



Protección Integral de Transformadores de Potencia de la ANDE

Richard Arroyo*, Alejandro Coronel*, Mario Arévalo, Fabián Cáceres****

Facultad Politécnica – UNA*, Administración Nacional de la Electricidad (A.N.D.E.)**

Paraguay

RESUMEN

La Administración Nacional de Electricidad (ANDE), distribuye y abastece de energía eléctrica en toda la Región Oriental y parte de la Región Occidental del Paraguay; además de la generación de energía; en una menor proporción con respecto a las otras entidades generadoras de energía (Itaipú y Yacretá). Es un ente autárquico descentralizado de la administración pública; que debe satisfacer en forma adecuada las necesidades de energía eléctrica del país. Para el logro de este objetivo debe proyectar, construir y mantener obras de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. Debido a la alta demanda, el sistema de transmisión se ve afectado directamente por su exposición a sobrecargas, sobretensiones y factores externos al sistema que hacen que la red de transmisión opere a su máxima capacidad; esto a su vez genera que los sistemas de protecciones de los elementos que componen la red; específicamente los transformadores de potencia, deban ser cada vez más eficientes y confiables para garantizar una mayor vida útil de los componentes de la red de transmisión, evitar mayores pérdidas económicas para la institución responsable, y a su vez garantizar la entrega de energía eléctrica de manera constante.

El planteamiento de este trabajo es presentar un sistema de protección para los transformadores de potencia que cumpla con los requerimientos mínimos necesarios para satisfacer las exigencias de la red de transmisión considerando un funcionamiento óptimo y eficaz teniendo en cuenta un beneficio económico favorable. Para ello, primeramente; deberemos realizar un análisis de la eficiencia del funcionamiento de los sistemas de protección utilizados actualmente en la ANDE; y a partir de allí ver que mejoras pueden implementarse con la tecnología con la cual se cuenta.

PALABRAS CLAVES

Calidad de Servicio Técnico, Transformador de Potencia, Sistemas de Protección, Transmisión de energía, Sistema de Potencia.

1. INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico ha evolucionado hacia un entorno competitivo de mayor nivel que exige el requerimiento de planificación idónea de la expansión del sistema para mejorar el grado de competencia en el mercado. Por ello es importante también asegurar los equipos eléctricos que hacen posible la transmisión y distribución de la energía en la red mediante equipos modernos y sistemas de protecciones actualizados y sincronizados correctamente con la red eléctrica local; de esta manera se garantiza el funcionamiento óptimo de la transmisión y distribución de la energía en la red local.

La protección es necesaria para separar los equipos bajo falla del resto del sistema, limitar daños al equipo con defectos, minimizar la posibilidad de incendios, los riesgos al personal y riesgos de daños a los equipos adyacentes. Sin embargo, no existe un sistema de protección estándar para la protección de los distintos tipos de transformadores, en varios casos se requiere un análisis individual de ingeniería a fin de determinar el



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

mejor esquema con costos viables. Normalmente se puede tener varios resultados y alternativas que ofrecen variados grados de sensibilidad, velocidad y selectividad. Con el objetivo de obtener el mejor rendimiento posible el sistema de protección debe satisfacer, a la institución responsable del suministro garantizando; minimizar [1]: costo de reparación de las averías, costo de pérdida de producción, los efectos adversos en la operación del sistema, la extensión de los daños a los equipos adyacentes, el período de indisponibilidad del equipo.

Los transformadores de potencia son elementos esenciales en la transmisión de energía eléctrica ya que sin estos dispositivos el transporte de energía eléctrica a grandes distancias no sería factible. La vida útil de un transformador; aparte de estar expuesto a fallas externas, también depende en gran medida de la calidad de sus medios aislantes [2], estos medios aislantes se degradan con el paso del tiempo y pueden llegar a contaminarse ocasionando fallas en el transformador. Se busca encontrar un sistema de protección el cual sería económicamente viable para nuestro mercado y a la vez que sea operativamente eficiente.

Entonces, para la transmisión de energía se cuenta con diversos sistemas de protecciones; tanto para proteger las líneas de transmisión en sí, como también para proteger equipos eléctricos individuales; en este sentido, los Dispositivos Electrónicos Inteligentes (o IEDs por sus siglas en inglés); haciendo referencia a un sistema de protección confiable, son sistemas de protecciones más complejas que incorporan una o más procesadores que tienen la capacidad de recibir o enviar datos/control desde o hacia una fuente externa. A la hora de hablar de sistemas de protecciones este sistema es de lo más avanzado con el cual se cuenta en la actualidad en el mercado eléctrico nacional. Con esta tecnología mejorada, no solamente es posible inspeccionar los circuitos internos y externos, o realizar un diagnóstico en tiempo real de informes de eventos; sino también mejora la capacidad de control y adquisición de datos para eventos cotidianos o particulares [3].

2. EVOLUCIÓN DE LOS RELEVADORES A LO LARGO DE LA HISTORIA

En los inicios de la instalación e implementación de las Subestaciones Eléctricas fue necesario el empleo de dispositivos de protección ante la ocurrencia de fallas en los sistemas de potencia, los primeros dispositivos utilizados fueron los Fusibles, estos dispositivos se siguen utilizando en la actualidad por su bajo costo, pero con la desventaja de que una vez ocurrida la falla deben ser reemplazados. Ante esta problemática se vio la necesidad de adquirir los Interruptores Automáticos de Potencia para resolver este inconveniente, estos interruptores automáticos interrumpen o restablecen la continuidad del servicio bajo condiciones normales o de falla.

Con el desarrollo de las protecciones eléctricas en los circuitos de media tensión y en alta tensión, entro en vigencia la adquisición de relevadores de protección que operaban de manera independiente al interruptor de potencia, estos fueron los Relevadores Electromecánicos, cuya función se basa en los fenómenos de atracción y repulsión electromagnética, su principal desventaja es que son dispositivos de gran tamaño y que requieren un permanente mantenimiento [4]. Los Relevadores de Estado Sólido, su diseño se basan en la utilización de dispositivos analógicos y electrónicos, no contienen partes móviles ni contactos, son dispositivos más pequeños que los relevadores electromecánicos, realizan la misma función que los Relevadores Electromecánicos con mayor velocidad de conmutación y no produce ruidos acústicos, es inmune a vibraciones y choques mecánicos y al no haber contactos no existe rebotes, ni arcos ni desgaste, son más caros que los relevadores electromecánicos, están formados por semiconductores por lo que no soportan temperaturas elevadas ni transitorios fuertes, otras de sus desventajas es que a diferencia de los relevadores electromecánicos al recibir una onda de corriente excesiva existe posibilidad de reemplazar sus contactos, mientras que en los de estado sólido es necesario reemplazarlo totalmente [5].

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Los Relevadores Digitales que también cumplen funciones como la de los relevadores electromecánicos y relevadores de estado sólido que están diseñados para una función de protección específica como la de desconectar los equipos defectuosos del sistema de potencia; poseen la función de registrar y almacenar parámetros justo antes y durante la falla, observar de manera regular los parámetros del sistema durante corto circuitos, con el fin de proveer información acerca de los eventos producidos, utilizan filtros para rechazar señales transitorias a frecuencias que no sean fundamentales, estos filtros deben estabilizarse antes de que su resultado pueda considerarse preciso, también proporcionan diagramas oscilográficos [6].

3. EQUIPOS DE PROTECCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Estos equipos de protecciones muchas veces son usados como protecciones principales, o para protecciones de respaldo y generalmente, su funcionamiento no es muy compleja debido a que son dos las variables con los cuales se monitorea la red para su accionamiento o no:

- El nivel de la variable (corriente, tensión, etc.) mínima de operación, que es aquel valor que produce el cambio de estado del relé.
- La característica de tiempo de operación, es decir la forma en que el relé responde en cuanto al tiempo.

Los equipos de protecciones más utilizados por nuestra red eléctrica local para la protección de transformadores son los mencionados abajo;

Tabla I: Norma ASA-C-37-2 [7]:

NORMA ASA-C-37-2 "NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN Y FUNCIONES DE LOS DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS DE PROTECCIÓN, REGULACIÓN Y CONTROL"		
Nº DE FUNCIÓN	DENOMINACIÓN	FUNCIÓN
50	Relé de sobrecorriente instantáneo	Opera instantáneamente para una corriente por encima de un valor predeterminado.
51	Relé de sobrecorriente temporizado en circuito C.A.	Opera con una característica de tiempo definido o una característica de tiempo inverso, cuando la corriente sobrepasa el valor prefijado, en circuito de corriente alternada.
87	Relé diferencial	Opera en función de la diferencia proveniente del desequilibrio existente entre dos o más corrientes u otras magnitudes eléctricas cualesquiera, medidas en los puntos extremos del área protegida.

Estos dispositivos eléctricos de protección tienen un funcionamiento más detallado según [8], los cuales son explicados en la siguiente parte:

Relevador de sobrecorriente instantáneo (50) [4]

Este relevador opera en forma instantánea, para un valor de corriente excesivo, indicando una falla en el aparato o circuito protegido. Su tiempo de operación es de 0.05 segundos (3 ciclos), existentes en el tipo estático, pero el que se usa más comúnmente es el llamado de atracción electromagnética. Se diseña para operar sin retraso intencional cuando el valor de la corriente excede al valor ajustado en el relevador. El

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

rango de tiempo en la operación de este relevador varía entre 0.016 segundos y 0.10 segundos. Su característica se expresa mediante una curva de tiempo corriente como muestra en la **Figura 1**.

Relevador de sobrecorriente con Retraso de tiempo (51) [4]

Este es un tipo de relevador con una característica de tiempo definida e inversa, que opera cuando la corriente excede un valor determinado, por lo general, a mayor corriente implica menor tiempo de la característica inversa. Se encuentran en el diseño de estado sólido o bien electromecánico el cual por su simplicidad y confiabilidad sigue siendo el más usado. El relevador de sobrecorriente contra tiempo tiene una característica de operación tal que el tiempo de operación varía en forma inversa con la corriente que circula por el relevador, esta característica se identifica en forma convencional con una de las cuatro características siguientes:

- *De tiempo definido:* Los relevadores de este tipo de curva se aplican en donde no existe la necesidad de coordinar con otros dispositivos y en donde la corriente de falla prácticamente no varía entre una condición de máxima y mínima o bien entre una falla local y un bus remoto.
- *De tiempo Inverso:* En las instalaciones eléctricas en donde por cambios de potencia inyectada o modificaciones en los elementos del circuito (conexión y desconexión de elementos), se presentan variaciones importantes en la corriente de falla, es recomendable la utilización de esta curva característica de los relevadores de sobrecorriente.
- *De tiempo muy inverso:* En instalaciones eléctricas en donde para fallas pequeñas, existen variables de corriente y el tiempo de interrupción es pequeño o bien se requiere coordinar con las curvas de fusibles, esta característica resulta adecuada.
- *De tiempo extremadamente inverso:* Esta característica es recomendable en las redes de distribución de las compañías eléctricas, que es la que mejor se coordina con restauradores y fusibles de un mismo circuito que es una aplicación típica de las redes de distribución aéreas.

Las curvas correspondientes a cada una de estas clasificaciones difieren por el rango en el cual el tiempo de operación decrece al aumentar el valor de la corriente. Cada una de estas curvas, en el diagrama tiempo – corriente, tendría una representación como la que se muestra en la figura:

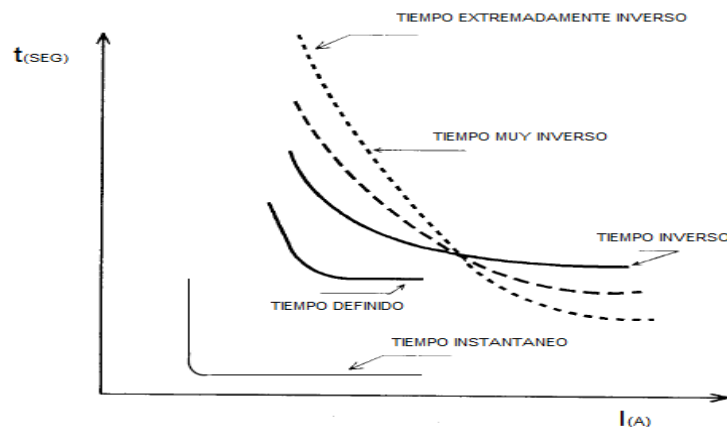


Figura 1: Comparación de las curvas típicas para relevadores de corriente

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Protección Diferencial (87) [4]

Esta protección es capaz no solo de eliminar todos los tipos de cortocircuitos internos, sino también entre espiras y fallas debidos a arcos eléctricos en las boquillas de los transformadores. En el esquema diferencial, se comparan las corrientes de entrada con los de salida del elemento protegido, siendo que el relevador denominado diferencial, opera cuando a través del mismo, circula una corriente, cuya diferencia entre la entrada y la salida rebosa cierto valor ajustado y denominado corriente diferencial.

Además de disponer de los distintos tipos de relés mencionados con finalidades diversas (protección, aviso, enclavamiento, etc.), en las instalaciones eléctricas existe la necesidad de conectar aparatos de medida, de constitución delicada, reducidas dimensiones y buena precisión, ya que las magnitudes a medir o vigilar son elevadas tensiones, corrientes fuertes, o concurren ambas circunstancias. Los aparatos más importantes son los transformadores de medida

- Transformadores de corriente.
- Transformadores de potencial.

Con sus primarios conectados en alta o en baja tensión, según corresponda, transforman las magnitudes que se desean medir, en corrientes y tensiones moderadas en el secundario (que por motivos de seguridad pueden conectarse a tierra) además de alimentar instrumentos de medida (indicadores, registradores, integradores) relés o aparatos análogos. Los principales objetivos de los transformadores de medida son:

- Aislar o separar los circuitos y aparatos de medida, protección, etc., de la alta tensión.
- Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes, y reducir corrientes de corto circuito a valores admisibles en delicados aparatos de medida.
- Obtener intensidades de corriente, o tensiones proporcionales a las que se desea medir o vigilar y transmitir las a los aparatos apropiados [9].

3.1 BANCOS DE BATERÍAS

Dentro de los servicios auxiliares (SSAA) de una subestación se encuentran los bancos de baterías, su funcionamiento es similar a la de una UPS, una vez interrumpida el servicio de energía eléctrica, se suministra energía desde los bancos durante un tiempo limitado; de acuerdo a sus dimensiones y capacidad. El banco de baterías es utilizado también para casos de emergencias (SSEE), ocasionados normalmente por una falla de los servicios auxiliares de corriente alterna, y el uso que se les da son para bobinas de disparo y cierre de disyuntores, motores de comando, señalización, alarmas, relés de protección, equipos de suministro de SSEE e iluminación de emergencia.

Cabe destacar que existen diferentes tipos de baterías, donde algunas obtienen mayor ventaja que otros, en ciertos aspectos como la vida útil, costo del banco de batería o el espacio físico que ocupa el banco. En la actualidad los bancos de baterías más utilizadas son las de Níquel-Cadmio por presentar menor desgaste, relegando a la batería de Plomo-Ácido.

3.2 DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS INTELIGENTES (IEDS)

Hoy en día, contar con un sistema que provea gran cantidad de información y, además, que sean de una fuente fiable, significa mucho para el manejo adecuado de los datos ya que aporta una gran flexibilidad a la hora de hacer la interfaz entre máquina y usuario para tomas de decisiones o simplemente para realizar mediciones en tiempo real, u obtener datos del funcionamiento del sistema.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

De esta manera, los IEDs son una alternativa viable económicamente para la protección de equipos ya que aportan ciertas ventajas como [10]:

- Contar con un rendimiento mejorado
- Ofrece mayor flexibilidad
- Cuenta con menor espacio físico y menor cantidad de cableado
- Ofrece una orientación a la multifuncionalidad

Con los avances tecnológicos de comunicación en la actualidad, se ha conseguido aumentar en gran número datos e informaciones en tiempo real; desde cualquier punto de la red. Una gran cantidad de información para los usuarios pueden ser desventajoso a la hora que se produzca algún evento en la red para la toma de decisiones que el personal deba hacer para corregir el evento en sí. Por eso es necesario que los datos estén resumidos en muchos casos para simplificar la toma de decisiones; obviamente sin perder datos e informaciones cruciales. En un IED, dichas informaciones y datos se clasifican básicamente en a) operacionales y b) no operacionales [11]. Los datos operacionales se refieren a valores instantáneos de la tensión (voltios), de la corriente (amperios) y de las potencias (MW, Mvar), etc. Por otro lado, los datos no operacionales que proporciona los IEDs son los datos utilizados para el análisis de un evento y no están en un formato de punto para el usuario como los datos operacionales.

En estos sistemas se pueden implementar tanto funciones de protección como de medición de calidad de suministro, e incluso ambas simultáneamente. Además de la medición en sí y el estado de información, también proporciona fasores de corriente y voltaje [12]. Una representación esquemática del funcionamiento general de un IED y su sistema de retransmisión puede observarse en la **Figura 2**.

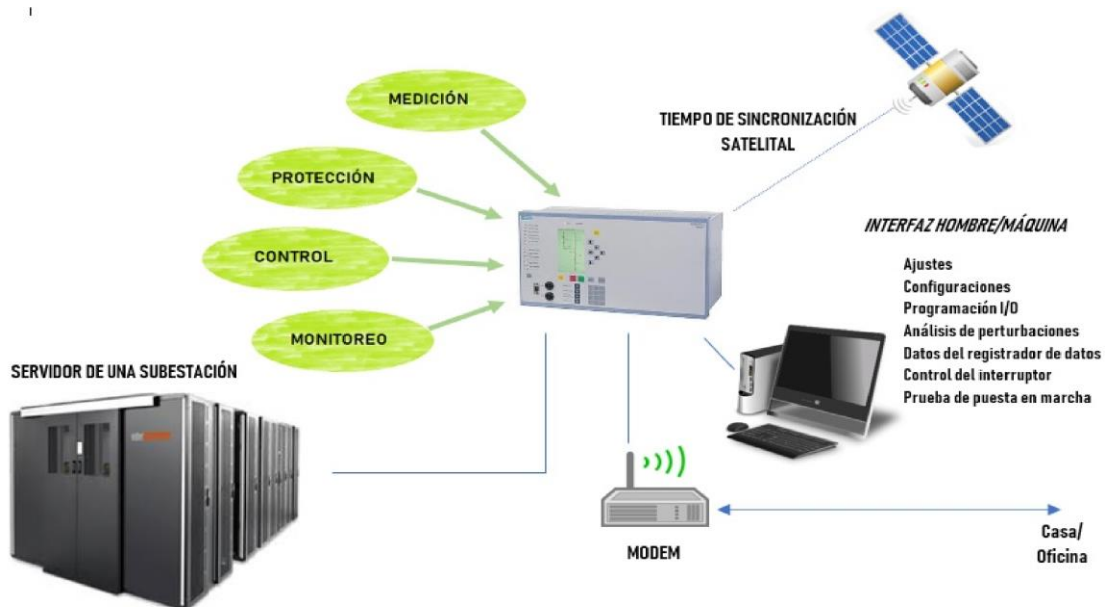


Figura 2: Descripción funcional de un dispositivo electrónico inteligente

En lugares como las subestaciones más modernas, los IEDs son ampliamente utilizados para monitorear y controlar de forma continua los equipos portentosos y costosos que se utilizan en una

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

subestación. La transmisión de datos se realiza mediante redes de comunicación de alta velocidad, donde son enviados a un software que se encarga de procesar las señales recibidas de los IEDs. La integración de datos en una subestación puede presentar grandes dificultades a la hora de trabajar con IEDs de diferentes proveedores, diferentes softwares, diferentes canales de comunicación, diferentes formatos de archivo, etc. Para manejar este problema es posible integrar datos de grabaciones realizadas por Digital Protective Relays (DPRs) y Digital Fault Records (DFRs) [13].

3.2.1 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

Volviendo a la parte de gestionamiento de datos e informaciones que puede proporcionar los IEDs, se mencionó que una sobreabundancia de informaciones puede ser dificultoso para los usuarios u operadores en momentos críticos donde uno necesite tomar decisiones rápidas. Por eso es importante obtener un buen conocimiento de los IEDs [14]; mejorar la recuperación de datos y presentar en un formato amigable. Los IEDs pueden considerarse como los ojos y oídos de un sistema de administración de energía remota y como constantemente está en vigilancia, se tiene un impacto significativo en la confiabilidad del sistema, la efectividad y el costo de una solución.

La **Figura 3** muestra un futuro Sistema de Control Digital (DCS) integrado con una Unidad de Gestión de la Información (IMU) para entregar información clasificada y necesaria de acuerdo al tipo de información que necesite el usuario. Por ejemplo, los datos que necesitan los Operadores es mucha más básica y menos detallada que los datos que necesita un usuario del área de Protecciones; esto es debido a que los Operadores toman las decisiones sobre el funcionamiento de la subestación (decisiones las cuales muchas veces son críticas y deben tomarse de forma instantánea) y una sobreabundancia de datos no es lo ideal para agilizar y dar mayor confiabilidad al sistema en sí.

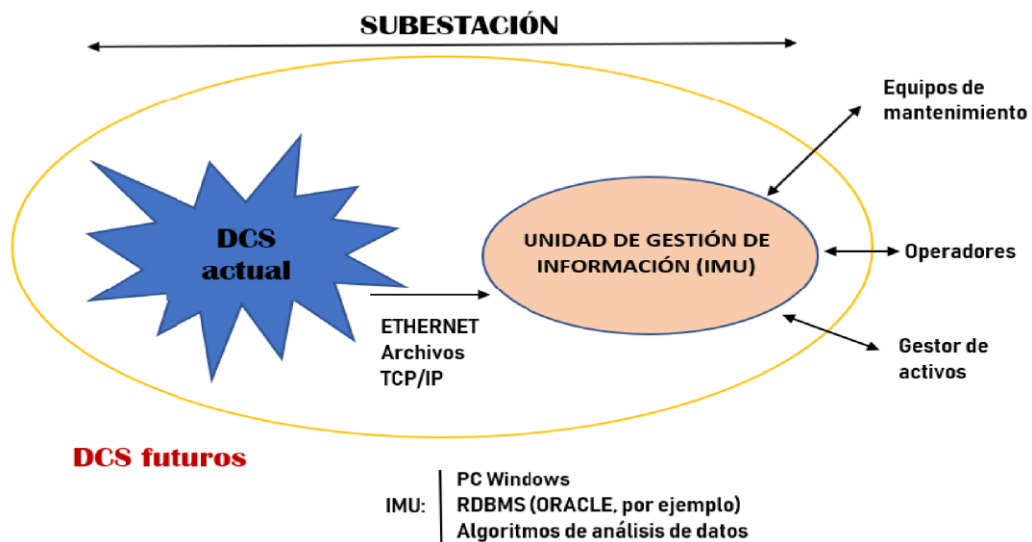


Figura 3: Futuro DCS con la Unidad de Gestión de Información (IMU).

Para la toma de decisiones se debe considerar que un nuevo evento puede ocurrir al mismo tiempo que un evento existente, y en consecuencia las clases de decisiones se superponen [15], de esta manera se complica más la realización de un análisis eficaz. Entonces debe definirse áreas de trabajo donde las corrientes y tensiones operan en rangos normales; saliendo fuera de esos



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

contornos es donde el régimen de trabajo será anormal; y dependiendo también, si el valor es muy excesivo puede entrar en estado de emergencia.

A partir de estas áreas operacionales, se puede tratar de forma más manipulable los datos. El enfoque de conjunto aproximados nos permite explorar sobre los datos [16][17][18] y trabajar con ellos de tal forma de simplificar informaciones sin que exista pérdidas de informaciones cruciales. Al tratar este enfoque de forma genérica, se puede aplicar esta forma de extraer conocimientos del dispositivo a las diferentes tipologías de subestaciones que utilicen la tecnología IED.

4. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se trató sobre las protecciones integral de un transformador de potencia que son utilizados normalmente en la ANDE, con una breve historia de cómo evolucionó uno de los principales componentes de protección que es el relé; hasta en la actualidad, con la aplicación de la última tecnología que existe en el campo de protecciones para un transformador de potencia, que son los dispositivos electrónicos inteligentes o IEDs.

El enfoque que se dió fue la de mejorar el conocimiento de esta nueva tecnología mediante este trabajo, para tratar de sacar el mayor provecho en lo que respecta a la utilización de IEDs y sus diversas aplicaciones que puedan ser aplicadas en el campo operativo y técnico. Haciendo hincapié en la mejora de los datos e informaciones que puedan proporcionar un IED y también la forma de comunicación que esta herramienta pueda otorgar al personal teniendo en cuenta en el área que trabaja (técnico operativo, ingeniero en mantenimiento, etc).

Queda abierta aún investigar más sobre los demás beneficios que se pueda aprovechar sobre los dispositivos electrónicos inteligentes, a través de la realización de otros trabajos a futuro y como pueden ser más beneficioso a la ANDE.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Rol del Organismo Regulador en la Confiabilidad del Sistema Eléctrico. Curso de Mercados Eléctricos Competitivos y la Red Transporte. 2004. Instituto de Energía Eléctrica, y Pedro Meroño. PRIMERA EDICION DEL CURSO DE REGULACION ENERGETICA DE ARIAE. La función de la regulación 2003.
- [2] Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. W. Flores, E. Mombello, Senior Member, IEEE, G. Rattá, Senior Member, IEEE, José Antonio Jardini, Fellow IEEE.
- [3] K. Behrendt and M. Dood. Substation Relay Data and Communication. In 27ndnd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 1995. [online] (www.selinc.com/techpprs.)
- [4] Harper, E. Protección de instalaciones eléctricas industriales y comerciales. Editorial Limusa. 2002
- [5] Areny, R. P. Adquisición y distribución de señales. Marcombo. 1993
- [6] Glover, J. D., & Sarma, M. S. Sistemas de potencia: análisis y diseño. Cengage Learning Editores. 2003
- [7] NORMA ASA-C-37-2 “NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN Y FUNCIONES DE LOS DISPOSITIVOS ELÉTRICOS DE PROTECCIÓN, REGULACIÓN Y CONTROL”.
- [8] Protección Multifuncional de Máquinas 7UM62. SIPROTEC. Manual. V4.6 2006.
- [9] R as Oliva, E. Transformadores de potencia, medida y protección. Marcombo. Barcelona. 1994
- [10] Katiraei, F.; Sun, C.; Enayati, B. No Inverter Left Behind: Protection, Controls, and Testing for High Penetrations of PV Inverters on Distributions Systems. *IEEE Power Energy Mag.* 2015, 13, 43-49.
- [11] J. McDonald. Substation Automation – IED Integration and Availability of Information. *IEEE Power & Energy*, March–April 2003.
- [12] A. Apostolov. Distributed Intelligence in Integrated Substation Protection and Control Systems. In 13th Conference of the Electric Power Supply Industry and Exhibition (CEPSI 2000), Manila, Philippines, October 2000.
- [13] R Integration of Substation Data M. Kezunovic, Fellow, IEEE, D. Sevcik, Member, IEEE, R. Lunsford, and T. Popovic, Senior Member, IEEE).
- [14] Knowledge Extraction from Intelligent Electronic Devices Ching-Lai Hor1 and Peter A. Crossley.
- [15] G. Roed. Knowledge Extraction from Process Data: A Rough Set Approach to Data Mining on Time Series. Master’s thesis, Department of Computer and Information Science, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1999.
- [16] R L. Polkowski. Advances in Soft Computing: Rough Sets Mathematical Foundation. Physica-Verlag Publisher, A Springer Verlag Company, Berlin, 2002.
- [17] Z. Pawlak and A. Skowron. Rough Set Rudiments. Bullentin International Rough Set Society, 3(4):pp. 181–185, 1999.
- [18] R Z. Pawlak and A. Skowron. Rough Set Rudiments. Bullentin International Rough Set Society, 3(4):pp. 181–185, 1999.