

Optimización De Sistemas De Enfriamiento En Autotransformadores De Potencia Para La Eficiencia Energética

M. Pineda Belmontes^{1,*}, A. Tinoco Alcazar², A. Zarate Sanchez².

Resumen— Dentro de este trabajo se presenta una estrategia de reducción del consumo de energía en subestaciones eléctricas mediante la automatización del sistema de enfriamiento de aire forzado en bancos de autotransformadores de potencia, se presentan las acciones realizadas en tres subestaciones eléctricas cuyos bancos de transformación son de una capacidad de 100 MVA y se utilizan en el proceso de transmisión del sistema eléctrico nacional en la zona de transmisión Camargo. Así mismo se presenta el impacto que tiene esta estrategia en términos de consumo de energía en dichas subestaciones.

Palabras claves— Automatización, Autotransformador Eficiencia Energética, Sistemas SCADA.

Abstract— This paper shows a strategy for the reduction of electrical consume in electrical substations by air forced cooling system automation in power autotransformers, activities in three autotransformer banks with a capacity of 100MVA that are part of the national electrical system in Camargo transmission zone are also presented; finally, the impact of this strategy in such substations are presented in consum terms.

Keywords— Automation, Autotransformer, Electrical Efficiency, SCADA Systems.

I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética es una práctica que tiene como objetivo la reducción del consumo de energía eléctrica. Para la reducción de este consumo es necesaria la implementación de proyectos que permitan la vinculación entre la innovación tecnológica y el uso eficiente de la energía eléctrica mediante la aplicación de la tecnología. La eficiencia energética es un factor de gran importancia en el sector energético, ya que en este siempre se busca aprovechar en mayor medida la energía disponible, evitando las pérdidas, ya que existe una gran cantidad de mecanismos por los cuales se desaprovecha la energía eléctrica [1], es por eso que en los últimos años surgen

cada vez más proyectos que buscan, mediante el uso de nuevas tecnologías, la reducción del consumo de energía eléctrica en algunos de los procesos principales o inclusive en algunos subprocesos que existen dentro de éste sector.

Dentro de la transmisión de energía eléctrica el proceso de transformación es uno de los más importantes, ya que este permite elevar la tensión de la energía generada para poder transmitirla con un nivel menor de pérdidas. En el proceso de transformación existe un subproceso que ayuda a mejorar la eficiencia de este, ya que incrementa la capacidad de carga del autotransformador o transformador, según sea el caso, este subproceso es el sistema de enfriamiento del transformador, sin embargo, en ocasiones este sistema cumple con su función a costa de un consumo desmedido de energía que podría no ser muy considerable en relación a la cantidad de energía que pasa por el proceso de transformación, pero si lo es cuando se repite en varios bancos de transformación y cuando se revisa el costo de las actividades del proceso de transmisión.

Es debido a la problemática de consumo de energía que presenta este pequeño proceso que dentro de la CFE se ha propuesto ejecutar acciones que permitan la reducción de este consumo mediante la modernización y el uso de tecnología en este proceso [2].

II. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

La regulación de la temperatura en un autotransformador es de suma importancia en términos de eficiencia energética, ya que conforme la capacidad del autotransformador para autorregularla disminuye, las pérdidas de energía se incrementan [3], [4].

Es común que en transformadores de gran potencia se recurra a un sistema de enfriamiento de aire forzado para reducir este problema [4], sin embargo, en algunas ocasiones estos sistemas no tienen una adecuada regulación debido a cuestiones tecnológicas o a desgaste de los elementos que lo conforman. En estas situaciones se requiere hacer una intervención a dicho sistema, ya sea con la modernización de algunos de sus elementos, el uso de tecnologías que aporten mayor confiabilidad o ambas.

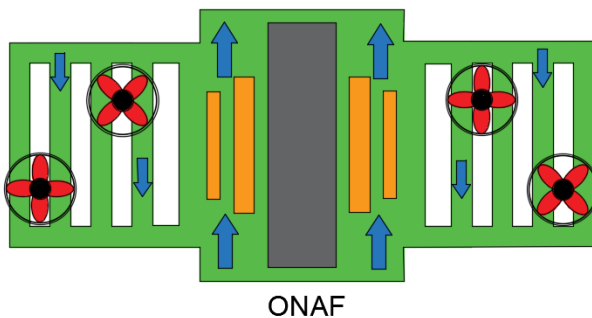
El presente proyecto se realiza en tres bancos de transformación de 230/115 kV con una capacidad de 100 MVA en tres diferentes subestaciones de la zona de transmisión Camargo.

¹ CFE Transmisión, Gerencia Regional de Transmisión Norte, Zona de Transmisión Camargo, Carretera Camargo-la Perla km 12.5, Cd. Camargo, Chihuahua. C.P. 33700. mario.pineda@dt.cfe.mx

² CFE Transmisión, Gerencia Regional de Transmisión Norte, Calle Guanaceví No. 131, Parque Industrial Lagunero, Gómez Palacio, Durango, C.P. 35070.

A. Definición del sistema de enfriamiento de aire forzado

El sistema de enfriamiento de los autotransformadores tratados en este trabajo es del tipo ONAF en el que los devanados del autotransformador están sumergidos en un tanque que contiene aceite mineral como refrigerante, el cual circula por convección dentro del tanque así como por un grupo de radiadores los cuales se ubican a los costados del tanque, en estos se montan ventiladores para hacer circular aire a través de ellos, a esta última parte se le denomina sistema de enfriamiento de aire forzado, este sistema consta de un grupo de ventiladores que son accionados a un nivel de temperatura definido reduciendo en menor tiempo la temperatura del aceite. La Figura 1 muestra los elementos del sistema de enfriamiento mencionado.



ONAF

Figura 1. Representación gráfica del sistema de enfriamiento del autotransformador.

B. Modernización de ventiladores y monitores de temperatura

En los autotransformadores es necesaria la medición de temperaturas del aceite y del devanado debido a que son un parámetro para la ejecución de otras tareas. Estas temperaturas se obtienen de la parte superior del tanque mediante un sensor de temperatura PT100 el cual consiste en un elemento de platino que incrementa su resistencia (Ω) conforme se incrementa la temperatura. Dichas señales se envían al monitor de temperatura correspondiente, que está montado sobre el autotransformador para poder disponer de la medición. En este caso los elementos para la medición de temperatura habían alcanzado su tiempo de vida disminuyéndose así la confiabilidad de las señales proporcionadas, además en algunos casos la medición de temperatura solo podía verificarse de manera local, debido a lo anterior se optó por su reemplazo, se realizó el cambio del sensor de temperatura por uno del mismo material, así también, se reemplazaron medidores analógicos.

La Figura 2 muestra algunos de los elementos retirados en

los autotransformadores de la zona.



a)



b)

Figura 2. Elementos retirados a) Monitor de temperatura, b) Ventiladores.

En el caso del sistema de aire forzado los ventiladores utilizados se conectan en un arreglo que puede consistir en una o varios grupos denominados pasos. Existen arreglos denominados de un paso, en los que se agrupan todos los ventiladores para entrar en funcionamiento al detectar un incremento en la temperatura, o bien se utilizan arreglos denominados de dos pasos en los que un grupo de ventiladores funcionan para reducir un incremento leve en la temperatura, sin embargo, si este grupo no logra reducirla se activa un segundo grupo que ayude disminuirla. El sistema de aire forzado con el que contaban los autotransformadores de este trabajo constaba únicamente de un paso por lo que para cualquier

incremento de la temperatura funcionaban todos los ventiladores, aunado a esto los ventiladores al igual que los monitores de temperatura habían excedido su tiempo de vida lo cual traía consigo un funcionamiento ineficiente que se reflejaba en un mayor consumo de energía y una reducción muy baja de la temperatura durante su funcionamiento. Es por esta razón que se realizó la modernización de los ventiladores y se habilitaron dos pasos en los casos donde la instalación lo permitió.

En la Figura 3 se muestran los elementos instalados los cuales constituyen la modernización de los elementos primarios de este sistema, en el inciso a) se muestran los monitores de temperatura instalados sobre el autotransformador. En el inciso b) se observan los ventiladores montados sobre los radiadores del autotransformador.



a)



b)

Figura 3. Elementos instalados a) Monitor de temperatura
b) Ventiladores.

C. Instalación de monitor de transformador

Como parte de este proyecto se contempla el uso de tecnologías existentes que aseguren un mejor desempeño del sistema de enfriamiento por lo que se contempla la instalación de un equipo monitor de transformador el cual permite obtener y procesar información del estado del autotransformador únicamente suministrando señales de tensión, corriente y temperatura [5]. El dispositivo utilizado es un equipo SEL-2414 mostrado en la Figura 4.



Figura 4. Monitor de transformador utilizado.

Una vez instalados los elementos primarios del sistema de enfriamiento (monitores de temperatura y ventiladores), se realizó la instalación de dicho monitor, para esta actividad se tendió cableado para la obtención de señales de temperatura provenientes de cada uno de los monitores de temperatura instalados en el autotransformador, los cuales fueron obtenidos en señal resistiva (RTD) ya que el monitor de transformador cuenta con un grupo de entradas destinadas a este tipo de señales. Así mismo se realizó la integración de las señales de tensión y corriente provenientes de los TP de bus y TC del autotransformador respectivamente, ambas del lado secundario.

Dentro de este proyecto se contempla un gabinete de campo el cual protege tanto al equipo como al cableado de los agentes del ambiente que pueden ocasionar un mal funcionamiento o una reducción acelerada del tiempo de vida del cableado y el equipo. Este gabinete se instaló en un punto intermedio del banco de transformación evitando que el monitor del autotransformador quede lejano de alguna de las fases que componen el banco. La alimentación de este gabinete se hace en 127 VCA para alimentar equipo auxiliar del gabinete como iluminación, resistencias calefactoras o contactos disponibles para servicio en sitio del equipo, y 129 VCD para el monitor

del autotransformador, lo anterior para asegurar su funcionamiento mediante bancos de baterías aun y cuando se pierda la alimentación de CA. La Figura 5 muestra la instalación del monitor de temperatura, en esta imagen se puede ver también la instalación del distribuidor de fibra óptica de este gabinete el cual se abordará en la siguiente sección.



a)



b)

Figura 5. Instalación del monitor de transformador a) vista frontal del equipo b) vista posterior del equipo

La configuración del equipo se realiza mediante el software del fabricante, y está conformada en 2 grupos de funciones, el primero se compone de una lógica de automatización para el encendido de los ventiladores la cual consiste a su vez en dos modos de funcionamiento, automático y manual, el modo automático consta de un grupo de variables digitales que se activan con la elevación de la temperatura de devanado en cada una de las fases que integran el banco de transformación, las cuales a su vez activan una salida correspondiente a la fase que ha sobrepasado el umbral establecido. Este umbral se determina según lo establecido en [6] donde se determinan los parámetros para el funcionamiento del sistema de enfriamiento, esto es 55°C para el arranque del paso 1 y 65° para el arranque del paso 2. El modo manual se establece como una herramienta para el mantenimiento y pruebas del sistema de enfriamiento, ya que este permite arrancar y parar los ventiladores en cualquier momento sin importar las condiciones de temperatura, esto se realiza mediante el panel frontal del equipo en el cual se configuraron mandos en los botones de este para arrancar directamente los ventiladores, así mismo en este panel se configuran señales visibles que indiquen el estado del sistema de enfriamiento, esto es indicación del modo automático/manual y de funcionamiento de los pasos del sistema (paso 1 y paso 2) las cuales se encienden cuando se encuentran activos como se observa en la Figura 4.

La segunda función del equipo consiste en un grupo de señales digitales que se activan a través de la medición de la temperatura y constituyen las alarmas preventivas que se envían a control supervisorio para reportar las condiciones de temperatura del transformador a fin de prevenir un disparo debido al incremento de esta, este grupo de alarmas se configuran según lo establecido en [6] para cada una de las fases, esto es una alarma de temperatura de aceite 65°C y una alarma de temperatura de devanado a 95°C, estas alarmas preventivas otorgan un margen de acción que permite la aplicación de medidas para la reducción de la temperatura evitando alcanzar los 105°C a los que se produce el disparo del interruptor del lado secundario. Se configuran también algunas alarmas generales complementarias, para los casos de pérdida de alimentación y problemas en el sistema de enfriamiento las cuales ayudan a mantener en óptimo funcionamiento dicho sistema.

Con las señales de potencial y corriente provenientes de los TP y TC respectivamente se activa una serie de funciones con las que cuenta el equipo, las cuales otorgan información relacionada con el desgaste del aislamiento en el interior del autotransformador, así como, la reducción del tiempo de vida de este provocada por incrementos de temperatura.

D. Integración al sistema SCADA

Las subestaciones de este proyecto cuentan con un sistema SCADA el cual permite el monitoreo tanto local como remoto de las condiciones operativas de la misma, así mismo, permiten el telecontrol de estas instalaciones, dado lo anterior la integración del monitor de transformador a este sistema se vuelve necesaria debido a que como se mencionó anteriormente las condiciones de operación del transformador están en este equipo.

La comunicación entre el monitor de transformador y el servidor SCADA se realiza mediante la red LAN de cada una de las subestaciones.

La integración a la red LAN del monitor de transformador consiste en un cable de fibra óptica rematado en un distribuidor óptico en cada extremo, uno en el gabinete de campo y otro en la caseta de control de la subestación, para así mediante jumpers de fibra óptica hacerlo llegar en un extremo al equipo y en otro extremo a un switch de la instalación. Lo anterior constituye el enlace físico del equipo y se muestra en la Figura 6.

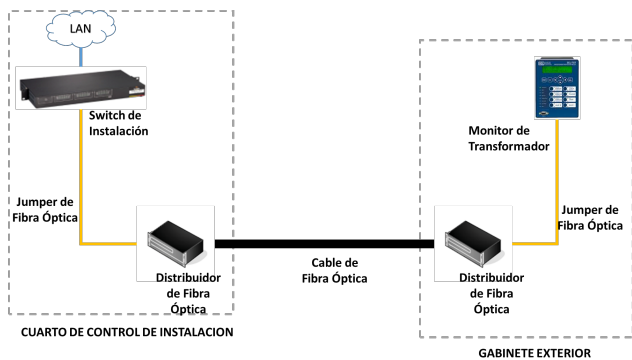


Figura 6. Diagrama de Interconexión del Monitor de Transformador a la Red LAN.

Concluido el enlace físico del equipo se realizó el enlace mediante un protocolo de comunicación, para lo cual se eligió el protocolo DNP3 el cual permite el intercambio de información entre equipos mediante una arquitectura maestro-esclavo con una estructura definida en los datos enviados, que le da robustez y fiabilidad a la información transmitida. Dicho enlace requiere la configuración del equipo donde se le indiquen parámetros de comunicación, tipo de información solicitada y estructura de la información. Esta configuración se realizó en los equipos SEL-2414 conforme a lo especificado en [5] para establecerlo como un equipo “esclavo”, de igual forma el servidor SCADA se preparó para fungir como dispositivo “maestro”.

La información recolectada en el servidor SCADA se hace llegar a la consola de control local en la que se desarrollaron diferentes desplegados para la información,

esto dependiendo de las posibilidades de cada una de las consolas. La Figura 7 muestra los desplegados de algunas de las consolas de este proyecto en ellas se puede ver el monitoreo en tiempo real de la temperatura en el autotransformador, así como algunos indicadores de alarma para el incremento de temperatura.

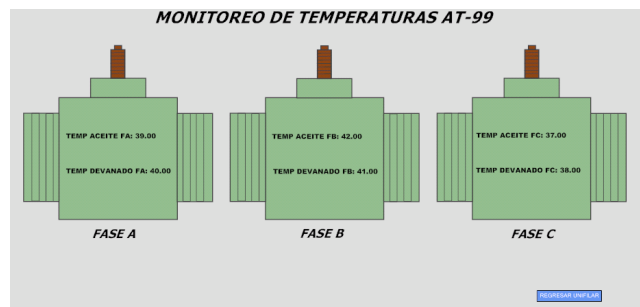
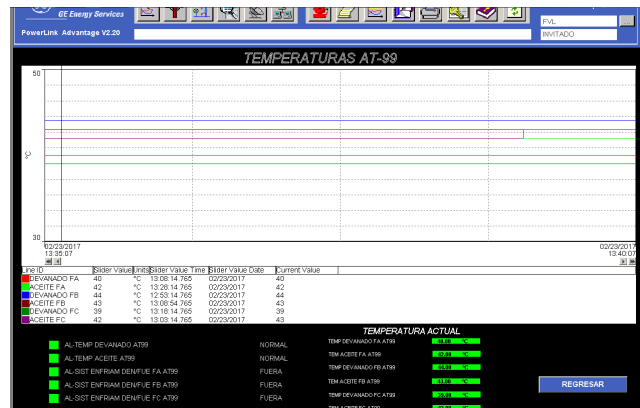


Figura 7. Desplegados de consolas de control local

De la misma forma que en las consolas de control local la información es enviada a las instancias de control supervisorio donde es recolectada para ser utilizada con fines de la operación de la red del sistema eléctrico nacional. El envío de esta información a nivel superior establece también una medida preventiva que asegura un mejor funcionamiento ya que de existir un fallo o un funcionamiento anormal el centro de control reportará de manera inmediata para la revisión de éste.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se presenta una evaluación comparativa del consumo y características del sistema de enfriamiento en las instalaciones incluidas en este proyecto. Para fines prácticos durante este apartado se asigna un número como identificador para cada autotransformador.

A continuación, las Tablas I y II muestran algunas características de los ventiladores anteriores y los actuales instalados en los autotransformadores de este proyecto.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE VENTILADORES ANTERIORES

AT	No Ventilador	Caudal m ³ /h	Capacidad HP	I Amp	Años de uso
UNO	40	8112	0.5	2.5	27
DOS	24	8112	0.5	2.5	20
TRES	30	8112	0.5	2.5	20

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE VENTILADORES ACTUALES

AT	No Ventilador	Caudal m ³ /h	Capacidad HP	I Amp	Años de uso
UNO	40	13800	0.5	1.8	1
DOS	24	13800	0.5	1.8	1
TRES	30	13800	0.5	1.8	1

En primera instancia se ve el número de ventiladores instalados en cada banco de autotransformadores este número varía dependiendo de la estructura de los radiadores, se observa también el caudal en m³/h, esto es la cantidad de aire que puede hacer pasar por los radiadores para refrigerar el aceite, este parámetro es muy importante ya que como se mencionó se trata de la cantidad de material refrigerante (en este caso el aire) que se hace pasar para reducir la temperatura este está determinado por las capacidades del motor empleado (dato de placa). Finalmente se muestran características eléctricas del motor las cuales dan pie a las lecturas de consumo que se tienen, finalmente se observa el tiempo de uso en el que sobresalen los equipos anteriores los cuales tenían 20 años o más en funcionamiento.

Las diferencias en relación a los datos del caudal entre los ventiladores existentes y los actuales muestran que estos últimos incrementan aproximadamente el 60% del caudal cuya importancia ya ha sido mencionada, además se observa que este incremento lo hace con un motor que tiene un consumo nominal de corriente menor.

Dada la comparativa anterior es notorio en los datos proporcionados por estas tablas que los ventiladores instalados tienen características que pueden conseguir la reducción de la temperatura en un menor tiempo lo cual impacta directamente en el consumo ya que el sistema de enfriamiento tendrá menos horas de uso, es decir, no funcionara de forma continua, lo anterior se puede comprobar en la comparativa de las tablas III y IV donde se presentan datos de consumo del sistema de enfriamiento. En esta se puede observar como la demanda en todas las instalaciones se ha reducido esto debido a las características eléctricas de los nuevos ventiladores los cuales funcionan de una forma más eficiente, el consumo anual se redujo también ya que con la automatización del sistema de enfriamiento, este solo funciona cuando es requerido y realiza su función en un menor tiempo como lo muestra la columna de horas de uso.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO ANTERIOR

AT	Demanda kW	Horas de uso anual	Consumo anual kW/h
UNO	38.06	5040	191822
DOS	22.84	5040	115093
TRES	28.55	5040	143867

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS DE CONSUMO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO ACTUAL

AT	Demanda kW	Horas de uso anual	Consumo anual kW/h
UNO	27.40	3528	96678
DOS	16.44	3528	58007
TRES	20.55	3528	72509

Finalmente es importante recalcar que los consumos anuales del sistema de enfriamiento se redujeron en promedio al 50% en todas las instalaciones, lo que a su vez se traduce en una reducción en el costo del proceso de transmisión en términos económicos y en un ahorro de energía en términos de sustentabilidad.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron las estrategias seguidas para la modernización de los elementos del sistema de enfriamiento de autotransformadores en tres instalaciones diferentes, así mismo, se describió la integración de tecnologías que le dan una mayor flexibilidad a este sistema y a su vez permiten mantenerlo en un funcionamiento óptimo.

Dentro de este trabajo se comprueba que la inversión en la modernización de equipo de sistemas alternos al autotransformador puede tener un gran impacto tanto en su funcionamiento como en los costos del proceso de transmisión. Así también muestra como al integrar diversas tecnologías en estos proyectos se puede tener un monitoreo en todos los niveles de operación, además se puede obtener información del estado de materiales internos de difícil acceso en el autotransformador que podrían prevenir un fallo mayor o en su caso ayudar a dictaminar la causa de alguna falla.

Finalmente este trabajo constituye una práctica que puede ser replicada en sistemas de igual o menor capacidad, la cual ayude al uso eficiente de la energía eléctrica y por consecuencia al ahorro de la misma.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Comisión Federal de Electricidad quien dentro del programa de ahorro de energía del sector eléctrico (PAESE) y por medio de la gerencia de transmisión norte otorga las facilidades para la realización de este proyecto.

VI. REFERENCIAS

- [1] Benedict, E.; Collins, T.; Gotham, D.; Hoffman, S.; Karipides, D.; Pekarek, S.; and Ramabhadran, R., (1992) "*Losses in Electrical Power Systems*", ECE Technical Reports. Paper 266. Disponible en: <http://docs.lib.purdue.edu/ecetr/266>.
- [2] Johnson, T.; Alatorre, C.; Romo, Z.; Liu, F., (2009) "*Low-Carbon Development for Mexico*", Conference Edition, The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, pp 118.
- [3] Gradnik T.; Končan-Gradnik M., (2006) "*Cooling System Optimization and Expected Lifetime of Large Power Transformers*", Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environmental Systems, Chalkida, Greece, pp194-201.
- [4] Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Co. (1964). "*Electrical Transmission and Distribution Reference Book*", Pennsylvania: Westinghouse Electric Co. pp.106.
- [5] *SEL-2414 Transformer Monitor Instruction Manual*, Schweitzer Engineering Laboratories Inc. pp 5.1-5.42, D.1-D.13 Jul. 2015.
- [6] Manual de Transformadores y Reactores de Potencia, segunda edición, Tomo II, CFE, IIE, pp.8 -9, Jun 2007.



Ana Mayela Zárate Sánchez, Coahuila, el 02 de mayo de 1992. Egresada de la carrera de Arquitectura, del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Laguna, en el año 2015.

Actualmente trabaja en CFE Transmisión, donde se funge como Jefe de Oficina de Obra Civil e.f. en la zona de transmisión Durango y como coordinadora de Proyectos de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE) de la

Gerencia Regional de Transmisión Norte. Áreas de interés son Optimización de sistema de ahorro de energía, Calidad ambiental, Calidad de energía, Conservación del medio ambiente en trabajos de generación y transmisión de energía, Diseño y desarrollo sustentable bioclimático, Eficiencia energética, energías alternativas, mejora de calidad ambiental.

VII. BIOGRAFÍA



Mario Alberto Pineda Belmontes Nació en Torreón Coahuila, el 04 de abril de 1986. Egresado de la carrera de Ingeniería electrónica, con especialidad en electrónica de potencia, del Instituto Tecnológico de la Laguna, en el año 2009. Obtuvo el grado de maestro en ciencias en ingeniería eléctrica con especialidad en ingeniería de potencia en el mismo instituto en el año 2012.

Actualmente labora en CFE Transmisión, donde funge como jefe del departamento de control e.f. en la zona de transmisión Camargo, sus áreas de interés son calidad de la energía, redes eléctricas, FACTS, filtros activos de potencia, sistemas SCADA y automatización industrial.

Es Miembro IEEE, IEEE Industry Applications Society, IEEE Power Electronics Society e IEEE Power & Energy Society



Andrés Tinoco Alcázar Nació en Torreón Coahuila, el 15 de septiembre de 1968. Egresado de la carrera de Ingeniería Industrial en Electrónica, del Instituto Tecnológico de la Laguna, en el año 1989. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en el mismo instituto en el año 2015. Asimismo, obtuvo el grado de Maestro en Administración en la

Universidad Autónoma de Coahuila en el año 2015

Actualmente trabaja en CFE Transmisión, donde se desempeña como encargado de la Subgerencia de Control de la Gerencia Regional de Transmisión Norte. Áreas de interés son automatización, sistemas SCADA, Electrónica de Potencia, CEVs, calidad de energía, análisis y evaluación de proyectos de inversión. Es miembro de la IEEE.