

Guía de Diseño Para Calcular el Desgaste Abrasivo Entre Componentes no Lubricados

P. Pérez-Oviedo¹, J. Torre-Nieto²

Resumen— El objetivo de este trabajo es proponer una guía de diseño para calcular el desgaste abrasivo entre componentes metálicos no lubricados.

Esta guía de diseño se basa en una revisión a la bibliografía existente en el Estado del Arte y busca proveer al diseñador un criterio metódico y práctico para identificar el escenario de desgaste al que se enfrenta y proveer una serie de ecuaciones ordenadas (basadas en la ecuación de Archard) que le permitirán analizar el escenario observado y planear así los ciclos de mantenimiento correctivo necesarios.

Temas claves — Abrasión, Archard, Desgaste, Guía, Tribología.

Abstract— The objective of this article is to present a design guide to calculate the abrasive wearing between two no lubricated metallic components. This design guide is based on a literature review of the State of the Art. The wear design guide will provide a quick direction in how to identify and characterize wearing scenarios. Additionally, a set of equations (based on Archard's equation) are included to represent the wear phenomenon, this to plan the maintenance cycles.

Keywords— Abrasive, Archard, Guide, Tribology, Wear.

I. INTRODUCCIÓN

La naturaleza de un producto, al igual que la vida de un ser humano, cuenta con un tiempo determinado para cumplir su ciclo de vida. En el medio ambiente los diferentes materiales sufren transformaciones incluyendo el deterioro a través del tiempo, dicho deterioro puede ser causado por distintos factores según la aplicación del componente a evaluar.

El tiempo óptimo para reemplazar componentes en las diferentes industrias juega un papel importante en la economía **del negocio**, ya que si se reemplaza de forma prematura, la industria realizará un gasto mayor que al pasar de los años incrementará los costos de producción u

operación. El caso opuesto es mantener un componente por un periodo de tiempo superior al óptimo, poniendo riesgo la calidad y rendimiento de la parte así como la integridad del medio en el que realice el trabajo el componente desgastado. En ambos casos ya mencionados la industria corre un alto riesgo de tener pérdidas económicas; motivo por el cual temas como el desgaste y la corrosión atraen la atención de los ingenieros en todas partes del mundo y desde fechas muy antiguas; nuestros antepasados comenzaron a observar el fenómeno del desgaste con la creación y mantenimiento de la rueda.

Según Zmitrowicz en su artículo “Patrones de Desgaste & Leyes del Desgaste”, el 80-90% del desgaste observado en elementos de una máquina se atribuye al desgaste abrasivo. Con base al alto porcentaje del desgaste abrasivo que Zmitrowicz reporta, es de particular interés enfocar este documento en el análisis y caracterización del desgaste abrasivo no lubricado.

En diferentes industrias que operan con maquinaria tan grande como la aeronáutica o tan pequeña como la relojera se presentan escenarios donde los componentes de las máquinas interactúan sin ningún tipo de lubricante y eventualmente se observa deterioro entre los componentes al cual se le denomina “*desgaste*”.

Ejemplos de aplicaciones de contactos metálicos no lubricados:

- Sistema de engranes.
- Juntas atornilladas. Ej: “Bridas”
- Ensamblajes con abrazaderas.
- Contactos superficiales indeseados debido a falta de espacio entre componentes de máquinas.

El objetivo de este documento es crear una guía de diseño para calcular el desgaste abrasivo con base a una recopilación de métodos analíticos y empíricos que son utilizados en la industria para el cálculo del desgaste así como acciones que se toman para retardarlo.

La adecuada predicción del desgaste puede ayudar al:

- Ahorro de materias primas y energía
- Optimización de la vida útil de las herramientas y la maquinaria
- Prevención de fallas inesperadas

¹ Paola Perez (paola.perez.oviedo@gmail.com). Estudiante de Maestría en el CIATEQ Campus Querétaro. Av. El Retablo 150 Col. Constituyentes Fovisste Querétaro, México.

² Jose Torre (jose.torre@ge.com). Centro de Ingeniería Avanzada en Turbomaquinaria (CIAT). Av. Campo Real 1692, Col. Ampliación el Refugio, Querétaro, México.

- Planeación del mantenimiento
- Protección al medio ambiente
- Ahorro económico

EL DESGASTE EN LA ACTUALIDAD

La competitividad de los mercados ha llevado el desarrollo de los productos a un punto donde se deben optimizar materiales, elevar la calidad y reducir los costos.

La tecnología en las diferentes industrias promueve el uso de contactos entre elementos, en otras palabras muchos dispositivos mecánicos y mecanismos son diseñados y construidos con el fin de tener contacto unos con otros y así poder realizar un trabajo. Es del conocimiento general que el desgaste no puede ser totalmente prevenido, motivo por el cual se invierten fuertes capitales al desarrollo de agentes que retardan el mismo, así como la optimización de los diseños para reducir la fricción.

A pesar de que hoy en día, las pruebas experimentales de desgaste utilizan mediciones estándares de las propiedades mecánicas de los sólidos, sigue siendo difícil de predecir y controlar el desgaste entre elementos en contacto y sujetos a fuerzas de fricción causadas por el movimiento relativo entre sus superficies.

II. MECANISMOS E INDICADORES DEL DESGASTE

La tribología es una rama del diseño mecánico que involucra muchas disciplinas como materiales, termodinámica, química, mecánica, entre otras. El término Tribología proviene de la palabra griega *tribos* que significa fricción / frotamiento y *logos* que significa tratado, en otras palabras es el “Estudio de la fricción”. (3)

El campo de estudio de la Tribología está relacionado con la interacción de contacto entre sólidos en movimiento relativo centrándose en el estudio de tres fenómenos:

- La fricción entre dos cuerpos en movimiento.
- El desgaste como efecto natural de la fricción entre dos cuerpos.
- La lubricación como un medio para evitar el desgaste.

La fricción se define como la fuerza de rozamiento entre dos superficies en contacto, dicha fuerza se opone al movimiento de una superficie sobre la otra.

La fuerza de rozamiento es independiente del área aparente de contacto, debido a que la mayoría de las superficies, aun las que se consideran pulidas son

extremadamente rugosas a escala microscópica. Los picos de interface en donde las dos superficies están realmente en contacto, definen el área real de contacto (Ver Figura 1 y 2) (3)

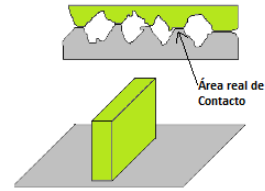


Figura 1 (Superficie aparente de contacto pequeña)

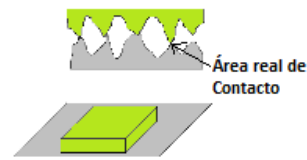


Figura 2 (Superficie aparente de contacto grande)

El *desgaste* se puede definir como la pérdida gradual de material en la interface de dos cuerpos en contacto cuando se ven sometidos a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. El resultado del desgaste es un daño permanente en las superficies.

Existen cuatro principales tipos de desgaste (4) (5) (6):

- 1) Desgaste por adherencia. Este tipo de desgaste se caracteriza por tener una gran fuerza de adherencia entre dos superficies en contacto. El desgaste por adherencia es favorecido principalmente por dos factores: Tendencia de diferentes materiales a formar soluciones sólidas o compuestos intermetálicos con otros materiales y la limpieza de las superficies. Las superficies más limpias tienden a crear enlaces con otras superficies. (7)

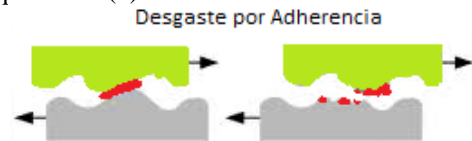


Figura 3 (Desgaste por adherencia)

- 2) Desgaste por abrasión. Remoción de material de las superficies en contacto por superficies duras en coincidencia o por partículas duras situadas entre las dos superficies que se deslizan.

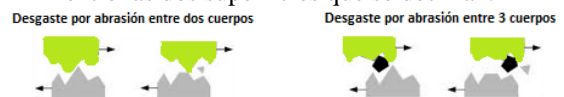


Figura 4 (Desgaste por abrasión)

- 3) Desgaste por fatiga superficial. Este tipo de desgaste ocurre cuando las piezas son sometidas

a elevados esfuerzos, los cuales provocan la aparición y propagación de grietas bajo la acción repetitiva de estos. Algunos ejemplos son: la falla de contactos lubricados como los rodamientos de bolas, engranes, levas y mecanismos impulsores de fricción. La pérdida de material es por desprendimiento o delaminación superficial (5).



Figura 5 (Desgaste por fatiga superficial) (11)

- 4) Desgaste por erosión. Este tipo de desgaste es ocasionado por el contacto de un fluido (líquidos o gases) que llegan a contener en suspensión cierta cantidad de partículas abrasivas que se ponen en contacto con las superficies.



Figura 6 (Desgaste por Erosión) (12)

Por otra parte K. Budinski en su libro “Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing” (14) hace una división diferente para categorizar el desgaste. Budinski comenta que expertos en el campo del desgaste, prefieren tratar a la erosión como un fenómeno aparte ya que en este caso la acción mecánica de un fluido sobre una superficie es la que causa el deterioro.

Indicadores del Desgaste

La determinación cuantitativa del desgaste ha sido de interés para la mayoría de los tribólogos de diferentes épocas, sin embargo este es un problema no resuelto debido a que cada escenario de análisis depende de una serie de factores como la temperatura, presencia de lubricantes, presencia de elementos contaminantes como polvo, rebabas, fugas de aceite o combustible, tipo de materiales en contacto, medio ambiente bajo el cual operan (medio salino, húmedo, seco, etc), fuente del movimiento relativo (vibración, deslizamiento, expansión térmica, etc).

Los indicadores del desgaste son parámetros que se han establecido para evaluar, estudiar, clasificar y diagnosticar el desgaste.

Algunos de los indicadores del desgaste son (15):

Lineal (Wh). Se utiliza cuando los valores absolutos del desgaste son de medianos a altos y está fundamentado en la medición de las dimensiones de las piezas antes y después del ensayo de desgaste.

Gravimétrico (Wg). Este indicador generalmente se utiliza para la determinación del desgaste de piezas de pequeñas dimensiones las cuales se pesan antes y después del desgaste para determinar la pérdida de masa.

Volumétrico (Wv). Este se fundamenta en la medición del volumen antes y después del proceso de desgaste.

La predicción de la fricción y el desgaste pueden ser no solo analizados en pruebas de laboratorio sino también utilizando modelos matemáticos. Por ejemplo, en el campo de la minería, existe un modelo matemático conocido como Método de Elementos Distintos (MED) cuya aplicación es la simulación del desgaste abrasivo en las herramientas de trabajo que se emplean en el movimiento y excavación de suelos no agrícolas como arena sílice y rocas. En dicho modelo los parámetros que se usan como datos de entrada son los factores macroestructurales del suelo y de la interface suelo – herramienta. La ley de Archard se aplica para simular el desgaste en el herramental debido al movimiento y manipulación de suelos no agrícolas rocosos (16).

III. METODOLOGÍAS PARA EVALUAR EL DESGASTE ENTRE COMPONENTES METÁLICOS

G. Bayer (17) en su artículo “Fundamentos de las fallas por desgaste” lista 4 pasos para analizar un componente que falló por desgaste:

- 1.- Examinar y caracterizar el sistema tribológico
- 2.- Caracterización y modelado del escenario de desgaste
- 3.- Obtener y evaluar datos del desgaste
- 4.- Evaluar y verificar la solución.

G. Bayer también aclara que el proceso ya mencionado es un proceso iterativo y que los pasos se pueden alternar hasta encontrar el fenómeno físico que replique lo observado en la pieza analizada.

A continuación se resumirán los 4 pasos que G. Bayer recomienda para el análisis del desgaste:

- 1.- Examinación y caracterización del sistema tribológico.

El desgaste es el resultado de un sistema característico por lo que no se debe considerar como una propiedad del material.

Algunas de las preguntas para definir un sistema tribológico son:

- ¿Qué materiales están en contacto?
- ¿Cuáles son las características geométricas (forma, tamaño, rugosidad) del sistema tribológico?
- ¿Existe movimiento relativo entre componentes del sistema a analizar?
- ¿Cuál es el estado de carga (compresión / tensión) del sistema tribológico analizado?
- ¿Tiene algún tipo de lubricación?

El desgaste es un fenómeno que se debe describir en términos de:

- Velocidad de contacto
- Área de contacto
- Presión de contacto
- Ángulo de entrada

2.- Caracterización y modelado del escenario de desgaste.

La caracterización del sistema tribológico permite ordenar e identificar de forma apropiada la información que resulta del proceso del desgaste.

El desgaste por abrasión, tema de estudio de éste documento, es en el cual la principal causa del desgaste es el desgarramiento o corte generado por partículas abrasivas.

Sub-categorías:

Tabla 1

Atributo	Variación
Número de componentes en contacto	Un cuerpo (superficie abrasiva), dos cuerpos (pérdida de partículas entre las superficies)
Nivel de esfuerzo	Altamente esforzada ó poco esforzada
Alteración superficial	Desgarramiento ó pulido
Presencia de fluido	Abrasión en seco o abrasión húmeda

Dureza relativa o presencia de partículas en la superficie.	Superficie endurecida o ablandada por partículas
---	--

El desgaste también puede ser clasificado como leve o severo. Esta clasificación parte de la naturaleza del desgaste y no de la cantidad. La diferenciación se basa en términos de las marcas producidas por el desgaste.

El desgaste leve, como se observa en la figura 8, sigue un patrón uniforme de líneas definidas y poco profundas. Por otra parte, en la Figura 9 se muestra un desgaste severo en donde es mayor la profundidad de las marcas de desgaste e incluso hay zonas amorfas:

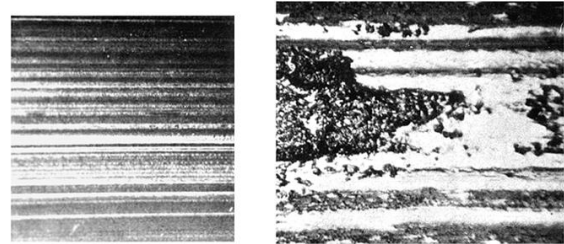


Figura 8. (Desg Leve)(17) Figura 9. (Desg Severo)(17)

3.- Obtener y evaluar datos del desgaste.

Los modelos que representan el desgaste generalmente se clasifican en base a la experiencia de fenómenos ya observados y a experimentos de laboratorio.

La forma óptima de simular el desgaste como ya se mencionó es experimentalmente. Sin embargo, los costos asociados con los métodos experimentales suelen ser altos y por ende el desarrollo de métodos analíticos confiables representa un área de oportunidad para la industria en términos de productividad.

En la literatura se mencionan diferentes formas para medir el desgaste respecto a los siguientes cambios en cantidad de:

- Masa removida del componente
- Volumen removido de material
- Dimensiones reducidas del componente

Existen 3 tipos de mecanismos de desgaste abrasivo (17):

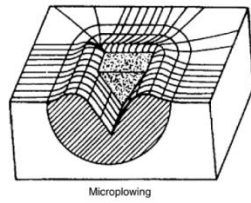


Figura 10. Desplazamiento de material (17)

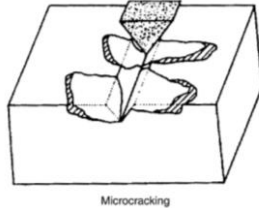


Figura 11. Microgrieta (17)

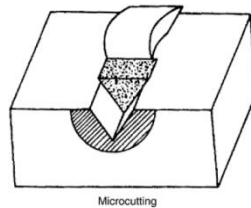


Figura 12. Microcorte(17)

Microplowing, en Español se define como micro desplazamiento de material (ver Figura 10), un ejemplo de esto es la labranza de la tierra a la hora de hacer un surco.

Microcracking, en Español se denomina Microgrieta. En donde se fractura el material como se observa en la Figura 11.

Microcutting, en Español se conoce como Microcorte y como se muestra en la figura 12, hay dos materiales en contacto y uno genera un desprendimiento por corte sobre el otro.

4.- Evaluar y verificar la solución.

Para evaluar y verificar las posibles soluciones existen fórmulas que provienen de la experimentación además de pruebas validadas de donde se han calculado factores empíricos que se utilizan en las ecuaciones para predecir el fenómeno del desgaste abrasivo.

Una de las ecuaciones más generales para calcular el desgaste fue desarrollada por Archard (1) en 1953:

$$V = K \frac{Lx}{H} \quad (1)$$

En donde V es el Volumen perdido por desgaste, H es la Dureza del material (en caso de tener diferentes materiales en contacto, se recomienda seleccionar el de menor dureza). L es la Fuerza Normal, x es la distancia de deslizamiento y K es un factor adimensional constante conocido como el coeficiente de desgaste. Éste factor depende del par de materiales en contacto. En la literatura se puede encontrar este factor relacionado con la dureza de los materiales en contacto.

Para calcular el desgaste medido en base al cambio de volumen perdido respecto al tiempo \dot{V} , lo podemos representar como se muestra en la ecuación (2)

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

Para representar el cambio de distancia en el tiempo, es decir la velocidad (\dot{x}) lo representamos con la ecuación (3)

$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (2) en la (1) asumiendo que K, H y L no son función del tiempo podemos obtener la ecuación (4).

$$\dot{V} = K \frac{xL}{H} \quad (4)$$

Asumiendo que por el desgaste se pierde un sólido de volumen rectangular (área transversal constante):

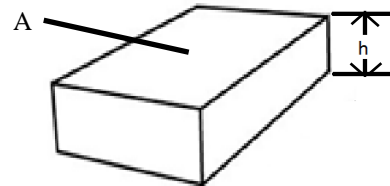


Figura 13

La ecuación (5) hace referencia al volumen de una pieza rectangular, en donde V es el volumen perdido, A el área de desgaste y h la altura perdida.

$$V = Ah \quad (5)$$

Si derivamos el Volumen perdido respecto al tiempo para calcular el cambio en la altura perdida por el desgaste.

$$\dot{V} = A\dot{h} \quad (6)$$

Sustituyendo en la ecuación 1 para calcular el cambio de altura.

$$A\dot{h} = K \frac{Lx}{H} \quad (7)$$

$$\dot{h} = K \frac{\left(\frac{L}{A}\right)x}{H} \quad (7.1)$$

A continuación se establecen ecuaciones para calcular la velocidad partiendo de que la fuente de movimiento relativo causante del desgaste es debido a oscilaciones armónicas (vibración).

En la ecuación (8) se representa la frecuencia angular en radianes/seg obtenida por la multiplicación de la frecuencia en Hertz.

$$w = 2\pi f \quad (8)$$

Conociendo la frecuencia angular mediante la ecuación (9) se puede calcular el desplazamiento respecto al tiempo.

$$x(t) = x_0 \text{sen}(wt) \quad (9)$$

En donde X_0 es la amplitud de vibración, asumiendo que el desplazamiento es de naturaleza oscilatoria armónica (fenómeno típico de vibración en maquinaria)

Derivamos para calcular la velocidad:

$$\dot{x}(t) = wx_0 \cos(wt) \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (7.1)

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} = \frac{K}{H} \left(\frac{L}{A}\right) wx_0 \cos(wt) \quad (11)$$

Se asume que los valores de la ecuación (11.1) son constantes.

$$c = \frac{K}{H} \left(\frac{L}{A}\right) wx_0 \quad (11.1)$$

Se integra la función respecto al tiempo en la ecuación (11.2)

$$\int_0^{h_w} dh = \int_0^{t_f} c |\cos(wt)| dt \quad (11.2)$$

En donde h_w es el espesor removido y t_f es el lapso de tiempo en el que ambos componentes permanecen en contacto con movimiento relativo. La función coseno puede tomar valores positivos y negativos a lo largo del tiempo. Por lo que el valor absoluto en la función cumple

el objetivo de sumar la cantidad total de material removido durante periodo de tiempo.

Conclusiones:

El desgaste es un tema de interés global para todas las industrias. Se ha trabajado a lo largo del tiempo en diferentes métodos para poder predecir el desgaste, sin embargo cada escenario cuenta con variables particulares que lo hacen único. La literatura parte de la ecuación de Archard para poder predecir el desgaste de una forma genérica.

El objetivo de la guía de diseño para calcular y predecir el desgaste cumple con el objetivo de informar al Ingeniero los principios y caracterización básica en una forma rápida y resumida para poder evaluar el evento de desgaste abrasivo en el que esté trabajando.

IV. REFERENCIAS

- Hernandez G. "Efecto del volumen de metal cortado y de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta durante en torneado de alta velocidad del acero AISI 1045". Cuba - Mexico : Ingeniería y Desarrollo, 2011, Vol. 29. ISSN:0122-3461.
- Zmitrowicz, Alfred. "Wear Patterns and Laws of Wear", Jurnal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, págs. 219-253.
- Díaz del Castillo Rodríguez, Felipe. "Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación". UNAM. [En línea] 2007. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/tribologia.pdf.
- Davis, J.R. "Resistance, Surface Engineering for Corrosion and Wear". Ohio, EU : Maney Publishing, 2001.
- Díaz del Castillo Rodríguez, Felipe. "Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación". UNAM. [En línea] 2007. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/tribologia.pdf.
- McKeen, Laurence W. "Wear Factor. Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers". 2nd Edition. s.l. : Elsevier, 2010. Online version available at: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008TVGR5/fatigue-tribological-2/wear-factor>.
- Gate, W.F y Totemeier, T.C. Smithells "Metals Reference Book". 8th. s.l. : Elsevier, 2006.
- Staitz.M. "Reduction of adhesive wear in the aluminium sheet forming process". Technische Universitat Darmstadt. [En línea] Reduction of adhesive wear in the aluminium sheet forming process.
- "Abrasive Wear". Improved Durability for Mechanical Parts. [En línea] Aludra, 2014. <http://www.aludra.nl/index.php?pagina=abrasive>.

10. “Desgaste de Materiales”. [En línea] [Citado el: 2 de Diciembre de 2014.] <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>.
11. Martinez, P.F, Rabinowicz, E. “Fatiga Superficial”. [En línea] EcuRed, 2014.
http://www.ecured.cu/index.php/Fatiga_superficial?PageSpeed=noscript.
12. Abrasion and wear testing. [En línea]
<http://www.abrasiontesting.com/understanding-wear-abrasion/types-wear/>
13. Mayama, R. “Qué es la corrosión”. [En línea] 2015.
<http://nestorcuriosidad.blogspot.com/2011/02/que-es-la-corrosion.html>
14. Budinski, Kenneth G. “Categories of Wear. Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing: (MNL 56)”. s.l. : ASTM International, 2007, pág. 4. Online version available
at:<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGFWETMN3/guide-friction-wear-erosion/guide-friction-wear-erosion>.
15. Álvarez García, Emilio. “Desgaste de los cuerpos sólidos”. 2014.
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Z2E6-s1UoWkJ:https://lopezva.files.wordpress.com/2014/02/desgaste-de-los-cuerpos-sc3b3lidos.doc+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=mx>.
16. Sanchez, Angel Lazaro. “Bases teóricas para la simulación del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranzamediante el Método de los Elementos Distintos (MED)”. Cuba : Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Junio de 2014, Vol. 23, págs. 81-88. ISSN-1010-2760.
17. Bayer, Raymond G. “Fundamentals of Wear Failures”. Tribology Consultant. [En línea] Published 2002. ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention (ASM International)
http://www.asminternational.org/web/edfas/technical/-/journal_content/56/10192/ASMHBA0003558/PUBLICATION
18. Askeland, Donald R y Phulé, Pradeep P. “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”. Cuarta Edición. Missouri : Thomson, 2003. págs. 971-972.
19. Bury, K. “Statistical Distributions in Engineering”. s.l. : Cambridge University Press, 1999. Online ISBN:9781139175081.



José Torre Nieto

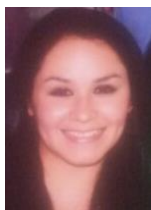
Lugar de Nacimiento: Celaya, Gto. México.

Fecha de Nacimiento: 20 de Septiembre de 1980.

Historial Académico:

- Ingeniero Mecánico Electricista (2002), ITESM Campus Monterrey, NL, México.
- Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica (2010), University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

V. BIOGRAFÍA



Paola Perez Oviedo

Lugar de Nacimiento: Querétaro, Qro. México.

Fecha de Nacimiento: 13 de Junio de 1986.

Historial Académico:

- Ingeniera Mecánica Administradora (2009) ITESM Campus Querétaro, México.
- Maestría en Manufactura Avanzada (En curso) CIATEQ Campus Querétaro,

México.

Ella actualmente es estudiante de la Maestría en Manufactura Avanzada impartida por el CIATEQ Campus Querétaro, con dirección en Av. El Retablo 150 Col. Constituyentes Foviste Querétaro, México.