
- U. Kiencke, A. Daiss., (1997). Observation of Lateral Vehicle Dynamics, Control Engineering Practice, Vol. 5, No. 8, pp. 1145-1150.
- U. Kiencke, L. Nielsen., (2000). Automotive Control Systems, Springer, Berlin.
- T. L. Lam, H. Qian, Y. Xu., (2010). Omnidirectional Steering Interface and Control for a Four-Wheel Independent Steering Vehicle, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, No. 3, pp. 329-338.
- N. Mudaliar, D. Leblanc, H. Peng., (2004). Linear Estimator for Road Departure Warning Systems, Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, pp. 2104-2109.
- Jiwon J. Oh, Seibum B. Choi., (2012). Vehicle Velocity Observer Design Using 6-D IMU and Multiple-Observer Approach, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1865-1879.
- H. Ohara, T. Murakami., (2008). A Stability Control by Active Angle Control of Front-Wheel in a Vehicle System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 3, pp. 1277-1285
- H. B. Pacejka., (2005). Tyre and Vehicle Dynamics, Elsevier Butterworth.
- H. Pan, Y. Zhang, W. Sun., (2014). Robust Tracking Control for Vehicle Lateral Dynamics with Uncertain Parameters and External Nonlinearities, Shock and Vibration, Vol. 2014, pp. 12.
- R. Rajamani., (2006). Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York.
- L. R. Ray., (1995). Nonlinear State and Tire Force Estimation for Advanced Vehicle Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 117-124.
- H. Ren, S. Chen, G. Liu, K. Zheng., (2014). Vehicle State Information Estimation with the Unscented Kalman Filter, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2014, pp.11-20.
- D. Rubin, S. Arogeti., (2013). Vehicle Yaw Stability Control Using Rear Active Differential via Sliding Mode Control Methods, 2013 [21] ^st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), pp. 317-322.
- J. Stephant, A. Charara, D. Meizel., (2007). Evaluation of Sliding Mode Observer for Vehicle Sideslip Angle, Control Engineering Practice, Vol. 15, pp. 803-812.
- A. Suissa, Z. Zomotor, F. Bttiger., (1996). Method for Determining Variables Characterizing Vehicle Handling, Patent US 5557520.
- J. Tjonnas, T. A. Johansen., (2010). Stabilization of Automotive Vehicles Using Active Steering and Adaptive Brake Control Allocation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 545-558.
- A. Y. Ungoren, H. Peng, H. Tseng., (2004). A Study on Lateral Speed Estimation Methods, International Journal on Vehicle Autonomous Systems, Vol. 2, pp. 126-144.

Z.Yacine, D. Ichalal, N. Ait-Oufroukh, S. Mammam, S. Djennoune., (2015). Takagi-Sugeno Observers: Experimental Application for Vehicle Lateral Dynamics Estimation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 754-760.

M. Zakaria, A. Dwijotomo, M. Azman Abdullah, N. Tamaldin., (2014). Development Motor Control Unit for Electronic Steering System Test Rig, 2014 IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 42-47.

L. Zhao, Z. Liu., (2014). Vehicle State Estimation with Friction Adaptation for Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle, Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 4527-4531.

Proyecto Dren Norponiente de la ciudad de Pachuca

KAMPFNER, Oscar*†, SILVA, Martín, PAZ, Silvestre y REYES, José

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

Las colonias que se ubican en la porción norponiente de la ciudad de Pachuca se ven afectadas por inundaciones debido a que el sistema natural de drenaje ha sido modificado, o bien, no tiene una descarga franca de las aguas pluviales hacia el Río de las Avenidas. Para resolver el problema, es necesaria la construcción de un dren de interconexión para desalojar los escurrimientos pluviales. Se llevó a cabo el estudio hidrológico que permitió determinar los gastos de diseño para una precipitación con un periodo de retorno de 500 años, con los cuales se diseñaron las secciones hidráulicas para el dren de interconexión. También se llevó a cabo la simulación del paso de la avenida de diseño sobre este dren y se encontró un correcto funcionamiento del mismo. Esta obra de protección permitirá desalojar de manera segura las precipitaciones pluviales hacia el Río de las Avenidas, evitando pérdidas económicas por los daños que sufre actualmente la infraestructura.

Dren, cuenca, Río de las Avenidas.

Abstract

Colonies are located in the north-west portion of the city of Pachuca are affected by floods, because the natural drainage system has been modified, or not have a free download of rainwater into the Río de las Avenidas. To solve the problem, the construction of a drain interconnection is necessary to evacuate stormwater runoff. The hydrological study which identified the flows of design for precipitation with a return period of 500 years, in which the hydraulic sections were designed to drain interconnection is carried out. Also it carried out the simulation of the passage of the design flood this drain, finding proper operation. This protection work safely evacuate allow rainfall to the Río de las Avenidas, avoiding economic losses for damages currently undergoing infrastructure.

Drain, basin, Río de las Avenidas.

Citación: KAMPFNER, Oscar, SILVA, Martín, PAZ, Silvestre y REYES, José. Proyecto Dren Norponiente de la ciudad de Pachuca. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 139-146

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: oscar.kampfner@prodigy.net.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Hidrológicamente, la ciudad de Pachuca, capital del estado de Hidalgo, se localiza en la parte alta de la cuenca del Río de las Avenidas. Pachuca, es vulnerable principalmente a los eventos meteorológicos que se desarrollan sobre el Océano Atlántico y tocan tierra por la parte central del estado de Veracruz; la temporada de huracanes para este océano inicia el 1 de junio de cada año. Para desalojar los escurrimientos pluviales, la ciudad cuenta con un sistema de drenes que conducen la mayor parte de los escurrimientos hasta el Río de las Avenidas, el cual desemboca sus aguas en la laguna de Zumpango o en los túneles de Tequixquiac.

Los principales drenes de la ciudad son barranca de Azoyatla, arroyo Sosa, Santa Julia, Venados, Cubitos, La Noria, La Paz, Barranca Blanca, entre otros. Estos drenes se formaron de manera natural y una parte de ellos han sufrido modificaciones en su curso según el crecimiento de la mancha urbana, otros han sido bloqueados y dejaron de funcionar, o bien, no tienen una descarga, razón por la cual se requiere interconectarlos a drenes existentes. Este último es el caso de zonas inundables en la porción norponiente de la ciudad, lo que ha originado que las colonias El Palmar, San Carlos, Santo Tomás, Hacienda La Luz, Zona Plateada, Zona Militar, y parte de las instalaciones del auditorio Gota de Plata y Plaza Galerías sufran frecuentes inundaciones.



Figura 1 Drenes de la ciudad de Pachuca

Una de las primeras obras de protección contra inundaciones para Pachuca es el Cinturón de Seguridad, el cual se planeó para interceptar las aguas pluviales que escurren del cerro de San Cristóbal y de la barranca El Zembo y conducirlas hasta la presa El Durazno, en el municipio de San Agustín Tlaxiaca. Cabe señalar que hasta el momento no se ha concluido la construcción de este cinturón, por lo cual los escurrimientos que intercepta son enviados al dren Piracantos. Este dren atraviesa las colonias Parque de Poblamiento y Piracantos, cruza el bulevar Colosio y, después de pasar por un costado del fraccionamiento Arboledas de San Javier (tercera sección), desaparece; posiblemente, antes del crecimiento de la mancha urbana, existió en este sitio un almacenamiento de agua pluvial. Esto ha originado la necesidad de construir un dren de interconexión para llevar las aguas desde este punto hasta el dren Venados, para desalojarlas en el Río de las Avenidas; este proyecto se denomina Dren de Interconexión Norponiente.

Para diseñar la sección hidráulica del dren de interconexión y sus obras complementarias, se cuenta con el estudio hidrológico de las cuencas localizadas en esta porción de la ciudad, el cual proporciona sus características fisiográficas, de uso de suelo, geología superficial, el área que cubren, etcétera.

El estudio hidrológico proporciona los gastos esperados, asociados a diferentes periodos de retorno, que fueron estimados a través de los métodos Racional Americano, Ven Te Chow e Hidrograma Unitario Triangular (propuesto por el Soil Conservation Service, del Gobierno de los Estados Unidos).

El gasto seleccionado para el diseño del dren de interconexión en su parte inicial, resultó de 43 m³/s para un periodo de retorno de 500 años, con el cual se simuló el paso de la avenida con el apoyo del programa HEC-RAS, lo que permitió obtener las dimensiones requeridas para este dren. Para el diseño de la parte final del dren, se encontró que el gasto corresponde a 80 m³/s.

Descripción de las cuencas de estudio

Para delimitar la cuenca en la zona de estudio y la red hidrográfica, se emplearon las cartografías digitales 1:50,000 publicada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), 1:20,000 publicada por la empresa SIGSA y 1:5,000 obtenida por el municipio de Pachuca.

Se identificaron tres pequeñas cuencas dentro de la zona de estudio, considerando los drenes que existen:

- La primera aporta escurrimiento del cerro de San Cristóbal al Cinturón de Seguridad.
- La segunda aporta escurrimientos de la barranca El Zembo.
- La tercera se encuentra aledaña a la cuenca de la barranca El Zembo y aporta escurrimientos hasta el aeropuerto de la ciudad, a la altura del estacionamiento de alumnos del Instituto Tecnológico de Pachuca.

De acuerdo con los datos obtenidos, se determinó que el área de la cuenca en la zona de estudio corresponde a 24.012 km² y la longitud del cauce principal, a 8.875 km, el cual inicia en la elevación de 2,680 msnm y termina en 2,356 msnm. Utilizando el criterio de Taylor y Schwartz, se determinó que la pendiente media del cauce principal corresponde a 0.0129.

Como se ha mencionado, el dren Piracantos desaparece después del cruce con el bulevar Colosio, aguas abajo del fraccionamiento Arboledas. Por esta circunstancia, la zona de estudio se dividió en dos subcuencas, lo cual permitió estimar el gasto con el que inicia el dren de interconexión, así como el gasto que éste aportará al dren Venados. La zona donde se pretende construir el dren de interconexión se encuentra poblada, lo que dificultó determinar su trazo, sin embargo, después de varios recorridos ha sido posible determinar el trazo sin dañar las casas existentes.

La primera subcuenca (conocida como subcuenca norte) corresponde a la parte alta de la zona de estudio y considera la cuenca del Cinturón de Seguridad y la cuenca de la barranca El Zembo, hasta el cruce con el bulevar Colosio; este punto está próximo al sitio donde iniciará el dren en proyecto, que permitirá encauzar los escurrimientos hacia el dren Venados. La segunda subcuenca (conocida como poniente) inicia desde el punto donde empezará el dren de interconexión, hasta donde se entroncará con el dren Venados.

La subcuenca norte tiene una superficie de 12.293 km² y la longitud del cauce principal es de 4,719 m, con un desnivel de 285 m. El perfil por el eje del cauce se observa en la siguiente figura:

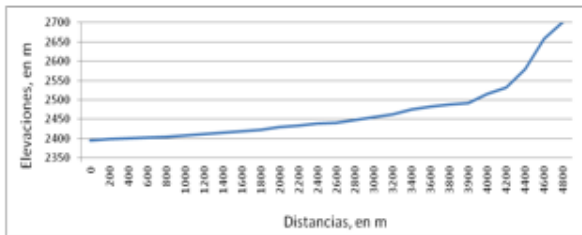


Figura 2 Perfil por el eje del cauce de la barranca El Zembo

En lo que corresponde a la subcuenca poniente, cubre una superficie de 11.749 km² y la longitud del cauce principal considerado es de 4,696 m, con un desnivel de 39 m. Es necesario señalar que el volumen de agua que escurrirá por este cauce principal, es el que se genere en las dos subcuencas, por lo cual en el estudio hidrológico se consideró la cuenca total, con lo que se calculó el gasto para la parte final del dren de interconexión. También, se consideró un solo cauce principal en este sitio con una longitud igual a la suma de los cauces para cada subcuenca. La longitud que resultó es de 8,875 m, y en la siguiente figura se muestra el perfil observado:

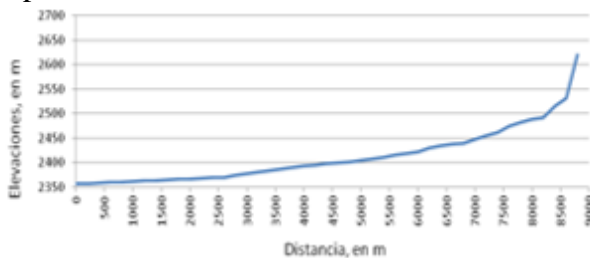


Figura 3 Perfil por el eje del cauce principal de la zona de estudio.

Por otra parte, para la clasificación del tipo de suelo en la zona de estudio, se recurrió a la cartografía de Inegi, que señala para esta cuenca suelos calcificados, como litosoles, feozem haplicos y feozem calcáricos, con texturas medias y finas. Igualmente, la cartografía indica la presencia de fases físicas descritas como líticas y dúrica profunda, que indican que a los suelos les subyace roca (lítica) o una capa de tepetate (duripan).



Figura 4 Tipos de suelo en el área de estudio.

| Tipo de suelo | Textura | Clasificación |
|------------------|---------|---------------|
| Feozem hepálico | Media | C o B |
| Litosol | Media | B |
| Feozem calcárico | Fina | C |

Tabla 1 Clasificación del tipo de suelo

De manera similar, con apoyo en la cartografía del Inegi, complementada con ortofotos recientes, se determinaron las distintas coberturas vegetales y usos del suelo en el área de estudio, lo que permitió asignarles un número N de curva la curva de escurrimiento (CN) o un coeficiente de escurrimiento.

De la superposición de los tipos y usos de suelo dentro del área de estudio, se obtuvo el número de la curva de escurrimiento CN = 78.5 y un coeficiente de escurrimiento de Ce = 0.22. Estos valores se utilizaron en el estudio hidrológico para determinar los gastos asociados a diferentes periodos de retorno.

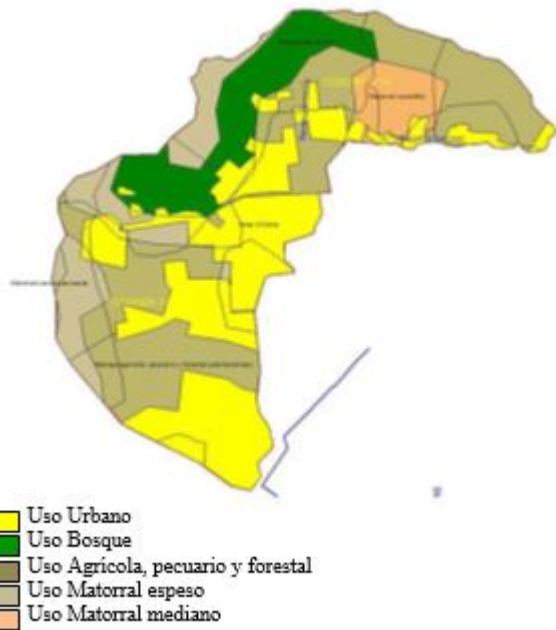


Figura 5 Usos de suelo en el área de estudio.

Estudio hidrológico

Con el objeto de estimar el gasto para diseñar el canal de interconexión, se procedió a revisar la información climática disponible en la zona de estudio. La Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), no cuenta con estaciones hidrométricas o climatológicas en esta zona de la ciudad. La estación pluviográfica más cercana al punto de interés, se localiza en el observatorio de Pachuca y cuenta con registro de lluvias a partir de 1962 y hasta 1998. La información de esta estación se tomó de base para la estimación de gastos.

Con el procesamiento del registro de lluvias disponible, fue posible calcular la intensidad de lluvia para tormentas de 5 a 120 minutos y, mediante un análisis estadístico de estos valores, se ajustó el modelo matemático para calcular las intensidades de lluvia y se construyeron las curvas intensidad-duración-frecuencia (i-d-Tr). El modelo matemático ajustado resultó:

$$i = 215.774 \frac{Tr^{0.343}}{d^{0.349}} \tag{1}$$

Donde *i* es la intensidad de lluvia, en mm/h;
Tr es la frecuencia, en años;
d es la duración de la tormenta, en minutos.

Para la altura de precipitación:

$$hp = 3.596 Tr^{0.343} d^{0.349} \tag{2}$$

Donde *hp* es la precipitación acumulada, en mm;
Tr es la frecuencia, en años;
d es la duración de la tormenta, en minutos.

Para determinar la duración de la tormenta de diseño, se calculó el tiempo de concentración del cauce principal, tanto en la subcuenca norte como en la cuenca en la zona de estudio, con los criterios de Rowe, Kirpich y del Soil Conservation Service (SCS). Los resultados obtenidos son:

| Criterio | Tiempo de concentración, en minutos | |
|----------|-------------------------------------|--------------|
| | Subcuenca norte | Cuenca total |
| Rowe | 38.73 | 75.57 |
| Kirpich | 53.42 | 110.32 |
| SCS | 37.04 | 72.05 |

Tabla 2 Tiempo de concentración.

La duración de la tormenta seleccionada para cada caso fue la que se obtuvo con el criterio de Kirpich, en virtud de que utiliza el valor de la pendiente media del cauce principal, en tanto que los otros criterios solo emplean el desnivel de dicho cauce, perdiendo aproximación.

Los gastos asociados a diferentes periodos de retorno fueron calculados con los métodos Racional Americano.

Ven Te Chow e Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service (HU SCS), considerando las intensidades de lluvia (calculadas con el modelo matemático determinado), el número CN de la curva de escurrimiento y el coeficiente de escurrimiento.

Los resultados se muestran a continuación.

Para la subcuenca norte:

| TR | Gasto, en m ³ /s | | |
|------|-----------------------------|-------------|--------|
| | Racional Americano | Ven Te Chow | HU SCS |
| 5 | 21.2 | 1.3 | 0.7 |
| 10 | 6.9 | 3.1 | 1.7 |
| 25 | 36.8 | 7.4 | 4.2 |
| 50 | 46.7 | 12.9 | 7.3 |
| 100 | 59.2 | 21 | 12 |
| 500 | 102.8 | 55 | 31.3 |
| 1000 | 130.4 | 78.9 | 44.9 |

Tabla 3 Gastos obtenidos para diferentes periodos de retorno

Para la cuenca en zona de estudio:

| TR | Gasto, en m ³ /s | | |
|------|-----------------------------|-------------|--------|
| | Racional Americano | Ven Te Chow | HU SCS |
| 5 | 25.8 | 6 | 2.5 |
| 10 | 32.7 | 10.9 | 4.5 |
| 25 | 44.8 | 21.2 | 8.8 |
| 50 | 6.8 | 33 | 13.8 |
| 100 | 72 | 49.5 | 20.6 |
| 500 | 125.1 | 113.1 | 47.1 |
| 1000 | 158.7 | 155.8 | 64.9 |

Tabla 4 Gastos obtenidos para diferentes periodos de retorno

Al revisar los gastos obtenidos, se aprecia que los valores calculados con el Método Racional Americano resultan de mayor magnitud respecto a los obtenidos con los otros métodos empleados. Por esta razón, para determinar los gastos asociados a diferentes periodos de retorno, se descartaron los calculados por este método y se promediaron los valores obtenidos por Ven Te Chow y HU SCS. En cuanto a la selección del periodo de retorno, la Conagua, en su carácter de organismo rector, determinó que se debía utilizar un $Tr = 500$ años.

Bajo estas consideraciones, para la subcuenca norte el gasto adoptado fue $Q = 43$ m³/s, con el cual se diseñaron las secciones hidráulicas de la parte inicial del Dren de Interconexión Norponiente. Para la cuenca total se adoptó un gasto de $Q = 80$ m³/s, que se tomó para el diseño de la parte final del dren y de su descarga al dren Venados.

Resultados

Como ya se mencionó, antes de elaborar el estudio hidrológico fue necesario realizar diversos recorridos en la zona de estudio para determinar la mejor alternativa para el trazo del dren, pues debido al crecimiento de la mancha urbana en esta zona, se encontraron diferentes limitaciones para definir el trazo. La información topográfica del trazo definitivo sirvió para definir la forma de las secciones hidráulicas; es decir, por cuestiones de espacio en algunos tramos del dren se propusieron rectangulares; en otros, trapeciales, y en algunos puntos fue necesario considerar secciones cubiertas.

Con estas consideraciones y con los gastos de diseño para el dren de interconexión, se realizó el diseño hidráulico de las secciones y se determinaron las siguientes dimensiones.

Sección propuesta del km 0+000 al km 0+180 y del km 2+200 al km 2+920:

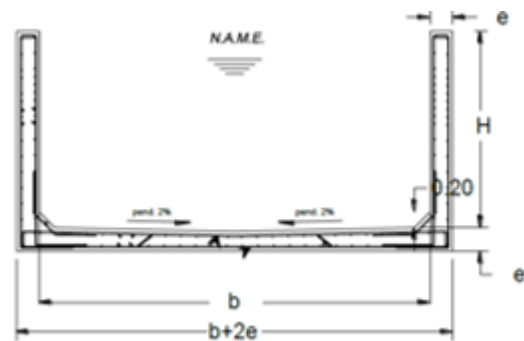


Figura 6 Sección transversal rectangular

Sección propuesta del km 0+180 al km 1+480, del km 2+180 al km 2+200 y del km 2+920 al km 3+389.80:

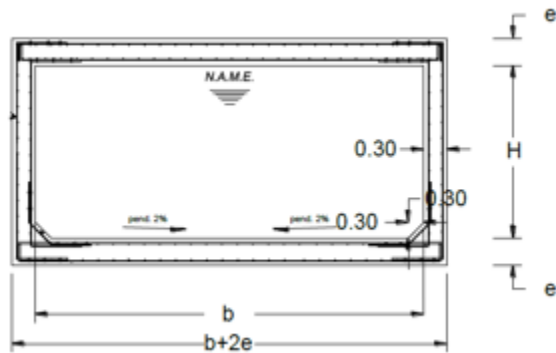


Figura 7 Sección cubierta.

Sección propuesta del km 1+480 al km 2+180:

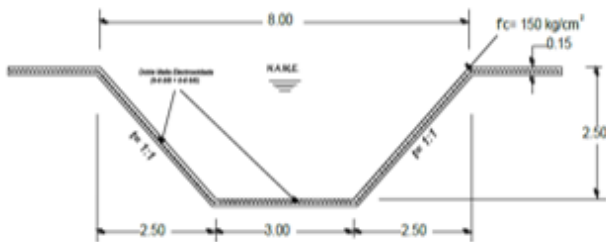


Figura 8 Sección trapezoidal.

| Sección | Tramo | b (m) | y (m) | B.L. (m) | H (m) |
|---|------------------------|-------|-------|----------|-------|
| Rectangular de concreto armado, a cielo abierto | km 0+000 al km 0+180 | 4 | 2.194 | 0.306 | 2.50 |
| Rectangular de concreto armado, con losa | km 0+180 al km 0+860 | 4 | 2.194 | 0.306 | 2.50 |
| Rectangular de concreto armado, con losa | km 0+860 al km 1+480 | 5 | 2.394 | 0.106 | 2.50 |
| Trapezoidal con concreto reforzado | km 1+480 al km 2+180 | 8 | 2.242 | 0.258 | 2.50 |
| Rectangular de concreto armado, con losa | km 2+180 al km 2+220 | 5 | 2.191 | 0.309 | 2.50 |
| Rectangular de concreto armado, a cielo abierto | km 2+220 al km 2+920 | 5 | 2.191 | 0.309 | 2.50 |
| Rectangular de concreto armado, con losa | km 2+920 al km 3+389.8 | 5 | 2.191 | 0.309 | 2.50 |

Tabla 5 Datos hidráulicos de las secciones de proyecto

Para verificar el correcto funcionamiento de las secciones propuestas para el dren de interconexión.

Se llevó a cabo una simulación del funcionamiento hidráulico utilizando el modelo River Analysis System desarrollado por Hydrologic Engineering Center, del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estado Unidos. Se observó que el nivel del agua que se establece en las secciones para el gasto asociado al periodo de retorno de 500 años, queda por debajo del nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME). Estos resultados muestran que el dren de interconexión va a operar de manera segura y brindará protección a las colonias El Palmar, San Carlos, Santo Tomás, Hacienda La Luz, Zona Plateada, Zona Militar, y parte de las instalaciones del auditorio Gota de Plata y Plaza Galerías.

Conclusiones

El proyecto del Dren de Interconexión Norponiente permitirá desalojar de manera segura el escurrimiento de aguas pluviales que se acumulan aguas abajo del fraccionamiento Arboledas de San Javier (tercera sección) y que actualmente provocan inundaciones en desarrollos urbanos de esta parte de la ciudad.

El proyecto contempla que el dren de interconexión se entronque con el dren Venados para llevar sus escurrimientos hasta el Río de las Avenidas, evitando trasladar el problema de inundaciones a otra zona de la ciudad. En este aspecto, queda pendiente la revisión hidráulica del puente localizado a 150 m aguas abajo del punto de entronque sobre el dren Venados (puente de la carretera México – Pachuca), para verificar que tenga la capacidad suficiente para la circulación del nuevo gasto.

Con la construcción del dren de interconexión, se evitarán pérdidas económicas en viviendas, infraestructura tanto urbana como productiva (industria, comercio, etcétera), que son causadas por las frecuentes inundaciones que se registran en épocas de lluvia.

En algunos puntos del dren de interconexión se ha propuesto que las secciones hidráulicas sean cubiertas, debido a que parte del trazo pasa por áreas densamente pobladas y se pretende evitar accidentes de los habitantes de estas zonas.

Referencias

Sotelo, G. (2002). Hidráulica de canales. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.

French, R. H. (1988). Hidráulica de canales abiertos. México, D.F.: Mc Graw-Hill.

United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. (1967). Diseño de presas pequeñas. México, D.F.: Compañía Editorial Continental, S. A.

Chow, V. (1994). Hidráulica de canales abiertos. México, D.F.: Mc Graw-Hill.

Sistema de Semáforos Inteligentes Utilizado Sensores de Presencia

JACOBO, Armando*†

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

La evolución en tecnología, ha permitido que las áreas del conocimiento de la ingeniería interactúen de manera que el aprovechamiento de los recursos, sean explotados al máximo en beneficio de la humanidad. Se analizó un área de la ingeniería civil llamada ingeniería de tránsito, la cual es una profesión relativamente nueva y básica en proyectos de planeación urbana, ejecución de obras de carreteras, auditoría y administración vial.

Se evaluó la Av. Reforma en la ciudad de Nuevo Laredo Tamaulipas, avenida de mayor concentración de flujo, se encuentra controlada por semáforos de tiempo fijo, mediante la gestión municipal se invirtió en un novedoso sistema de semaforización el cual, estará de acuerdo con el comportamiento vehicular en tiempo real.

Si este sistema no es operado por el personal técnico y profesional, la inversión será nula a la hora de su implementación y operación. Se inspeccionó la intersección y se utilizó para la comparación, el sistema antiguo con el novedoso sistema de sensores, en el cual las variables a controlar serán para lograr el aumento de la capacidad vial, estableciendo mejoras como la disminución del congestionamiento vial, la contaminación, el aprovechamiento de gasolina y disminución del tiempo perdido.

Tiempo fijo, Tiempo dinámico, Optimización

Abstract

The evolution of technology has allowed areas of knowledge engineering to interact so that the use of resources are fully exploited for benefit of humanity. An area of civil engineering called Traffic Engineering is analyzed, which is a relatively new profession and basic for projects of urban planning, construction of roads, audit and road management. Av. Reforma was evaluated in the city of Nuevo Laredo Tamaulipas, avenue with highest concentration of flow, is controlled by traffic lights with fixed time, by municipal management investing in a new traffic light system, which it will be fixed with vehicular behavior in real time. If this system is not operated by technical and professional staff, the investment will be zero when it comes to its implementation and operation. The intersection was inspected and used to compare the old system with the new system of sensors, in which the variables to be controlled to achieve increased road capacity, establishing improvements such as reducing traffic congestion, pollution, the use of gasoline and decrease lost time.

Fixed time, Dynamic Time, Optimization.

Citación: JACOBO, Armando. Sistema de Semáforos Inteligentes Utilizado Sensores de Presencia. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 147-152

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: armando_jacobo@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad las ciudades con un crecimiento exponencial como Nuevo Laredo requieren que los recursos de infraestructura sean paralelos a las necesidades.

En los sistemas de controladores de tráfico se requieren de grandes inversiones las cuales se deben de contrastar y justificar con los perjuicios económicos de la no existencia de sistemas de respuesta en tiempo real, al no interactuar los modelos en tiempo real, se pierde la competitividad de esa población sin embargo, es de vital importancia esta administración, para mantener la red eficiente de movilidad en la cual interactúan vehículos de servicio, de carga y de emergencia.

Los sistemas centralizados Gertrude tienen su origen en Francia y se implementan en México con gran aceptación, generando que cada vez, más ciudades inviertan sus recursos públicos en la compra de estos aparatos generando también a su vez, técnicos en el manejo y operación.

La justificación de la inversión será mediante una variable principal de consumo de combustible y como dato adicional se encontrara el grado de contaminación.

Fundamentos

La administración de tráfico empieza desde el control de los sentidos de circulación del tránsito vehicular, su orden variará desde la colocación de señales restrictivas, agentes de tránsito e isletas. Al agotar estas medidas de control de tránsito se opta por la implementación de semáforos.

El sistema semáforo depende de variables de calibración como, comportamiento vehicular, peatonal, condiciones geométricas, rutina de usuario y velocidad.

Se aplicará la teoría de evaluación de HCM 2000 y el programa de simulación de tráfico Syncho 7 y Sim Traffic.

Desarrollo

Se evaluó el sistema de semaforización de tiempo fijo en el cual, el tiempo de ocurrencia de las fases será con la misma duración de tiempo en todo momento en comparativa con el sistema dinámico el cual, estará en función de la detección vehicular para lo cual se desarrollaron estudios propios de la ingeniería de tránsito para medir las cualidades de operación, generando los siguientes estudios:

1. Aforo vehicular
2. Aforo peatonal
3. Fases de semáforo
4. Levantamiento físico y geométrico

| MUNICIPIO | | CARRILAS | | SEMAFORO | | CARRILAS | | SEMAFORO | | CARRILAS | | SEMAFORO | | CARRILAS | | SEMAFORO | |
|-----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| 07:00 | 07:15 | 07:15 | 07:30 | 07:30 | 07:45 | 07:45 | 08:00 | 08:00 | 08:15 | 08:15 | 08:30 | 08:30 | 08:45 | 08:45 | 09:00 | 09:00 | 09:15 |
| 07:00 | 07:15 | 07:15 | 07:30 | 07:30 | 07:45 | 07:45 | 08:00 | 08:00 | 08:15 | 08:15 | 08:30 | 08:30 | 08:45 | 08:45 | 09:00 | 09:00 | 09:15 |
| 07:00 | 07:15 | 07:15 | 07:30 | 07:30 | 07:45 | 07:45 | 08:00 | 08:00 | 08:15 | 08:15 | 08:30 | 08:30 | 08:45 | 08:45 | 09:00 | 09:00 | 09:15 |
| 07:00 | 07:15 | 07:15 | 07:30 | 07:30 | 07:45 | 07:45 | 08:00 | 08:00 | 08:15 | 08:15 | 08:30 | 08:30 | 08:45 | 08:45 | 09:00 | 09:00 | 09:15 |

Figura 1

Se muestra en la Figura 1 el aforo vehicular, se clasificaron los vehículos y se encontró que el tiempo de aceleración de los vehículos pesados es tres veces más lento que el tipo ligero.

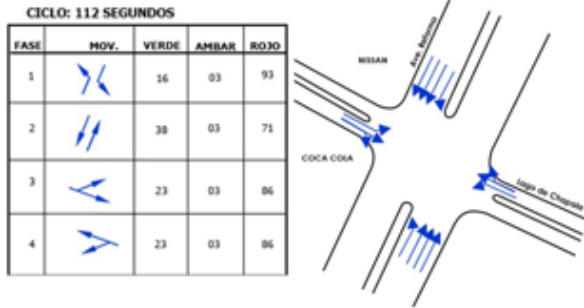


Figura 2

En la Figura 2 se muestra la duración de fases en tiempo fijo de la intersección consistió en medir el tiempo de cada indicación visual del semáforo, estableciendo el acomodo de la operación de cada fase.

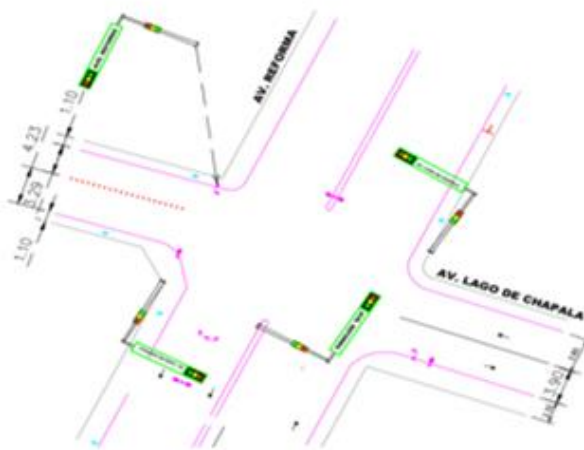


Figura 3

En la Figura 3 se muestra la estructura del semáforo MG-10: poste octagonal, brazos de 12 metros y dimensionamiento de vialidad.



Figura 4

En la Figura 4 vemos la ubicación de la intersección de estudio control de tiempo fijo.



Figura 5

En la Figura 5 se obtienen los niveles de servicio con el programa Syncho 7 y Sim Traffic, se ingresan variables ancho de carril, volumen y tipo de vehículo y tiempos de semáforo y se determina el nivel de nivel de servicio F.

58: LAGO DE CHAPALA & AV. REFORMA Zona Centro

| Lane Group | EBL | EBT | WBL | WBT | NBL | NBT | SBL | SBT |
|-----------------------|-----|------|-----|-----|------|------|-----|------|
| Lane Group Flow (vph) | 188 | 448 | 98 | 239 | 380 | 2788 | 178 | 2975 |
| Stops (vph) | 142 | 348 | 74 | 176 | 270 | 2249 | 144 | 2377 |
| Fuel Used(l) | 21 | 70 | 15 | 42 | 84 | 238 | 23 | 339 |
| CO Emissions (g/hr) | 380 | 1287 | 285 | 782 | 1180 | 4410 | 429 | 8288 |
| NOx Emissions (g/hr) | 74 | 250 | 56 | 152 | 230 | 858 | 84 | 1220 |
| VOC Emissions (g/hr) | 88 | 298 | 66 | 181 | 274 | 1023 | 100 | 1483 |
| Dilemma Vehicles (#) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Intersection Summary

Figura 6

En la Figura 6 se determina una hora de operación de tráfico, la cual corresponderá a la hora de máxima demanda para semáforos de tiempo fijo.

Después de haber obtenido los resultados de tiempo fijo “no utilización de sensores” se evaluará el sistema con sensores TRAFICAM para generar ahora los tiempos dinámicos, modificando el tiempo de fase verde de la intersección para cada sentido de circulación.

Este método dinámico aplicado en la intersección sin tecnología, sería posible controlarlo con un agente vial, manipulando el push botón para el cambio de fases, pero su permanencia en el lugar sería inadecuada por las condiciones climáticas y condición humana.



Figura 7 Fuentes: TRAFICAM

En la Figura 7 se muestra como el sistema de semáforos dará tiempo verde si solo si detecta presencia vehicular para así aprovechar los tiempos del usuario de la vialidad (imagen de traficam).

Al implementar y simular este sistema en la intersección se obtienen las ventajas de mejora y optimización de la vialidad.



Figura 8

En la Figura 8 se obtienen el nivel de servicio con el programa de simulación generando nivel de servicio C.

58: LAGO DE CHAPALA & AV. REFORMA Zona Centro

| Lane Group | EBL | EBT | WBL | WBT | NBL | NBT | SEL | SBT |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| Lane Group Flow (vph) | 188 | 448 | 98 | 239 | 360 | 2788 | 178 | 2975 |
| Stops (vph) | 140 | 363 | 77 | 189 | 141 | 1919 | 63 | 2237 |
| Fuel Used(l) | 15 | 45 | 10 | 25 | 22 | 200 | 8 | 184 |
| CO Emissions (g/hr) | 283 | 828 | 181 | 455 | 412 | 3694 | 150 | 3401 |
| NOx Emissions (g/hr) | 55 | 181 | 35 | 89 | 80 | 719 | 29 | 682 |
| VOC Emissions (g/hr) | 66 | 192 | 42 | 106 | 96 | 857 | 35 | 789 |
| Dilemma Vehicles (#) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Intersection Summary

Figura 9

En la Figura 9 se muestra la determinación de una hora de operación de tráfico en la hora de máxima demanda para semáforos de tiempo dinámico, sistema TRAFICAM y control C-210.

En la Figura 9 se muestra la determinación de una hora de operación de tráfico en la hora de máxima demanda para semáforos de tiempo dinámico, sistema TRAFICAM y control C-210.

Resultados

Es importante mencionar que la eficiencia de la vialidad se mide en función del nivel de servicio, por tanto, a continuación se da una descripción de lo que significan y representan los diferentes niveles de eficiencia en las condiciones operacionales del tránsito de acuerdo con el manual de Capacidad Vial (HCM por sus siglas en inglés).

Nivel de Servicio.- El Nivel de Servicio de una vía o intersección, es una medida cualitativa que se refiere a la calidad con la que se efectúa la movilidad vehicular, con respecto a la máxima capacidad que puede soportar la misma.

Los niveles de servicio, se clasifican desde el “A” como muy bueno, hasta el “F” como nivel de saturación de la avenida o intersección, y éstos dependen principalmente del flujo vehicular.

Las características geométricas de la vía, número de carriles, velocidad y los sistemas de control del tránsito.

Nivel de servicio “F” para una situación de tiempo fijo, corresponde a circulación forzada, las velocidades son bajas, las cuales en casos extremos llegan a ser cero, y los volúmenes de tránsito que permiten pasar son inferiores a la capacidad. En éstas condiciones generalmente se producen colas de vehículos a partir del lugar en que se produce la restricción.

Nivel de servicio “C”, Se encuentra en la zona de flujo estable, pero las velocidades y posibilidades de maniobras están más restringidas por los altos volúmenes de tránsito.

Se evaluó la diferencia de los consumos de combustible para dos escenarios.

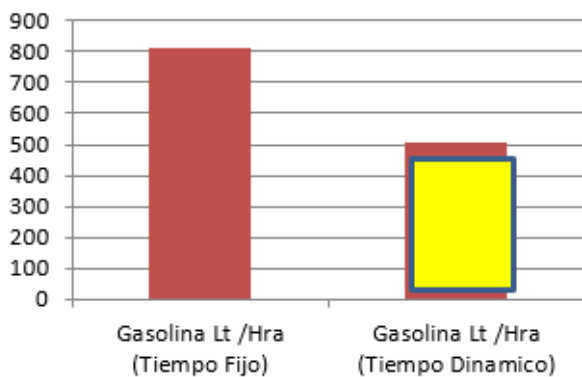


Figura 10

En la Figura 10 se muestra la diferencia de consumos de combustible, el ahorro de consumo de combustible para una operación de congestión es 303 l/hr.

De acuerdo a patrones de comportamiento vial, en condiciones de saturación se deben considerar 3 horas de congestión por día, 5 días hábiles por semana, 3 semanas por mes y 8 meses por año.

Por lo tanto el consumo total:

$$Ct = 303 \text{ l/hr.} \times 5 \text{ horas/día} \times 5 \text{ dias/semana} \times 3 \text{ semanas/mes} \times 8 \text{ meses/año}$$

$$CT = 181800 \text{ l/año}$$

Gasto total por año

$$GT = CT \times \text{Costo de gasolina}$$

$$\text{Costo de gasolina} = 10.30 \text{ pesos /l.}$$

$$GT = 1,123,524.00 \text{ pesos, ahorro por año}$$

Inversión de tecnología 1 control y 4 sensores y trabajos de calibración de equipos. Inversión inicial = 450,000.00 pesos.

La disminución en la Emisión de monóxido de carbono (CO), se logra al tener menor tiempo de espera en función de la detección de presencia vehicular.

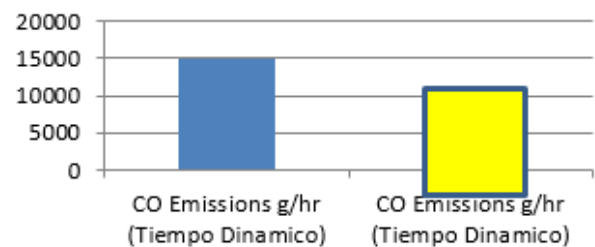


Figura 11

La Figura 11 muestra la diferencia de CO 5617 g/hr representa una disminución del 37 %.

Conclusiones

Rentabilidad económica

Calculamos la rentabilidad utilizando el beneficio económico como medida de los ahorros y la inversión a efectuar para dicha infraestructura.

$$RE = BE / AT$$

Donde:

$$BE = \text{Beneficio Económico, } BE = 673,524.00 \text{ pesos}$$

$$AT = \text{Activo Total; } AT = 450,000.00 \text{ pesos}$$

Por lo tanto la rentabilidad del sistema de semaforización dinámica es de 1.49 la tecnología se justifica.

Con estos antecedentes se debe dar prioridad a fomentar la implementación en todas las intersecciones semaforizadas.

En los aspectos ambientales, aún no existen legislaciones que determinen el grado o costo de contaminación vehicular en la región norte del país, solo se demostró el resultado de disminución de la generación de CO gr/hr que fue de 37 %.

Referencias

Hernán de Solminihaq T., (2005)“Gestión de Infraestructura Vial”. México, Editorial Alfa Omega.

Jacobo, E., Hernández, F., & Lope, L. (2013). Gestión para una contabilidad verde en México. Observatorio de la Economía Latinoamericana, (186).

Ortega, J. (2014). Rentabilidad.

Modelo de Planeación Estratégica para el Reciclado de Papel en el ITSSNP

HERNÁNDEZ-CORONA, Sergio*†, LUNA-MIRANDA, Ana Bertha`` y GARRIDO-ROSADO Rafael`

**Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla, Av. José Luis Martínez Vázquez No. 2000, Jicolapa, Zacatlán, Puebla, México*

``Universidad Autónoma de Tlaxcala, Av. Ocotlan S/N

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

El reciclado de papel es una de las alternativas utilizadas en la reducción del volumen de los residuos sólidos y evita el que se talen árboles, en pocas palabras la deforestación. Se trata de un proceso que consiste básicamente en volver a utilizar materiales que fueron desechados y que aún son aptos para elaborar otros productos o re fabricar los mismos. En el caso de las escuelas y oficinas el papel se constituye como el mayor desecho sólido que se genera. El papel de desecho se utiliza para la elaboración de diferentes productos tales como fólder, cuadros, sobres, etc.

En lo comentado con anterioridad es recomendable llevar a cabo el reciclado de papel dentro de la organización lo que nos ayudaría a la preservación de los bosques siendo esta preservación en esta actualidad muy importante, a tener una cultura en el reciclado de papel, cabe hacer mención que al reciclar se talan menos árboles y se ahorra más energía.

Modelo, planeación, reciclaje, papel.

Abstract

Recycled paper is one of the alternatives used in reducing the volume of solid waste and prevents that timber is cut in short deforestation. It is a process that is basically reusing materials that were discarded and are still apt to develop other products or re making the same. For schools and offices role is established as the largest solid waste that is generated. Waste paper is used for the manufacture of various products such as folder, boxes, envelopes, etc.

As discussed above it is advisable to carry out the paper recycling within the Institute which would help us to preserve the forests being this preservation in this very important today to have a culture in recycling paper, it is worth mentioning that to recycle fewer trees are felled and saves energy.

Model, planning, recycled, paper.

Citación: HERNÁNDEZ-CORONA, Sergio, LUNA-MIRANDA, Ana Bertha y GARRIDO-ROSADO Rafael. Modelo de Planeación Estratégica para el Reciclado de Papel en el ITSSNP. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 153-167

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: sergio4003@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Las razones por las cuales hacen factible que se lleve a cabo este proyecto en la organización son las siguientes:

- Mucho papel en las aulas (botes de basura).
- El crear una conciencia sobre la importancia del reciclado de papel.
- Conocer las ventajas que trae el reciclar papel.
- Cuidado al medio ambiente.
- Menos deforestación.

La falta de consenso sobre lo que es la educación ambiental puede ser una razón de tales interpretaciones erróneas. Con frecuencia la educación al aire libre, la educación para la conservación y estudio de la naturaleza son todos temas los considerados como educación ambiental. Al mismo tiempo, parte del problema se debe también a que el mismo término de educación ambiental es un nombre no del todo apropiado.

La problemática ambiental se ha acelerado y agudizado en las últimas décadas, en un contexto en el que la globalización económica impone nuevas pautas para la producción y consumo de recursos. En dicho contexto la educación es una vía útil y necesaria para potenciar al máximo la formación y capacitación ambiental en distintos ámbitos de la sociedad, desde quienes tienen en sus manos la toma de decisiones importantes, hasta los niveles ciudadanos, en los que la actuación diaria incide en forma directa sobre el medio.

Visualizando desde el desarrollo sustentable que surge por la necesidad del ser humano de explotar los recursos naturales para su desarrollo, en una forma racional que garantice la calidad ambiental de nuestro ecosistema, llevando a cabo esto mediante las tres (R):

- Reduce
- Reutiliza
- Recicla

Reciclar significa volver a usar algunos de los residuos generados como materias primas en procesos industriales con el fin de convertirlos nuevamente en productos nuevos de calidad para el consumidor. Es importante conocer que muchos residuos considerados como "basura" pueden ser materias primas importantes para muchas industrias.[1](<http://www.redcicla.org>)

Planteamiento del problema

El problema surge a partir de que tanto en las oficinas como con los propios alumnos existe mucho desgaste de papel, en algunas oficinas, como los propios alumnos las hojas las gastan por un lado y la tiran a la basura, un aproximado de las hojas o paquetes que se gastan en las oficinas por mes, es de 62 paquetes en donde cada paquete trae 500 hojas, no se cuenta con contenedores para ir la recopilando y se nota que no se cuenta con el hábito de reutilizarla por los dos lados principalmente, y al final ir la juntando para un uso adecuado, se ve que no se cuenta con una cultura ambiental lo que propicia todo esto, es comprar más hojas, hacer más basura y tener un gasto mayor en la institución.

Este proyecto surge en la organización, con la necesidad de que se gasta mucho papel en las diferentes oficinas (áreas administrativas), así como en los propios alumnos siendo el material con el que más se trabaja en dicha organización optando con esto el reciclar papel y así generar algo de provecho para la misma organización

Objetivo general

El objetivo principal que se persigue es Proponer un modelo de planeación estratégica para el reciclado de papel, con el propósito de aprovechar el papel de desecho generado por el Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla. (Aulas y oficinas) de manera que sea utilizado en la elaboración de diferentes productos.

Materiales y métodos

El tipo de investigación que se va a aplicar en propuesta es cuantitativa porque nos permitirá analizar los datos obtenidos para definirlos, limitarlos y saber exactamente qué dirección va a llevar dicha investigación.

Esta investigación se desarrolla en siete etapas, las cuales se presentan a continuación.

Etapas del proceso de investigación:

- Planteamiento de la idea a investigar.
- Búsqueda de la base bibliográfica acerca de la planeación estratégica y estado del arte.
- Contextualización del estudio de caso.
- Diseño del instrumento de medición tanto para los alumnos como para el personal administrativo, tamaño de muestra y aplicación del mismo.

- Estudio de campo.
- Resultados y análisis.
- Propuesta del modelo y conclusiones.

Para definir la idea a investigar, fue necesario primero analizar a fondo el problema que se está presentando en la organización, siendo el desperdicio de hojas de papel tanto del personal administrativo como de los alumnos y en algunos casos este desperdicio de hojas nada más es de un solo lado de las mismas y después a la basura teniendo en cuenta que se pueden utilizar por los dos lados. Al final del análisis se enfocó el problema a un tema primordial y de gran importancia que debe tener cualquier organización.

Contextualización del estudio de caso: En esta fase se determinó el problema detalladamente partiendo de un diagrama de Ishikawa, (Diagrama 1), así mismo se plantea el marco teórico de la información concerniente a la teoría de gran relevancia tanto en la planeación estratégica como del reciclado de papel lo que da la pauta a un conocimiento de gran medida para todas las personas que aún desconocen el beneficio que trae consigo el reciclado no nada más de papel si no de alguna otra cosa, (Fuente tomada de la propia investigación)

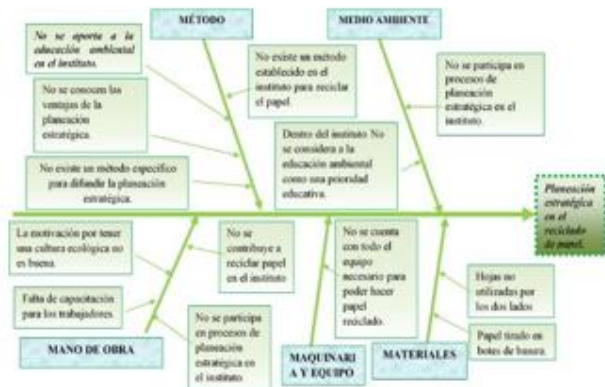


Figura 1 Ishikawa para la determinación del problema.

Diseño del instrumento de medición tanto para los alumnos como personal administrativo y aplicación al estudio de campo y tamaño de muestra.

Definida ya la contextualización del estudio de caso y partiendo del diagrama de Ishikawa en donde se plantea el problema a resolver fue más fácil definir y estructurar el instrumento de medición, “se define el instrumento de medición como el recurso que utiliza el investigador para registrar información o datos sobre las variables que tiene en mente” [4] (Hernández S. (2007), (INSTRUMENTO DE MEDICIÓN 1), definido el cuestionario se realiza el cálculo para medir el tamaño de muestra con el que se tiene que realizar la investigación “medición se define como el proceso que vincula conceptos abstractos con indicadores empíricos” [4] (Hernández S, 2007, p. 276). Para la realización de esta actividad fue necesario ver que variables podrían medir el nivel de planeación estratégica del reciclado de papel en el instituto.

El cuestionario se clasificó en dos partes, la primera para el personal administrativo con 13 preguntas (tomado y validado por la Secretaria del Trabajo y Previsión Social [2](<http://www.stp.gob.mx>) (INSTRUMENTO DE MEDICIÓN 1), y la segunda parte para los alumnos con 21 preguntas manejando diferentes factores respectivamente para cada uno, cada factor tiene como finalidad investigar los diferentes elementos que pueden conformar un modelo de planeación estratégica. Este tipo de cuestionario permite conocer que tanto conocen las personas acerca del reciclado de papel como de la planeación estratégica.

Validez de un instrumento de medición: En términos generales, se refiere al grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir.

La importancia de un instrumento de medición se evalúa sobre la base de todos los tipos de evidencia. Cuanto mayor evidencia de validez de contenido, de criterio, de constructo tenga un instrumento de medición, este se acercará más a representar la (s) variable (s) que pretende medir”, [4] (Hernández S, 2007).

“La validez es un concepto del cual pueden tenerse diferentes tipos de evidencia: 1) Evidencia relacionada con el contenido, 2) Evidencia relacionada con el criterio, 3) Evidencia relacionada con el constructo, [4] (Hernández S, 2007).

Para validar el instrumento de medición dirigido hacia los alumnos, como primera parte se presentó ante todo el grupo de tercer semestre de la maestría en ciencias de la calidad la cual es impartida en la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, al finalizar la presentación del instrumento cada uno de los alumnos aportó sus comentarios y sugerencias los cuales sirvieron para afinar más el instrumento.

Para el primer cuestionario del personal administrativo se tomó como base un instrumento diseñado por la Secretaria del Trabajo y Previsión Social el cual ya está validado y para el segundo se realizó por cuenta propia de la investigación (Fuente tomada de la propia investigación).

Estudio de campo: Para el estudio de campo se empezó primero con una prueba Piloto, “es aquella que consiste en administrar el instrumento a una pequeña muestra, cuyos resultados se usan para calcular la confiabilidad inicial y, de ser posible, la validez del instrumento” [4] (Hernández S. 2007, p. 306).

Esta prueba se realizó con 30 personas y los resultados se metieron para su cálculo y validación mediante el alfa de Cronbach respectivamente, en un software denominado “XLSTAT, 2009”.

Alfa de cronbach: “Es el método de fiabilidad más utilizado en psicometría (desarrollado en 1951). Se trata de un índice de consistencia interna que toma valores entre 0 y 1 y que sirve para comprobar si el instrumento que se está evaluando recopila información defectuosa y por tanto nos llevaría a conclusiones equivocadas o si se trata de un instrumento fiable que hace mediciones estables y consistentes. Alfa es por tanto un coeficiente de correlación al cuadrado que, a grandes rasgos, mide la homogeneidad de las preguntas promediando todas las correlaciones entre todos los ítems para ver que, efectivamente, se parecen. Su interpretación será que, cuanto más se acerque el índice al extremo 1, mejor es la fiabilidad, considerando una fiabilidad respetable a partir de 0.80”[3] (<http://es.wikipedia.org>).

El resultado de la prueba piloto fue 0.853, (Tabla1), quiere decir que mi instrumento esta muy bien diseñado por lo que ya puedo empezar con mis 260 muestras restantes, el periodo de levantamiento de los datos fue del 28 de abril del 2014 al 9 de mayo del 2014.

No se presentó ningún problema durante el levantamiento de datos, tanto del personal administrativo como de los alumnos, teniendo ya los 300 datos del levantamiento de los alumnos se procedió a la captura de los mismos en Excel así como del personal administrativo (Tabla 3), presentando un resultado de la prueba de validación mediante el alfa de Cronbach de las 300 muestras de (0.829), (tabla 4).

| Variable | Observaciones | Obs. con datos perdidos | Obs. sin datos perdidos | Mínimo | Máximo | Media | Desviación típica |
|-------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|--------|-------|-------------------|
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.700 | 1.088 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 1.000 | 5.000 | 3.600 | 1.211 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.600 | 0.704 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.900 | 0.845 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.933 | 0.907 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.933 | 0.907 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.867 | 0.860 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 4.000 | 0.743 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.700 | 1.088 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.300 | 0.750 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.600 | 0.882 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.800 | 0.847 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.900 | 0.845 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 4.133 | 1.074 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 3.000 | 5.000 | 4.667 | 0.806 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.967 | 0.999 |
| 3 | 30 | 0 | 30 | 2.000 | 5.000 | 3.567 | 1.040 |
| 2 | 30 | 0 | 30 | 1.000 | 5.000 | 3.333 | 1.241 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 1.000 | 5.000 | 3.433 | 1.104 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 1.000 | 5.000 | 4.000 | 0.947 |
| 4 | 30 | 0 | 30 | 1.000 | 5.000 | 3.233 | 1.223 |
| Alfa de Cronbach: | | 0.853 | | | | | |

Tabla 1 Alfa de Cronbach, Prueba Piloto.

La muestra. “Se define a la muestra como un subgrupo de la población del cual se recolectan los datos y deben ser representativos de dicha población” [4] (Hernández S. 2007, p. 236).

Para determinar la muestra se preguntó a recursos humanos la cantidad de alumnos con que se cuenta en el Instituto Tecnológico Superior de la Sierra norte de Puebla, siendo un total de 1442 alumnos, el tipo de muestra tomada en la investigación es cuantitativa ya que muestra la cantidad de alumnos a muestrear.

Para determinar su tamaño de muestra, se utilizó el software STATS el cual se presenta a continuación (Tabla 2), [4] (Hernández S. 2007).

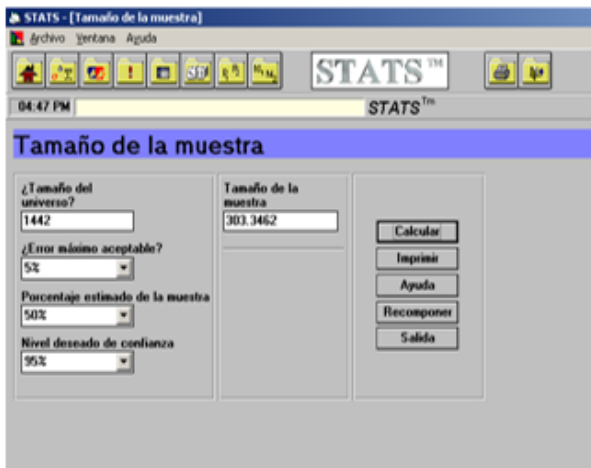


Tabla 2 Cálculo del tamaño de muestra.

| SUJETO | VARIABLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 6 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| 8 | 4 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 | 5 | 5 | 4 |
| 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 4 |
| 8 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 5 | 4 | 5 |
| 8 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 10 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 5 | 1 |
| 11 | 4 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 12 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| 13 | 4 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 2 | 5 | 3 |
| 14 | 4 | 2 | 4 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 15 | 4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 |
| 16 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 17 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | 5 | 5 | 1 |
| 18 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 18 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 20 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 |
| 21 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| 22 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| 23 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 24 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 4 | 3 | 5 | 4 |
| 26 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 28 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 27 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 28 | 4 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 29 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 2 |
| 30 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 |
| 31 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 32 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| 33 | 4 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 34 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 4 | 4 |
| 35 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 2 | 2 | 5 | 5 | 2 |
| 38 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 4 | 2 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1 |
| 37 | 2 | 1 | 3 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 | 2 | 4 | 1 |
| 38 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 39 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 4 | 4 | 2 |
| 40 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 |
| 41 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 |
| 42 | 4 | 2 | 4 | 5 | 2 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 43 | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 4 | 5 | 2 | 2 | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 |
| 44 | 1 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| 45 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| 46 | 3 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 47 | 2 | 2 | 2 | 5 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 48 | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 48 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 1 |
| 50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 1 |
| 51 | 3 | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 52 | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 53 | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 54 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 55 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 1 | 5 | 5 | 4 |
| 58 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 57 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 58 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 59 | 4 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 60 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| 61 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 62 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 |
| 63 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 | 4 | 5 | 2 |
| 64 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 |
| 65 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 |
| 68 | 1 | 1 | 2 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 2 |
| 67 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 4 | 5 | 2 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| 68 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| 69 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 70 | 2 | 2 | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1 |
| 71 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 72 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 73 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| 74 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 75 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 76 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 77 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 |
| 78 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 5 | 3 | 5 |
| 79 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| 80 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 |
| 81 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 2 |
| 82 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 2 |
| 83 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| 84 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 85 | 4 | 1 | 3 | 5 | 2 | 5 | 3 | 5 | 2 | 3 | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 |
| 101 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| 102 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 103 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 104 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | |
| 105 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 106 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 107 | 2 | 1 | 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 108 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 109 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 110 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 111 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 112 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 113 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 114 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 115 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 116 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 117 | 4 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 118 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 119 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 120 | 4 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 121 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 122 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 123 | 5 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 | |
| 124 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | |
| 125 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 126 | 3 | 1 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | |
| 127 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 128 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 129 | 3 | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 130 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 131 | 3 | 1 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| 132 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 133 | 5 | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 134 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 135 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 136 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 4 | 4 | |
| 137 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 138 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 139 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 140 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | |
| 141 | 2 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | |
| 142 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 143 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 144 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 145 | 4 | 1 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 146 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 147 | 5 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 4 | |
| 148 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 149 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 150 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 151 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 |
| 152 | 4 | 1 | 5 | 4 | 1 | 1 | 4 | 5 | 1 | 1 | 2 | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 3 | 3 |
| 153 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | |
| 154 | 4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | |
| 155 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | |
| 156 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 157 | 4 | 1 | 4 | 3 | 4 | 4 | 1 | 5 | 5 | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 4 | |
| 158 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | |
| 159 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | |
| 160 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | |
| 161 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | |
| 162 | 5 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 | 4 | |
| 163 | 1 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | |
| 164 | 4 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | |
| 165 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | |
| 166 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 1 | 3 | 5 | |
| 167 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| 168 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 2 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | |
| 169 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | |
| 170 | 4 | 1 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | |
| 171 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | |
| 172 | 2 | 1 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 5 | 4 | |
| 173 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 2 | |
| 174 | 2 | 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 | |
| 175 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | |
| 176 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | |
| 177 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | |
| 178 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | |
| 179 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | |
| 180 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 1 | 5 | 5 | |
| 181 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 4 | 2 | 5 | 3 | 5 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 4 | 5 | |
| 182 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 | 4 | 4 | 1 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| 183 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | |
| 184 | 4 | 1 | 3 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | |
| 185 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | |
| 186 | 4 | 2 | 4 | 5 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 2 | 4 | |
| 187 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 1 | 5 | |
| 188 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | |
| 189 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 1 | 1 | 2 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 5 | |
| 190 | 3 | 1 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | 5 | |
| 191 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | |
| 192 | 4 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | |
| 193 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | |
| 194 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | 1 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | |
| 195 | 2 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 4</ | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 202 | 3 | 1 | 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 203 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| 204 | 3 | 1 | 2 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | 2 |
| 205 | 1 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 206 | 3 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 207 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| 208 | 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| 209 | 2 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 210 | 1 | 1 | 1 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 4 | 5 | 3 |
| 211 | 3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 2 |
| 212 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 2 | 5 | 5 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 213 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 214 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 5 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 215 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 216 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 217 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 218 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 219 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 220 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 221 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 4 | 2 | 2 |
| 222 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| 223 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 1 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 2 | 2 |
| 224 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 225 | 2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 226 | 3 | 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 2 | 2 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| 227 | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 228 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 229 | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 230 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| 231 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 232 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| 233 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 234 | 5 | 1 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 | 2 |
| 235 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| 236 | 2 | 1 | 2 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 237 | 5 | 1 | 5 | 3 | 4 | 5 | 3 | 3 | 1 | 2 | 3 | 5 | 3 | 5 | 1 | 5 | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 238 | 1 | 2 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 239 | 3 | 1 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 1 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 3 | 5 | 1 |
| 240 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 2 | 2 |
| 241 | 2 | 1 | 2 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 242 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 2 | 3 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 243 | 3 | 2 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 244 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 245 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 246 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| 247 | 2 | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 |
| 248 | 4 | 2 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 249 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 |
| 250 | 3 | 2 | 2 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 1 | 2 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 251 | 4 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| 252 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 5 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 253 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| 254 | 3 | 1 | 1 | 5 | 4 | 5 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 255 | 1 | 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| 256 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 257 | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| 258 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 259 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 4 | 3 |
| 260 | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 3 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 261 | 1 | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| 262 | 1 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 263 | 3 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 264 | 4 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 265 | 2 | 3 | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 3 | 3 | 5 | 3 | 2 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 3 | 2 |
| 266 | 2 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 3 |
| 267 | 2 | 1 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 268 | 2 | 1 | 1 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 269 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 |
| 270 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 271 | 3 | 1 | 1 | 4 | 3 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 272 | 3 | 5 | 4 | 1 | 4 | 4 | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 273 | 3 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| 274 | 4 | 1 | 4 | 2 | 2 | 5 | 5 | 4 | 2 | 2 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| 275 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 1 | 3 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 3 |
| 276 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 | 3 | 5 | 2 | 2 | 1 | 3 | 5 | 1 |
| 277 | 5 | 1 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 | 5 | 1 |
| 278 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 279 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 4 |
| 280 | 4 | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 281 | 4 | 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 282 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 283 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 284 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 |
| 285 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 2 |
| 286 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 |
| 287 | 3 | 3 | 1 | 4 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 |
| 288 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 |
| 289 | 4 | 4 | 5 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Resultados

Resultados del instrumento personal administrativo y análisis del proyecto son:

Los resultados obtenidos en el cuestionario del personal administrativo se graficaron (ver gráfica 1) la cual al analizarla se presenta una brecha entre ambas variables en donde (A) representa el estado donde esta o se encuentra uno y (B) representa el estado de hasta donde quiere uno llegar, mediante esta brecha que se presenta entre ambas se determina un análisis FODA y que nos da varias estrategias a seguir las cuales nos sirven para determinar la propuesta del modelo de Planeación Estratégica a seguir. (Fuente tomada de la propia investigación).

La metodología a seguir es la parte medular de la investigación ya que en ella se marcan todas y cada una de las etapas que se siguieron durante la investigación las cuales se presentaron con anterioridad y que fueron de gran importancia para el desarrollo del proyecto esta metodología se desarrolló en siete etapas cumpliéndose cada una de ellas y que nos llevan a la presentación del modelo de planeación estratégica.

La ventaja que trae consigo el crear conciencia del desarrollo sustentable en el Instituto Tecnológico es que reúne dos líneas de pensamiento en torno a la gestión de las actividades humanas: una de ellas está concentrada en las metas de desarrollo día con día y la otra en el control del impacto dañino de las actividades humanas sobre el medio ambiente que nos rodea, involucrando principalmente a toda la comunidad, esto no se puede alcanzar si nada más se involucra a pequeños grupos, para que se lleve a cabo esto es necesario involucrar a las autoridades de la misma organización.

Todo este proceso es largo y complejo pero muy satisfactorio ya que uno mismo está haciendo algo para la propia humanidad y para la propia organización. Así mismo el beneficio que trae consigo el crear conciencia en el desarrollo ambiental es que es un proceso permanente y continuo, no necesariamente es la enseñanza de conceptos ambientales, aquí lo importante y primordial es promover una cultura para el ambiente que nos rodea, lo más importante es concientizar a las personas sobre el ambiente que nos rodea, lo más importante es valorar los beneficios y todos los servicios que proporciona el ambiente.

En la hoja de codificación de datos del personal administrativo que se presentó en la gráfica 1, los resultados obtenidos para el análisis FODA del personal administrativo se dan en la (Gráfica 1), (Fuente tomada y hecha de los resultados en estudio).



Gráfica 1 Resultados del instrumento de medición personal administrativo.

Variable (A)= Representa la situación actual en la que se encuentra actualmente la organización.

Variable (B)= Representa la situación hacia donde la empresa quiere llegar. Toda la información del instrumento de medición de los alumnos se procesó en el paquete estadístico SPSS 13 for Windows.

Primero se procedió al cálculo de la distribución (t), utilizando una μ de 4, 3.5 ,3 respectivamente (tabla 5) proponiendo una hipótesis para cada una de las variables a medir y con esto identificar con más facilidad el problema, esta hipótesis sirvió de ayuda para la elaboración del análisis, (TABLA 6), “Hipótesis es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso que puede probarse a partir de la información contenida en una muestra”, [5] (Humberto Gutiérrez P. Roman de la Vara S.(2003))

El resultado obtenido de la prueba de hipótesis se utilizó para la elaboración de un análisis FODA el cual dio como resultado estrategias a seguir para la elaboración del modelo de planeación estratégica, (Tabla 4.1), “FODA es una forma importante de validar el modelo de la estrategia de negocios” [6] (Leonard D. Goodstein, Timothy M. Nolan, J. William Pfeiffer, 2003, p.31), el análisis FODA es una de las herramientas esenciales que provee de los insumos necesarios al proceso de planeación estratégica, proporcionando la información necesaria para la implantación de acciones, estrategias, medidas correctivas, generación de nuevos o mejores proyectos.

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|----------|-----|--------|----------------|-----------------|
| VAR00001 | 300 | 3.2233 | 1.0442 | 6.029E-02 |
| VAR00002 | 300 | 3.0267 | 1.4397 | 8.312E-02 |
| VAR00003 | 300 | 3.0600 | 1.2814 | 7.398E-02 |
| VAR00004 | 300 | 3.7900 | 1.0408 | 6.008E-02 |
| VAR00005 | 300 | 3.8200 | 1.0382 | 5.994E-02 |
| VAR00006 | 300 | 3.9500 | 1.0915 | 6.302E-02 |
| VAR00007 | 300 | 3.7000 | 1.0067 | 5.812E-02 |
| VAR00008 | 300 | 3.7067 | .8738 | 5.044E-02 |
| VAR00009 | 300 | 3.0667 | 1.2705 | 7.335E-02 |
| VAR00010 | 300 | 3.0167 | 1.0740 | 6.201E-02 |
| VAR00011 | 300 | 3.2200 | 1.0304 | 5.949E-02 |
| VAR00012 | 300 | 3.7367 | .9852 | 5.688E-02 |
| VAR00013 | 300 | 3.7033 | .9790 | 5.652E-02 |
| VAR00014 | 300 | 3.9933 | .9538 | 5.507E-02 |
| VAR00015 | 300 | 4.4000 | .7972 | 4.602E-02 |
| VAR00016 | 300 | 3.6267 | 1.1569 | 6.679E-02 |
| VAR00017 | 300 | 3.2367 | 1.1157 | 6.442E-02 |
| VAR00018 | 300 | 3.1100 | 1.3180 | 7.609E-02 |
| VAR00019 | 300 | 3.5133 | .9968 | 5.754E-02 |
| VAR00020 | 300 | 4.0200 | .8994 | 5.193E-02 |
| VAR00021 | 300 | 3.1833 | 1.2416 | 7.168E-02 |

One-Sample Test

| | Test Value = 4 | | | | | |
|---------|----------------|-----|-----------------|-----------------|---|--------|
| | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | 95% Confidence Interval of the Difference | |
| | | | | | Lower | Upper |
| VAR0000 | 12.882 | 299 | .000 | -.7767 | -.8953 | -.6580 |
| VAR0000 | 11.709 | 299 | .000 | -.9733 | -1.1369 | -.8098 |
| VAR0000 | 12.706 | 299 | .000 | -.9400 | -1.0856 | -.7944 |
| VAR0000 | -3.495 | 299 | .001 | -.2100 | -.3282 | 18E-02 |
| VAR0000 | -3.003 | 299 | .003 | -.1800 | -.2980 | 20E-02 |
| VAR0000 | -.793 | 299 | .428 | 000E-02 | -.1740 | 02E-02 |
| VAR0000 | -5.162 | 299 | .000 | -.3000 | -.4144 | -.1856 |
| VAR0000 | -5.816 | 299 | .000 | -.2933 | -.3926 | -.1941 |
| VAR0000 | 12.724 | 299 | .000 | -.9333 | -1.0777 | -.7890 |
| VAR0000 | 15.858 | 299 | .000 | -.9833 | -1.1054 | -.8613 |
| VAR0000 | 13.111 | 299 | .000 | -.7800 | -.8971 | -.6629 |
| VAR0000 | -4.630 | 299 | .000 | -.2633 | -.3753 | -.1514 |
| VAR0000 | -5.248 | 299 | .000 | -.2967 | -.4079 | -.1854 |
| VAR0000 | -.121 | 299 | .904 | 667E-03 | -.1150 | .1017 |
| VAR0000 | 8.691 | 299 | .000 | .4000 | .3094 | .4906 |
| VAR0000 | -5.589 | 299 | .000 | -.3733 | -.5048 | -.2419 |
| VAR0000 | 11.850 | 299 | .000 | -.7633 | -.8901 | -.6366 |
| VAR0000 | 11.696 | 299 | .000 | -.8900 | -1.0397 | -.7403 |
| VAR0000 | -8.458 | 299 | .000 | -.4867 | -.5999 | -.3734 |
| VAR0000 | .385 | 299 | .700 | 000E-02 | 22E-02 | .1222 |
| VAR0000 | 11.393 | 299 | .000 | -.8167 | -.9577 | -.6756 |

One-Sample Statistics

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|----------|-----|--------|----------------|-----------------|
| VAR00001 | 300 | 3.2233 | 1.0442 | .029E-02 |
| VAR00002 | 300 | 3.0267 | 1.4397 | .312E-02 |
| VAR00003 | 300 | 3.0600 | 1.2814 | .398E-02 |
| VAR00004 | 300 | 3.7900 | 1.0406 | .008E-02 |
| VAR00005 | 300 | 3.8200 | 1.0382 | .994E-02 |
| VAR00006 | 300 | 3.9500 | 1.0915 | .302E-02 |
| VAR00007 | 300 | 3.7000 | 1.0067 | .812E-02 |
| VAR00008 | 300 | 3.7067 | .8736 | .044E-02 |
| VAR00009 | 300 | 3.0667 | 1.2705 | .335E-02 |
| VAR00010 | 300 | 3.0167 | 1.0740 | .201E-02 |
| VAR00011 | 300 | 3.2200 | 1.0304 | .949E-02 |
| VAR00012 | 300 | 3.7367 | .9852 | .688E-02 |
| VAR00013 | 300 | 3.7033 | .9790 | .652E-02 |
| VAR00014 | 300 | 3.9933 | .9538 | .507E-02 |
| VAR00015 | 300 | 4.4000 | .7972 | .602E-02 |
| VAR00016 | 300 | 3.6267 | 1.1569 | .679E-02 |
| VAR00017 | 300 | 3.2367 | 1.1157 | .442E-02 |
| VAR00018 | 300 | 3.1100 | 1.3180 | .609E-02 |
| VAR00019 | 300 | 3.5133 | .9966 | .754E-02 |
| VAR00020 | 300 | 4.0200 | .8994 | .193E-02 |
| VAR00021 | 300 | 3.1833 | 1.2416 | .168E-02 |

One-Sample Statistics

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|----------|-----|--------|----------------|-----------------|
| VAR00001 | 300 | 3.2233 | 1.0442 | .029E-02 |
| VAR00002 | 300 | 3.0267 | 1.4397 | .312E-02 |
| VAR00003 | 300 | 3.0600 | 1.2814 | .398E-02 |
| VAR00004 | 300 | 3.7900 | 1.0406 | .008E-02 |
| VAR00005 | 300 | 3.8200 | 1.0382 | .994E-02 |
| VAR00006 | 300 | 3.9500 | 1.0915 | .302E-02 |
| VAR00007 | 300 | 3.7000 | 1.0067 | .812E-02 |
| VAR00008 | 300 | 3.7067 | .8736 | .044E-02 |
| VAR00009 | 300 | 3.0667 | 1.2705 | .335E-02 |
| VAR00010 | 300 | 3.0167 | 1.0740 | .201E-02 |
| VAR00011 | 300 | 3.2200 | 1.0304 | .949E-02 |
| VAR00012 | 300 | 3.7367 | .9852 | .688E-02 |
| VAR00013 | 300 | 3.7033 | .9790 | .652E-02 |
| VAR00014 | 300 | 3.9933 | .9538 | .507E-02 |
| VAR00015 | 300 | 4.4000 | .7972 | .602E-02 |
| VAR00016 | 300 | 3.6267 | 1.1569 | .679E-02 |
| VAR00017 | 300 | 3.2367 | 1.1157 | .442E-02 |
| VAR00018 | 300 | 3.1100 | 1.3180 | .609E-02 |
| VAR00019 | 300 | 3.5133 | .9966 | .754E-02 |
| VAR00020 | 300 | 4.0200 | .8994 | .193E-02 |
| VAR00021 | 300 | 3.1833 | 1.2416 | .168E-02 |

One-Sample Test

| | Test Value = 3.5 | | | | | |
|----------|------------------|-----|-----------------|-----------------|---|--------|
| | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | 95% Confidence Interval of the Difference | |
| | | | | | Lower | Upper |
| VAR00001 | -4.589 | 299 | .000 | -.2767 | -.3953 | -.1580 |
| VAR00002 | -5.694 | 299 | .000 | -.4733 | -.6369 | -.3098 |
| VAR00003 | -5.948 | 299 | .000 | -.4400 | -.5856 | -.2944 |
| VAR00004 | 4.827 | 299 | .000 | .2900 | .1718 | .4082 |
| VAR00005 | 5.339 | 299 | .000 | .3200 | .2020 | .4380 |
| VAR00006 | 7.141 | 299 | .000 | .4500 | .3260 | .5740 |
| VAR00007 | 3.441 | 299 | .001 | .2000 | .62E-02 | .3144 |
| VAR00008 | 4.098 | 299 | .000 | .2067 | .1074 | .3059 |
| VAR00009 | -5.907 | 299 | .000 | -.4333 | -.5777 | -.2890 |
| VAR00010 | -7.794 | 299 | .000 | -.4833 | -.6054 | -.3613 |
| VAR00011 | -4.706 | 299 | .000 | -.2800 | -.3971 | -.1629 |
| VAR00012 | 4.161 | 299 | .000 | .2367 | .1247 | .3486 |
| VAR00013 | 3.597 | 299 | .000 | .2033 | .10E-02 | .3146 |
| VAR00014 | 8.959 | 299 | .000 | .4933 | .3850 | .6017 |
| VAR00015 | 19.555 | 299 | .000 | .9000 | .8094 | .9906 |
| VAR00016 | 1.896 | 299 | .059 | .1267 | .78E-03 | .2581 |
| VAR00017 | -4.088 | 299 | .000 | -.2633 | -.3901 | -.1366 |
| VAR00018 | -5.125 | 299 | .000 | -.3900 | -.5397 | -.2403 |
| VAR00019 | .232 | 299 | .817 | .333E-02 | .99E-02 | .1266 |
| VAR00020 | 10.014 | 299 | .000 | .5200 | .4178 | .6222 |
| VAR00021 | -4.418 | 299 | .000 | -.3167 | -.4577 | -.1756 |

One-Sample Test

| | Test Value = 3 | | | | | |
|----------|----------------|-----|-----------------|-----------------|---|--------|
| | t | df | Sig. (2-tailed) | Mean Difference | 95% Confidence Interval of the Difference | |
| | | | | | Lower | Upper |
| VAR00001 | 3.704 | 299 | .000 | .2233 | .1047 | .3420 |
| VAR00002 | .321 | 299 | .749 | .667E-02 | -.1389 | .1902 |
| VAR00003 | .811 | 299 | .418 | .000E-02 | .56E-02 | .2056 |
| VAR00004 | 13.149 | 299 | .000 | .7900 | .6718 | .9082 |
| VAR00005 | 13.680 | 299 | .000 | .8200 | .7020 | .9380 |
| VAR00006 | 15.074 | 299 | .000 | .9500 | .8260 | 1.0740 |
| VAR00007 | 12.044 | 299 | .000 | .7000 | .5856 | .8144 |
| VAR00008 | 14.011 | 299 | .000 | .7067 | .6074 | .8059 |
| VAR00009 | .909 | 299 | .364 | .667E-02 | .77E-02 | .2110 |
| VAR00010 | .269 | 299 | .788 | .667E-02 | -.1054 | .1387 |
| VAR00011 | 3.698 | 299 | .000 | .2200 | .1029 | .3371 |
| VAR00012 | 12.952 | 299 | .000 | .7367 | .6247 | .8486 |
| VAR00013 | 12.443 | 299 | .000 | .7033 | .5921 | .8146 |
| VAR00014 | 18.039 | 299 | .000 | .9933 | .8850 | 1.1017 |
| VAR00015 | 30.419 | 299 | .000 | 1.4000 | 1.3094 | 1.4906 |
| VAR00016 | 9.382 | 299 | .000 | .8267 | .4952 | .7581 |
| VAR00017 | 3.674 | 299 | .000 | .2367 | .1099 | .3634 |
| VAR00018 | 1.446 | 299 | .149 | .1100 | .97E-02 | .2597 |
| VAR00019 | 8.922 | 299 | .000 | .5133 | .4001 | .6266 |
| VAR00020 | 19.642 | 299 | .000 | 1.0200 | .9178 | 1.1222 |
| VAR00021 | 2.558 | 299 | .011 | .1833 | .227E-02 | .3244 |

Tabla 5 Cálculo de la distribución (t)

| Variable | Factor | Prueba (t) | Media | Desviación Estándar | μ | Prueba de Hipótesis | Hipótesis aceptable y de rechazo |
|----------|--|------------|--------|---------------------|-------|---|----------------------------------|
| 1 | Conocimiento de la planeación estratégica. | 3.704 | 3.2233 | 1.0442 | 3 | H0: Si se tiene conocimiento de lo que es la planeación estratégica. H1: No se tiene conocimiento de lo que es la planeación estratégica. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |
| 2 | Conocimiento de la planeación estratégica. | 0.321 | 3.0267 | 1.4397 | 3 | H0: Si se participa en procesos de planeación estratégica en el Instituto. H1: No se participa en procesos de planeación estratégica en el Instituto | Se rechaza H0 y se acepta H1 |
| 3 | Conocimiento de la planeación estratégica. | 0.811 | 3.0600 | 1.2814 | 3 | H0: Se conocen las ventajas de lo que es la planeación estratégica. H1: No se conocen las ventajas de lo que es la planeación estratégica. | Se rechaza H0 y se acepta H1 |
| 4 | Aplicación. | 4.827 | 3.7900 | 1.0406 | 3.5 | H0: Se tiene un buen porcentaje en la aplicación de la planeación estratégica en el reciclado de papel. H1: No se tiene un buen porcentaje en la aplicación de la planeación estratégica en el reciclado de papel. | Se rechaza H1 y se acepta H0 |
| 5 | Aplicación. | 5.339 | 3.8200 | 1.0382 | 3.5 | H0: Se participa mucho en el reciclado de papel. H1: No se participa mucho en el | Se acepta H0 y se rechaza H1 |

| | | | | | | | |
|----|---------------|-------|--------|--------|-----|---|------------------------------|
| 6 | Aplicación. | 7.141 | 3.9500 | 1.0915 | 3.5 | H0: Si se aplica el reciclado de papel en la región. H1: No se aplica el reciclado de papel en la región. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |
| 7 | Contribución. | 3.441 | 3.7000 | 1.0067 | 3.5 | H0: Si se aplica el reciclado de papel en la región. H1: No se aplica el reciclado de papel en la región. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |
| 8 | Contribución. | 4.099 | 3.7067 | 0.8736 | 3.5 | H0: Se contribuye a la preocupación del medio ambiente. H1: No se contribuye a la preocupación del medio ambiente. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |
| 9 | Contribución. | 0.909 | 3.0667 | 1.2705 | 3 | H0: Se contribuye a reciclar pap en el Instituto. H1: No se contribuye a reciclar pap en el Instituto. | Se rechaza H0 y se acepta H1 |
| 10 | Aportación. | 0.269 | 3.0167 | 1.0740 | 3 | H0: La aportación a la educación ambiental en el Instituto es buena. H1: No se aporta a la educación ambiental en el Instituto. | Se rechaza H0 y se acepta H1 |
| 11 | Aportación. | 3.698 | 3.2200 | 1.0904 | 3 | H0: El porcentaje de aportar a la cultura ecológica es buena. H1: El porcentaje de aportar a la cultura ecológica no es buena. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |
| 12 | Aportación. | 4.161 | 3.7367 | 0.9852 | 3.5 | H0: Se aportaría un buen porcentaje en el proyecto de Planeación Estratégica del reciclado de papel. H1: No se aportaría un buen porcentaje en el proyecto de Planeación Estratégica del reciclado de papel. | Se acepta H0 y se rechaza H1 |

| | | | | | | | |
|----|----------|-------|--------|--------|-----|---|-------------------------------|
| 13 | Actitud. | 3.597 | 3.7033 | 0.9790 | 3.5 | H0: Se muestra una actitud de cooperación hacia el reciclado. H1: No se muestra una actitud de cooperación hacia el reciclado. | Se acepta H0 y se rechaza H1. |
| 14 | Actitud. | 3.999 | 3.9933 | 0.9958 | 3.5 | H0: La actitud y conocimiento representa una estrategia para solucionar problemas ambientales. H1: La actitud y conocimiento no representa una estrategia para solucionar problemas ambientales. | Se acepta H0 y se rechaza H1. |
| 15 | Actitud. | 3.691 | 4.400 | 0.7972 | 4 | H0: Se considera una buena actitud para triunfar en la educación ambiental. H1: No hay una buena actitud para triunfar en la educación ambiental. | Se acepta H0 y se rechaza H1. |
| 16 | Mito. | 1.896 | 3.6267 | 1.1569 | 3.5 | H0: Se considera a la educación ambiental como una prioridad educativa. H1: No se considera a la educación ambiental como una prioridad educativa. | Se rechaza H0 y se acepta H1. |
| 17 | Mito. | 3.674 | 3.2367 | 1.1137 | 3 | H0: El impacto económico del reciclaje es mínimo. H1: El impacto económico del reciclaje no es mínimo. | Se acepta H0 y se rechaza H1. |

| | | | | | | | |
|----|-------------|-------|--------|--------|-----|---|-------------------------------|
| 18 | Mito. | 1.446 | 3.1100 | 1.3180 | 3 | H0: El reciclaje de papel utiliza la misma cantidad de agua que el papel normal. H1: El reciclaje de papel no utiliza la misma cantidad de agua que el papel normal. | Se rechaza H0 y se acepta H1. |
| 19 | Motivación. | 0.232 | 3.5133 | 0.9966 | 3.5 | H0: La motivación del reciclaje de papel en el Instituto es buena. H1: La motivación del reciclaje de papel en el Instituto no es buena. | Se rechaza H0 y se acepta H1. |
| 20 | Motivación. | 0.385 | 4.0200 | 0.8994 | 4 | H0: La motivación por tener una cultura ecológica es buena. H1: La motivación por tener una cultura ecológica no es buena. | Se rechaza H0 y se acepta H1. |
| 21 | Motivación. | 2.558 | 3.1833 | 1.2416 | 3 | H0: Los maestros motivan a sus alumnos en la cultura ecológica del reciclado de papel. H1: Los maestros no motivan a sus alumnos en la cultura ecológica del reciclado de papel. | Se acepta H0 y se rechaza H1. |

Tabla 6 Prueba de hipótesis mediante la distribución (t), a alumnos

Con base en la gráfica 1 y a la brecha que existe entre una y otra variable se realizó el análisis de FODA correspondiente (Tabla 7).

| | | |
|---|---|--|
| | <p>Fortalezas-F 1.-Conocimiento de las habilidades, misión, visión, objetivos, en el reciclado de papel. 2.-Concentramos toda nuestra capacidad en el producto o servicio. 3.-Toma de decisiones con respecto al desarrollo sustentable y educación ambiental.</p> | <p>Debilidades-D 1.-Se ignora el propósito fundamental que persigue la organización en el reciclado de papel. 2.-Se Contribuye muy poco en el reciclado de papel en el Instituto. 3.-Se desconoce quienes más participan en el Instituto en el reciclado de papel y en la preocupación por el medio ambiente. 4.-Nos guiamos por intuiciones.</p> |
| <p>Oportunidades-O 1.-Conocer las características significativas del crecimiento de la educación ambiental así como de la actitud de cooperación hacia el reciclado de papel externamente. 2.- Se desconoce el proceso de reciclado de papel y desarrollo sustentable externamente. 3.- Conocer las funciones básicas del reciclado de papel. 4.- Conocimiento sobre planeación estratégica.</p> | <p>Estrategias-FO 1.-Programa de capacitación para el conocimiento de F.O.D.A. y Planeación Estratégica, (FO1). 2.-Brindar capacitación sobre la Planeación Estratégica en el Reciclado de Papel para brindar un buen servicio a la institución, (FO2). 3.-Establecimiento de principios del reciclado y desarrollo sustentable hacia la educación ambiental que marquen el rumbo a seguir, (FO3). 4.-Impulso para el desarrollo de nuevos servicios y/o productos en el reciclado de papel y Planeación Estratégica, (FO1,4).</p> | <p>Estrategias-DO 1.-Hacer una descripción breve y clara por escrito del propósito fundamental de la organización, (DO1). 2.-Proponer una capacitación sobre lo que se puede hacer con el reciclado, (FO2). 3.-Realizar un estudio completo de nuestros clientes para identificar necesidades, deseos y expectativas en el reciclado de papel. 4.-Realización de acciones que impacten en el mercado y se traduzcan en ventajas para la competencia en la Planeación Estratégica.</p> |

| | | |
|--|--|--|
| <p>Amenazas-A 1.-Se carece de un estudio, preparación y concientización sobre el beneficio que trae el reciclado de papel. 2.-Se carece de un sistema formal que nos guíe en la elección de nuestro futuro. 3.-Desconocimiento de las fuerzas y debilidades. 4.-No se tiene definida una estrategia que debamos seguir.</p> | <p>Estrategias-FA 1.-Creación de un estudio el cual nos permita conocer todo sobre reciclado de papel así como de elaborar misión, visión y objetivos, (FA1). 2.-Elaboración de un sistema formal que nos guíe en la elección de nuestro futuro, así como del producto o servicio, (FA2). 3.-Análisis de toda nuestra situación y mostrar todas nuestras fuerzas y debilidades, (FA3). 4.-Determinación de la fase por la que atraviesa nuestro servicio de reciclado de papel, (FA 2,4).</p> | <p>Estrategias-DA 1.-Preocupación constante por la innovación y lanzamiento de nuevos productos de reciclado de papel, (DA1). 2.-Llevar a cabo investigaciones de mercado para conocer los deseos, necesidades y expectativas de un Plan Estratégico en el Reciclado de Papel en el Instituto, (DA2). 3.-Conocer la importancia que tiene el reciclado de papel y lo que se puede hacer con él, (DA3). 4.-Tener perfectamente claro y definido la estrategia a seguir, (DA4).</p> |
|--|--|--|

Tabla 7 Análisis de FODA personal administrativo.

Modelo de Planeación Estratégica a un proyecto académico de Reciclado de Papel



Conclusión

De acuerdo a la investigación realizada a la muestra corrida durante la investigación, se cumple con el objetivo general siendo el plantear una propuesta del modelo, en donde de acuerdo a las pruebas realizadas se aprovecha el papel generado por la organización, realizándose de manera diferente varios productos como pueden ser cuadros, carpetas, hojas, libretas para notas etc., inclusive se puede realizar una especie de tablarrocaconvinado con cemento y yeso, con esto se cumple la implementación de las 3R que son (Reduce, Recicla, y Reutiliza), así mismo se cumple con los objetivos específicos en determinar mediante un diagnóstico exploratorio y mediante una cultura de desarrollo sustentable un plan estratégico de reciclado de papel, así mismo se puede desarrollar un sistema de acopio de papel en cada uno de los diferentes departamentos de la organización mediante la colocación de contenedores, y una cultura ambiental, con todo esto se cumple el cuidado al medio ambiente, la mejora continua y se contribuye con la certificación de la norma ISO 1400, así mismo esta propuesta sirve para analizar las necesidades de la propia organización.

En cuanto a las preguntas de investigación que se presentan, la primera pregunta se está cumpliendo, según el modelo propuesto, ver (propuesta), mediante la investigación realizada para llevar a cabo el proyecto, mediante este mismo modelo se presenta la forma de cómo realizar el acopio de papel en el Instituto realizándose con la colocación de contenedores en los diferentes departamentos de la organización, así mismo se presentan las variables estratégicas que incluyen el plan de concientización y educación ambiental sobre la importancia del reciclado que en esta actualidad es de gran importancia y relevancia en cualquier organismo.

La ventaja que trae consigo el crear conciencia del desarrollo sustentable en la organización, es que reúne dos líneas de pensamiento en torno a la gestión de las actividades humanas: una de ellas está concentrada en las metas de desarrollo día con día y la otra en el control del impacto dañino de las actividades humanas sobre el medio ambiente que nos rodea, involucrando principalmente a toda la comunidad, esto no se puede alcanzar si nada más se involucra a pequeños grupos, para que se lleve a cabo esto es necesario involucrar a las autoridades de la organización, todo este proceso es largo y complejo pero muy satisfactorio ya que uno mismo está haciendo algo para la propia humanidad y para la propia organización. Así mismo el beneficio que trae consigo el crear conciencia en el desarrollo ambiental es que es un proceso permanente y continuo, no necesariamente es la enseñanza de conceptos ambientales, lo primordial es promover una cultura para el ambiente que nos rodea, lo más significativo es concientizar a las personas sobre el ambiente que nos rodea y valorar los beneficios y todos los servicios que proporciona el ambiente.

Referencias

(<http://www.redcicla.org/organizacion/queson-las-3-erres.php>).

<http://www.stp.gob.mx>

(http://es.wikipedia.org/wiki/Alfa_de_Cronbach

Hernández S. (2007), p. 276. Metodología de la Investigación. Mc Graw Hill.

Humberto Gutiérrez P. Roman de la Vara S.(2003), Análisis y Diseño de Experimentos. Mc Graw Hill.

D. Golstein L. M. Nolan T. “et al”(2003) Planeación Estratégica Aplicada, Como desarrollar un plan que realmente funcione. Mc Graw Hill.

Mejoramiento del OEE en la Línea de Producción siguiendo la Metodología Seis Sigma + Lean

GONZÁLEZ, Martín*† y CUAUHTÉMOC, Lehi

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Avenida 25 Pte. #100, Colonia Reserva Territorial, 94106 Huatusco, Ver.

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

El uso de la metodología de Seis Sigma + Lean permitió obtener un OEE mínimo del 40% para finales de año.

Lean y Seis Sigma presentan una metodología robusta, organizada y sistemática para la mejora estratégica de la organización. Lean se concentrará en eliminar aquellas actividades que no agregan valor en la organización (eliminar los 8 desperdicios) y Seis sigma en reducir la variación en el proceso. Dicho de otra forma, Lean nos ayuda a mejorar el proceso y Seis Sigma a mantenerlo bajo control. Se siguió la metodología de Seis sigma, las técnicas Lean son complementarias en el enfoque DMAIC de seis sigma. La metodología Seis Sigma + Lean nos muestra su validez para afrontar los diferentes problemas en la línea de producción y mejorar su rendimiento de OEE a un 40%, la reducción del tiempo de cambio de formato en un 65.57%, reducción de merma en un 76.96% y un incremento en el tiempo de funcionamiento de 49.13%. La importancia del material es una de las principales causas de variación de los procesos, la importancia de eliminar el octavo desperdicio, uno para todos y todos para uno.

OEE, Seis Sigma, Lean Manufacturing, DMAIC.

Abstract

Using the methodology of Six Sigma + Lean OEE allowed to obtain a minimum of 40% by the end of the year. Lean and Six Sigma has a strong, organized and systematic methodology for strategic improvement of the organization. Lean will focus on eliminating activities that do not add value in the organization (eliminate waste 8) and Six Sigma to reduce the variation in the process. In other words Lean helps us to improve the process and Six Sigma to keep it under control. Six sigma methodology followed, lean techniques are complementary in six sigma DMAIC approach. Six Sigma + Lean shows its validity to tackle the various problems in the production line and improve their performance OEE to 40%, reducing the changeover time on a 65.57% decrease on a reduction 76.96% and an increase in the operating time of 49.13%. The importance of the material is one of the main causes of the process variation, the importance of eliminating eighth waste, one for all and all for one.

OEE, Six Sigma, Lean Manufacturing, DMAIC.

Citación: GONZÁLEZ, Martín y CUAUHTÉMOC, Lehi. Mejoramiento del OEE en la Línea de Producción siguiendo la Metodología Seis Sigma + Lean. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 168-180

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: martinglez75@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Seis Sigma + Lean es la combinación de herramientas, técnicas y principios de Seis sigma (calidad) y Lean Manufacturing (velocidad). Lean se concentra en eliminar aquellas actividades que no agregan valor en la organización y Seis sigma en reducir la variación en el proceso, las cuales son llamadas desperdicios y ambas permiten reducir los defectos en cualquier proceso, de ese modo se mejora la calidad de los productos para los consumidores.

Seis sigma + Lean proporciona un enfoque riguroso y estructurado para ayudar a gestionar y mejorar el rendimiento. Ayuda a utilizar las herramientas correctas, en el lugar adecuado y de la manera correcta, no solo en la mejora, sino también en el control de las actividades diarias.

El presente trabajo muestra como Lean Seis Sigma logran un mejoramiento del OEE en la línea de producción en un 40% en la empresa Productos Químicos Naturales S. A. (PROQUINA), dicho estudio se llevó a cabo de Enero a Noviembre de 2014.

El 11 de Marzo de 1963 se funda Productos Químicos Naturales S.A. (PROQUINA) la cual se localiza en el Valle de Orizaba en la ciudad de Ixtaczoquitlan, Veracruz México. La ciudad está ubicada a 1200 metros sobre el nivel del mar.

En 2007, la compañía pasa a ser parte del grupo Bayer, donde pertenece al área de Bayer HealthCare, Product Supply. Bayer HealthCare sitio Orizaba, conservando el nombre de Productos Químicos Naturales S.A. de C.V.

La planta farmacéutica cuenta con un edificio de 2 pisos, con áreas de producción autorizadas de grageas, supositorios, cremas, óvulos.

Solución inyectable en ampolleta y solución inyectable en jeringas; así mismo tiene un área de acondicionamiento de producto y laboratorios de control de calidad. En el 2012 se cuenta con procesos de fabricación de más de 20 productos, los cuales son exportados a más de 20 países en el mundo.

La línea consta de un tanque Diésel (Reactor) para la fabricación de óvulos, una llenadora de óvulos y una encartonadora, en la cual, se puede trabajar en línea con la encartonadora o simplemente llenar y recolectar el producto para después ser encartonado. El proceso que se analizará inicia cuando se fabrica el producto en tanque DIESEL (reactor), una vez que se termina de fabricar se pasa a realizar las descargas hacia la llenadora y de ahí pasa a la encartonadora para su acondicionamiento. La línea presenta problemas en la llenadora y en la encartonadora como: espera de personal, materiales, mantenimiento; espera de máquina, herramientas, materia prima, capacitación, y merma excesiva. EL OEE de la línea es deficiente con un 23.51%, la meta de la empresa para finales del año es de mínimo 40%.

Objetivos

Los objetivos del presente estudio son:

- Disminución de tiempo para cambios de lote y ajustes en 3 horas.
- Aumentar el tiempo de funcionamiento de la línea en 20%.
- Disminuir la cantidad de producto defectuoso y re trabajado.
- Reducir los restablecimientos de equipo del operador en un 50%.

- Eliminar las actividades que no agregan valor al proceso.

Justificación de la investigación

Debido al aumento en la demanda para el siguiente año y a las metas de la empresa, será necesario tomar medidas pertinentes para lograr que la línea cuente con la capacidad de producción y calidad requerida.

Alcances y limitaciones

El proceso que se analizará comprenderá desde el inicio del llenado y el encartonado. Debido a que la información de la empresa y los procesos son de carácter confidencial se usará letras para los productos, el proceso descrito será similar al que se utiliza en realidad y solo se muestra parte del proceso de la encartonadora.

Hipótesis

El uso de la metodología de Seis Sigma + Lean permitirá obtener un OEE mínimo del 40% para finales de año. Ya que Lean se concentrará en eliminar aquellas actividades que no agregan valor en la organización y Seis sigma en reducir la variación en el proceso.

Revisión de literatura

Lean Manufacturing

El término Lean fue acuñado por el Massachusetts Institute of Technology para analizar a nivel mundial los métodos de manufactura de las empresas de la industria automotriz (Reyes Aguilar, 2002, pág.19). Actualmente se le denominó como Lean Manufacturing o sistema de producción Toyota, el cual es un grupo de métodos que es utilizado desde la década de los años setenta con la participación de Shigeo Shingo y Taiichi Ohno.

Con el propósito de minimizar el uso de recursos a través de la empresa con la finalidad de lograr la satisfacción del cliente, reflejado en entregas oportunas la diversidad de productos solicitada y con tendencia a los cero defectos. Es una metodología para mejorar la eficiencia de procesos y productividad; consiste en el conjunto de técnicas que cuando se combinan permiten reducir y luego eliminarlas actividades que no agregan valor en búsqueda de las necesidades del cliente y al mismo tiempo liberando una gran cantidad de recursos.

“Este sistema no solo hará que la empresa sea más ágil, sino también más flexible y adecuada mediante la reducción de desperdicios” (Wilson, 2010).

Lean Manufacturing fue reconocido internacionalmente por la obra “La máquina que cambio el mundo” James Womack y Dan Jones (1990).

Según Taiichi Ohno (1970), el objetivo es “la eliminación absoluta de los residuos”, donde los residuos o mudas son los que impiden el flujo de valor agregado al producto iniciando desde las materias primas hasta el producto terminado. Los clientes de una empresa son los jueces finales en cuanto a si o no la firma ha creado un valor. El enfoque de Lean lleva a sus practicantes a mejorar sus organizaciones, centrándose en la eliminación de cualquier y/o todos los desperdicios.

En la actualidad la metodología de Lean se ha empleado tanto en el sector de la industria aeroespacial, automotriz, farmacéuticas, de servicio, etc.

Los siete tipos de desperdicios

Taiichi Ohno (1970), Padre del Sistema de producción Toyota, define los desperdicios de una forma en la que a nadie se le había ocurrido.

Clasifica los desperdicios en siete tipos, a estos también se les conoce como TIMWOOD por sus nombres en inglés: Transport, Inventory, Motion, Waiting, Overproduction, Overprocessing y Defects (Christian Staudter, 2009).

Los siete tipos de desperdicios:

- Sobreproducción.
- Demoras.
- Transportes.
- Sobre procesos.
- Inventarios.
- Movimientos.
- Productos defectuosos.

Seis Sigma

Sigma, σ , es una letra del alfabeto griego utilizada en estadística para medir la variación existente en un conjunto de datos (desviación estándar).

Seis Sigma es una estrategia de gestión empresarial desarrollada originalmente por Motorola, EE.UU. en 1986. Seis Sigma busca mejorar la calidad del proceso mediante la identificación y eliminación de las causas de defectos, trabaja para minimizar la variabilidad en la fabricación y los procesos.

Es una meticulosa metodología que apunta a la generación de casi perfectos procesos de producción buscando como resultado no más de 3.4 defectos por cada millón de oportunidades.

Para esto hay que identificar las necesidades del cliente, en términos de seis sigma CTQ's (del inglés Critical to Quality) o críticos para la calidad y lo siguiente, encontrar los números de defectos o fallas con relación a estas características y este es expresado en términos de defectos por millón de oportunidades (DPMO).

El nivel de sigma indica que tan seguido pueden aparecer los defectos. A medida que se incrementa el número de sigmas, los costos se reducen. Al reducir los reprocesos y retrabajos, se acortan los tiempos de ciclo de producción y con esto la satisfacción del cliente aumenta. Con Seis sigma el índice de medición común es "defectos por unidad", en donde unidad puede ser un producto, un servicio, un material, etc.

Seis sigma + Lean

Seis Sigma + Lean es la combinación de herramientas, técnicas y principios de Seis sigma (calidad) y Lean Manufacturing (velocidad). Lean se concentra en eliminar aquellas actividades que no agregan valor en la organización y Seis sigma en reducir la variación en el proceso, las cuales son llamadas desperdicios y ambas permiten reducir los defectos en cualquier proceso, de ese modo se mejora la calidad de los productos para los consumidores.

Seis Sigma + Lean proporciona un enfoque riguroso y estructurado para ayudar a gestionar y mejorar el rendimiento. Ayuda a utilizar las herramientas correctas, en el lugar adecuado y de la manera correcta, no solo en la mejora, sino también en el control de las actividades diarias.

Se seguirá la metodología de Seis sigma para el siguiente trabajo, las técnicas Lean son complementarias en el enfoque DMAIC de seis sigma.

Champions.- Son directivos de alto nivel que trabajan con los black belt dándoles soporte y recursos para la ejecución de los proyectos seleccionados.

Master black belt.- El master black belt fue un black belt pero por el resultado de sus proyectos enseña, revisa y lidera proyectos difíciles y sirve como maestro de los demás black belt.

Black belt.- Es un experto en las herramientas de seis sigma, guía a los equipos en los proyectos y capacita a otros. Por lo general trabaja de tiempo completo en los proyectos y capacitación al personal.

Green belt.- Son empleados que no se dedican a tiempos completos en las actividades de seis sigma, conocen la metodología y las herramientas a un nivel de aplicación en proyectos a los cuales son invitados, pueden dirigir pequeños proyectos y proporcionar apoyo cuando son invitados.

OEE

La Efectividad Total de los equipos u OEE (por sus siglas en inglés Overall Equipment Effectiveness) es un indicador para conocer la capacidad real que cuenta la empresa para producir. Es un métrico a partir la multiplicación de tres razones: Disponibilidad, Eficiencia y Calidad. “Se dice que engloba todos los parámetros fundamentales, porque del análisis de las tres razones que forman el OEE, es posible saber si lo que falta hasta el 100% se ha perdido por disponibilidad (la maquinaria estuvo cierto tiempo parada), eficiencia (la maquinaria estuvo funcionando menos de su capacidad total) o calidad (se han producido unidades defectuosas)”. (Fundación Wikimedia, Inc., 2014).

Metodología

Se seguirá la metodología de Seis sigma para el siguiente trabajo, las técnicas Lean son complementarias en el enfoque DMAIC de seis sigma. Para mejorar la Efectividad Total de los equipos u OEE (por sus siglas en inglés Overall Equipment Effectiveness) el cual es un indicador para conocer la capacidad real que cuenta la empresa para producir. Es un métrico a partir la multiplicación de tres razones: Disponibilidad, Eficiencia y Calidad.

El DMAIC (por sus siglas en inglés: Define, Measure, Analyze, Improve, Control) de los pasos de la metodología: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Es representado por cinco fases secuenciales bajo la consideración de eliminar cualquier defecto en el proceso y este deberá ser estable y con límites de control.

Definir

En la etapa inicial del proyecto se presenta la definición, en la cual se describe el objetivo, la justificación, el alcance, los recursos, el equipo asignado y un programa preliminar del proyecto. Lean Seis sigma usa cartas proyecto para presentar esta información y también en esta etapa se definen los CTQ's.

Como factores críticos de calidad se tienen los siguientes:

- Entregas a tiempo.
- Dosis adecuada.
- Sin perforación en el alveolo.
- Datos fijos en envase primario
- Centrado de datos variables en envase primario.

- Centrado de taka en envase primario.
- Presencia de producto en envase primario.
- Corte de tira adecuada.

Medir

El objetivo de esta etapa es entender el estado actual del proceso y recolectar datos confiables de este. Mediante técnicas de recolección de datos como Diagrama de flujo de proceso, mapa de proceso y la creación de VSM actual. Mediante el análisis de diagramas de flujo, se identificaron dos familias de producto, a partir de ello se elaboró el VSM actual, debido al carácter confidencial de la empresa, solo se muestra parte del mismo, que corresponde al producto A.

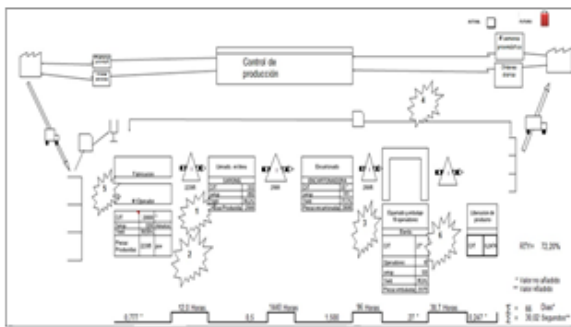


Figura 1 VSM actual del producto A.

La presentación del producto A requiere producto en envase primario, instructivo, guante y envase secundario. El VSM muestra periodos largos entre el llenado y el encartonado. Se encontraron que algunos lotes fueron llenados y recolectados debido a que el guante no paso el control de calidad, pero aun así se autorizó su fabricación, hay que tener en cuenta que a partir de su fecha de fabricación se tiene 2 años para su vencimiento.

A partir de lo anterior, se dio a la tarea de evaluar el comportamiento del OEE, se evaluó los meses de Enero a Junio de 2014, como podemos observar en la siguiente gráfica, la línea de tendencia muestra un decremento del OEE.

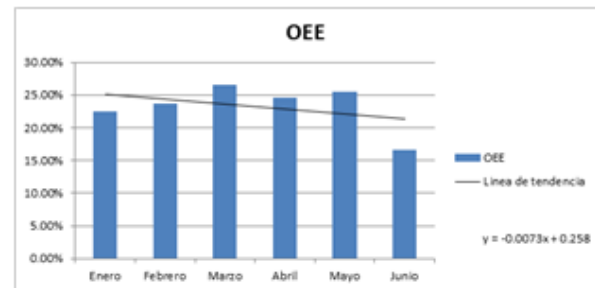


Figura 2 Desempeño del OEE.

Analizar

Es el propósito de evaluar la capacidad y estabilidad del proceso para producir dentro de las especificaciones. Es identificar las fuentes de variación del proceso, analizando los datos de OEE mediante el uso de técnicas de análisis de datos y de procesos. En esta etapa se analizan los desperdicios. Taiichi Ohno (1970), Padre del Sistema de producción Toyota, define los desperdicios de una forma en la que a nadie se le había ocurrido. Clasifica los desperdicios en siete tipos, a estos también se les conoce como TIMWOOD por sus nombres en inglés: Transport, Inventory, Motion, Waiting, Overproduction, Overprocessing y Defects. Hay una categoría adicional de desperdicios, se podría decir es un octavo desperdicio, Thomas Pyzdek y Paul A. Keller (2010), en su libro *The Six Sigma Handbook*, lo mencionan como: Diseño de bienes y servicios que no conocen las necesidades del cliente, diseño defectuoso lo nombra Industrial Technology Centre, Bill Carreira (2004), en su libro *Lean manufacturing That Works*, menciona el trabajo como una categoría más, que un desperdicio y por último Jeffrey K. Liker y David Meier (2006).

En su libro The Toyota Way Fieldbook, lo mencionan como: creatividad del empleado sin uso, y se refieren a que se pierde tiempo, ideas, habilidades, mejoras y oportunidades de aprendizaje por no contratar o escuchar a sus empleados.

Dentro de esta etapa se identifica que el área de mejora se encuentra en la encartonadora, para ello se realiza un diagrama de Pareto con el fin de analizar los factores que afectan el nivel del OEE.

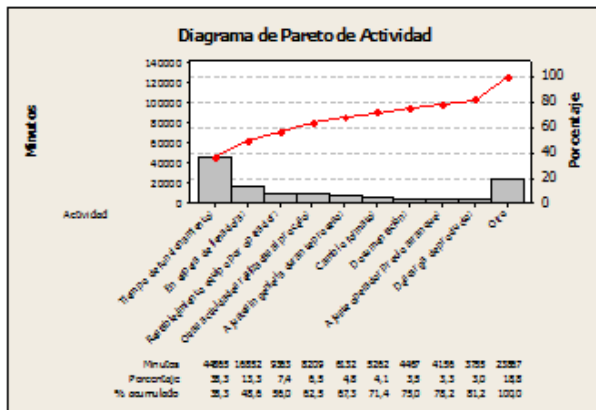


Figura 3 Diagrama de Pareto de encartonadora.

De la figura 3, podemos observar que del tiempo total solo 9 de las 28 actividades representan el 80 % del tiempo las cuales son: tiempo de funcionamiento, en espera de llenadora, restablecimiento de equipo por operador, otras actividades realizadas al proceso, ajuste de ingeniería durante el proceso, cambio de formato, documentación, ajuste operador previo arranque y descarga de producto.

Por otra parte, la empresa desea tener como mínimo un tiempo de funcionamiento por turno de 300 minutos y como máximo uno de 500 los cuales tomaremos como límites; se realizará una prueba de capacidad de proceso para conocer si el tiempo de funcionamiento está entre estos límites.

| Variable | Turno | Conteo | | | | Media | Dev. Est. | Varianza |
|--------------------------|-------|--------|-----|----|-------|-------|-----------|----------|
| | | total | N | M* | | | | |
| Tiempo de funcionamiento | 1 | 105 | 91 | 14 | 172,2 | 119,4 | 14256,5 | |
| | 2 | 118 | 100 | 18 | 175,3 | 114,5 | 13110,1 | |
| | 3 | 15 | 15 | 0 | 145,5 | 80,8 | 7887,7 | |

| Variable | Turno | Coeffic | Mínimo | Mediana | Máximo | Rango |
|--------------------------|-------|---------|--------|---------|--------|-------|
| Tiempo de funcionamiento | 1 | 69,34 | 3,0 | 144,0 | 525,0 | 522,0 |
| | 2 | 46,06 | 9,0 | 149,0 | 514,0 | 505,0 |
| | 3 | 61,05 | 21,0 | 138,0 | 306,0 | 285,0 |

| Variable | Turno | Modo | N para modo |
|--------------------------|-------|----------------|-------------|
| Tiempo de funcionamiento | 1 | 10 | 3 |
| | 2 | 24; 51; 53; 60 | 2 |
| | 3 | * | 0 |

Figura 4 Estadística descriptiva de tiempos de funcionamiento.

La estadística descriptiva muestra tiempos de funcionamiento de 3, 9 y 21 como mínimo y máximos de 525, 514 y 306, es importante observar que las desviaciones estándar presentan valores grandes.

Después de realizar las pruebas de bondad de ajuste, para identificar el tipo de distribución de probabilidad a la que se ajustan los datos, se elige la distribución de Weibull para realizar el análisis de capacidad de proceso.

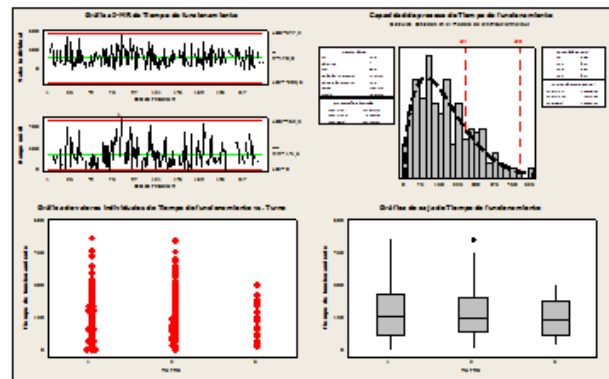


Figura 5 Análisis de capacidad del proceso actual.

La distribución de Weibull se ajusta a los datos, la mayoría de los turnos presenta valores de tiempo de funcionamiento pequeños, será necesario incrementar el tiempo de funcionamiento; se necesitará reducir los paros por fallas, ajustes, restablecimientos, etc. El proceso no está bajo control.

Para el análisis de los CTQ's, se utilizará el diagrama de Pareto, de esta manera llegar a conocer cuales CTQ's son los que tienen la mayor frecuencia, es importante mencionar solo es para analizar el comportamiento de esto, el FMEA es la herramienta principal que se utilizara para buscar la mejora.

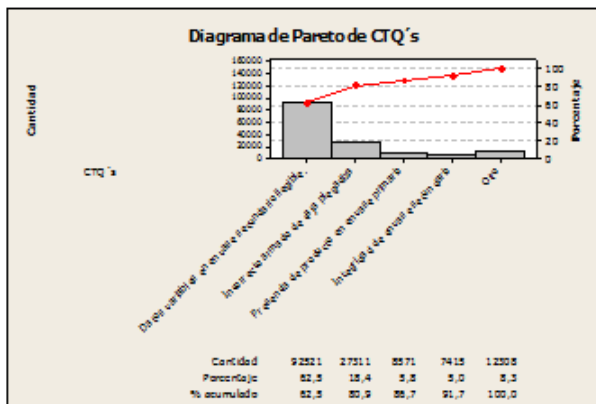


Figura 6 Diagrama de Pareto de CTQ's.

De los 18 CTQ's, solo 2 representan el 80.89% de la cantidad, cabe mencionar que las 8,571 piezas de presencia de producto en envase primario fue un lote que se retrabajo al 100%, debido a falla del sensor de presencia de producto.

A partir del análisis de los CTQ's y del análisis FMA, llegamos a la elaboración del VSM futuro del producto A:

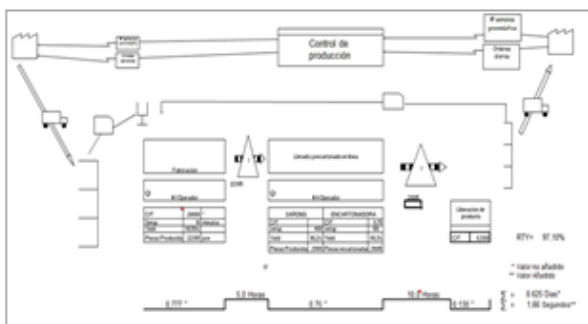


Figura 7 VSM futuro del producto A.

En el VSM del estado futuro nos muestra un proceso eficiente en comparación del actual, se busca que el proceso sea en línea al 100%, el producto no se fabricaría hasta que todo el material para su acondicionamiento cumpla con los estándares establecidos, se eliminaría el sello de garantía que se le tiene que poner al producto en envase secundario, en su lugar el cierre de caja plegadiza sería pegamento en las solapas del envase secundario por medio de sellos Hot Melt y la caja plegadiza la respectiva leyenda que avale la garantía. Se aplicara el FMEA para mejorar el tiempo de funcionamiento, la calidad y la reducción de paros y restablecimientos, y con SMED lograr cambios rápidos de lote. Y con estos cambios lograr reducir el valor no añadido.

Mejorar

Es implementar los cambios necesarios para mejorar el proceso. Por medio de eventos Kaizen en nuestro VSM actual y creando VSM Futuro.

SMED. "Cambio de herramientas en un solo dígito de minuto", en menos de 10 minutos. Es el tiempo entre la última pieza producida buena del lote anterior y la primera pieza buena del lote siguiente.

AMEF (Análisis del modo y efecto de fallas) Fue desarrollado por los ingenieros de la National Aeronautics and Space Administration (NASA); se conocía como el procedimiento militar MIL-P-1629, titulado "Procedimiento para la Ejecución de un Modo de Falla, Efectos y Análisis de Criticabilidad", se empleaba para evaluar la confiabilidad y para determinar los efectos de las fallas de los equipos y sistemas en el éxito de una misión y en la seguridad del personal o de los equipos.

Su objetivo es detectar cualquier posible falla en producto o procesos y evaluar sus efectos, causas y elementos de detección para evitar su ocurrencia y de esta manera tener un método documentado de prevención.

En la tabla 1, se presentan los eventos Kaizen así como sus respectivos responsables y algunas observaciones:

| Propuesta/tarjeta No. | Evento Kaizen | Responsable | Observaciones |
|-----------------------|--------------------------------|-------------|---------------|
| 01 | Aplicar FMEA | A. Méndez | Línea |
| 02 | Aplicar SMED | A. Méndez | Llenadora |
| 03 | Aplicar SMED | Cuauhtémoc | Encartonadora |
| 04 | Tablero de información | Cuauhtémoc | Línea |
| 05 | Segundo Tanque para producción | R. Lezama | Fabricación |
| 06 | Nueva encartonadora | R. Lezama | Encartonado |

Tabla 1 Eventos Kaizen a implementar.

Con la implementación de las herramientas anteriores, se obtendrá un ahorro del 82 % del tiempo en la preparación de los lotes de diferentes productos y un 91% en la preparación de un mismo lote. También se deberá intercalar el producto de Farmores II y Sarong.

| | Actual | Propuesto | Ahorro | % |
|---|--------|-----------|--------|-----|
| Cambio de Lote de un producto A hacia producto B. | 413 | 109 | 304 | 82% |
| Cambio de lote del mismo producto. | 290 | 25 | 265 | 91% |

Tabla 2 Resultados esperados.

Controlar

Es estandarizar los nuevos métodos y verificar que las mejoras se mantengan. Se diseñó un plan de control para consolidar todas nuestras actividades de control.

Como son: procedimientos escritos conocidos como SOP's, hojas de verificación, CTQ's, métodos de control de procesos y tableros de tareas. El tablero de tareas para supervisores que permitirá mejorar el flujo de trabajo y alcanzar un ritmo sostenible libre de estrés.

Las columnas del tablero corresponden a los estados del flujo de tareas y pueden ser específica para un proceso puntual o bien adoptar una forma genérica de tres columnas la primera destinada a pendientes, la segunda destinada para aquellas tareas que están en proceso y la tercera destinada a las tareas terminadas.

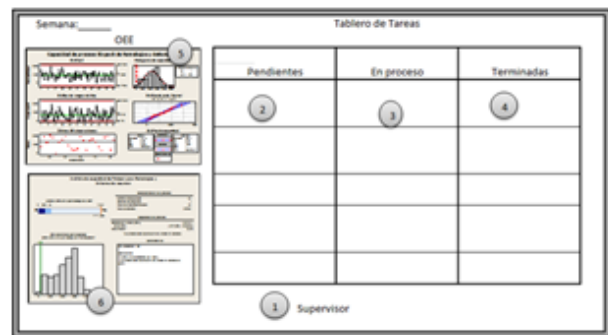


Figura 8 Tablero de tareas.

Resultados

Para validar la mejora en el nivel del OEE, en primer lugar se vuelve a realizar un análisis de capacidad de procesos de Sixpack, como se presenta en figura 9:

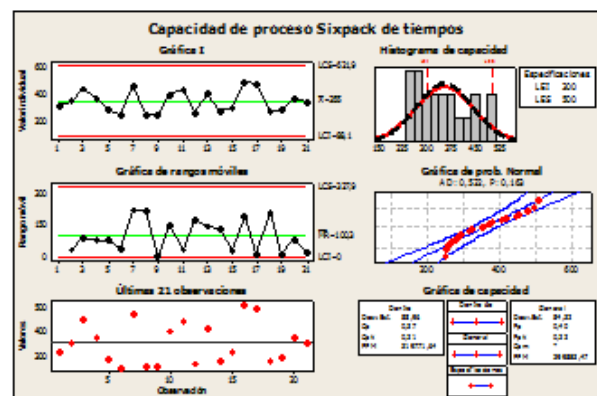


Figura 9 Capacidad de proceso de Sixpack de tiempo de funcionamiento mejora.

Se observan mejoras al comparar la figura 9 con respecto a la figura 5, si bien todavía no está en control si presenta mejoras. Es importante mencionar que antes de la mejora nuestros datos seguían una distribución no normal (No paramétrica) y después de la mejora presenta datos normales.

A continuación podemos ver los resultados obtenidos, comparando el antes y después de la implementación de los eventos kaizen:

| Equipo | | Antes | Después |
|--------|------------|-------|---------|
| 1 | N | 91 | 13 |
| | Media | 172,2 | 350,5 |
| | Desv. Est. | 119,4 | 82,3 |
| | Mediana | 164 | 358 |
| | Mínimo | 3 | 250 |
| | Máximo | 525 | 475 |
| | Rango | 522 | 225 |
| 2 | N | 100 | 8 |
| | Media | 173,3 | 362,30 |
| | Desv. Est. | 114,5 | 92,80 |
| | Mediana | 149 | 333,00 |
| | Mínimo | 9 | 279,00 |
| | Máximo | 514 | 509,00 |
| | Rango | 505 | 230 |

Tabla 3 Comparación de Estadística descriptiva antes y después de la mejora para tiempo de funcionamiento.

La tabla 4, nos presenta los resultados obtenidos, derivados de la implementación del cambio de formato:

| Equipo | | Antes | Después | Diferencia | Porcentaje |
|--------|------------|-------|---------|------------|------------|
| 1 | Media | 409 | 114,9 | 294,1 | 71,91% |
| | Desv. Est. | 171 | 10,1 | | |
| 2 | Media | 327 | 112,58 | 214,42 | 65,57% |
| | Desv. Est. | 112 | 9,42 | | |

Tabla 4 Comparativo antes y después de la mejora para cambio de formato.

Como se puede observar en el comparativo hubo una disminución en la mejora del cambio de formato, el equipo dos es el que realiza el cambio de formato de una manera más rápida y también es el que muestra una desviación estándar menor entre los dos grupos. El proceso de cambio de formato está controlado.

Se realizó una prueba de Hipótesis de T de 2 muestras para determinar si el método de cambio de formato es diferente entre los equipos.

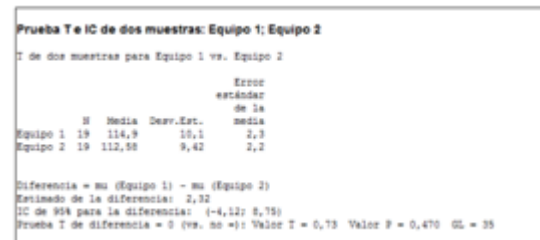


Figura 10 Prueba de hipótesis t de 2 muestras para Cambio de formato.

El p valor no proporciona evidencias de que haya diferencia en el método de cambio de formato cuando lo realiza el quipo 1 versus equipo 2.

CTQ's

Se logró una mejora con respecto al anterior, los defectos y retrabajos antes mostraba una media de 1,357.6 y ahora 312.7. Si bien se logró una mejora es necesario volver a analizar las causas y lograr que el proceso cumpla con los objetivos de la empresa.

| Reducción de defectos | | | | | | |
|-----------------------|----|---------|------------|---------|--------|--------|
| | N | Media | Desv. Est. | Mediana | Mínimo | Máximo |
| Antes | 81 | 1357,62 | 623,377 | 1462 | 22 | 2895 |
| Después | 68 | 312,728 | 112,847 | 327 | 130 | 499 |

Tabla 5 Estadísticas descriptivas de la reducción de defectos.

OEE

En la Figura 11, se muestra los resultados obtenidos hasta el mes de Noviembre en ella se observa como se ha presentado el comportamiento del OEE a partir de que se inició el proyecto y se empezó a controlar el proceso, la línea de tendencia muestra que de seguir aplicando el plan de control se podrán obtener rendimientos y procesos eficientes. El nivel de sigma mejoró a un nivel de 3.47.

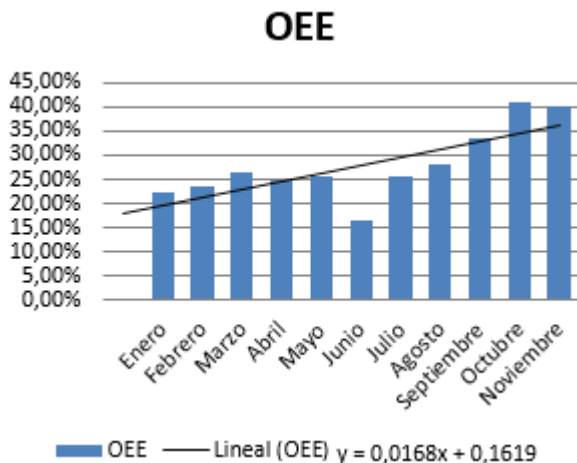


Figura 11 Resultados de OEE Hasta el mes de Noviembre

Conclusiones

En esta investigación se ha presentado como la metodología Seis Sigma + Lean nos muestra un método de solución de problemas organizado y sistemático para la mejora estratégica del sistema.

Se logró disminuir el tiempo para el cambio de lote de 327 a 112.58 con una reducción de 214 minutos porcentaje que significa un ahorro del 65.57%, en horas equivalente a una hora con cincuenta y tres minutos.

La cantidad de defecto de la misma forma se redujo de una media 1357.62 a una media de 312.728 con una desviación estándar de 623.377 a 112.847 se logró una reducción de 76.96 % de producto reprocesado.

El tiempo de funcionamiento de la encartonadora aumentó del equipo uno de 172.2 a 350.5 lo que significa un incremento del 49.13% con respecto a su media. El quipo 2 muestra mejoras de 173.3 a 362.3 con un aumento del 44.74% con respecto a su media. Esto se debe a que cuando el tanque esta en limpieza y fabricación, en la Cart 5 I se pasó producto de la Farmores II, y esto nos llevó a mejorar el rendimiento.

Los materiales es lo más importante si se desea ajustar la empresa ya que de ellos depende que los cambios de formato se realicen de manera rápida, así como la variación de éstos puede afectar el proceso. Los proveedores tienen que adaptarse a requisitos solicitados no la empresa a la variación en su material.

Solo liberar ordenes de lotes que cuenten con todo el material necesario para su fabricación y acondicionamiento.

Uno para todos y todos para uno. Cada vez que se cambia de producto se debe cambiar de formato lo cual implica una mayor cantidad de tiempo invertido, por eso es necesario utilizar la menor diferencia de las cajas plegadizas (formato). Es decir, lograr que un mismo tipo de formato se utilice para varias presentaciones. Así como la misma calidad entre los diferentes proveedores.

Llenadora. Es necesario lograr que el OEE se incremente, se requiere mayor seguimiento al FMEA para lograr una menor cantidad de paros por ajustes. Así como la elaboración de SOP's sobre las principales causas de paro y como solucionarlas. Si no se realizan los ajustes necesarios en la llenadora cabe la posibilidad de que se tenga producto en el primer tanque, en la llenadora y producto en el segundo tanque; lo cual generaría varias desviaciones y no conformidades y se tendrían problemas graves de rendimiento.

Referencias

- Bass, Issa. (2007). Six Sigma Statistics with Excel and Minitab. New York. McGraw-Hill.
- Bass, Issa y Lawton Ph.D., Barbara. (2009). Lean Six Sigma Using SigmaXL and Minitab. New York. McGraw-Hill.
- Bayer HealthCare Sitio Orizaba Proquina. (2013). Hormonas Esteroidales. Orizaba.
- Cabrera Oettinghaus, Ricardo. (2001). La mecánica de un alto en pits - NASCAR. 05 de Marzo de 2014, de Mecánica Popular Sitio web: <http://www.mimecanicapopular.com/verautos.php?n=759>
- Carreira, Bill. (2005). Lean Manufacturing That Works: Powerful Tools for Dramatically Reducing Waste and Maximizing Profits. New York. American Management Association.
- Dailey, Kenneth W. (2003). The Lean Manufacturing Pocket Handbook. DW publishing Co.
- EL-HAIK, BASEM y AL-AOMAR, RAID. (2006). Simulation-based lean six-sigma and design for six-sigma. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc.
- Feld, William M. (2001). Lean Manufacturing: Tools, Techniques, and How to Use Them. Washington, D.C. The St. Lucie Press/APICS Series on Resource Management.
- Fundación Wikimedia, Inc. (2014). Lean manufacturing. 11 de Mayo de 2014, de Fundación Wikimedia, Inc. Sitio web: http://es.wikipedia.org/wiki/Lean_manufacturing
- Industrial Technology Centre. (2004). Principles of Lean Thinking: Tools & Techniques for Advanced Manufacturing. 09 de Abril de 2014, de Industrial Technology Centre. Sitio web: <http://www.itc.mb.ca/files/library/PrinciplesofLeanThinkingRevD2004.pdf>
- Liker, Jeffrey K. y Meier, David. (2006). The Toyota Way Fieldbook: A Practical Guide For Implementing Toyota's 4P's. New York. The McGraw-Hill.
- M. Khan, Rehman. (2013). Problem Solving and Data Analysis using Minitab: A clear and easy guide to Six Sigma methodology. Loughborough, UK. John Wiley & Sons, Inc.
- McCarty, Thomas; Bremer, Michael; Daniels, Lorraine y Gupta, Praveen. (2004). The Six Sigma Black Belt Handbook. New York. The McGraw-Hill.
- Minitab Inc. (2010). Ayuda Minitab.

Niebel, Benjamin W., y Andris Freivalds. (2009). Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo. Mexico. McGraw-Hill

Pyzdek, Thomas, y Paul Keller. (2010). The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels. New York. The McGraw-Hill.

Reyes Aguilar, Primitivo. (2002). Manufactura delgada (Lean) y seis sigma en empresas mexicanas: experiencias y reflexiones. Abril-junio de 2002, Revista UNAM. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rca/article/viewFile/4540/4072>

Secretaria de Salud. (2013) NOM-059-SSA1-2013. Buenas prácticas de fabricación de medicamentos. 22 de Julio de 2013.

Staudter, Christian; Mollenhauer, Jens-Peter; Meran, Renata; Roenpage, Olin; von Hugo, Clemens y Hamalides, Alexis. (2009). Design for Six Sigma + Lean Toolset: Implementing Innovations Successfully. Frankfurt: Stephan Lunau.

Socconini, Luis. (2008). Lean Manufacturing paso a paso. Norma.

Theodore T. Allen, PhD. (2006). Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma. Germany. Springer.

Wilson, Loonie. (2010). How to implement Lean Manufacturing. New York. McGraw-Hill.

Womack, James P., y Daniel T. Jones. (2003). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation New York. Free Press.

Yang, Kai, y Basem S. El-Haik. (2009). Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development. New York. McGraw-Hill.

Correlación de la Prueba de Indentación Miniatura contra pruebas mecánicas convencionales: Prueba de Impacto Charpy, Termofluencia y Tenacidad a la Fractura

SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel*†, RODRIGUEZ-CASTILLO, Mario, ORTIZ-MARISCAL, Arturo, LEDEZMA, Karen y LÓPEZ-HIRATA, Víctor

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

La Prueba de Indentación Miniatura es una técnica de caracterización mecánica que usa especímenes miniatura de 10 x 10 x 0.5t mm y por ello, es considerada como prueba cuasi no destructiva [1]. En esta prueba, el espécimen se fija firmemente entre dos dados y se deforma hasta fallar en una cavidad de 4 mm; usando un indentador esférico de 2.5 mm de diámetro [2]. La carga aplicada se grafica contra la deflexión del punto central del espécimen [3]. La motivación de este trabajo es mostrar la correlación existente entre la Prueba de Indentación Miniatura y las pruebas mecánicas de: Termofluencia, Tenacidad a la Fractura y de Impacto Charpy. La metodología experimental consiste en obtener muestras de componentes en servicio de aceros en servicio, seccionar al tamaño necesario para la prueba y ensayarlas para obtener las curvas de carga-deflexión. Las curvas se compararán con los datos obtenidos de las pruebas mecánicas convencionales. Con base en los resultados logrados, las correlaciones presentan un comportamiento lineal, lo cual demuestra que los datos generados por la Prueba de Indentación Miniatura son equivalentes a los datos obtenidos por pruebas convencionales.

Prueba de Indentación Miniatura, Termofluencia, Tenacidad a la fractura, Impacto Charpy.

Abstract

The Small Punch Test technique is a mechanical test that requires miniaturized plate specimens, 10 x 10 x 0.5t mm, thus, this test has been considering as a quasi-non-destructive technique [1]. In this test, the specimen is clamped between two cylindrical dies and is deformed up to failure in a 4 mm cavity; using a Φ 2.5 mm spherical indenter [2]. The load applied is plot versus central deflection in specimen [3]. The motivation in this paper aims to find correlations between Small Punch Test and conventional mechanical tests: Creep, Fracture Toughness and Charpy Impact test. The experimental procedure consists in obtain samples in service of steels in service, cutting them to the desire dimensions and test them in order to obtain load-deflection curves. Those curves will compare with data from conventional mechanical tests. Based on the results, the correlations show a lineal behaviour, wich is demonstrate that data from Small Punch Test is comparable to data from conventional test.

Small Punch Test, Creep, Fracture Toughness, CVN Impact test.

Citación: SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, RODRIGUEZ-CASTILLO, Mario, ORTIZ-MARISCAL, Arturo, LEDEZMA, Karen y LÓPEZ-HIRATA, Víctor. Correlación de la Prueba de Indentación Miniatura contra pruebas mecánicas convencionales: Prueba de Impacto Charpy, Termofluencia y Tenacidad a la Fractura. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 181-186

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: maribelsaucedo@prodigy.net.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad existen muchos componentes fabricados con aceros. En turbinas se utilizan aceros ferríticos de baja aleación los cuales presentan cambios estructurales al encontrarse en servicio; para evaluar su temperatura de transición dúctil frágil, se utiliza la Prueba de Impacto Charpy. Esta prueba requiere ensayar tres especímenes por temperatura y las dimensiones de la probeta son de 55 x 10 x 10 mm [3]. Los reactores de fusión se fabrican con aceros inoxidables austeníticos y trabajan a temperaturas criogénicas. Al estar en servicio, los reactores presentan envejecido térmico y para caracterizar mecánicamente este cambio se utiliza la Prueba de Tenacidad a la Fractura [4]. La probeta utilizada para esta prueba tiene un grosor igual a la mitad del largo propuesto. Por último, los componentes de supercalentadores son de aceros grado SUS 316 HTB y para evaluar su tiempo de ruptura se utiliza la Prueba de Termofluencia Uniaxial; la cual requiere probetas de $\Phi 25$ mm x 127 mm [2].

En años recientes, la Prueba de Indentación Miniatura es una alternativa para realizar las pruebas anteriores, siendo sus principales ventajas: probetas de forma simples y pequeñas (10 x 10 x 0.5t mm), evaluación local, la prueba se puede hacer de componentes en servicio, el costo de prueba es bajo en comparación a otras pruebas mecánicas, se realiza en estado de esfuerzos biaxiales y es útil en condiciones extremas de prueba (-195.8 hasta 1500 °C [5]).

La prueba se realiza colocando la muestra en una cavidad de 4 mm de profundidad entre dos dados cilíndricos y se aplica una carga con un indentador semiesférico hasta que falle la probeta, ver figura 1a.

El resultado se presenta en una gráfica “carga-deflexión central”; ver figura 1b, que de ella se pueden obtener varias propiedades del material por su similitud con la curva de “esfuerzo-deformación”.



Figura 1 a) Esquema del dado de prueba y b) Curva carga-deflexión.

En trabajos recientes, se propusieron relaciones matemáticas para obtener equivalencias de varias propiedades mecánicas a partir de las curvas obtenidas por la Prueba de Indentación Miniatura [6].

La presente contribución de este trabajo consiste en demostrar que existen equivalencias entre la Prueba de Indentación Miniatura y las Pruebas de: Termofluencia uniaxial, Tenacidad a la Fractura y de Impacto Charpy. Además, se implica el establecimiento de correlaciones matemáticas con los resultados obtenidos.

Metodología a desarrollar

Materiales

El material utilizado para la determinación de la temperatura de transición dúctil-frágil (DBTT) son muestras de aceros ferríticos de baja aleación extraídas de componentes en plantas químicas y refineras. En la tabla 1 se presentan algunas de las composiciones químicas de los materiales usados para la prueba.

| Material | C | Cr | Mo | Mn |
|----------|------|------|------|------|
| A | 0.24 | --- | 0.53 | 0.85 |
| B | 0.18 | 1.23 | 0.48 | 0.64 |
| C | 0.10 | 2.18 | 0.95 | 0.40 |
| D | 0.35 | 1.03 | 1.08 | 0.78 |

Tabla 1 Composición química (wt%) de aceros para DBTT.

Los materiales utilizados para la determinación de la tenacidad a la fractura son placas de acero inoxidable austenítico de 200 mm de espesor y sus composiciones químicas se presentan en la tabla 2. Se realizó un tratamiento de solubilizado a los aceros JN1, JJ1 y JK2 de 1075 °C por 0.2 h, 1060 °C por 5.5 h y 1000 °C por 5 h; respectivamente.

| Material | C | Mn | Ni | Cr | Mo |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|
| JN1 | 0.040 | 3.88 | 15.07 | 24.32 | - |
| JJ1 | 0.025 | 10.13 | 11.79 | 12.01 | 4.94 |
| JK2 | 0.05 | 21.27 | 9.15 | 12.97 | 0.97 |

Tabla 2 Composición química de los materiales (wt%).

Para determinar las propiedades de termofluencia se usó muestras de un acero inoxidable austenítico SUS 316 HTB cortadas de tubos de un supercalentador secundario expuesto a 609 °C por 100, 600 h, envejecido artificialmente a 700 °C por 1322 h. La composición química de este acero se presenta en la tabla 3. Las probetas de ensayo se etiquetaron como A0.

| Material | C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|
| Wt% | 0.08 | 0.45 | 1.50 | 12.90 | 16.55 | 2.14 |

Tabla 3 Composición química del acero SUS 316 HTB.

Procedimiento para las pruebas mecánicas para determinar DBTT

Las pruebas de Impacto Charpy se realizaron conforme al estándar ASTM E23. Las pruebas para determinar la DBTT usando la Prueba de Indentación Miniatura se hicieron en un dispositivo como el mostrado en la figura 1a. Se utilizó un indentador de acero con forma de balín de 2.5 mm con una dureza de 62-67 HRC. Se monitoreó la temperatura con un termopar de cromel-alumel colocado entre los dados cilíndricos y se estabilizó por 10 minutos antes de la prueba. La temperatura más baja de la prueba fue de -196.15 °C. La energía de fractura se determinó calculando el área bajo la curva de los resultados.

Pruebas de Tenacidad a la fractura-JIC y EPIM

La tenacidad a la fractura JIC se determinó usando especímenes compactos de tensión de 2.55 x 1.25 cm. Las temperaturas de prueba fueron -270 (temperatura del helio líquido) y a -196 °C (temperatura del nitrógeno líquido). Hasta alcanzar la temperatura de prueba se mantuvo la probeta 10 minutos en el helio o nitrógeno. La integral J y los valores JIC se determinaron en base con la norma ASTM E81. Los especímenes de la Prueba de Indentación Miniatura se ensayaron por triplicado en cada condición del material. El aparato de prueba consistió en dos depósitos (uno de helio y otro de nitrógeno líquido), un tubo de transferencia de líquido y una unidad de carga de dos toneladas. Las pruebas se realizaron en 20 minutos y la energía obtenida se denominó ESP.

Prueba de Termofluencia de Indentación Miniatura

Las pruebas de Termofluencia de Indentación Miniatura se realizaron en un equipo adaptado para soportar las temperaturas de prueba.

El indentador fue un balín de cerámico de $\Phi 2.4$ mm. Se aplicó una carga constante mediante un peso colgante. Para prevenir cualquier oxidación la prueba se realizó en un ambiente controlado y el dispositivo de prueba se rodeó de una malla de titanio para atrapar el oxígeno restante en el ambiente. Las temperaturas empleadas fueron de 700 °C con cargas desde 234-478 N.

Resultados

Relación entre CVNDBTT y PIMDBTT

La figura 2 muestra la gráfica del comportamiento de la temperatura de transición dúctil-frágil determinada por la Prueba de Indentación Miniatura de los materiales de este trabajo.

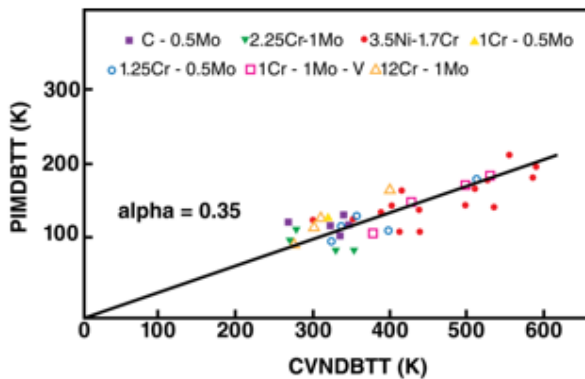


Figura 2 Gráfica de PIMDBTT vs CVNDBTT.

Se observa que hay una correlación lineal entre los datos obtenidos por la PIM y la Prueba de Impacto Charpy para los distintos materiales de prueba. Usando los datos de ambas pruebas junto con el contenido de los elementos esenciales de cada acero (S, C, Mn, y Mo) y el tamaño de grano del material, se realizó una regresión múltiple. Esta regresión considera estos factores como componentes de influencia en la temperatura de transición en cada material, de ella se obtuvo la ecuación 1.

$$CVNDBTT = 1.35PIMDBTT - 0.84 \times 10^{-3} d^{-\frac{1}{2}} + 136 \tag{1}$$

Donde d, es el tamaño de grano y PIMDBTT la temperatura de transición obtenida por la Prueba de Indentación Miniatura. La regresión múltiple obtuvo un coeficiente de determinación del 86%.

Relación existente entre JIC y ESP

La variación de JIC de los distintos materiales de prueba y su relación con la energía de prueba ESP se presenta en la figura 3. Se observa que existe una clara correlación lineal entre ambos valores. Las ecuaciones de regresión obtenidas son:

$$J_{IC} = 171.95E_{SP} - 13.85 \tag{2}$$

$$\epsilon_{qf} = 0.1266E_{SP} - 0.0155 \tag{3}$$

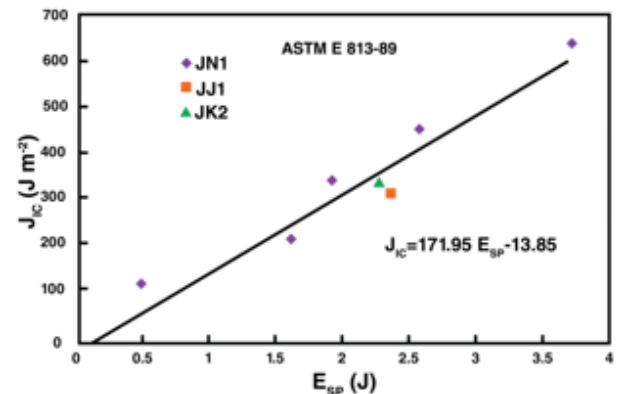


Figura 3 Gráfica de JIC vs ESP.

El coeficiente de determinación de las ecuaciones es de 91%.

Pruebas de Termofluencia

La figura 4 muestra la curva típica “deflexión-tiempo” obtenida por PIM. Se observa en la figura que todas las curvas obtenidas presentan las tres etapas de termofluencia características de la prueba.

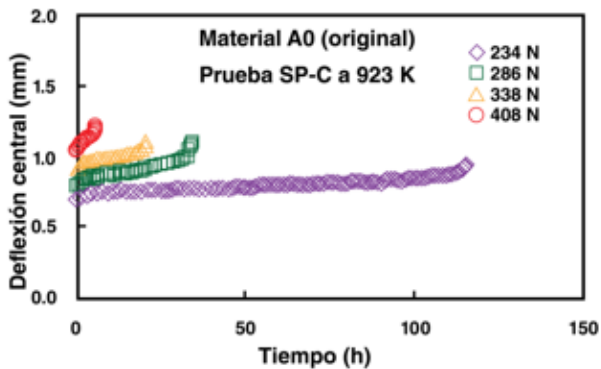


Figura 4 Curvas PIM de Termofluencia para el material A0.

Esta semejanza con las curvas tradicionales de termofluencia permitió el cálculo del parámetro de Larson-Miller para graficar las curvas obtenidas por PIM y la prueba de Termofluencia Uniaxial. En la figura 5 se presenta la comparación de los datos obtenidos por ambas pruebas y se observa que existe una relación directa entre ambos resultados.

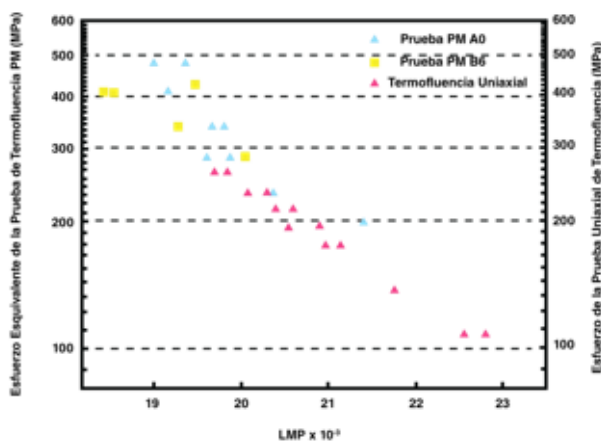


Figura 5 Comparación entre datos obtenidos por la Prueba de Termofluencia de Indentación Miniatura y Termofluencia Uniaxial.

Esta relación permite interpretar a los resultados de la Prueba de Indentación Miniatura como una prueba equivalente a la prueba convencional.

Conclusiones

La Temperatura de Transición Dúctil-Frágil obtenida por la Prueba de Indentación Miniatura es equivalente a la DBTT obtenida por la prueba de Impacto Charpy ya que presenta una correlación lineal.

La relación JIC-ESP sigue una correlación lineal, lo cual hace de la PIM equivalente a la prueba convencional.

Con base en el Parámetro de Larson-Miller, se determinó que la Prueba de Termofluencia de Indentación Miniatura y la Prueba de Termofluencia Uniaxial, son equivalentes.

Se determinaron ecuaciones de regresión para calcular las equivalencias entre pruebas.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo recibido de SIP-IPN y Conacyt 220984.

Referencias

- Bulloch, J. (1995). The Small Punch Toughness Test: Some Detailed Fractographic Information. *Int. J. Pres. Ves. & Piping*(63), 177-194.
- Ule, B., Sturm, R., & Leskovsek, V. (2003). Effects of Test Specimen Geometry on Creep Behaviour of 12Cr Steel in Miniaturised Disc Bend Tests. *Materials Science and Technology*, 19, 1771-1776.

Komazaki, S., Kato, T., Kohno, Y., & Tanigawa, H. (2009). Creep Property Measurements of Welded Joint of Reduced-Activation Ferritic Steel by the Small-Punch Creep Test. *Materials Science and Engineering, A(510-511)*, 229-233.

Misawa, T., Nagata, S., Aoki, N., Ishizaka, J., & Hamaguchi, Y. (1989). Fracture Toughness Evaluation of Fusion Reactor Structural Steels at Low Temperatures by Small Punch Tests. *Journal of Nuclear Materials*, 169, 225-232.

Kim, B., Sim, Y., Lee, J., Kim, M., & Lim, B. (2011). Application of Small Punch Creep Test for Inconel 617 Alloy Weldment. *Procedia Engineering(10)*, 2579-2584.

Dobes, F., & Molicka, K. (2002). On the Monkman-Grant relation for Small Punch Test data. *MATERIALS Science and Engineering, A(336)*, 245-248. doi:10.1016/S0921-5093(01)01975-X

Análisis de una máquina de inducción en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para determinar su desempeño con carga

ARAGÓN, David*†, ESCARELA, Rafael, OLIVARES, Juan, HERNANDEZ, José, JIMENEZ, Víctor y GONZALEZ, Felipe

Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200, México D.F.

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

Este trabajo trata el análisis en el dominio de la frecuencia de una máquina de inducción usando el Método del Elemento Finito.

Se emplea un análisis magneto-dinámico para estudiar la máquina de inducción en el dominio de la frecuencia. La solución proporciona el par electromagnético, las pérdidas y la densidad de flujo magnético. Se usa la solución en el dominio de la frecuencia como condición inicial para analizar el comportamiento del motor a velocidad nominal, teniendo en cuenta los armónicos del campo magnético debido al ranurado del núcleo estator y rotor. Simulaciones de las pruebas de rotor bloqueado, operación en vacío, funcionamiento a plena carga cuya metodología está fundamentada en la norma internacional de pruebas de la IEEE-112 (2004), se realizan. Los parámetros y el desempeño a las condiciones mencionadas, como par, corriente, factor de potencia, etc., se calculan y se comparan con resultados de laboratorio para validar el modelado.

Máquina de inducción, Método del elemento finito, Análisis en el dominio de la frecuencia, Circuito equivalente, Acoplamiento circuito-campo.

Abstract

This work presents the frequency analysis of an induction machine, using the Finite Element Method.

The magneto-dynamic approach is used to study the induction machine in the frequency domain. The solution gives torque, losses and magnetic flux densities. A second application involves the time domain analysis of the induction machine. The frequency domain solution is employed as an initial condition to analyze the behavior of the motor for rated speed, taking into account magnetic field harmonics due to the slotting of stator and rotor.

Simulations of locked rotor testing, load operation, full load operation whose methodology is based on the international standard test IEEE-112 (2004), are carried out. The parameters and performance under these operation conditions, such as a torque, current, power factor, etc., are calculated and compared with test results to validate the numerical simulations.

Induction machine, Finite element method, Frequency domain analysis, Equivalent circuit, Circuit-field coupling.

Citación: ARAGÓN, David, ESCARELA, Rafael, OLIVARES, Juan, HERNANDEZ, José, JIMENEZ, Víctor y GONZALEZ, Felipe. Análisis de una máquina de inducción en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para determinar su desempeño con carga. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 187-196

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: daav@correo.azc.uam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Durante décadas el motor de inducción ha sido la máquina rotatoria más empleada a nivel industrial y en aplicaciones domésticas. En los países más avanzados, este tipo de máquina es responsable del 70% del consumo de energía eléctrica total, por lo tanto el estudio y análisis de esta máquina es de suma importancia (Conte et al. (2003)). El método del elemento finito (MEF por sus siglas) se ha convertido en una herramienta computacional práctica para dicho propósito. El MEF un método numérico utilizado en varias áreas de estudio que nos permite encontrar y aproximarnos numéricamente a la solución de problemas que son difíciles (en algunos casos imposibles) de ser resueltos de forma analítica.

En años recientes, generadores de inducción han sido introducidos al sistema eléctrico nacional en la producción de energía eólica (Aragón et al. (2014)). Una tendencia es utilizar más la máquina de inducción como generador ya que debido a su principio de operación el mantenimiento es mucho menor comparado con una máquina síncrona. Otra motivación de realizar este trabajo es tener una metodología para obtener los parámetros y conocer el comportamiento de las máquinas de inducción de gran porte (media y alta tensión) bajo una simulación MEF, antes de realizar las pruebas eléctricas usuales marcadas en la norma IEEE-112 (2004), ya que estas pruebas representan un alto estrés mecánico y altos niveles de calentamiento de la máquina, además de que debe existir un alto nivel de seguridad para evitar daños al personal y a la máquina.

Este trabajo presenta un análisis 2D no lineal en el dominio de la frecuencia de una máquina de inducción basada en el MEF con acoplamiento circuito-campo.

Con la técnica propuesta, (Escarela et al. (2010) y (Yang et al. (2009)), no es necesario girar el rotor, la resistividad del material del rotor es modificada en términos de la condición de carga especificada. Las propiedades no lineales son representadas la curva de magnetización efectiva. Los elementos del acoplamiento circuito-campo son introducidos para tomar en cuenta los efectos en 3D que son la reactancia de dispersión en cabezales de las bobinas y la impedancia del rotor en el anillo de corto circuito. Es importante mencionar que con esta técnica el tiempo de cómputo es mucho menor comparada con el análisis en el dominio del tiempo. El desempeño a condición nominal como el par, la corriente, el factor de potencia, etc., son calculados y comparados con los resultados de laboratorio para validar el modelo.

Objetivo General

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal el análisis de una máquina de inducción tipo jaula de ardilla de 1044.4 kW, 4p, 7200 V, 60 Hz en el dominio de la frecuencia usando el método de elementos finitos para obtener información del par electromagnético, las pérdidas y la densidad de flujo magnético, así como la obtención de parámetros que puedan representar el comportamiento dinámico de la máquina.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el modelo de la máquina de inducción. En la sección 3 se presenta el modelado electromagnético. En la sección 4 se explica el modelo en 2D creado mediante el MEF y finalmente en la sección 5 se presentan los resultados de las simulaciones desde el punto de vista efectivo de la metodología presentada.

La máquina de inducción

Básicamente las máquinas de inducción consisten de dos partes, principalmente (Boldea y Nasar (2010)):

El estator: Es la parte fija, que consiste de devanados alojados en las ranuras existentes en la periferia interna de un núcleo ferromagnético laminado. Los devanados del estator son alimentados con tensiones trifásicas, que producen un campo magnético que gira a la velocidad síncrona.

El rotor: Es la parte giratoria, donde los conductores son colocados de manera similar que los conductores del estator con el mismo número de fases. El rotor puede ser construido de dos formas: Rotor devanado y Rotor en corto-circuito o jaula de ardilla. El núcleo de ambos es laminado ferromagnético.

En la figura 1 se muestra el circuito equivalente que representa la máquina de inducción en régimen permanente y está constituido por resistencias e inductancias que toman en cuenta los diferentes fenómenos que aparecen en la máquina durante su funcionamiento. La norma IEEE-112 (2004) indica el cálculo de los parámetros analíticamente o experimentalmente a través de los diferentes métodos de pruebas.

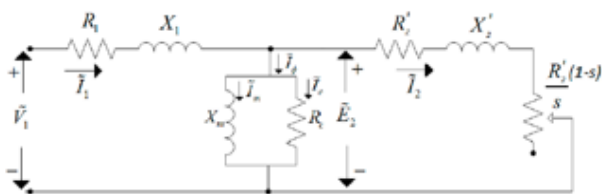


Figura 1 Circuito equivalente monofásico de la máquina de inducción trifásica (referido al estator).

En este modelo los parámetros eléctricos del estator son representados por R_1 y X_1 que son la resistencia y la reactancia de dispersión del devanado estator.

La rama de magnetización con los parámetros R_c y X_m que representan las pérdidas en el núcleo y la reactancia de magnetización respectivamente. Los parámetros del rotor R_2' y X_2' que es la resistencia y reactancia de la jaula o devanado del rotor referidos al estator. También se muestran las corrientes que están en el circuito debido al voltaje aplicado V_1 , como I_1 que es la corriente absorbida por el estator, I_2 es la corriente absorbida por el rotor desde el punto de vista del estator, I_ϕ la corriente de excitación, I_m la corriente de magnetización e I_{cl} corriente correspondiente a las pérdidas del núcleo.

En la ecuación (1) se define la velocidad del campo giratorio del estator, también llamada velocidad síncrona N_s , que posee una relación con la frecuencia eléctrica y el número de polos de la máquina.

$$N_s = \left(\frac{120}{p}\right) f_e \tag{1}$$

Cuando el motor funciona sin carga, el rotor gira con una velocidad casi igual a la síncrona, con carga el rotor se atrasa más en relación al campo magnético giratorio, y diferentes corrientes son inducidas para desarrollar el par necesario.

En la ecuación (2), se define al deslizamiento de un motor como la diferencia entre la velocidad síncrona N_s y la velocidad del motor N_m , a la velocidad síncrona.

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \tag{2}$$

El movimiento relativo entre el flujo generado por el estator y la velocidad del rotor induce tensiones en las barras del rotor, cuya frecuencia es llamada “frecuencia de deslizamiento”, denotada por f_r , que es el producto entre el deslizamiento s y la frecuencia eléctrica del estator f_e conforme a la ecuación (3).

$$f_r = s \cdot f_e$$

(3)

El problema electromagnético para resolverse mediante el MEF

La solución de muchos problemas encontrados en ingeniería requiere resolver ecuaciones diferenciales y ecuaciones en derivadas parciales. Las cuatro ecuaciones de Maxwell engloban las relaciones existentes en la teoría electromagnética. A través de éstas es posible el análisis del comportamiento espacial y temporal de campos electromagnéticos, así como la interdependencia existente entre sus componentes. Estas ecuaciones en el dominio de la frecuencia siguen teniendo las mismas variables, las mismas constantes e incluso, las mismas relaciones constitutivas, por lo que se escriben de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} &= -j\omega \tilde{\mathbf{B}} \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} &= \tilde{\mathbf{J}} - j\omega \tilde{\mathbf{D}} \\ \nabla \cdot \tilde{\mathbf{B}} &= 0 \\ \nabla \cdot \tilde{\mathbf{D}} &= \rho\end{aligned}$$

(4)

Donde $j = \sqrt{-1}$ y $\tilde{\mathbf{E}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$, $\tilde{\mathbf{H}}$, $\tilde{\mathbf{D}}$ y $\tilde{\mathbf{J}}$, son vectores de campo eléctrico, de inducción magnética, e intensidad de campo, desplazamiento eléctrico y densidad superficial de corriente eléctrica, respectivamente. ρ es la densidad volumétrica de carga eléctrica. Las ecuaciones de Maxwell se completan con relaciones constitutivas.

Son estas las responsables de establecer las características del medio donde existen los campos electromagnéticos: la presencia de no linealidades, inducciones remanentes, el comportamiento de los campos en la interface entre medios diferentes, etc:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{B}} &= \mu \tilde{\mathbf{H}} \\ \tilde{\mathbf{J}} &= \sigma \tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{D}} &= \epsilon \tilde{\mathbf{E}}\end{aligned}$$

(5)

Donde ϵ , σ y μ son la permitividad eléctrica del medio, la conductividad eléctrica del medio y la permeabilidad magnética del medio respectivamente.

El uso de la tilde sobre las magnitudes vectoriales indica que se trata de una variable compleja, y las variables son evaluadas a una frecuencia angular ω dada (Humphries (2010)).

Existen diversas formulaciones equivalentes, basadas en diferentes potenciales (potencial magnético vectorial, potencial magnético escalar, potencial eléctrico escalar y potencial eléctrico vectorial (Hayt (2011))), para resolver implícitamente las ecuaciones de Maxwell. Esto quiere decir que la solución de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en términos de los potenciales representa la solución del problema original de las ecuaciones de Maxwell (Bastos y Sadowski (2003)). Para el caso de este trabajo se usa la formulación del potencial magnético vectorial $\tilde{\mathbf{A}}$, y el potencial eléctrico escalar $\tilde{\mathbf{V}}$, formulación $\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{V}}$ lo cual lleva a una forma sencilla en 2D para establecer el acoplamiento entre circuitos eléctricos y las ecuaciones de campo magnético en la máquina de inducción. Esta formulación es conocida como “la ecuación de difusión no lineal”

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \tilde{\mathbf{A}} \right) + \sigma [j\omega \tilde{\mathbf{A}} + \nabla \tilde{\mathbf{V}}] = 0$$

(6)

El análisis de problemas electromagnéticos de baja frecuencia solamente permite la existencia de conductores filamentosos (fc), conductores sólidos (sc) y regiones no conductoras (nc). La ecuación de difusión puede ser manipulada en el dominio de la frecuencia para producir el siguiente sistema de ecuaciones (Escarela, et al. (2010)):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial y} \right] &= 0 \quad \text{en } \Omega_{nc} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial y} \right] &= -\frac{n_f I_f}{S_f} \quad \text{en } \Omega_{fc} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}}{\partial y} \right] - j\omega\sigma(\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{A}}_{avg}) &= -\frac{i_g}{S_s} \quad \text{en } \Omega_{sc} \end{aligned} \quad (7)$$

Donde Ω_{nc} , Ω_{fc} y Ω_{sc} son los dominios: no conductores, conductores filamentosos y conductores sólidos respectivamente y S_f y S_s son la sección del área transversal de las regiones de los conductores filamentosos y sólidos respectivamente.

En electromagnetismo, el MEF está asociado a métodos variacionales y métodos de residuales ponderados. En el primer caso, el procedimiento numérico no trabaja directamente con la ecuación física relacionada al problema, sino con una funcional (función de funciones) que tiene que ser minimizada. Contrariamente, los métodos residuales se establecen directamente de la ecuación física que tiene que ser resuelta. Esto es una ventaja considerable comparada con los métodos variacionales ya que estos son simples y sencillos de entender y aplicar. Esta es la principal razón del porque hoy en día el MEF es establecido con métodos de residuales ponderados (Bastos y Sadowski (2003)).

El método de Galerkin es un método de residuales ponderados que se aplica para minimizar el residual de una ecuación en derivadas parciales. La función de ponderación puede ser arbitraria, pero en el método de Galerkin, las funciones de ponderación se seleccionan de tal manera que sean las mismas que las funciones usadas para la expansión de la solución aproximada. En este trabajo la ecuación a resolver por el método es la ecuación (6) presentada anteriormente.

Modelo de la máquina mediante el MEF

En esta sección se presentan los pasos más importantes realizados para obtener el modelo de elementos finitos de la máquina de inducción jaula de ardilla.

Hipótesis del modelo

En el caso de las máquinas eléctricas de baja frecuencia, el comportamiento electromagnético se describe con la solución de las ecuaciones de Maxwell. Para tener un mejor aprovechamiento computacional se realizan las siguientes suposiciones:

Se asume un modelo en 2D del sistema electromagnético, en el cual se pueden incorporar los efectos tridimensionales con valores de resistencias e inductancias en las ecuaciones de circuitos.

La corriente de desplazamiento es despreciable en comparación con la corriente de conducción. En otras palabras la corriente de desplazamiento puede omitirse cuando se opera a baja frecuencia (Bastos y Sadowski (2003)).

En el modelo cuasi 3D, los medios magnéticos son isotrópicos, sin embargo, no lineales, pudiendo sufrir el fenómeno de saturación, pero se ignora el fenómeno de histéresis.

Los medios dieléctricos y conductores son lineales, por lo tanto, ϵ, σ, μ son constantes.

Condición de frontera del modelo

La evaluación del campo electromagnético en todas las simulaciones realizadas por el MEF considera como incógnita al potencial magnético vectorial A en todo el dominio solución. Aunque teóricamente se debería considerar el infinito para resolver con precisión el modelo del motor por el MEF, es necesario emplear condiciones de frontera que delimiten el dominio del problema. Esto tiene como objetivo disminuir tiempos de simulación y despreciar zonas donde el campo magnético es pequeño o su efecto es imperceptible en el modelado del motor con el MEF. La condición de frontera del dominio seleccionado en este trabajo, ver Figura 2, es la periferia externa del núcleo magnético del estator y la periferia interna del núcleo magnético del rotor. El modelo del motor considera la condición de frontera Dirichlet de flujo magnético nulo cruzando esta frontera. Se podría considerar una condición de frontera más alejada de la periferia de la máquina. Sin embargo, el área del núcleo magnético principal del estator es mucho mayor que el área ocupada por los dientes del estator, que es donde puede existir saturación. Entonces, el flujo pasa sin dificultad por el material magnético de alta permeabilidad del estator, lo que resulta en que el flujo de dispersión en la periferia externa de la máquina sea prácticamente nulo.

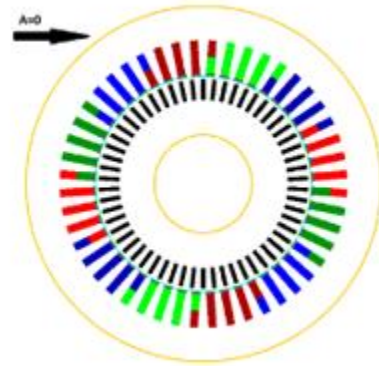


Figura 2 Condición de frontera Dirichlet del modelo.

Condición de periodicidad

Algunas máquinas de inducción presentan condiciones de periodicidad o anti-periodicidad, esto es que el dispositivo completo es obtenido por la repetición de la geometría de un subdominio "S".

La condición de periodicidad impone a las fronteras que delimitan la porción periódica potenciales con valores iguales. Ya que la condición de anti-periodicidad impone potenciales iguales en módulo, sin embargo de signos contrarios a las fronteras que delimitan la porción anti-periódica.

En la máquina analizada se puede utilizar la condición de periodicidad como se muestra en la Figura 3.

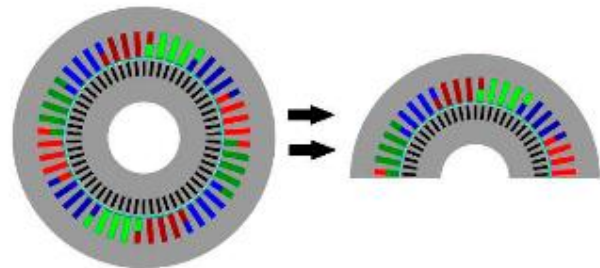


Figura 3 Condición de periodicidad.

Mallado de la geometría

La fase de pre-procesamiento es muy importante en la generación de una malla válida en dominios con geometrías complejas.

Es un procedimiento trivial, que puede resultar en detrimento del tiempo requerido para realizar los cálculos.

Crear una malla es una tarea crucial, la cual se debe adaptar bien a las propiedades físicas del problema en consideración. Así la eficiencia en la solución y su respectivo tiempo de cómputo del problema está fuertemente relacionada con la calidad de la malla.

Una malla en un dominio “S” de calidad consiste en la unión de un número finito de elementos geométricos (triángulos y cuadriláteros para dos dimensiones o tetraedros, pentaedros y hexaedros para tres dimensiones), los cuales deben satisfacer que:

- La variación en tamaño entre dos elementos adyacentes debe ser progresiva.
- La densidad de los elementos en algunas regiones del dominio debe ser mayor conforme a las propiedades físicas del problema.
- Cuando los elementos son del tipo triangular, la existencia de ángulos obtusos se debe evitar.

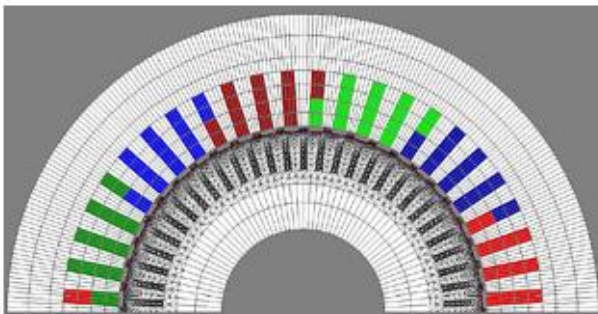


Figura 4 Malla del modelo con 19019 nodos, 4517 elementos de línea y 8630 elementos de superficie

Por lo tanto, las regiones de dominio para el cálculo de los campos electromagnéticos se pueden observar en la figura 5

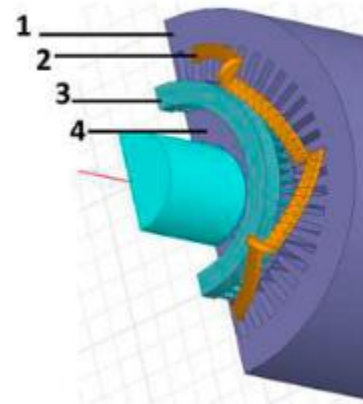


Figura 5 Regiones de dominio para el cálculo de los campos electromagnéticos- 1. Núcleo magnético del estator, 2. Devanados del estator, 3. Barras y anillo de la jaula de ardilla de rotor, 4. Núcleo magnético del rotor.

Simulaciones y Resultados

Este capítulo presenta las simulaciones y análisis de resultados obtenidos de la máquina de inducción. Se utilizó un software comercial de elemento finito del cual se tiene licencia académica y una computadora de escritorio con procesador Intel core i3 @ 3.2GHz, memoria RAM de 6.0 Gb, Sistema operativo de 64 bits y disco duro de 1 Tb, la cual se encuentra en el laboratorio de Uso de Energía ubicado en la UAM-Azcapotzalco. Las simulaciones magneto-armónicas de la máquina de inducción se realizan a valores constantes de deslizamiento (valores de velocidad del rotor constante) y son problemas que no consideran el movimiento del rotor con respecto al estator. La frecuencia de la corriente en el circuito del rotor se ajusta de acuerdo a la ecuación (3).

Características de operación de la máquina a plena carga

Para los cálculos de operación con carga, se calcularon diferentes puntos de funcionamiento con varios valores del deslizamiento s , En el análisis en el dominio de la frecuencia solo se requiere especificar la frecuencia en el estator (ver sistema de ecuaciones 7).

Durante las operaciones de carga, la frecuencia de las corrientes del estator es igual a la frecuencia de alimentación, mientras que la frecuencia de la corriente del rotor es la frecuencia de alimentación multiplicada por el deslizamiento.

La operación del motor con carga nominal corresponde con el estado de la máquina donde la potencia mecánica en el eje del motor es igual a la potencia nominal $P_n=1044.4$ kW.

Un análisis magneto-armónico parametrizado, se efectúa para los valores de deslizamiento en el rango de $s=0.001$ hasta $s=0.04$, con paso de 0.0001.

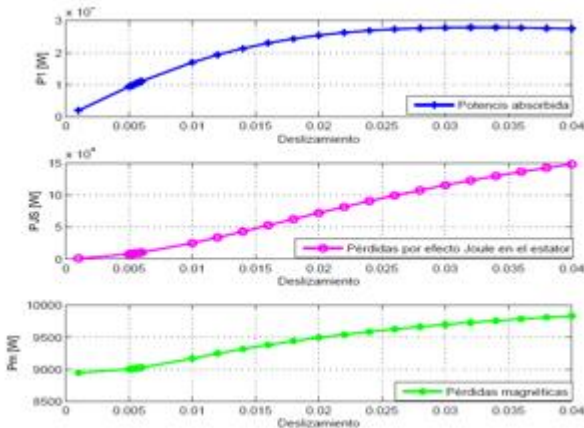


Gráfico 1 Curvas de la potencia absorbida, pérdidas por efecto Joule y pérdidas magnéticas de la máquina bajo estudio.

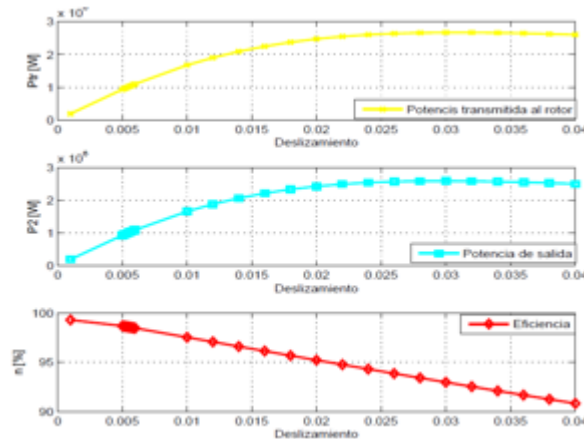


Gráfico 2 Curvas de la potencia transmitida al rotor, potencia entregada y eficiencia de la máquina bajo estudio.

A partir de la curva P_2 del Gráfico 2 se obtiene el valor de deslizamiento nominal $s_n=0.0057$ correspondiente a la potencia nominal del motor P_n .

| Parámetros | I_{1n} (A) | n_m (rpm) | s_n | T_n (Nm) | $\cos\theta_n$ |
|---------------------------|--------------|-------------|---------|------------|----------------|
| Valores de simulación | 98.39 | 1789.7 | 0.0057 | 5582.79 | 0.86 |
| Valores de laboratorio | 99.76 | 1789.6 | 0.00577 | 5597 | 0.87 |
| Error relativo porcentual | 1.37 | 0.0055 | 1.21 | 0.25 | 2.09 |

Tabla 1 Tabla comparativa entre los valores obtenidos de la simulación y datos de laboratorio.

| Parámetros | P_{1n} (W) | P_{2n} (W) | P_{3n} (W) | P_{4n} (W) | η_n (%) |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Valores de simulación | 1061851.60 | 9520.02 | 11204.52 | 1046333.29 | 98.02 |
| Valores de laboratorio | 1087580 | 9700 | 10560 | 1044180 | 96.01 |
| Error relativo porcentual | 2.36 | 1.85 | 6.10 | 0.2062 | 2.09 |

Tabla 2 Tabla comparativa entre los valores obtenidos de la simulación y datos de laboratorio.

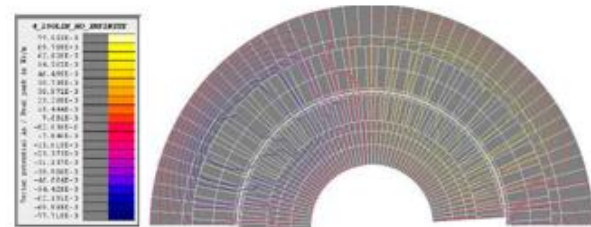


Figura 6 Líneas del campo magnético para la operación en estado estacionario de la máquina con carga nominal ($s = 0.0057$).

En la Figura 6 se puede apreciar las líneas de campo magnético, las cuales están formando dos polos. La máquina bajo estudio es de 4 polos y por cuestiones de simetría solo se muestran dos polos.

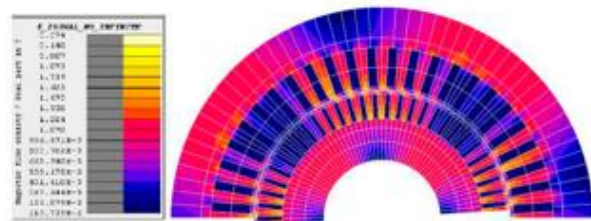


Figura 7 Densidad de flujo magnético en la máquina a operando con carga nominal ($s = 0.0057$).

En la Figura 7 se muestra la densidad de campo magnético en la máquina, se nota que para este específico deslizamiento ($s=0.0057$), se tiene un rango de densidad de campo desde 0-2.27 T.

En la práctica se busca que las inducciones máximas en el yugo de estator y rotor sean de 1.4 T y las inducciones máximas para dientes en estator y rotor sea de 2.1 T. En la máquina bajo estudio se nota que se cumplen los límites con los que se trabaja en la industria.

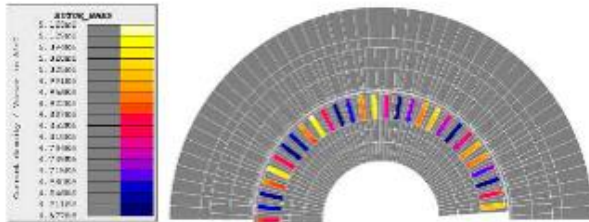


Figura 8 Densidad de corriente en las barras del rotor para operando con carga nominal.

En la Figura 8 se muestra la densidad de corriente en las barras del rotor para carga nominal. Se aprecia que se tiene un rango de densidades de corriente de 4.5-5.1 A/mm². En la industria estas densidades de corriente van relacionadas a la potencia nominal de trabajo de la máquina así como su sistema de transferencia de calor, para este tipo de máquina que posee un intercambiador de calor la densidad máxima aceptada en los conductores de rotor es de 5.3 A/mm².

Par electromagnético frente al deslizamiento del rotor.

El par electromagnético en relación al deslizamiento del rotor se muestra en la Figura 9.

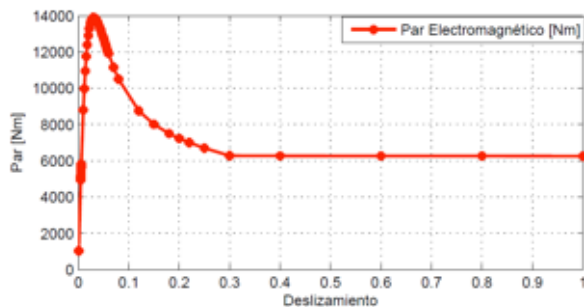


Grafico 2 Par electromagnético contra deslizamiento.

Este cálculo también ofrece la posibilidad de evaluar las siguientes características del motor:

Los valores de la corriente I_{1s} y el par electromagnético T_{es} correspondiente a la puesta en marcha de la máquina, es decir, por el valor $s = 1$ del deslizamiento.

El valor del deslizamiento máximo s_m y el par electromagnético correspondiente T_{em} .

Los valores relativos de estas cantidades con respecto a la operación de la máquina con carga nominal (T_{e1} y I_{1n}) se muestran en la tabla 3.

| Parámetros | s_m | $T_{em}(Nm)$ | $T_{e1}(Nm)$ | T_{em}/T_{e1} | T_{e1}/T_{em} | $I_{1s}(A)$ | I_{1s}/I_{1n} |
|---------------------------|-------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Valores de Simulación | 0.03 | 14117.24 | 5595.10 | 2.53 | 1.002 | 601.93 | 6.11 |
| Valores de Laboratorio | 0.036 | 16902.94 | 6212.67 | 3.02 | 1.11 | 708.29 | 7.10 |
| Error relativo porcentual | 16.66 | 16.30 | 9.94 | 16.09 | 9.71 | 15.01 | 13.83 |

Tabla 3 Características de la máquina para el arranque y el deslizamiento máximo.

El análisis en el dominio de la frecuencia se ha repetido a diferentes velocidades del rotor y, de esta manera, se han calculado las características mostradas en la Tabla 3.

Aunque se han obtenido buenos resultados cuando la máquina de inducción opera a su deslizamiento nominal. Los resultados para la operación de puesta en marcha de la máquina y deslizamiento máximo, han estado lejos de ser precisos (ver Tabla 3). La influencia de los armónicos en el rotor cuando sucede el arranque, no se determinan de manera eficiente por la simulación en el dominio de la frecuencia.

Conclusiones

Este trabajo desarrolló un modelo de una máquina de inducción trifásica $P_n=1044.4$ kW en el dominio de la frecuencia utilizando el método de elementos finitos.

Con lo que fue posible realizar varias simulaciones y obtener parámetros confiables de la máquina de acuerdo a las tablas mostradas en la sección 5.

Con el análisis en el dominio de la frecuencia se pudo dar un panorama completo de las variables de entrada-salida de la máquina de inducción, obteniéndose las variables como voltajes y corrientes en estator y rotor, variables internas como el campo magnético y la densidad de campo magnético, todo esto a diferentes puntos de operación y empleando un menor tiempo de cómputo en comparación a los análisis en el dominio del tiempo.

Referencias

Aragón, D., López, I., Escarela, R., Campero, E., Guzmán, J., Ortiz, A. "La energía eólica en la generación de energía eléctrica en el mundo", Habana Cuba, Noviembre 24-28, 2014.

Conte, R. N., Pereira, L. F. A., Haffner, J. F., Scharlau, C. C., Campestrini, L., & Fehlberg, R. P. (2003, November). Parameters identification of induction machines based on frequency response and optimization techniques. In Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE (Vol. 1, pp. 596-599). IEEE.

Bastos, J.P.A. y Sadowski, N. (2003). Electromagnetic modeling by finite element methods. CRC press.

Boldea, I. y Nasar, S.A. (2010). The induction machine handbook. CRC press.

Escarela-Perez, R., Melgoza, E., Alvarez-Ramirez, J., & Laureano-Cruces, A. L. (2010). Nonlinear time-harmonic finite-element analysis of coupled circuits and fields in low frequency electromagnetic devices. Finite Elements in Analysis and Design, 46(10), 829-837.

Hayt, W.H. y Buck, J.A. (2001). Engineering electromagnetics, McGraw Hill.

Humphries, S. (2010). Finite-element methods for electromagnetics. Field Precision LLC, Electronic Edition.

IEEE-112 (2004). Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. (Revision of IEEE std 112-1996).

Yang, T., Zhou, L., & Li, L. (2009, November). Parameters and performance calculation of induction motor by nonlinear circuit-coupled finite element analysis. In Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on (pp. 979-984). IEEE.

Diseño de un reductor de 746 W de acero de bajo C para una máquina de pruebas de abrasión

RODRIGUEZ, Mario*†, PALACIOS, Luis, AVILA, Erika, RESENDIZ, Celerino y OCAMPO, Gabriel

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de una transmisión de engranes de 746 W, donde los ejes de entrada y salida giran a 1800 rpm y 2000 rpm respectivamente. Utilizando diferentes teorías de diseño como la de Von Misses, Energía de distorsión elástica y la de fatiga, para obtener el diámetro de los ejes o árboles así como la de los engranes y cuñas. En base al estudio de fuerzas, esfuerzos y diámetros obtenidos, se seleccionan los baleros o rodamientos para los ejes. Además como se decidió utilizar acero de bajo C como el AISI 1018 para los ejes y los engranes, se aplicó la segunda ley Fick de difusión para establecer el tratamiento térmico superficial de carburización para endurecer dichos elementos. Finalmente se establecen las dimensiones mínimas de la caja que contendrá el reductor.

Transmission, engranes, acero, carburización.

Abstract

In this study it's presented the analysis of a 746 W gears transmission, where the input and output shafts rotate at 1800 rpm and 2000 rpm respectively. Different design theories were used to get the diameter of the shaft or trees as well as the gears and wedges, like the Von Misses, Elastic distortion energy and the Fatigue Theory. Based on the study of strength, efforts and diameters obtained the bearings or bearings for shafts were selected. Moreover as we decided to use low carbon steel as the 1018 AISI for the shafts and gears the diffusion second Fick's law was applied to set the carbonization surface heat treatment to harden these elements. Finally the minimum dimensions of the housing that will contain the gear are established.

Transmission, gears, steel, carburization.

Citación: RODRIGUEZ, Mario, PALACIOS, Luis, AVILA, Erika, RESENDIZ, Celerino y OCAMPO, Gabriel. Diseño de un reductor de 746 W de acero de bajo C para una máquina de pruebas de abrasión. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 197-208

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: rurianluca@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Desde hace ya dos o tres siglos la industria ha requerido de transmisiones para el movimiento de materiales o para realizar alguna operación específica como la de los molinos de diversas materias primas y el diseñador tiene que iniciar con la comprensión del problema, con los datos que le puedan proporcionar o de los que obtenga en las condiciones reales y con esto parte para el diseño y solución del problema.

Hay muchos estudios referentes a los problemas que presentan las transmisiones por engranes tal como la investigación para reducir las vibraciones de los reductores de velocidad [1], pero como lo menciona Vera Nikolic et.al.[2] existen pocas herramientas computacionales disponibles para el análisis dinámico de configuraciones de engranes, ya que algunos modelos son muy limitados.

Existen en la actualidad muchos proveedores de transmisiones a nivel mundial, pero pues es mejor resolver los problemas que se plantean en el día a día y realizar propuestas que se puedan fabricar con el equipo que se disponga en cualquier microempresa o en alguna institución de educación, que cuente con maquinas herramienta.

Por lo que el objetivo del presente trabajo es diseñar un reductor de engranes de 746 W para una transmisión de una maquina para pruebas de abrasión, donde se requiere que la patea de salida sea de 200 rpm.

Metodología a Desarrollar

Ecuaciones iniciales de esfuerzos en ejes

Los elementos centrales de análisis para una transmisión son los ejes y engranes en este caso, la obtención de fuerzas y esfuerzos son los principales propósitos.

La determinación de las dimensiones de un eje es muy sencilla cuando solo se consideran cargas estáticas, pero es un buen inicio en la solución del problema.

Los esfuerzos en un punto de la superficie de un eje redondo macizo de diámetro d , que se someten a cargas de flexión, axiales y de torsión son:

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2)$$

Observar que las tres cargas, M , F y T ocurren en la sección que contiene un punto superficial específico.

Utilizando un círculo de Mohr se demuestra que los dos esfuerzos principales nulos son:

$$\sigma_A, \sigma_B = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

Estos esfuerzos pueden combinarse para obtener el esfuerzo cortante máximo τ_{max} y el esfuerzo de von Misses σ' , como sigue:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_A - \sigma_B}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4)$$

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Sustituyendo ecuaciones 1 y 2 en 4 y 5, se tiene:

$$\tau_{max} = \frac{2}{\pi d^3} [(8M + Fd)^2 + (8T)^2]^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma' = \frac{4}{\pi d^3} [(8M + Fd)^2 + 48T^2]^{1/2} \quad (7)$$

Estas ecuaciones permiten determinar τ_{max} o bien σ' cuando se da el diámetro, o calcular d cuando se conoce el valor permisible de τ_{max} o σ' .

Teorías de diseño de ejes

Teoría del τ_{max}

Si el análisis o diseño ha de ser con base en la teoría del esfuerzo cortante máximo, entonces el valor admisible de τ_{max} es

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{n} = \frac{\sigma_y}{2n} \quad (8)$$

Las ecuaciones (6) y (8) sirven para determinar el factor de seguridad n si se conoce el diámetro d , o bien para hallar el diámetro si es un dato el factor de seguridad.

Un análisis similar puede efectuarse con base en la teoría de la energía de distorsión en la falla. En este caso el esfuerzo de von Mises permisible es:

$$\sigma' = \frac{\sigma_y}{n} \quad (9)$$

Carga estática-flexión y torsión

En muchos casos, la componente axial F en las ecuaciones (6) y (7) es nula o tan pequeña que puede ser despreciada. Con $F=0$, las ecuaciones (6) y (7) se convierten en:

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d^3} (M^2 + T^2)^{1/2} \quad (10)$$

$$\sigma' = \frac{16}{\pi d^3} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \quad (11)$$

Es más fácil resolver estas ecuaciones para evaluar el diámetro que las ecuaciones (6) y (7). Sustituyendo los valores de los esfuerzos permisibles a partir de las ecuaciones (8) y (9), se obtiene que:

$$d = \left[\frac{32n}{\pi \sigma_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (12)$$

Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo. Alternativamente, si se conoce el diámetro, el factor de seguridad se calcula por:

$$\frac{1}{n} = \frac{32}{\pi d^3 \sigma_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \quad (13)$$

Relaciones similares pueden obtenerse mediante la teoría de la energía de distorsión. Los resultados correspondientes son:

$$d = \left[\frac{16n}{\pi S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad (14)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3 S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \quad (15)$$

Diseño de ejes mediante un análisis por fatiga

En cualquier eje rotatorio cargado por momentos estacionarios de flexión y torsión actuarán esfuerzos por flexión completamente invertida, debido a la rotación del árbol, pero el esfuerzo torsional permanecerá estable. La ecuación que se aplica para este caso es:

$$d = \left\{ \frac{32\pi}{\pi} \left[\left(\frac{K_t M_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{T_m}{\sigma} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (16)$$

K_t es el factor teórico de concentración de esfuerzo por fatiga en el hombro.

Con r = radio de fillete; d = diámetro menor del escalón; D = diámetro mayor del escalón. En anexo se utiliza las relaciones

$$\frac{r}{d} \text{ y } \frac{D}{d}$$

Mediante la fórmula de resistencia a la fatiga o ecuación de Marín.

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S_e', \quad (17)$$

Se determinan cada uno de los factores.

$$S_e' = 0.504 S_{ut} \quad (18)$$

Factor K_a = Factor de superficie (maquinado).

Factor K_b = Factor de tamaño

$$k_b = \left(\frac{d}{0.3} \right)^{-0.1133}$$

Factor K_c = Factor de carga axial

$K_c = 1$, por que no se invierte

Factor K_d = Factor de temperatura.

Como el reductor estará trabajando a temperatura ambiente se toma:

$$K_d = 1$$

Factor K_e = Factor de efectos diversos

$$k_e = \frac{1}{k_f}$$

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

k_f = factor real de concentración de esfuerzos

q = factor de sensibilidad a la entalla del material

Cuñas

Existe una gran variedad de cuñas; pero aquí se analiza el tipo más simple: la cuña de sección cuadrada o rectangular (figura I). El objetivo principal de una cuña consiste transmitir el par de torsión entre el eje y el elemento de máquina conectado.

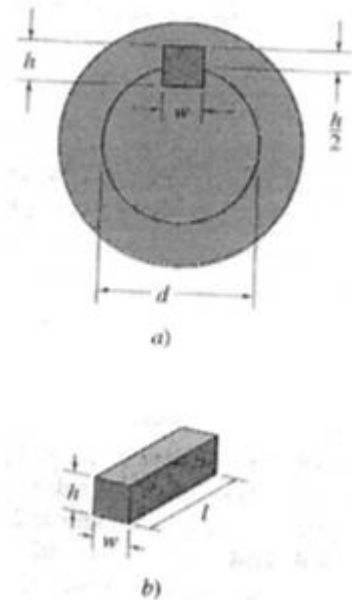


Figura 1 Ensamble de una cuña plana. a) Vista de la sección transversal del ensamble del eje, la masa y la cuña; b) vista tridimensional de la cuña plana.

Una cuña también tiene la función de un sistema de seguridad. La mayoría de las máquinas tienen una velocidad de operación y un par de torsión que definen el tamaño requerido de la cuña. Sin embargo, en el caso de un incremento drástico en las condiciones de carga, la cuña fallará por cortante antes de que falle el eje o el elemento de máquina (engrane, leva, polea, etc.).

Observe que si $h = w$, la cuña es cuadrada, un caso especial de cuña plana. Usualmente las cuñas se fabrican de acero de bajo carbono (AISI 1018) y tienen un acabado estirado en frío. En algunas aplicaciones se puede requerir el uso de tornillos prisioneros para restringir el movimiento.

Las cuñas fallan principalmente por corte o por compresión, ambos casos se consideran aquí:

1. Falla debida al corte de la cuña:

$$P = \frac{T}{d/2} = \frac{2T}{d} \quad (19)$$

El área de corte de la cuña es $A_s = wl$. El esfuerzo cortante de diseño es

$$\tau_{diseño} = \frac{P}{A_s} = \frac{2T}{dwl} \quad (20)$$

El lado derecho de la ecuación (20) es independiente de la altura h . Para evitar la falla debida al cortante:

$$\tau_{diseño} \leq \frac{\tau_y}{n_s} = \frac{\text{Esfuerzo de fluencia cortante}}{\text{Factor de seguridad}} \quad (21)$$

Donde $\tau_{perm} = \tau_y = 0.40\sigma_y$.

2. La falla debida al esfuerzo de compresión o de apoyo de la cuña: el área de apoyo es

$$A_c = lh/2 \quad (22)$$

El esfuerzo de compresión o de apoyo de diseño es:

$$\sigma_{diseño} = \frac{P}{A_c} = \frac{2T}{dlh/2} = \frac{4T}{dlh} \quad (23)$$

El lado derecho de la ecuación (23) es independiente del ancho w . Usando la ecuación:

$$\sigma_{perm} = 0.9\sigma_y$$

Se pueden evitar las fallas debidas al esfuerzo de compresión o esfuerzo en el apoyo, si:

$$\sigma_{diseño} \leq \frac{0.90\sigma_y}{n_s} \quad (24)$$

Cojinetes

Para ayudar al diseñador en la selección de cojinetes, la mayoría de los manuales de los fabricantes contienen datos sobre la vida o duración de los cojinetes de rodamiento para muchas clases de maquinas, así como información sobre los factores de aplicación de la carga.

Diseño del tren de engranajes

Se necesita que el tambor gire a 200 rpm ± 10 rpm y teniendo una velocidad de salida del motor de 1800 rpm con 746 W (1 hp), se procede a determinar la relación del tren motriz.

De acuerdo a la fórmula:

$$m_t = \frac{w_{entrada}}{w_{salida}} = \pm \frac{r_{salida}}{r_{entrada}} = \frac{d_{salida}}{d_{entrada}}$$

La relación del tren de engranaje es:

$$m_v = \frac{w_{ent}}{w_{sal}}$$

$$m_v = \frac{1800 \text{ rpm}}{200 \text{ rpm}} = \frac{9}{1}$$

Como la relación es < 10:1 es posible desarrollar la transmisión con una sola etapa mediante la siguiente tabla:

| Relación del engrane | Dientes del piñón | Dientes del engrane |
|----------------------|-------------------|---------------------|
| 9 | 12 | 108 |
| 9 | 20 | 180 |

Tabla 1 Relación de transmisión con una etapa

Se observa que los dientes del engrane se incrementan considerablemente y en tal caso el diámetro del engrane tendrá que ser mayor; por lo tanto, es conveniente considerar 2 etapas.

Se toma la raíz cuadrada de 9 que es 3. Así, 2 etapas, cada una con esa relación, darán 9:1

| Relación del engrane | Dientes del piñón | Dientes del engrane |
|----------------------|-------------------|---------------------|
| 3 | 12 | 36 |

Tabla 2 Relación de transmisión segunda iteración

Por lo tanto el piñón tendrá 12 dientes y el engrane 36 dientes.

Mediante la formula para engranes $d = \frac{N}{P}$ y despejando para d se obtiene el diámetro mas apropiado para el engrane. La tabla se genera sustituyendo valores estándar del paso.

| N | P | d (in) |
|----|------------------|--------|
| 36 | 2 | 18 |
| 36 | 2 _{1/4} | 16 |
| 36 | 2 _{1/2} | 14.4 |
| 36 | 3 | 12 |
| 36 | 4 | 9 |
| 36 | 6 | 6 |
| 36 | 8 | 4.5 ← |
| 36 | 10 | 3.6 |
| 36 | 12 | 3 |
| 36 | 16 | 2.25 |

Tabla 3 Relación de diámetros para engranes.

De acuerdo a la tabla anterior se selecciono un un paso de 8dts/in. Desarrollando el mismo procedimiento para el piñón tenemos:

| N | P | D plg(mm) |
|----|---|--------------------------|
| 12 | 8 | 1.5 ⁰⁰ (38.1) |

Tabla 4 Relación de diámetro para engrane.

Porlo tanto se requieren:

- 2 engranes con: N=36
- P=8
- d=4.5in (d=114.3mm)
- <presión=20*

2 piñones con: $N=12$

$P=8$

$d=1.5in$ ($d=38.1mm$)

\angle presión=20*

En la figura siguiente se muestra una solución de la configuración del tren de engranajes que satisface los criterios de diseño.

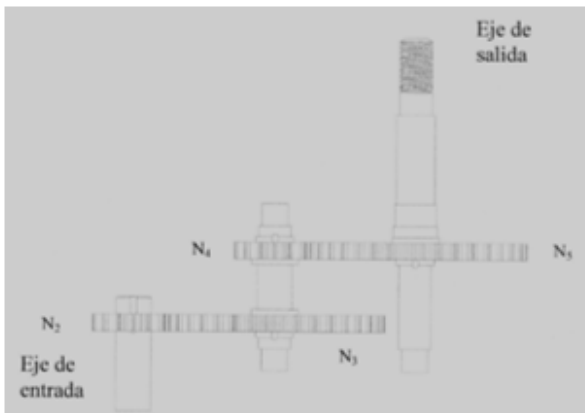


Figura 2 Tren de engranajes de tipo compuesto

Determinación del espesor F del diente

Se desea un par de engranes de reducción, con relación 3:1 para un motor de 1800 rpm y 746W (1 Hp), con un ángulo de presión normal de 20° y hechos de acero AISI 1018 CD con $\sigma=341MPa$ (49.5Kpsi) y $\sigma_y=220MPa$ (32 Kpsi).

Se trata de hacer una estimación preliminar del tamaño de los engranes que se requieren, suponiendo que el momento de torsión inicial no sea mayor que el de plena carga a la velocidad nominal.

Como se determinó anteriormente se tiene un piñón de 12 dientes y un engrane de 36 dientes para lograr la reducción de 3:1. Cuando el engrane y el piñón se hace del mismo material, el piñón siempre es el más débil de los dos debido a que los dientes del engrane menor tienen una forma con mayor rebaje.

Eligiendo un factor de seguridad de 3 se tiene como resultado un esfuerzo por flexión permisible igual a:

$$\sigma_p = \frac{220MPa}{3} = 73.3 MPa \quad (\sigma_p = 10.6Kpsi)$$

La ecuación para obtener el ancho del diente es:

$$F = \frac{F_t P}{K_v Y \sigma_p} \quad (25)$$

$$K_v = \frac{1200}{1200+V} \quad \text{Factor dinámico.}$$

$$v = \left[\frac{ft}{min} \right]$$

$$v = 0.75 in \left(\frac{1 ft}{12 in} \right) (1800rpm) \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right)$$

$$v = 706.86 ft/min \quad V = 215 m/min$$

$$K_v = \frac{1200}{1200+706.86} = 0.62$$

$$T = \frac{HP}{2\pi RPM} (33000)12 \quad (26)$$

Sustituyendo datos: $T = 35 Lb$ (156N)

$$F_t = \frac{2T}{D} = 2 * \frac{35Lb}{1.5} plg = 47 lb \quad (209N)$$

Se obtiene el factor de forma y de Lewis que $Y = 0.181$ para el piñón de 12 dts.[3]

$P =$ paso del engrane = 8

$$F = \frac{F_t P}{K_v Y \sigma_p} = \frac{47 (8)}{(0.62)(0.181)(10,600)}$$

$$F = 0.316 in \quad (F = 8mm)$$

Diseño de ejes

Eje 2

Para el diseño de los ejes se tomaran en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido a que los cambios de sección en el eje son de 1.58mm (1/16"), se propone un radio de 0.79mm (1/32") para la concentración de esfuerzo en los entalles o filetes.
- Acero AISI 1018 CD con $\sigma_y=220\text{MPa}$ (32Kpsi), $\sigma=341.5\text{MPa}$ (49.5kpsi).
- Velocidad del motor 1800 rpm (188.5rad/s); Pot=0.746 kW.
- Los diámetros de los engranes en la zona de análisis son: $D_1= 38.1\text{mm}(1.5")$ y $D_2= 114.3\text{mm}(4.5")$.

Se desea determinar el diámetro teórico del eje en los puntos críticos con base en la posibilidad de una falla por fatiga.

Torque en el eje 2:

$$1 \text{ hp} = 0.746 \text{ kw} = 550 \frac{\text{ft}\cdot\text{lb}}{\text{s}}$$

$$T_1 = 746 \text{ W} / 188.5 \text{ rad/s} = 3.957 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Para el torque T_2 tenemos:

$$\frac{T_1}{D_1} = \frac{T_2}{D_2} \rightarrow T_2 = \frac{D_2}{D_1} T_1$$

$$T_2 = \frac{4.5}{1.5} (3.957 \text{ N}\cdot\text{m}) = 11.87 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Determinando fuerza tangencial engranes 2 y 3

$$3.957 \text{ N}\cdot\text{m} = Ft_2 \left(\frac{0.038\text{m}}{2} \right)$$

$$Ft_2 = Wt_A = 207.7 \text{ New}$$

$$Fr_2 = 207.7 \text{ N} \tan 20^\circ = 75.6 \text{ New}$$

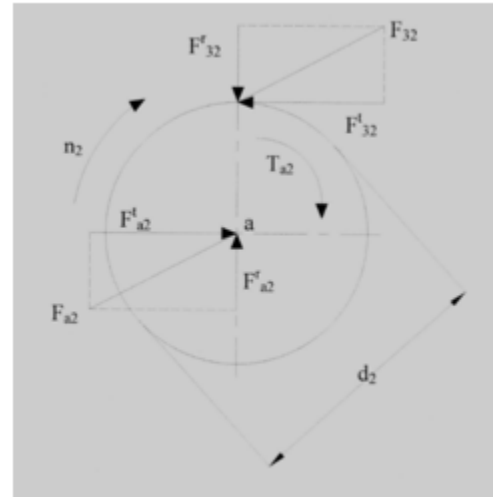


Figura 3 diagrama de fuerzas eje 2

Del engrane 4 se tiene de manera similar

$$11.87 \text{ N}\cdot\text{m} = Ft_4 \left(\frac{0.019\text{m}}{2} \right)$$

$$Ft_4 = Wt_B = 623.1 \text{ New}$$

$$Fr_4 = 623.1 \text{ N} \tan 20^\circ = 226.8 \text{ New}$$

Del diagrama de la figura IV,

$$\sum M_0 = 0$$

$$-Wt_A(19.05) + Wt_B(63.5) + Rc(82.55) = 0$$

$$Rc = 431.5 \text{ New.}$$

Hacienda $\sum F_v = 0$; se obtiene $R_o = 16.1 \text{ New}$

Del diagrama de momentos flectores en los planos xy y xz se obtiene el máximo $M = 12.622 \text{ N}\cdot\text{m}$ para el eje2 y sometido a un torque de 11.87 N-m.



Figura 4 Diagrama de fuerzas y momentos eje2.

Eje 3

Para el diseño de este eje se tomaran en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido a que los cambios de sección en el eje son de 1.58mm (1/16"), se propone un radio de 0.79mm (1/32") para la concentración de esfuerzo en los entalles o filetes.
- Acero AISI 1018 CD con $\sigma_y=220\text{MPa}$ (32Kpsi), $\sigma=341.5\text{MPa}$ (49.5kpsi).
- Velocidad del eje 200 rpm (20.94 rad/s)
- Los diámetros de los engranes en la zona de análisis son: $D_1= 38.1\text{mm}(1.5")$ y $D_2= 114.3\text{mm}(4.5")$.

De manera similar al eje 2 se desea determinar el diámetro teórico del eje 3 en los puntos críticos con base en la posibilidad de una falla por fatiga.

Torque en el eje 3:

$$T_2 = \frac{4.5}{1.5} (11.87 \text{ N} - \text{m}) = 35.38 \text{ N} - \text{m}$$

Se determina fuerza tangencial engranes 4 y 5

$$11.87 \text{ N} - \text{m} = Ft_4 \left(\frac{0.019\text{m}}{2} \right)$$

$$Ft_4 = Wt_A = 623.1 \text{ New}$$

$$Fr_4 = 623.1 \text{ New} \tan 20^\circ = 226.8 \text{ New}$$

Tal como se había obtenido, pero la salida del eje 3 va a mover a una polea, que es la que va desgastar a la probeta de la máquina para pruebas de abrasión, por lo tanto la fuerza tangencial que ejecutará dicha polea será P y se determina a continuación:

$$\Sigma M = 0$$

$$-P (114.3\text{mm}) + 35.58\text{N}\cdot\text{m} = 0$$

$$P = 313.3 \text{ N}$$

Analizando estas fuerzas que actúan en el eje 3 en un diagrama como si fuera una viga tal como se realizó para eje 2, se obtiene.

$$\Sigma M_0 = 0$$

$$R_D(82.55) - 623 (60.3) + 311(146.05)=0$$

$$R_D = 1005.3 \text{ New.}$$

$$\text{Haciendo } \Sigma F_v=0; \text{ se obtiene } R_D' = 71.2 \text{ New}$$

Del diagrama de momentos flectores en los planos xy y xz se obtiene el máximo $M = 19.72 \text{ N}\cdot\text{m}$ para el eje 3 y sometido a un torque de $35.6 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Resultados

Ejes

Para obtener los diámetros se aplicaron los criterios de Von Mises.

La teoría de la energía de la distorsión y la de diseño por resistencia a la fatiga, explicada anteriormente y representada por las ecuaciones 2.12, 2.14 y 2.16, por lo que en la tabla 6 se presenta el resumen de los diferentes resultados obtenidos por cada uno de las teorías y para cada eje 2 y eje 3. Además también se obtuvo el diámetro de los arboles para tres diferentes factores de seguridad: 1.25, 1.8 y 2.5.

| Criterio | Diámetro Eje 2 (mm) | | | Diámetro Eje 3 (mm) | | |
|----------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| | 1.25 | 1.8 | 2.5 | 1.25 | 1.8 | 2.5 |
| Von | 9.99 | 11.28 | 12.6 | 13.2 | 14.99 | 16.7 |
| ED | 9.04 | 11.04 | 12.3 | 12.8 | 14.47 | 16.14 |
| Fatiga | 15.5 | 17.48 | 19.05 | 17.5 | 19.76 | 22.04 |

Tabla 6 Resultados de los diámetros de los ejes 2 y 3.

Después de analizar los resultados se puede observar que por el criterio de la energía de distorsión ED se obtienen los diámetros mas pequeños en ambos ejes y al contrario por la de resistencia a la fatiga se calcularon los de mayor diámetro, por lo consiguiente se puede tomar la decisión de tomar los resultados conservadores de Von Mises.

En base a la experiencia y facilidad de fabricación se selecciona el diámetro para el eje 2 con FS de 2.5 y 19.05mm y para eje 3 con FS 1.8 y diámetro de 19.76mm por lo consiguiente se decide fabricarlos en la zona intermedia en la fracción en pulgadas y sería de 19.05mm (3/4”) ya que para el eje 3 quedaría definido dentro de la segunda mitad de resultados, es decir el diámetro mínimo y máximo fue de 12.8mm y 22.04mm, por lo que esta en zona segura.

Diseño de cuñas

Eje 2

El diámetro del eje donde se acopla el engrane es de 19.05mm (3/4”) y gira a 600 rpm y transmite un torque de 11.87 N-m mediante un engrane.

Usando como material acero AISI 1018 CD, con $\sigma_y = 220\text{MPa}$ (32 Kpsi) y un factor de seguridad de 3; ya que se requiere proteger las piezas.

En relación a la figura VI la fuerza F en la superficie del eje es:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{11.87\text{N-m}}{0.0095\text{ m}}$$

$$F = 1249\text{ N}$$

Por la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante es:

$$\frac{\tau_y}{n} = \frac{F}{t} \text{ de aquí que } l = \frac{Fn}{S_{synt}} = \frac{1249(3)}{110 \times 10^6 (0.0635)}$$

$$l = 5.36\text{mm}$$

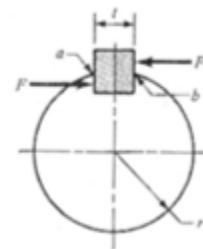


Figura 5 Diagrama de fuerzas en cuña de eje2

Se selecciona una chaveta de $w = 6.35\text{mm}$ (1/4”) con una profundidad de chaveteros de 3.1mm (1/8”). Se ha seleccionado esta configuración de cuñas debido a que se encuentran de manera comercial. Por lo tanto los engranes tendrán una cuña de $w = 1/4$ ”; $h = 1/8$ y la longitud de la cuña será pasante al piñón.

Eje 3

El diámetro del eje donde se acopla el engrane es de 19.05mm (3/4”) y gira a 200 rpm y transmite un torque de 35.6 N-m. por lo consiguiente de manera similar a eje 2 se obtiene:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{35.6N - m}{0.0095 m} = 3747 N$$

Por la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante es:

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl} \text{ de aquí que } l = \frac{Fn}{S_{sy}t} = \frac{3747(3)}{110 \times 10^6 (.00635)} \\ l = 16mm)$$

Nuevamente va a estar mu sobrada porque por necesidades del engrane va a estar mas larga.

Selección de cojinetes

La clasificación de la carga estática C o se expresa:

$$C_o = nW_o \quad \text{Donde} \\ n = \frac{F.S \text{ estático}}{W_o} \\ = \text{Carga estática equivalente en el cojinete.} \\ C_o = 1.2(431 N) = 537.2 N$$

La fuerza obtenida es menor que las fuerzas descritas en un catalogo de la SKF la cual proporciona la clasificación de carga estática para un cojinete de bolas de canal profundo de una fila. Asi mismo esta tabla proporciona las dimensiones generales del cojinete:

Eje 2 y 3

$$\text{Coj. 1} \rightarrow \phi_{int} = 17 mm \\ \text{Coj. 2} \rightarrow \phi_{int} = 17 mm \\ t = \frac{3}{8}'' = 10 mm$$

Con las dimensiones obtenidas de los ejes, engranes y baleros así como considerando un espacio interior más para la lubricación, se determinó las que la caja tenga las medidas nominales siguientes: 86mm x 135mm x 254 mm. En la figura V se ilustra el ensamble de los componentes del reductor.

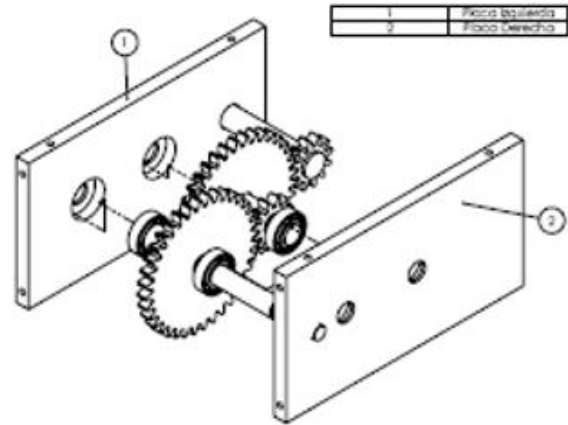


Figura 6 Vista parcial tridimensional del reductor.

Tratamientos térmicos

De la segunda ley de Fick la cual describe la difusión de los átomos

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (27)$$

Una solución que se aplica en los tratamientos térmicos de carburización es:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (28)$$

Considerando que los engranes tienen 0.18% de C y se pretende que a 1 mm de profundidad tengan 0.45% C, y que la carburización se llevará a 1273K de temperatura y en una atmosfera con un contenido de 1.2% C.

Sustituyendo los datos en ecuación 26 se obtiene que en un tiempo de 2.2 h se obtendrá el engrane con las características deseadas. Posteriormente se les deberá calentar a la temperatura de austenización de 840°C, templarlos en agua o aceite y aplicar el revenido a 300°C.

Conclusiones

Se ha diseñado un reductor de engranes de 1800 rpm a 200 rpm con aceros de bajo C AISI 1018 que se puede comprar en cualquier ciudad y se han propuesto los tratamientos térmicos de carburizado a los engranes para endurecerlos ya que están sometidos a desgaste.

Esta transmisión se puede hacer en cualquier taller de maquinas y herramientas con herramienta convencional o de CNC, por lo consiguiente resultará muy barato.

Este reductor servirá para una maquina de pruebas de abrasión en donde se requiere una velocidad de salida de 200 rpm

Si se utilizaran aceros de media aleación se puede obtener engranes mas esbeltos así como ejes mas compactos

Referencias

Tomasz Figlus, Andrzej Wilk, Application of fem method in reduction of gear transmission housing vibration, Journal of KONES powertrain and transport, vol 16, no.2 2009.

Vera Nikolic, Cemal Dolicanin y Dejan Dimitrijevic, Dynamic model for the stress and strain state analysis of a spur gear transmission, Journal of mechanical engineering 58(2012)1, 56-67.

AGMA standars, B89.

Shigley and Mitchell, Diseño en ingeniería mecánica, 4ª edición, Mc Graw Hill.

Budynas y Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica, 4ª edición, Mc Graw Hill.

Hamrock, Jacobsoy y Schmid, Elementos de maquinas, Mc Graw Hill.

Callister, Materials science and engineering, John Wiley and sons, second edition.

Estudio del engrosamiento de precipitados en un acero HK40 envejecido a 800 y 900 °C

ORTIZ-MARISCAL, Arturo*†, SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, LÓPEZ-HIRATA, Víctor, MARTINEZ-SANDOVAL, Uriel y ÁVILA-DÁVILA, Erika

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

El acero HK40 es una aleación que trabaja hasta 1100 °C [1]. Si este acero es expuesto a altas temperaturas, el proceso de disolución de los carburos primarios propicia la precipitación [2]. Con lo anterior, sus propiedades mecánicas cambian y el acero tiende a fallar [3]. La motivación de este trabajo es explicar la precipitación y el engrosamiento de los precipitados, así como el efecto sobre las propiedades mecánicas del acero HK40 envejecido a 800 y 900 °C. La microestructura del acero HK40 se caracterizó usando Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X. Las propiedades mecánicas de las muestras se caracterizaron por pruebas de dureza Rockwell C (HRC), microdureza Vickers y curvas de nanoindentación. El engrosamiento de precipitados reduce las propiedades mecánicas del material. Después de 300 h el engrosamiento de los precipitados reduce la dureza HRC y Vickers. Las curvas de nanoindentación muestran un endurecimiento de la matriz y los precipitados se suavizan por efecto del tiempo de envejecido.

Acero HK40, Nanoindentación, Precipitación, Engrosamiento.

Abstract

The HK40 steel is an alloy that works up to 1100 °C [1]. If this steel is exposed at high temperatures, the dissolution process in primary carbides promotes diffusion in matrix [2]. Therefore, its mechanical properties change and the steel fail [3]. The motivation of this research is assesses the precipitation and coarsening processes, as well as their effect on the mechanical properties of HK40 steel aged at 800 and 900 °C. The microstructure of the HK40 was characterized using Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction. The mechanical properties were characterized by Rockwell C Hardness tests, Vickers Microhardness and nanoindentation curves. The coarsening process reduces the mechanical properties in the material, after 300 h, the coarsening of the precipitates reduces the hardness of the material. Nanoindentation curves show matrix hardening and precipitates with less toughness by effect of aging time.

HK40 steel, Nanoindentation, Precipitation, Coarsening.

Citación: ORTIZ-MARISCAL, Arturo, SAUCEDO-MUÑOZ, Maribel, LÓPEZ-HIRATA, Víctor, MARTINEZ-SANDOVAL, Uriel y ÁVILA-DÁVILA, Erika. Estudio del engrosamiento de precipitados en un acero HK40 envejecido a 800 y 900 °C. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 209-214

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: arturoortizm@live.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la actualidad existen componentes que operan a altas temperaturas dentro de las industrias: química, petrolera, cementera y automotriz. Además de las altas temperaturas, el periodo de exposición a esas condiciones determina la vida útil del material en servicio. Una aleación convencional (aceros al carbono), no podría operar a altas temperaturas debido a que su microestructura no es la ideal para operar y el acero tiende a oxidarse. Por ello, a partir de los años 30's, se desarrollaron aleaciones de acero con el grado de inoxidable, siendo los aceros inoxidables ferríticos los primeros en descubrirse. Los aceros inoxidables austeníticos se descubrieron después de otras aleaciones y los investigadores prefirieron a esta clase de aceros por su alta pasividad y resistencia mecánica. Este tipo de aceros son austeníticos por su alto contenido de Ni; arriba de 15 %peso, y su pasividad es dotada por su contenido mayor a 13 %peso de Cr.

El acero HK40 es una aleación que recibe su nombre de la AISI. La H denota su resistencia a las temperaturas; Heat Resistant, la K el contenido de Cr con base en el diagrama ternario Fe-C-Cr y el 40 se refiere a la cantidad de carbono presente en la aleación, 0.40 %peso. Este acero trabaja en temperaturas de hasta 1100 °C y su resistencia mecánica le permite ser parte de componentes en hornos reformadores de gases, hornos cementeros, rodillos de transporte en procesos de colada continua y ser elementos refractarios para tratamientos térmicos.

La microestructura del acero HK40 es dendrítica; una matriz de austenita, rodeada con zonas interdendríticas de carburos primarios de la forma M₂₃C₆.

Cuando este acero es expuesto a altas temperaturas se presenta precipitación en la matriz lo cual le confiere mayor resistencia mecánica. Si esta exposición ocurre por largos periodos de tiempo, el acero se fragiliza y el componente en servicio falla.

El objetivo de este artículo es describir el proceso de engrosamiento de los precipitados en un acero HK40 expuesto a 800 y 900 °C y evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas.

Metodología a desarrollar

Materiales

El material utilizado para la evaluación del engrosamiento de precipitados son muestras de acero HK40 en estado de colada. La tabla 1 presenta la composición química de este material. Este acero fue seccionado en especímenes con dimensiones de 10 X 10 X 10 mm.

| Material | C | Cr | Ni | Si | Mn |
|----------|------|----|----|-----|-----|
| HK40 | 0.40 | 25 | 20 | 1.6 | 1.5 |

Tabla 1 Composición química (%peso) del acero HK40.

Las probetas se envejecieron térmicamente a 800 y 900 °C por tiempos que van desde 50 a 1500 h. La microestructura se analizó por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX). Las propiedades mecánicas se caracterizaron usando dureza HRC, microdureza Vickers y curvas de nanoindentación para conocer la tenacidad de microconstituyentes.

Resultados

Microestructura de colada y de envejecido.

La microestructura de colada; ver figura 1, consiste en una matriz austenítica (dendritas) rodeada de islas de carburos primarios de la forma M23C6.

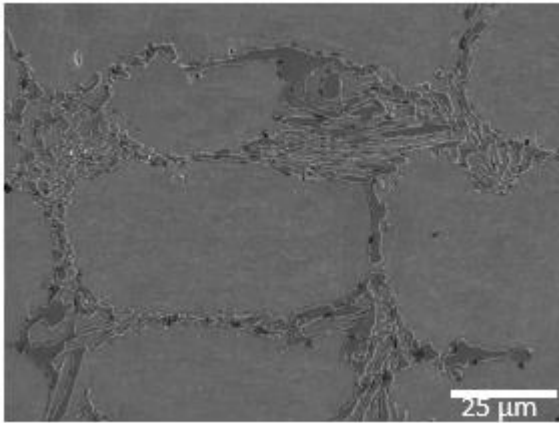


Figura 1 Microestructura de colada del acero HK40 a 1000X por MEB.

Al exponerse al tratamiento térmico de envejecido a ambas temperaturas, la matriz presenta precipitación en formas de cubos y placas; ver figura 2a y 2b.

La precipitación en el acero HK40 se debe a la disolución de los carburos primarios. Esta disolución ocurre al desestabilizarse el C y el Cr contenido en estos microconstituyentes. El primer elemento en difundir hacia la matriz es el C, al sobresaturarse esa región el Cr viaja de la zona interdendrítica hacia el centro de la matriz para buscar zonas ricas en C y formar precipitados de la forma M23C6. Los precipitados formados tienen una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, lo que hace de ellos coherentes con la matriz. Esta coherencia explica el por qué los precipitados presentan las formas antes descritas [6-7].

A 800 °C; figura 2a, se observan zonas sin precipitados en la región central de la matriz. A 900 °C; estas zonas se reducen.

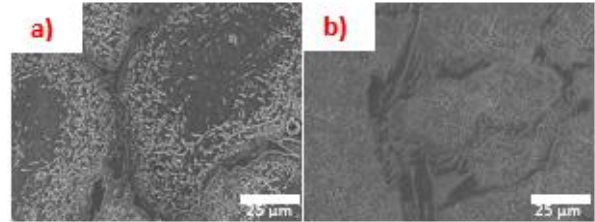


Figura 2 Microestructura del acero HK40 envejecida: a) 800 °C y b) 900 °C por 50 h a 1000X de MEB.

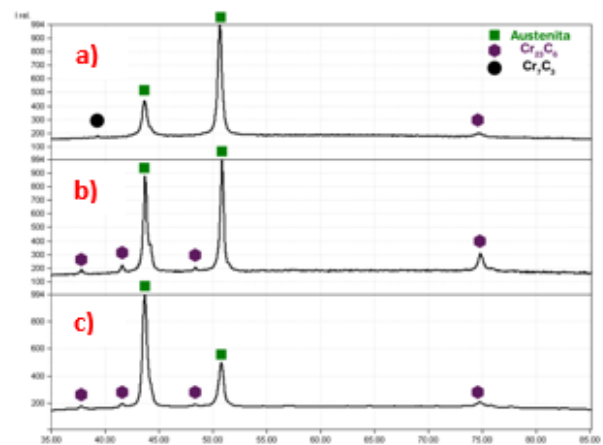


Figura 3 Patrón de difracción para las muestras de: a) Colada, b) 800°C a 1500 h y c) 900 °C a 1500 h.

Difracción de Rayos X

Se realizó difracción de Rayos X con longitud de onda Cr K α para identificar las fases presentes en el material. La figura 3 muestra los patrones de difracción obtenidos por esta técnica. En la figura 3a se muestra la presencia de Austenita, carburos M23C6 y carburos M7C3 en la microestructura de colada. La fase M7C3 presente es producto del enfriamiento en la colada, lo cual provocó esta fase metaestable. A 800 °C la fase M7C3 ya no está presente y solamente encontramos austenita y carburos M23C6, ver figura 3b.

Se observa en el primer pico característico de la austenita un incremento de intensidad, causa de la difusión de elementos y formación de precipitados sobre la matriz que la deforman. A 900 °C, figura 3c, la presencia de precipitados es mayor y por ende la matriz presenta un incremento mayor de intensidad en el primer pico característico de la austenita.

Engrosamiento de precipitados

En este trabajo se midieron los radios de los precipitados en todas las muestras envejecidas y los resultados se presentan en la figura 4.

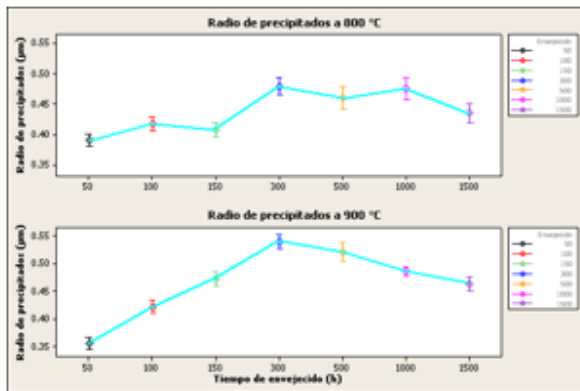


Figura 4 Radio de precipitados de muestras envejecidas: a) 800 y b) 900 °C de 50-1500 h.

En las muestras a 800 °C se observa un ligero incremento en el radio de los precipitados hasta 300 h; después de este tiempo de envejecido se reduce su radio; el rango del radio para esta temperatura es de 0.39-0.48 µm. A 900 °C el incremento del radio es más notorio, presentando variaciones mayores de radio que las muestras a 800 °C; de 0.36-0.52 µm. Después de 300 h se presenta también una caída del radio de los precipitados, pero a esta temperatura el cambio es más notorio. En ambos casos, el incremento del tamaño de los precipitados es un efecto del proceso de engrosamiento de los precipitados.

Por medio de la Teoría LSW (Lifshitz-Slyozov-Wagner) se calculó la densidad de los precipitados y la cinética de precipitación.

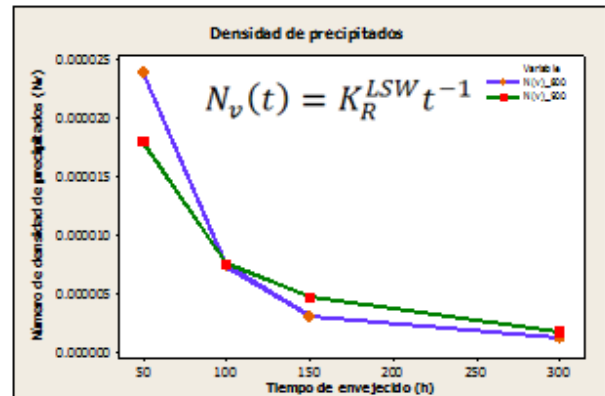


Figura 5 Densidad de precipitados a 800 y 900 °C.

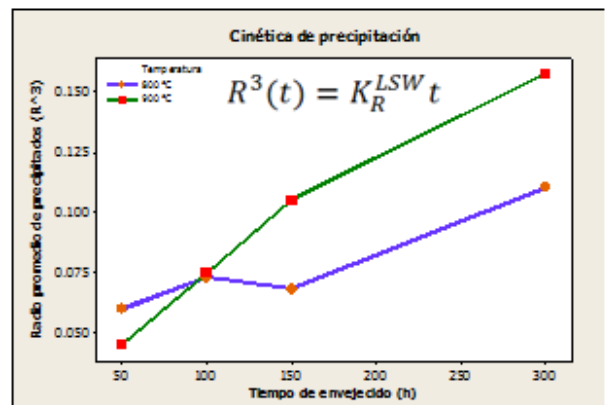


Figura 6 Cinética de precipitación a 800 y 900 °C.

En la figura 5 se muestra el cambio de densidad de precipitación en las muestras a 800 °C y 900 °C. A 50 h, a 800 °C se presenta la mayor densidad de precipitados y a 100 h la densidad en ambas temperaturas es la misma.

En las muestras a 900 °C, a 150 h se presenta una mayor densidad; lo cual es producto de la temperatura que permite mayor velocidad de difusión y mayor presencia de lugares ideales para la precipitación. A 300 h esta velocidad hace que algunos precipitados se disuelvan y engrosen a otros lo cual disminuye la densidad y la iguala con la densidad de las muestras a 800 °C.

La cinética de precipitación; figura 6, indica que a 900 °C se da la mayor velocidad de engrosamiento.

Lo cual confirma el por qué a 900 °C se observan tantos cambios en la densidad de los precipitados. Por ser menor temperatura, se observa una menor pendiente a 800 °C, lo cual sugiere que el engrosamiento se da a menor velocidad.

Lo anterior explica el por qué a 800 °C se observa ligeros cambios en el radio de los precipitados.

Pruebas mecánicas

En la figura 7 se presenta la Dureza HRC obtenida en las muestras de 800 °C y 900 °C. Se observa que a 800 °C la dureza alcanza un máximo y se mantiene constante debido al poco cambio en el radio de los precipitados y su distribución casi constante. A 900 °C la dureza presenta un máximo a 300 h, lo cual coincide con los cambios presentes en la cinética de precipitación.

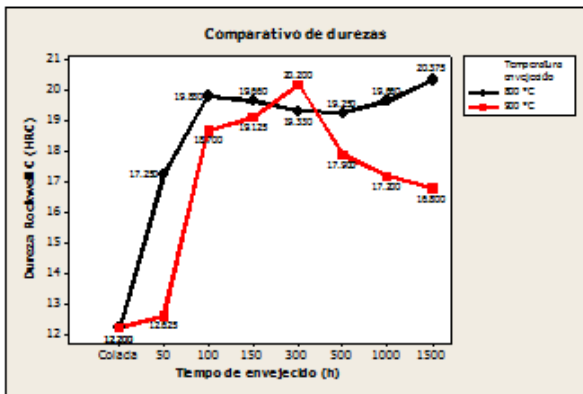


Figura 7 Dureza HRC de las muestras envejecidas a 800 °C y 900 °C.

La figura 8 muestra los resultados de la microdureza Vickers obtenida sobre la matriz.

La matriz presenta el mismo comportamiento por efecto de la distribución y la cinética de los precipitados.

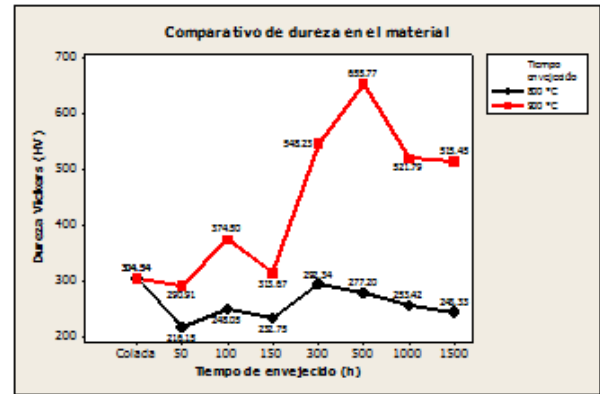


Figura 8 Microdureza Vickers en la matriz de las muestras envejecidas.

Las curvas de nanoindentación se obtuvieron analizando los carburos para observar su evolución dentro del proceso de engrosamiento. En la figura 9a, los carburos analizados a 800 °C presentan un ligero cambio en su tenacidad (área bajo la curva) hasta 150 h de envejecido y a 1500 h los carburos regresan a su tenacidad inicial.

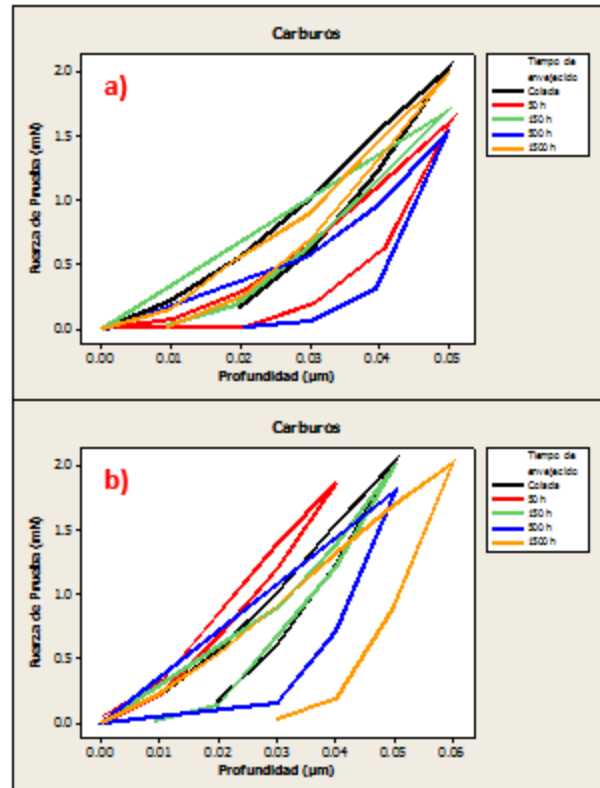


Figura 9 Curvas de tenacidad en carburos presentes en muestras envejecidas a: a) 800 y b) 900 °C.

Las curvas en la figura 9b muestran un claro aumento de tenacidad de 50 h a 1500 h, lo cual se atribuye al cambio de composición química debido al engrosamiento de precipitados.

Conclusiones

El proceso de engrosamiento de precipitados ocurrió entre 50 y 300 h. Siendo 900 °C la temperatura en la cual el proceso se dio más rápidamente.

La densidad de precipitación a 50 h es mayor a 800 °C debido a que su velocidad de engrosamiento es menor y esto permite mayor presencia de precipitados en la matriz.

Debido a que la velocidad de engrosamiento es mayor a 900 °C, el proceso de engrosamiento se revierte a 300 h de envejecido igualando la densidad de precipitación de las muestras a 800 °C.

La dureza del material; HRC y Vickers, incrementa a la presencia de precipitados y disminuye por efecto del proceso de engrosamiento.

La tenacidad de los carburos varía por efecto de la cinética de precipitación, haciendo a los precipitados más tenaces y por ello, después de 300 h la dureza del material cae.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo recibido de SIP-IPN y Conacyt 220929.

Referencias

Farrar, J. (2004). *The alloy tree: A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*. New York: CRC.

Beckitt, F., & Clark, B. (1967). The shape and mechanism of formation of M23C6 carbides in austenite. *Acta Metallurgica*, 15, 113-129.

Haro, S., López, D., & Velasco, A. (2000). Microstructural factors that determine the weldability of a high Cr- high Si HK40 alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 66, 90-96.

ASM Handbook: Properties and Selection of iron steels and high performance alloys (Vol. 1). (1990). New York: ASM International.

Whittaker, M., Wilshire, B., & Brear, J. (2013). Creep fracture of the centrifugally-cast superaustenitic steels, HK40 and HP40. *Materials Science and Engineering, A(580)*, 391-396.

Kostorz, G. (2001). *Phase Transformations in materials* (Vol. 1). Berlin: Wiley.

Kegg, G., & Silcock, J. (1972). The shape of M23C6 particles. *Scripta Metallurgica*, 6, 1083-1086.

Hong, H., Rho, B., & Nam, W. (2001). Correlation of the M23C6 precipitation morphology with boundary characteristics in stainless steel. *Materials Science and Engineering, A(318)*, 285-295.

Control de movimiento de los divisores de salida de un separador tipo espiral empleando conexión directa y remota

ESTRADA-RUIZ, Rosa*†, FLORES-CAMPOS, Rubén, RAMOS-CANO, Diego y VELARDE-SÁNCHEZ, Emma

Recibido 5 de Abril, 2015; Aceptado 24 de Junio, 2015

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control de movimiento bajo conexión directa y remota de las canaletas de salida de un separador de mineral tipo espiral. Este sistema de separación aprovecha las diferencias de densidades de los minerales para separar el mineral de interés del que se considera como desperdicio. Dependiendo de la concentración de cada fracción es necesario mover las canaletas para realizar una separación efectiva y asegurar la calidad en el producto final. Este cambio de posición es realizado manualmente por lo operadores. Para realizar el control se utilizó el microcontrolador ATMEGA328P-PU de la tarjeta Arduino Uno, dispositivo Bluetooth RN-41 FLY-477, servomotores, PC y una tableta electrónica con sistema Android. Para realizar las pruebas experimentales se diseñó y construyó un separador tipo espiral a nivel laboratorio y se utilizó mineral de carbón.

Sistema de control directo, Sistema de control remoto, Separadores tipo Espirales, Arduino, carbón mineral

Abstract

This work present the development of motion control system under direct connection and remote output splitters mineral spiral separator. This separation system, take advantage of the minerals density diference to separate the valuable mineral of that considered as waste. Depending on the concentration of each fraction is necessary to move the splitters for effective separation, and ensure the quality of the final product. This change of position is performance manually by operators. Arduino microcontroller ATMEGA328P-PU card, Bluetooth device RN-41 FLY477, servomotors, PC and a Tablet with Android system were used for motion control. To permorm, experimental tests it was designed and and builtd a laboratory spiral system separator and used coal mineral.

Title

Direct control system, Remote contro system, Spiral separators, Arduino, Coal mineral.

Citación: ESTRADA-RUIZ, Rosa, FLORES-CAMPOS, Rubén, RAMOS-CANO, Diego y VELARDE-SÁNCHEZ, Emma. Control de movimiento de los divisores de salida de un separador tipo espiral empleando conexión directa y remota. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2015, 2-3: 215-223

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: rhestrada@itsaltillo.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En la industria del procesamiento de mineral y la de carbón se utiliza una variedad de operaciones de separación para el beneficio de minerales, estos incluyen los ciclones para medios densos, separadores por gravedad específica, clasificadores Reflux que actualmente se emplean extensamente en las plantas de preparación de carbón (Osborne, 2013), celdas de flotación y espirales. Estos últimos también han sido empleador para la separación de mineral de óxidos de hierro y minerales pesados (Bazin y col., 2014) Lo ideal sería que el rendimiento de estas unidades se mida con regularidad para asegurarse que están operando de forma eficiente y así predecir la pureza y recuperación del producto final cuando varía el mineral en la alimentación (Iveson y col., 2015).

Los separadores tipo espiral, introducidos por Humphreys en 1940 (Thompson y Welker, 1990), han resultado ser muy eficientes, de uso simple y que no requieren reactivos químicos, lo cual resulta beneficioso desde el punto de vista económico. Estos aparatos se usan comúnmente en el procesamiento de minerales y en las plantas lavadoras de carbón bajo diferentes circuitos de configuración. Estos sistemas son amigables con el medio ambiente, robustos, compactos y económicos. La mayoría de las publicaciones acerca de los espirales se concentran en su diseño y operación. Doheim y col., 2013, reportan que es claro que la mayoría de los diseños de los espirales evolucionaron a través de análisis empíricos. Muchos modelos empíricos, los cuales se basaron en datos experimentales fueron establecidos. La desventaja de estos modelos es que si se cambia el tipo de espiral, los minerales o el rango de tamaños de las partículas se deben generar nuevos datos experimentales para modificar los coeficientes o incluso cambiar el modelo matemático en sí.

Actualmente se han desarrollado investigaciones en cuestión de modelación matemática de las características de separación de los espirales tomando en consideración la geometría del aparato y sus canales, movimiento del fluido y las fuerzas que actúan e influyen en el movimiento de las partículas (Das y col., 2007)

Mishra y Tripathy, 2010, desarrollaron una herramienta de simulación basada en el método de elemento discreto (DEM) para entender el proceso de separación en el espiral y utilizarlo para el propósito del diseño. Ellos reportaron resultados preliminares de la simulación así como la posición de los divisores (canaletas) para obtener la mejor eficiencia en la separación.

El movimiento de los divisores en las salidas de los espirales es llevado a cabo por los operadores en forma manual. Una vez que se ha realizado el análisis químico y mineralógico del material de entrada al proceso se notifica al operador si hay cambio de mineral y si hay que realizar un cambio que se realiza de forma manual. Es común que esto se lleve a cabo según sea el yacimiento de donde proviene el mineral o bien según la experiencia que tenga el operador. Sin embargo, estos cambios en las canaletas no se realizan de forma inmediata y por consecuencia se tenga durante cierto tiempo una deficiente separación y por tanto una baja calidad en el producto de salida. En este trabajo se propone el control de movimiento de los divisores mediante un circuito electrónico que proporcione la señal a unos servomotores para realizar el cambio según lo quiera el operador. Se propone un control mediante conexión directa y otro de forma remota mediante el uso de tabletas electrónicas o teléfonos móviles con sistema Android.

Antecedentes

Separadores tipo espiral

Un separador tipo espiral consiste de un canal abierto que se envuelve alrededor de la columna central de soporte. El número de vueltas (n) varía de 3 a 10. Los diseños más modernos (Davis y col., 1991, Holland-Batt, 1992) tienen de 5 a 7. La anchura usualmente varía de 0.25 a 0.35 m. Los parámetros de diseño del separador tipo espiral puede ser listado como: paso de la hélice (u), el perfil de la forma, longitud (L) y el radio interior y exterior (ri,ro) que gobiernan la curvatura (\square) del canal. Los parámetros se muestran en la Figura 1.

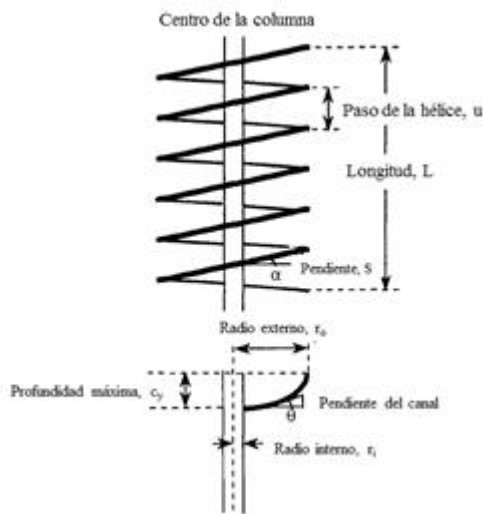


Figura 1 Dibujo esquemático de un separador tipo espiral (Kapur y Meloy, 1998).

La modelación de la separación de las partículas a través de un espiral es un proceso complejo que requiere el conocimiento del comportamiento de las partículas bajo diferentes regímenes. En general, el movimiento de las partículas depende de sus propiedades (tamaño, densidad y forma), las condiciones de operación (densidad de la pulpa y velocidad de flujo) y el diseño del espiral (inclinación, forma del canal, inclinación y número de vueltas).

La separación es llevada a cabo por la acción combinada de la estratificación, dimensión de la capa, fuerzas gravitacionales y centrífugas, que ocurren cuando la pulpa mineral, generalmente más fina que 3mm de tamaño de partícula, fluye a través del canal helicoidal. Cuando la pulpa desciende, cada elemento está sujeto a fuerzas centrífugas que causa que el agua y las partículas ligeras suspendidas se muevan hacia el área externa del aparato hasta que la fuerza centrífuga y gravitacional que se tiene en el descenso se encuentre en equilibrio. La velocidad de las partículas disminuye con la profundidad de la pulpa. La capa del fondo que es retardada por la fricción con la superficie tiene una fuerza centrífuga menor y por tanto sigue el perfil del canal hacia el centro, por tanto el mineral más pesado se transporta hacia la parte interior del espiral formando una capa inferior por estratificación y tamaño de película del mineral. La masa superior del flujo de agua haciendo simultáneamente transportando las partículas más ligeras. El mecanismo de separación puede ser representado conceptualmente dividiendo el canal en diferentes zonas que son gobernadas por diferentes aspectos del flujo del fluido, Figura 2.

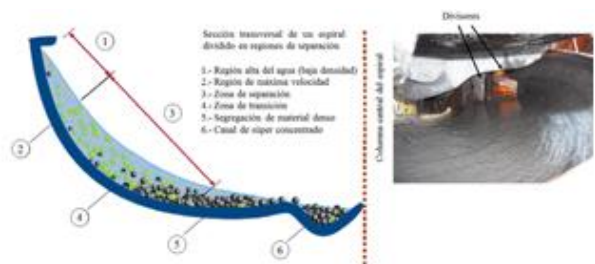


Figura 2 Separación por zonas del espiral (Doheim y col., 2013) e imagen de los divisores de salida.

El grado (pureza) del concentrado es regulado por la zona interior por el componente de elevación de la circulación secundaria, que actúa más severamente sobre las partículas finas de menor densidad.

La recuperación potencia es controlada en la zona central por los índices de sedimentación y las condiciones de depositación que prevalecen, las cuales dependen de la componente de la velocidad primaria. Una cama de partículas puede se puede formar en el canal debido a la acumulación de partículas sedimentadas aunque en condiciones normales la profundidad de ésta no es excesiva. Conforme esta cama de partículas se incrementa en espesor nuevas fuerzas son generadas y esto puede modificar el comportamiento del flujo. Cuando hay modificaciones en este comportamiento es necesario llevar a cabo el movimiento de los divisores para realizar una separación efectiva de las partículas de interés.

Aparato y metodología experimental

Aparato experimental

Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en un sistema de separación tipo espiral, Figura 3, el cual consiste de un sistema mezclador, bomba peristáltica, un sistema de separación en espiral y sistema de control de movimiento de las canaletas. El separador tipo espiral fue diseñado bajo las siguientes especificaciones: altura total tomando en cuenta las canaletas 1.2 m, diámetro externo del espiral 40 cm, distancia entre hélices 24 cm, oblicuidad transversal 9° y altura de pared de las hélices 10 cm. Los ductos de salida fueron diseñados con dimensiones 17 x 10 x 10 cm con una separación de 3 cm entre ellos.

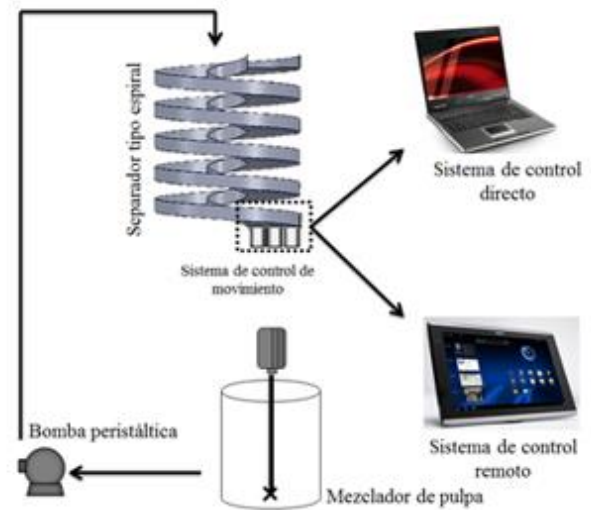


Figura 3 Sistema experimental.

Se utilizó mineral carbón para realizar las pruebas. En la salida del aparato se instaló un sistema de control de movimiento de las canaletas que fue realizado mediante dos métodos: bajo conexión directa y mediante un sistema remoto.

Conexión directa de control mediante USB

Para realizar el sistema de control de movimiento de las canaletas mediante conexión USB se realizó mediante de la tarjeta con el procesador ATMEGA328P-PU de Arduino Uno, este fue conectado al puerto USB de una Laptop para transmisión de datos y alimentación. Las salidas de control PWM se conectaron a las terminales de control de los servomotores, la salida para la alimentación de estos se conectaron a la fuente de 5V y las terminales de tierra a las correspondientes de la tarjeta, tal como se muestra en la Figura 4.

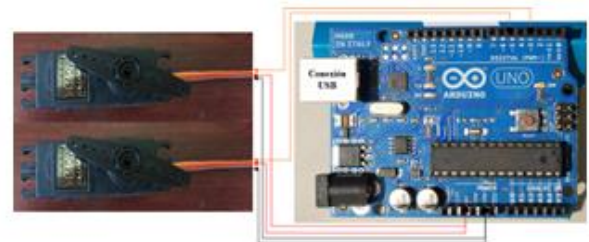


Figura 4 Representación del sistema de control de canaletas con conexión directa a Laptop.

Conexión remota de control mediante Bluetooth

Para realizar la conexión se requirió un adaptador inalámbrico Bluetooth RN-41 FLY-477 cuya conexión a las terminales tx y rx de la tarjeta Arduino para enviar y recibir los datos, como se muestra en la Figura 5. Para realizar la comunicación es necesario utilizar la aplicación AMARINO, que es una aplicación para Android, y una librería Arduino.

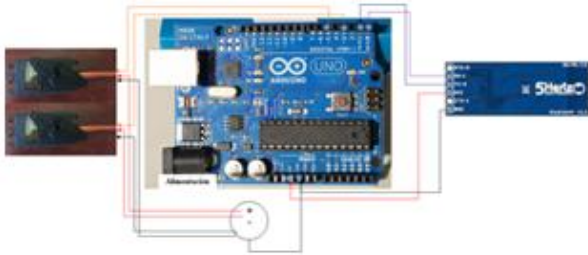


Figura 5 Sistema de control de canaletas con conexión remota empleando Bluetooth.

Resultados

Para realizar el movimiento de los divisores se consideró la información provista en planta la cual indicaba dos opciones de toma de decisión para realizar el cambio de posición. La primera de ellas considera las densidades del mineral según el yacimiento de procedencia, Figura 6(a), el cual se calcula en el laboratorio de análisis químico. Para ello es necesario calcular el contenido de ceniza del mineral ya que dependiendo de su concentración variará la densidad del mineral, ésta se define como la parte no combustible del carbón mineral (b) y que es decisivo en la calidad del producto final (c). A partir de esta variación se modifican las posiciones de los divisores (d) para realizar la separación del mineral (e).

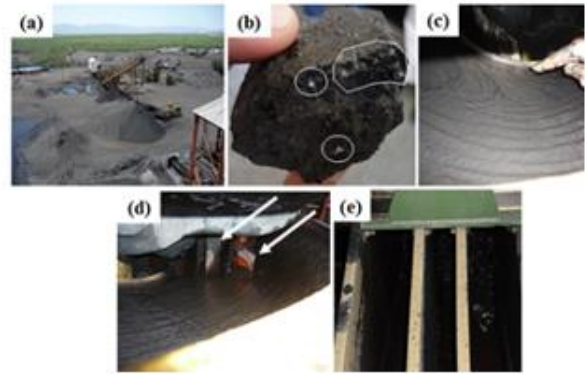


Figura 6 Consideraciones para la separación del mineral

Se realizaron pruebas de separación de mineral en el espiral de laboratorio (Figura 8) en donde el movimiento de los divisores se programó en conexión directa (alámbrica) diseñando una interfaz gráfica en Matlab, se programó la alta de los servomotores, la comunicación con la tarjeta Arduino mediante el puerto indicado.

Las pantallas de selección de tipo de procedencia donde se pre establece el número de grados a mover según sea el contenido de ceniza que reporte análisis químico. Por otra parte también se programó otra opción de movimiento en donde se establece únicamente el grado de inclinación que el usuario desee mover las canaletas, de tal modo que se eviten valores pre establecidos.

En el diagrama de flujo de la Figura 7 se muestra la secuencia de programación de la tarjeta Arduino para el movimiento de los servomotores estableciendo la comunicación con Matlab.

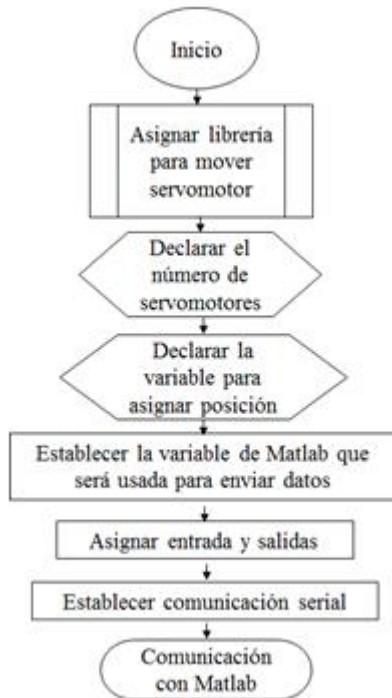


Figura 7 Secuencia de la programación del microcontrolador ATMEGA328P-PU de la tarjeta Arduino para el movimiento de los servomotores bajo instrucciones de Matlab.

El movimiento de los divisores mediante la opción remota fue realizada estableciendo la conexión de la tarjeta Arduino con el módulo de comunicación Bluetooth, posteriormente se sincroniza con la Tableta electrónica con sistema Android mediante el programa AMARINO y se establece la Tablet en modo de monitor para poder enviar datos al micro procesador a través del módulo y así habilitar las salidas e indicar los grados que se desea mover los divisores.



Figura 8 Esquema de experimentación, muestro y control.

El método para establecer la comunicación con la Tablet y el Arduino fue el presentado por Kaufman y Buechley (2010), que permite comunicar los sistemas Android con los microcontroladores de Arduino. Este consiste de dos componentes: una aplicación Android llamada AMARINO y una librería de Arduino llamada MeetAndroid. La estructura de comunicación entre los dispositivos se muestra en la Figura 9, en donde se muestra la interacción que se forma entre el dispositivo móvil usando la aplicación Android a través de la librería AMARINO y la de la tarjeta, en ésta última se tienen salidas disponibles para sensores, dispositivos tangibles y otras más que se encuentran disponibles.

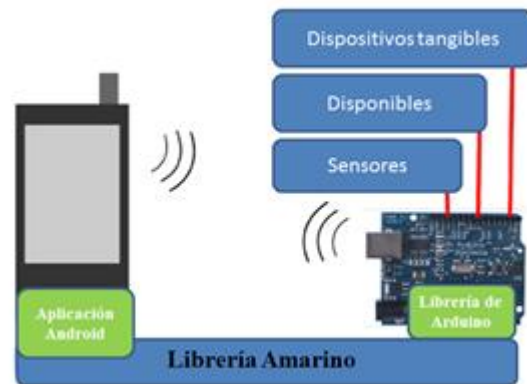


Figura 9 Esquema de interacción entre el dispositivo móvil y la tarjeta (Arduino Kaufman y Buechley, 2010).

La aplicación AMARINO envía datos desde los dispositivos móviles que tengan el sistema Android empleando una interfaz gráfica que permite al usuario seleccionar eventos incorporados de tabletas o teléfonos para enviarlos a un Arduino específico mediante el manejo de conexiones Bluetooth.

En la programación en Arduino, la librería MeetAndroid se asocia las funciones de la tarjeta con eventos de Android y así extraer datos ligados a esos eventos. Cuando se inicia la aplicación se presenta la opción de administrador de Bluetooth que habilita el manejo de éstos en los dispositivos Arduino dando de alta la tarjeta para establecer comunicación con el dispositivo móvil. Cuando se acciona la opción de monitoreo se despliega el flujo de datos que será enviado y recibido por AMARINO. Esta ventana también permite enviar arbitrariamente caracteres para activar al Arduino. Es posible personalizar el comportamiento de la librería para cambiar la velocidad con la que los datos pueden ser enviados y escoger si las conexiones entre la Tableta (en este caso) y el Bluetooth del Arduino sean permanente (para aplicaciones con un alto flujo de datos) o intermitente (para enviar datos ocasionalmente). El administrador de eventos es el componente central de la interface Amarino. Este permite crear colecciones de eventos que se desea que sean enviados a un Arduino en particular que contiene el módulo Bluetooth.

En la tarjeta Arduino es necesario realizar una programación para habilitar la comunicación y realizar las acciones. Se debe incluir la librería para controlar el servomotor, declarar las variables, habilitar las salidas, establecer una posición inicial, establecer la frecuencia de transferencia de datos, declarar las variables para recibir los valores para mover los servomotores en posiciones pre establecido en las direcciones asignadas.

Posteriormente se habilita la aplicación AMARINO en la Tableta con la opción de monitoreo, de modo que se enlaza por Bluetooth con Arduino y poder enviar las opciones de movimiento de los divisores.

Una vez construidos los sistemas de control se instalaron en el espiral de laboratorio, se realizaron diferentes pruebas en las que se modificaron las posiciones de los divisores. En La Figura 10 se muestran los resultados de la separación del mineral cuando se modifica la posición de las canaletas en 90° en donde se aprecian las micrografías del mineral en la parte interna, media y externa del espiral, mostrando la diferencia en tamaños de partícula así como la textura del mineral. En este caso las partículas más gruesas se recuperan en la parte interna y las más finas en la parte externa. Cuando se modifica la posición a 135° se puede observar que no hay una separación eficiente de partículas debido a que las canaletas dirigen el mineral grueso a las secciones por lo que en la imagen se aprecia una mezcla de tamaños. Al mover las canaletas a 180° se obstruyen parcialmente las salidas ocasionando un mezclado homogéneo antes de que el material pase a los contenedores y por tanto las imágenes muestran una textura homogénea en las tres secciones.

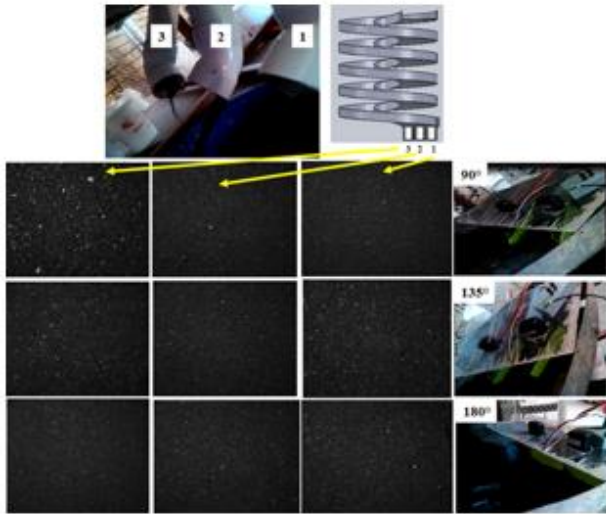


Figura 10 Micrografías del mineral separado mediante la modificación de posición de las canaletas a 90, 135 y 180°.

Conclusiones

Es posible controlar los divisores de salida de los separadores tipo espiral haciendo uso del microcontrolador ATMEGA328P-PU de la tarjeta Arduino Uno mediante la conexión directa a una computadora haciendo uso de una interfaz gráfica para enviar y recibir datos para controlar los servomotores. Además fue posible realizar este control de forma remota empleando el mismo microcontrolador, un dispositivo Bluetooth RN-41 FLY-477 y una Tableta electrónica con sistema Android.

Para realizar el control de forma remota fue necesario emplear las librerías AMARINO (Kaufman y Buechley, 2010) en la Tableta y Meetarduino en la programación del microprocesador. Si bien este control tiene un alcance de 15 metros es posible instalar repetidores para ampliar el rango.

Se realizó el control de movimiento tomando en consideración las características de planta que son el tener en cuenta el yacimiento de procedencia del mineral, contenido de ceniza y también la interacción directa con el usuario.

Como trabajo futuro se pretende realizar el control mediante red wifi y mediante mensajería 3G.

Referencias

Bazin C., Sadeghi M., Bourassa M., Roy P., Lavoie F., Cataford D, Rochefort C., Gosselin C. (2014). Size recovery curves of minerals in industrial spirals for processing iron oxide ores. *Miner. Eng.* Vol. 65, pp. 115-123.

Davies P.O.J., Goodman R.H., Deschamps J.A. (1991). Recent development in spiral design, construction and application. *J. Minerals Eng.* Vol. 4 (3-4), pp. 437-456.

Das S.K., Godiwalla K.M., Lopamudra Panda, Bhattacharya K.K., Ratnakar Singh, Mehrotra S.P. (2007). Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral. *Miner. Process.* Vol. 84, pp. 118-132.

Doheim M.A., Abdel Gawad A.F., Mahran G.M.A., Abu-Ali M.H., Rizk A.M. (2013). Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators: Part I. Low solids concentration (0.3% & 3% solids). *Applied Mathematical Modelling.* Vol. 37, pp. 198-215.

Holland-Batt A.B. (1992). A study of the potential for improved separation of fine particles by use of rotating spirals. *J. Minerals Eng.* Vol. 5 (10-12), pp. 1099-1112.

Iveson S.M., Hunter D.M., Galvin K.P. (2015). A water-based method for measuring density-based partition curves of separators used in coal and mineral processing. *Miner. Eng.* Vol. 79, pp. 196-211.

Kapur P.C., Meloy T.P. (1998). Spiral observed. *Int. J. Miner. Process.* Vol. 53, pp. 15-28.

Kaufmann, B., Buechley, L. 2010. Amarino: A Toolkit for the Rapid Prototyping of Mobile. Ubiquitous Computing. MobileHCI '10 Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services. Pp. 291-298.

Mishra B.K., Tripathy A. (2010). A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM. Int. J. Miner. Process. Vol. 94 (3-4), pp. 192–195.

Osborne, D. (Ed.), 2013. The Coal Handbook, Towards Cleaner Production Volume 1: Coal Production. Cambridge, Woodhead. Pp. 263–300.

Thompson, J.V., Welker, M., (1990). The Humphries Companies: Development and Application of Humphreys Spiral Concentrator. Skillings Mining Review, Feb. Vol. 24, pp. 4–15.

Instrucciones para Autores

A. Envío de artículos con las áreas de Aplicaciones de la Ingeniería.

B. La edición del artículo debe cumplir las siguientes características:

- Redactados en español o en inglés (preferentemente). Sin embargo, es obligatorio presentar el título y el resumen en ambos idiomas, así como las palabras clave.
- Tipografía de texto en Time New Roman #12 (en títulos- Negritas) y con cursiva (subtítulos- Negritas) #12 (en texto) y # 9 (en citas al pie de página), justificado en formato Word. Con Márgenes Estándar y espaciado sencillo.
- Usar tipografía Calibre Math (en ecuaciones), con numeración subsecuente y alineación derecha: Ejemplo;

$$\sigma \in \sum: H\sigma = \cap_{s < \sigma} Hs$$

(1)

- Comenzar con una introducción que explique el tema y terminar con una sección de conclusiones.
- Los artículos son revisados por los miembros del Comité Editorial y por dos dictaminadores anónimos. El dictamen será inapelable en todos los casos. Una vez notificada la aceptación o rechazo de un trabajo, su aceptación final estará condicionada al cumplimiento de las modificaciones de estilo, forma y contenido que el editor haya comunicado a los autores. Los autores son responsables del contenido del trabajo y el correcto uso de las referencias que en ellos se citen. La revista se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los textos a nuestra política editorial.

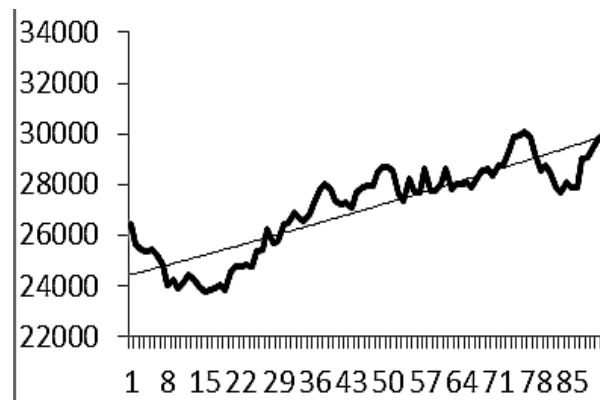
C. Los artículos pueden ser elaborados por cuenta propia o patrocinados por instituciones educativas ó empresariales. El proceso de evaluación del manuscrito no comprenderá más de veinte días hábiles a partir de la fecha de su recepción.

D. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de selección sea anónimo.

E. Los cuadros, gráficos y figuras de apoyo deberán cumplir lo siguiente:

- Deberán explicarse por sí mismos (sin necesidad de recurrir al texto para su comprensión), sin incluir abreviaturas, indicando claramente el título y fuente de consulta con referencia abajo con alineación izquierda en tipografía número 9 con negritas.

- Todo el material de apoyo será en escala de grises y con tamaño máximo de 8cm de anchura por 23cm de altura o menos dimensión, además de contener todo el contenido editable
- Las tablas deberán ser simples y exponer información relevante. Prototipo;



Gráfica 1. Tendencia determinista versus estocástica

F. Las referencias bibliográficas se incorporarán al final del documento con estilo APA.

La lista de referencias bibliográficas debe corresponder con las citas en el documento.

G. Las notas a pie de página, que deberán ser usadas sólo excepcionalmente para proveer información esencial.

H. Una vez aceptado el artículo en su versión final, la revista enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN-Bolivia únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del artículo. El autor tendrá un plazo máximo de 10 días naturales para dicha revisión. De otra forma, se considera que el (los) autor(es) está(n) de acuerdo con las modificaciones hechas.

I. Anexar los Formatos de Originalidad y Autorización, con identificación del Artículo, autor (s) y firma autógrafa, de esta manera se entiende que dicho artículo no está postulado para publicación simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales.

Formato de Originalidad



Sucre, Chuquisaca a ____ de ____ del 20____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

Firma (Signature):

Nombre (Name)

Formato de Autorización



Sucre, Chuquisaca a ____ de ____ del 20____

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN-Bolivia a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN-Bolivia to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

Firma (Signature)

Nombre (Name)

ISSN-2410-3454



www.ecorfan.org