

# Diseño Estructural de la Sección Cilíndrica del Túnel de Viento Didáctico del TecNM/ITLaguna

*E.J. Arroyo-Chavarría<sup>1</sup>, J.A. Barajas-Hernández<sup>1</sup>, F. Alba-Silva<sup>1\*</sup>, J.C. Ramos-Pedroza<sup>1</sup>.*

**Resumen**— En este artículo se determina la selección de perfiles a usar para la construcción de la estructura de un túnel de viento didáctico que estará ubicado en el Instituto Tecnológico de La Laguna. La geometría y dimensiones del túnel de viento serán cilíndrica con longitud de 2.44 m y diámetro de 1.10 m. Las cargas de diseño consideradas se determinan en base a los elementos electromecánicos que producen el viento, así como los pesos propios de los perfiles que forman el túnel y transmiten algún esfuerzo, con la finalidad de establecer el diseño estructural. El diseño se determina mediante un modelo matemático tridimensional del túnel de viento desarrollado en el software CYPE 3D. Los resultados de este estudio permitirán conocer el porcentaje de trabajo de los perfiles que soportan al túnel de viento.

**Palabras claves**— Túnel de viento, Diseño estructural, Diseño por software.

**Abstract**— This paper determines the selection of profiles to be used for the structure construction of a wind tunnel that will be located at the Instituto Tecnológico de La Laguna. The geometry and dimensions of the wind tunnel will be cylindrical with a length of 2.44m and a diameter of 1.10m. The design loads considered are determined based on the electromechanical elements that produce the wind, as well as the own weights of the profiles that form the tunnel and transmit some effort, with the aim to establish the structural design. The design is determined by a three-dimensional mathematical model of the wind tunnel developed in CYPE 3D software. The results of this study will allow to know the percentage of work of the profiles that support the wind tunnel.

**Keywords**— Wind Tunnel, Structural Design, Software Design.

## I. INTRODUCCIÓN

El mundo avanza a pasos agigantados, los estudiantes ya no se conforman con solo asistir a las aulas a adquirir conocimientos brindados por sus profesores. Están ansiosos por llevar a la práctica los conceptos que antes solo podían conocer por medio de algunas líneas y tablas

que un libro les proporcionaba. Por lo que es de vital importancia brindarles las herramientas necesarias para así adoptar esos conceptos y de esa forma hacerlos más competentes en el desempeño de su carrera. Una de esas herramientas es el túnel de viento didáctico, que les otorgará la capacidad de comprender energías como la eólica, que ante la necesidad imperante de utilizar energías limpias [1], es una excelente opción el poder comprender su funcionamiento por medio de la experimentación. Pero no hay que correr antes de caminar, ya que previo a poder materializar la herramienta antes mencionada, se tiene que someter a un proceso creativo con rigurosa evaluación, que le dará la forma que más convenga para su mejor aprovechamiento y funcionamiento. Así mismo se deberá respetar algunas limitantes como el espacio donde será ubicado, adoptando los resultados del análisis estructural. De esta manera podremos establecer el comportamiento de la estructura con la finalidad de seleccionar los perfiles más adecuados para soportar el túnel de viento didáctico. Posteriormente se procede al diseño estructural, que gracias a la evolución de la informática, se cuenta con software especializado en el desarrollo de estructuras metálicas, sin dejar de lado la interpretación del especialista responsable del proyecto, y de esta forma facilitar la propuesta de construcción del túnel de viento didáctico.

Uno de los pilares importantes en el diseño estructural es encontrar la solución más económica y que cumpla con los requerimientos solicitados [2]. Además de encontrar una solución que genere equilibrio y estabilidad a la estructura, pasando a ser de gran importancia conocer aspectos como espacio destinado para su colocación, uso que se le va a dar a la estructura, los riesgos que conlleva en caso de que existiera alguna falla en ella, la posibilidad de que existan pérdidas humanas por falla o si las pérdidas económicas son considerables. Así, de esta forma se puedan determinar factores de seguridad que deberán adoptarse, nunca siendo menores a los especificados en manuales de diseño y normas que rijan en nuestro país.

Los túneles de viento se pueden clasificar de distintas maneras y existe una gran variedad de ellos dependiendo del tipo de estudios para el que fueron desarrollados, por ejemplo, para el estudio de la capa límite atmosférica, calibración de sensores, estudio de la aerodinámica de autos, entre otros [3]. En el TecN/ITL se construirá un túnel de viento abierto y de baja velocidad [3], [4].

<sup>1</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de La Laguna, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Av. Cuauhtémoc y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna S/N 27000, Torreón, Coahuila, México.

\* felipealba@yahoo.com

Un aspecto importante a considerar en el diseño de túneles de viento es la vibración de las distintas partes del túnel que puede generar ruido, molestias en los usuarios, daños por fatiga en la estructura del túnel, así como generar turbulencia [5]. Todos estos aspectos son indeseables en la operación de un túnel de viento, por lo que en la medida de lo posible se deben evitar. Este trabajo se centra en el análisis estático de la estructura que soportará al túnel, dejando el estudio teórico y experimental de las vibraciones [6] para etapas posteriores del proyecto. En este trabajo de investigación se determinarán las cargas estáticas que actuarán sobre la propuesta de estructura de soporte del túnel y posteriormente se presenta el análisis numérico de dicha estructura. Se demuestra la utilización de herramientas computacionales de diseño estructural para conocer los esfuerzos en la estructura y así determinar los perfiles necesarios que sujetarán el túnel de viento. Finalmente los resultados que arroja la herramienta computacional deben conjuntarse con la experiencia del analista en estructuras para validar la selección de la estructura, respetando siempre los reglamentos y normas vigentes que deban ser aplicables.

II. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TÚNEL DE VIENTO

Antes de poder comenzar con el proceso de diseño estructural, se tiene que iniciar con el proceso de creación de la estructura, que consiste en materializar el concepto abstracto que se tiene en mente y combinarlo con las restricciones propias de espacios y las necesidades en las dimensiones por concepto de equipos que se integrarán a la estructura final.

Se busca construir e instalar el túnel de viento dentro del laboratorio de ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de La Laguna. Por lo tanto el dimensionamiento del túnel debe acotarse a dimensiones tales que no se presente la obstrucción tanto de la entrada como de la salida del viento. Por lo tanto, se propuso un túnel de viento con las siguientes dimensiones: a) zona convergente de entrada con diámetro inicial de 1.3 m y diámetro final de 1.1 m con una longitud de 1 m, b) sección de prueba cilíndrica de diámetro de 1.1 m y longitud de 2.44 m, c) zona de difusor con diámetro inicial de 1.1m y diámetro final de 1.2 m con longitud de 0.5 m. Por tanto, la longitud total del túnel es de 3.94 m.

Debido a que la mayor longitud del túnel se encuentra en la sección de prueba, se propone segmentar al túnel para llevar a cabo los estudios de esfuerzo estructural solamente sobre la parte del cilindro de longitud de 2.44 m. Para llevar a cabo esto, se considerará que a la entrada de la sección cilíndrica se tiene ya una velocidad y presión de viento tal que lo puede proporcionar un ventilador con las dimensiones ajustadas al diámetro del cilindro. Con

esto se podrán evaluar los esfuerzos sobre una estructura propuesta para la sección más larga del túnel. Y mediante los resultados obtenidos se podrán proponer los perfiles necesarios para soportar dicha sección.

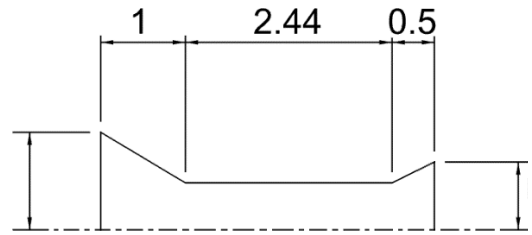


Figura 1. Longitudes del túnel de viento para diseño estructural

El ventilador que se propone para inyectar el viento a una velocidad determinada se muestra en la figura 2.

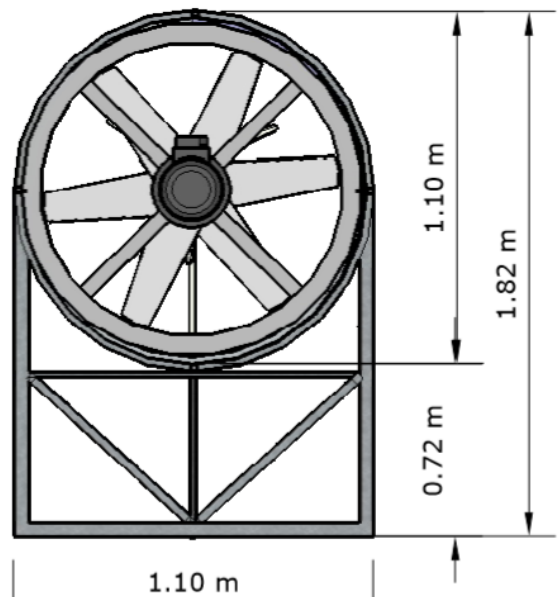


Figura 2. Vista frontal del ventilador de la sección cilíndrica del túnel de viento

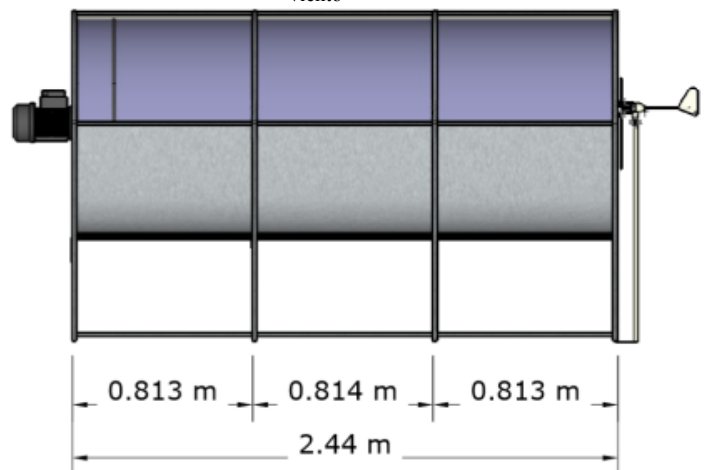


Figura 3. Vista lateral de la sección cilíndrica del túnel de viento

### III. ESTUDIO DE CARGAS APLICADAS

Las cargas en términos generales se pueden distribuir en 2 apartados, cargas permanentes y cargas variables. Las cargas permanentes, también conocidas como cargas muertas se consideran como los pesos de todos los elementos constructivos, los acabados y todos los elementos que ocupan una posición permanente y tienen un peso que no cambia substancialmente con el tiempo. Para la evaluación de las cargas muertas se emplearán las dimensiones especificadas de los elementos constructivos y los pesos unitarios de los materiales. Por otra parte, las cargas variables o vivas, son aquellas fuerzas que se producen por el uso y ocupación de las construcciones y que no tienen carácter permanente [7].

En nuestro caso, la carga muerta aplicada no tendremos que determinarla, ya que el software que vamos a utilizar para dar solución a la estructura, en el momento en que estemos alimentándolo con los datos, nos pide que seleccionemos el perfil a utilizar y automáticamente incluye el peso del material en la solución estructural dada. En cambio, en el caso de la carga viva, tenemos que encontrar los valores a utilizar en base a las condiciones de uso de la estructura.

Una de las fuerzas actuantes en la estructura por concepto de carga viva será la generada por el ventilador al momento de entrar en función, creando un flujo de aire que a su vez generará una fuerza cortante horizontal o fuerza de fricción proporcional a la velocidad de viento generada que tratará de mover el túnel.

Para que un sistema que incluye fuerzas de fricción permanezca estático (que no ocurra deslizamiento), la fuerza  $F$  no puede sobrepasar un valor límite que depende parcialmente de la fuerza normal transmitida a través de la superficie de contacto. Puesto que este valor limitante también depende de la naturaleza de las superficies en contacto, debe determinarse experimentalmente [2].

$$F_h = m * g * F_r \quad (1)$$

Donde  $F_h$  es la fuerza horizontal,  $m$ ,  $g$  y  $F_r$  son la masa de la estructura, aceleración de la gravedad y el factor de rozamiento, respectivamente.

Asignando valores a cada una de las variables se determina con base en el prediseño de la estructura una masa total de 350 kg. Para la gravedad manejamos la constante de 9.81 m/s<sup>2</sup> y por último el factor de rozamiento entre 2 elementos es variable según los materiales en acción. Para determinar este último factor se considera que el túnel de viento didáctico tendrá movilidad mediante un sistema de rodamiento a base de llantas de caucho con seguros para evitar desplazamientos no deseados. Y por otra parte la superficie donde se establecerá la estructura será de concreto por lo que el

factor de rozamiento dinámico para estos dos materiales está entre 1 y 0.8 cuando están secos y 0.3 cuando están húmedos. Para el caso del estudio mostrado en este artículo se considera un factor de rozamiento dinámico cercano al de la condición húmeda con la finalidad de manejar un factor de seguridad y verificar que no se desplace el túnel. Por ello se determina utilizar un factor de 0.4, de manera que la fuerza horizontal es

$$F_h = 350 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.40 = 1,373.40 \text{ N}$$

Por lo tanto, se necesita una fuerza de 1,373.40 N para mover la estructura del túnel. Es importante mencionar que el túnel estará estático, por lo que el coeficiente de rozamiento, y por tanto la fuerza horizontal, serán superiores al valor obtenido. Para verificar que el túnel no se moverá debido a la acción del viento sobre éste es necesario estimar esta fuerza definida como.

$$F = A * P \quad (2)$$

Donde  $F$  la fuerza debida a viento,  $A$  y  $P$  son el área de impacto y la presión del viento, respectivamente. De acuerdo a la ecuación de Bernoulli [8], en el caso en el que el fluido moviéndose a una velocidad  $V$  cede toda su energía a la superficie donde éste incide, la presión se determina con la siguiente fórmula:

$$P = 1.22 * V^2 \quad (3)$$

Si se considera una velocidad máxima de viento de 30 m/s que es la máxima a aplicar en los estudios al túnel y que además es muy superior a la velocidad que se espera en el túnel a construirse en el ITL [9], la presión debida al viento es

$$P = 1.22 (30)^2 = 1,098 \text{ N/m}^2$$

La fuerza que ejerce el viento sobre el túnel se obtiene al sustituir el valor obtenido para la presión en (2), es decir,

$$F = (0.95 \text{ m}^2) (1,098 \text{ N/m}^2) = 1,043.46 \text{ N}$$

En donde el área corresponde a la superficie del diámetro del tubo de 1.1 m. Si consideramos que la fuerza de empuje del viento es inferior a la fuerza horizontal  $F_h$  se puede concluir que la estructura no se moverá.

Ya que se determina esta condición, debemos de aplicar esta misma carga al modelo matemático que desarrollaremos para la solución estructural en el software *CYPE 3D* [10]. Además se consideran los apoyos como empotrados, ya que no se permitirá el desplazamiento en ninguno de los ejes, de acuerdo a las condiciones de operación que se esperan para el túnel de viento.

IV. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

El diseño estructural es un arte en el que se utilizan las experiencias obtenidas en construcciones anteriores, realizadas con o sin éxito, las leyes de la física y las matemáticas, y los resultados de investigaciones de laboratorio, para obtener la geometría y las dimensiones de estructuras que se comporten de una manera segura y eficiente, que sean económicas en construcción y mantenimiento y que sean estéticamente agradables [3].

Así mismo, respetando todos los parámetros anteriormente descritos, y aplicando la norma para Acero formado en frío: AISI S100-2007 (LRFD), se comienza con el diseño estructural.

En la figura 4 se presenta la estructura diseñada para soportar el túnel de viento, y sobre el cual se realizará el cálculo de los esfuerzos y posterior selección del material.

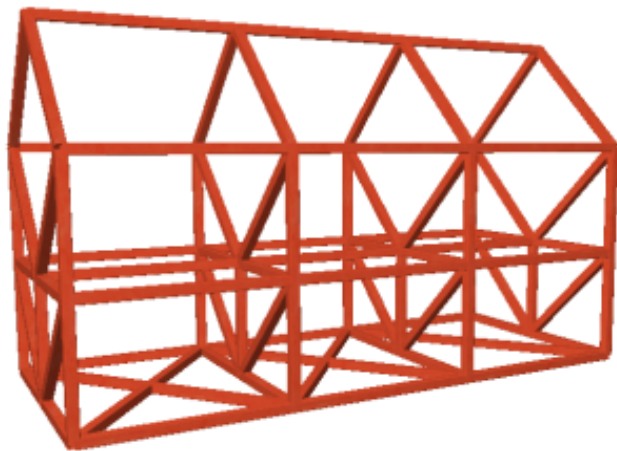


Figura 4. Modelo matemático representado por figura tridimensional. (altura 1.82 m, largo 2.44 m y ancho 1.56 m)

A continuación se aplican cargas por concepto de tablero de mediciones apoyado lateralmente sobre la estructura del túnel, así como las cargas actuantes generadas por el extractor, tanto por vibración, como por el viento generado, figura 5.

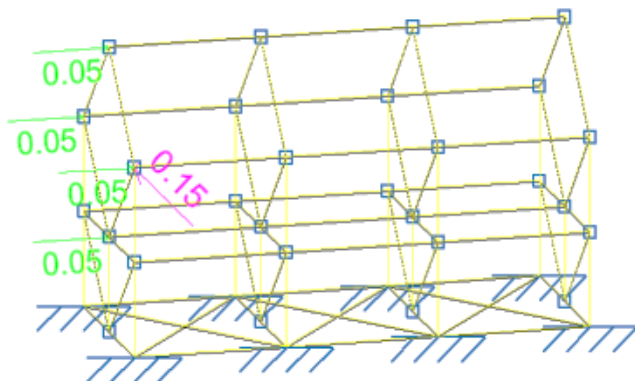


Figura 5. Esquema de cargas aplicadas en el modelo

Aunque se haya revisado anteriormente y se llegara a la conclusión de que la estructura no se movería, no quiere decir que esas cargas desaparecieran, si no que las absorben los perfiles que forman la estructura, por lo que debe considerarse en las cargas a aplicar sobre los nudos, de tal manera que el esquema de cargas aparece en la figura 5, tal y como se capturó en el software. Los valores de las cargas están dados en toneladas y equivalen a la carga total repartida uniformemente sobre los nudos, que a su vez repartirán esa carga hacia el resto de la estructura.

V. RESULTADOS

Ya que se cuenta con el modelo y las cargas aplicadas, lo único que resta por hacer es dar la orden para que el software elabore un proceso de cálculo, que tendrá a su vez que empatar con el pre diseño realizado por métodos manuales y corroborar que la selección de los perfiles fue la correcta. El tiempo que puede tomar este proceso es variable, depende en gran parte de la capacidad de la computadora donde se lleve a cabo la tarea encomendada, además de la complejidad de la estructura. Lo que sí es seguro es que este proceso será más rápido que los métodos tradicionales de diseño usados antes de existir estas tecnologías.

Al terminar este proceso de cálculo, el programa arrojará una serie de resultados donde se muestran uno a uno todos los perfiles indicando el porcentaje de trabajo al que están sujetos, siendo los resultados correctos cuando el valor esté por debajo del 100%. Por obvias razones estaría equivocado si un elemento trabaja por encima del 100%, ya que indicaría que está trabajando a más de su capacidad, en dado caso se tendrían que sustituir esos elementos, por elementos con mayor capacidad y volver al proceso de cálculo repitiendo este proceso hasta que todos los perfiles estén por debajo del 100%.

Comprobación de resistencia								
Barra	η (%)	Posición (m)	Esfuerzos pésimos				Origen	Estado
			N (t)	Vy (t)	My (t·m)	Mz (t·m)		
N1/N2	7.35	0.000	-0.048	-0.029	-0.001	-0.012	GV	Cumple
N1/N5	3.01	0.000	-0.035	0.006	-0.001	0.002	GV	Cumple
N5/N3	1.70	0.650	0.035	-0.006	-0.001	0.002	GV	Cumple
N3/N4	7.41	0.000	0.082	-0.028	0.000	-0.012	GV	Cumple
N6/N4	2.05	0.000	-0.009	-0.008	0.000	-0.003	GV	Cumple
N2/N6	3.09	0.650	-0.220	0.001	0.002	0.000	G	Cumple
N5/N6	3.20	0.600	-0.057	-0.014	0.000	0.005	GV	Cumple
N5/N4	0.49	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	GV	Cumple
N5/N2	2.54	0.885	0.289	0.000	0.000	0.000	G	Cumple

Figura 6. Resultados con el % de aprovechamiento

Al final del proceso nos arroja que los perfiles seleccionados fueron los correctos, siendo éstos para toda

la estructura perfil tipo PTR 2"x2" blanco formando armaduras entrelazadas para darle la rigidez requerida y conectando todos los aros que sirven como cimbra y área de sujeción de la lámina que formará el túnel de viento.

Además de la rapidez con que se trabajó, y lo satisfactorio de los resultados, se determina que la solución fue adecuada por la relación costo beneficio, ya que se consigue una estructura ligera que cumple con todos los requerimientos de su función. Por otra parte el peso de la estructura es ligera y por lo tanto de fácil manejo para su traslado.

## VI. CONCLUSIONES

Se tomó una idea básica de la necesidad de crear un túnel de viento didáctico y se optó por realizar el estudio correspondiente para conseguir una estructura capaz de soportar los esfuerzos generados por equipos utilizados para el estudio de energías como la eólica. Los resultados arrojados por el simulador de esfuerzos en estructuras demostró que la selección de perfiles PTR 2"x2" soportará sin ningún problema las cargas ejercidas por el peso de la sección de pruebas cilíndrica del túnel y por las fuerza de arrastre del viento en movimiento. Por tanto, esta propuesta de estructura mostrada en la figura 4 será la que se construirá para esta sección de túnel de viento.

Se entiende que el uso de software para las soluciones estructurales es de gran utilidad, pero nunca sustituirán el uso del razonamiento humano, convirtiendo estos softwares en herramientas eficaces, pero no indispensables para la toma de decisiones, ya que éstas se dan por la experiencia, imaginación, conocimientos, que a su vez y en conjunto te dan la habilidad de encontrar la solución adecuada, que aunada a la velocidad de respuesta de herramientas como las antes descritas, hacen que la tarea del diseño estructural sea todo un deleite de ejecutar. El trabajo a futuro incluye el análisis dinámico del túnel, es decir, considerar las cargas debidas al desprendimiento de vórtices dentro y fuera del túnel, así como la posterior validación con resultados experimentales.

## VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al TecNM por los recursos otorgados para el desarrollo del proyecto de túnel de viento didáctico.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] A. Schaffarczyk, *Understanding wind power technology: theory, development and optimisation*. 1ed, Wiley, 2014
- [2] J. D. Holmes, *Wind loading of structures*, 3th Ed, CRC Press,

2015

- [3] J. D. Pereira, *Wind tunnels: Aerodynamics, models and experiments*, Nova Science Publishrs, UK, 2013.
- [4] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook* 2nd Ed, Wiley, 2011.
- [5] J.B. Barlow, W.H. Rae, A. Pope, *Low speed wind tunnel testing*, 3ed, Wiley, 2010
- [6] S. Rao, *Mechanical Vibrations* 5th Ed, Pearson, 2011
- [7] Reglamento de construcción para el estado de Coahuila, 1996.
- [8] Y. Cengel y J. Cimbala, *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones* 2da Edición, McGraw Hill 2012.
- [9] M. Rivero, et.al., Estudio numérico de túnel de viento didáctico del TecNM/ITLaguna, Memorias de CONINCI 2017.
- [10] <http://programas.cype.es/>
- [11] R. L. Brockenbrough, F.S. Merrit, *Manual de diseño de estructuras de acero* Tomo 1 Segunda edición, 1997
- [12] O. de Buen López de Heredia, *Manual de estructuras de acero*, 1991

## IX. BIOGRAFÍA



**Erika Janeth Arroyo Chavarría.** Egresada de la carrera de Ingeniería Eléctrica, reconocida por mejor promedio de generación 2005 en el TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna, en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. A partir de ese momento y hasta el año 2011 colaboró en el departamento de proyectos en empresa líder en el ramo de instalaciones eléctricas en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Ella actualmente forma parte de la planta académica de la carrera Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son generación de energía eólica.



**José Arturo Barajas Hernández.** Egresado de la carrera Ingeniería Industrial Electricista del Instituto Tecnológico de la Laguna en Octubre de 1983 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Obtuvo el grado de M. C. en Ingeniería Eléctrica en julio del 2003 en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Actualmente forma parte de la planta académica de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas de investigación están en el control de velocidad de máquinas eléctricas.



**Felipe de Jesús Alba Silva.** Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de La Laguna en 1984 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México. Obtuvo el grado de M.E. en Economía y mercadotecnia en 2001 en la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de Coahuila, en Torreón, Coahuila. Actualmente forma parte de la planta académica de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de especialidad son las Plantas Eléctricas de Emergencia, los Hornos de Inducción y la Automatización de procesos.



**Julio César Ramos Pedroza.** Egresado de la carrera de Ingeniería Industrial en Eléctrica del Instituto Tecnológico de la Laguna en 1994 en la Ciudad de Torreón, Coahuila, México. En 1998 Estudió la Maestría en Ciencias con la Especialidad de S.E.P. (Pasante de Maestría) en el Instituto Tecnológico de la Laguna en la Ciudad de Torreón, Coahuila, México. Él actualmente forma parte de la planta académica del Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica del Instituto Tecnológico de la Laguna en la Ciudad de Torreón, Coahuila, México. Su área actual es en la especialidad de Potencia dentro de la carrera Ingeniería Eléctrica.