

# Esquema de Protección Piloto por Comparación Direccional con Canal Redundante para Líneas Paralelas de Subtransmisión

Gerardo Urrea Grijalva

Héctor J. Altuve Ferrer

Iván Yáñez Félix

Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V.  
Rogelio González Caballero No. 425, Parque Industrial Stiva Aeropuerto  
Apodaca, N.L., México

**Resumen**—Los esquemas normalizados de protección de líneas consideran arreglos que aseguran la redundancia utilizando distintos tipos de relevadores primarios y de respaldo con diferentes principios (diferenciales, de comparación direccional, de distancia, direccionales de sobrecorriente, etc.) para proteger líneas de diferentes niveles de tensión. En el caso de las líneas de subtransmisión (69 a 161 kV), se asegura la redundancia de los relevadores, pero no la del canal de comunicaciones, dado su elevado costo. En arreglos de líneas paralelas, cada línea tiene su propio canal de comunicaciones, y tampoco hay redundancia de canal. En este artículo se propone un esquema que permite lograr la redundancia del canal de comunicaciones en líneas paralelas en esquemas de protección piloto por comparación direccional. El esquema utiliza como canal redundante para cada línea el canal de comunicaciones de la línea paralela, y se basa en la capacidad de comunicación relevador-relevador y la lógica programable disponible en los relevadores digitales actuales.

Palabras clave: Relevadores de protección, protección de líneas, teleprotección, comunicación relevador a relevador.

## I. INTRODUCCIÓN

La Norma de Referencia NRF-041-CFE-2005 “Esquemas Normalizados de Protecciones para Líneas de Transmisión” [1] de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) establece los arreglos normalizados de protección de líneas de todos los niveles de tensión. Dicha norma incluye los diagramas de los esquemas de protección de líneas de transmisión, subtransmisión y distribución.

En el caso de las líneas de subtransmisión (69 a 161 kV), la Norma de Referencia NRF-041-CFE-2005 establece que tengan protecciones primaria y de respaldo independientes.

Como protección primaria puede utilizarse un esquema diferencial de línea (87L), o uno de protección piloto por comparación direccional (85L), en dependencia de la longitud de la línea, entre otros factores. Los canales de comunicaciones pueden ser fibra óptica, microonda, onda portadora o radio. La protección de respaldo es direccional de sobrecorriente, con o sin canal de comunicaciones.

Para la protección piloto por comparación direccional (85L), la Norma de Referencia NRF-041-CFE-2005 establece que debe contar con lógica programable de Disparo Transferido Permisivo de Sobrealcance (POTT, por sus siglas en inglés) o de Disparo Transferido Permisivo de Subalcance (PUTT).

A modo de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el arreglo normalizado de teleprotección para líneas de 69 a 161 kV, de longitud no mayor que 10 Km, con canal de comunicaciones de fibra óptica (PP-85L tripolar con convertidor óptico/eléctrico y fibra óptica dedicada).

De acuerdo con lo anterior, en la protección de líneas de subtransmisión se asegura la redundancia de los relevadores, pero no la del canal de comunicaciones, dado su elevado costo. Incluso en arreglos de líneas paralelas (ver Fig. 2), cada línea tiene su propio canal de comunicaciones, y tampoco hay redundancia de canal.

En este artículo se propone un esquema que permite lograr la redundancia del canal de comunicaciones en líneas paralelas, en esquemas de protección piloto por comparación direccional. El esquema utiliza como canal redundante para cada línea el canal de comunicaciones de la línea paralela, y se basa en la capacidad de comunicación relevador-relevador [2] y la lógica programable disponible en los relevadores digitales actuales.

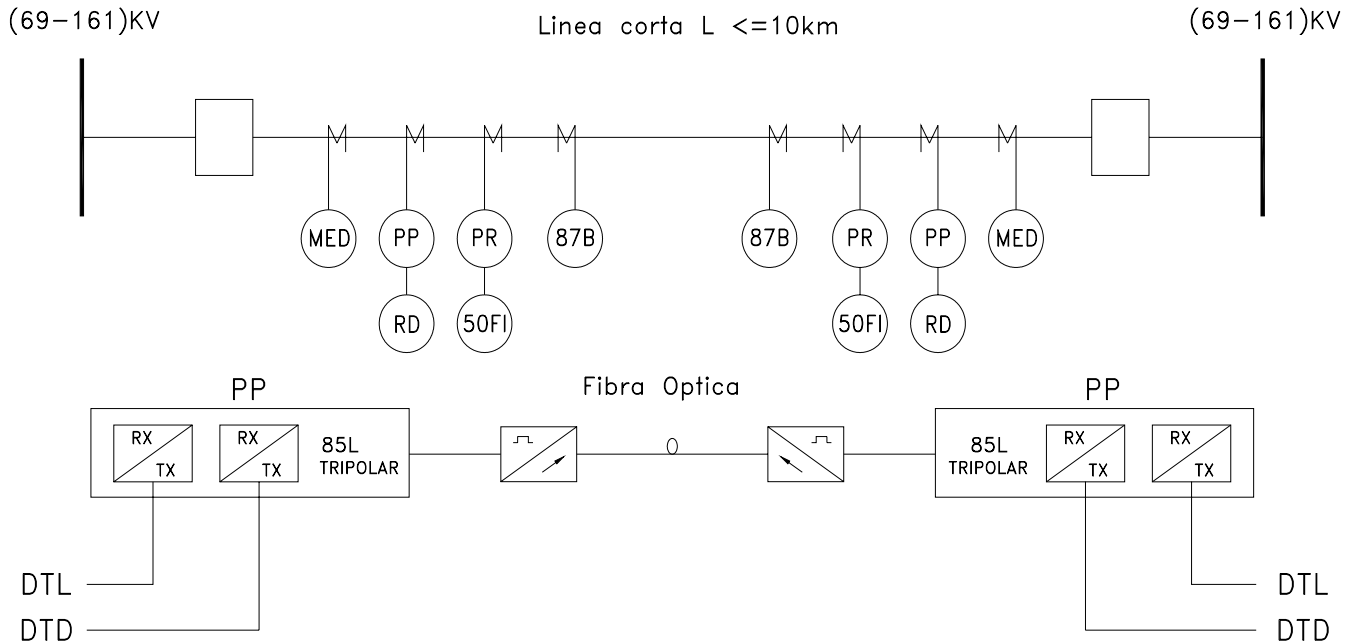


Fig. 1. Arreglo normalizado de teleprotección para líneas de 69 a 161 kV, con longitud no mayor que 10 Km [1].

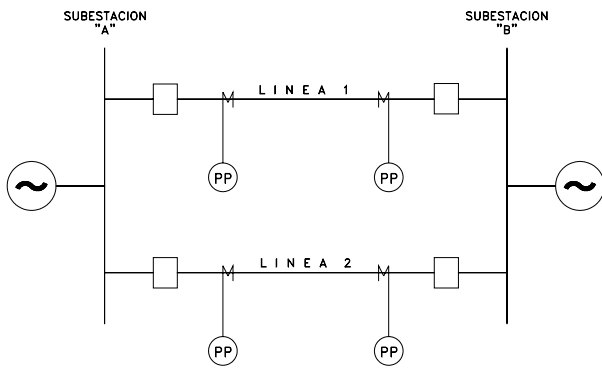


Fig. 2. Arreglo de dos líneas de subtransmisión paralelas.

## II. CANAL REDUNDANTE DE TELEPROTECCIÓN

Como se señaló anteriormente, la idea fundamental del esquema propuesto consiste en utilizar como canal redundante para cada línea el canal de comunicaciones de la línea paralela y aprovechar la capacidad de comunicación de relevador a relevador y la lógica programable de los relevadores digitales. Con esto se incrementa la confiabilidad del esquema, y se reduce el uso de relevadores auxiliares y alambrado, al ser sustituidos éstos por conexiones de fibra óptica y comunicaciones digitales.

En este artículo se propone hacer la comunicación entre relevadores a través de un protocolo de comunicaciones, intercambiando información de los elementos internos de los relevadores por medio de sus puertos serie para conformar un canal de comunicaciones adicional (ver Fig. 3). En la Fig. 4 se muestra el esquema completo, con los dos canales de comunicaciones. El canal de comunicaciones principal es el de la línea protegida; se establece además un canal redundante, que utiliza los relevadores y el canal de comunicaciones de la línea paralela. Ambos canales de comunicaciones pueden operar en forma simultánea, o el canal redundante puede entrar en operación de forma automática cuando se pierde el canal de comunicaciones principal de la línea.

En la Fig. 5 se muestra la lógica para la comunicación directa relevador-relevador. Utilizando un canal de fibra óptica o de cobre, cada relevador envía al otro relevador una palabra digital compuesta por ocho bits transmitidos (TMB1-TMB8); con la información recibida, cada relevador forma una palabra digital compuesta por los ocho bits recibidos (RMB1-RMB8); esta palabra digital es una imagen espejo del estado de los ocho bits del otro relevador. De esta forma, cada relevador conoce el estado de sus propias variables lógicas, y además el estado de las variables lógicas correspondientes al otro relevador. Con esta información, cada relevador puede ejecutar ecuaciones de lógica programable para realizar funciones avanzadas de protección y control.

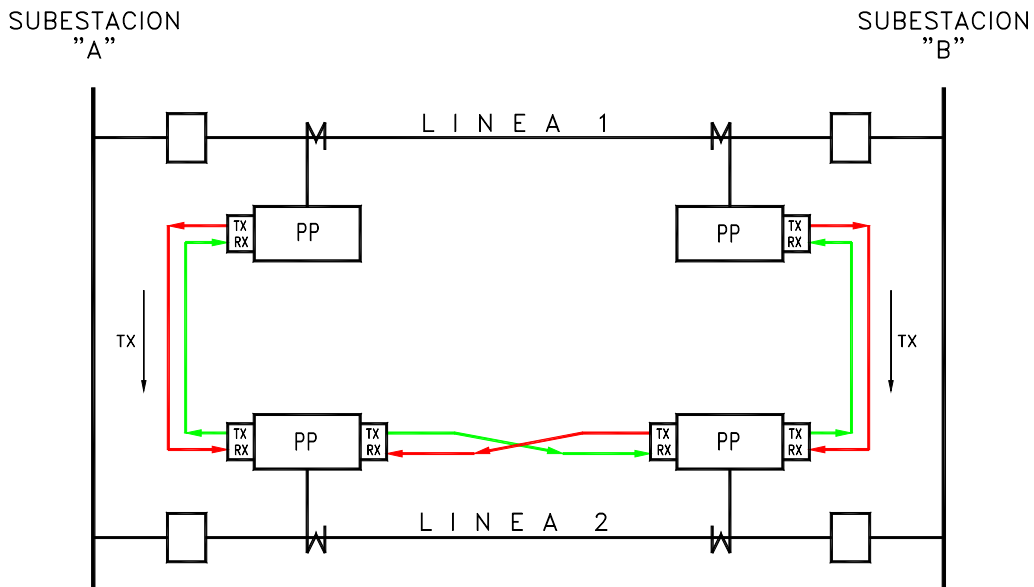


Fig. 3. Canal de comunicaciones adicional para la protección de la Línea 1.

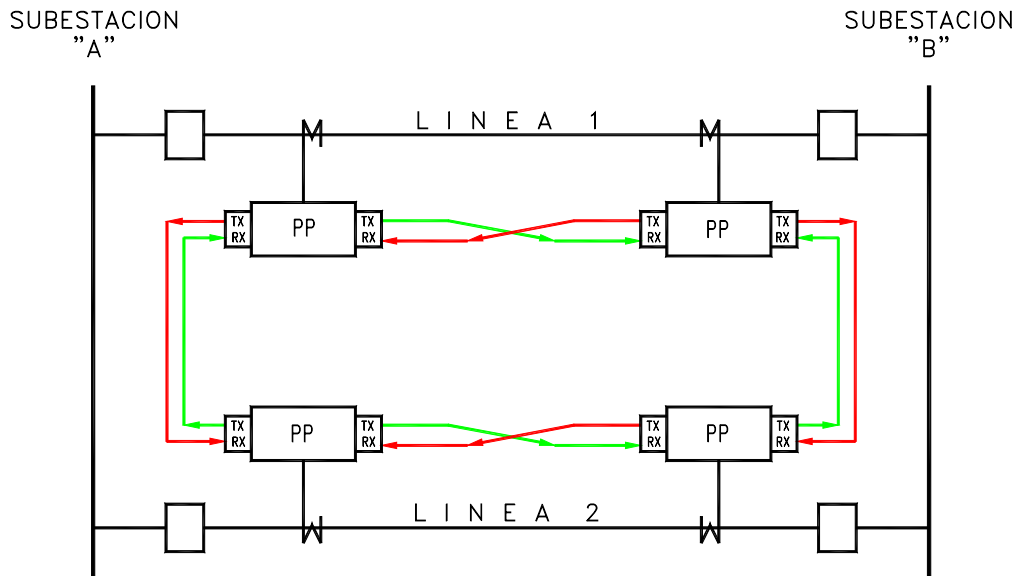


Fig. 4. Canales de comunicaciones principal y redundante para la protección de la Línea 1.

Se utilizan dos grupos de elementos internos para esta aplicación (canal primario, con bits que denominaremos MBA, y canal redundante, con bits MBB) en cada uno de los cuatro relevadores. En estos grupos de elementos internos se programa la información del esquema de protección piloto por comparación direccional (85L), incluyendo el disparo permisivo (DTL) y el disparo transferido directo (DTD).

Los elementos internos MBA se utilizan para intercambiar información entre los relevadores de la línea protegida; los elementos internos MBB se utilizan para intercambiar información con los relevadores de la línea paralela. Cada grupo (MBA y MBB) cuenta con ocho elementos internos, los cuales tienen la siguiente funcionalidad:

MBA de transmisión: TMBA  
 MBA de recepción: RMBA  
 MBB de transmisión: TMBB  
 MBB de recepción: RMBB

En los elementos internos MB1A a MB4A se programan los elementos de protección propios de la línea protegida, por ejemplo, la Línea 1 (ver Fig. 2); en los elementos MB5A a MB8A se programan los elementos de protección de la Línea 2 (canal redundante).

Así, tenemos la siguiente programación de los elementos MBA:

TMB1A: Transmisión de DTL de Línea 1  
 RMB1A: Recepción de DTL de Línea 1

TMB2A: Transmisión de DTD de Línea 1  
 RMB2A: Recepción de DTD de Línea 1

TMB3A: Disponible  
 RMB3A: Disponible

TMB4A: Disponible  
 RMB4A: Disponible

TMB5A: Transmisión de DTL de Línea 2  
 RMB5A: Recepción de DTL de Línea 2

TMB6A: Transmisión de DTD de Línea 2  
 RMB6A: Recepción de DTD de Línea 2

TMB7A: Disponible  
 RMB7A: Disponible

TMB8A: Disponible  
 RMB8A: Disponible

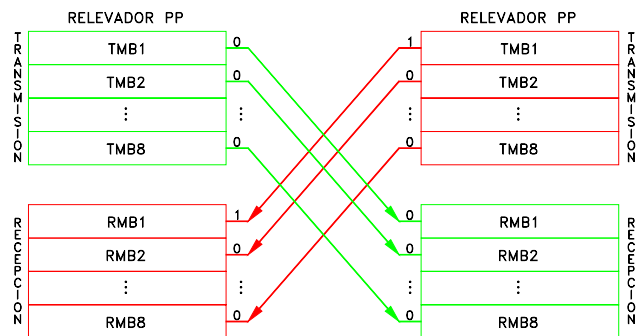


Fig. 5. Diagrama esquemático de la lógica de comunicación directa relevador-relevador.

La programación de los elementos internos del relevador PP de la Línea 2 es similar, cambiando únicamente el orden: los primeros cuatro elementos internos (MB1A a MB4A) corresponden a la línea propia (Línea 2), y los restantes corresponden a los elementos de la Línea 1.

La programación de la comunicación entre relevadores en una misma subestación corresponde a los elementos internos MBB; en esta programación es donde se envía la información del canal de comunicaciones de una línea a otro.

La programación de los elementos MBB es la siguiente:

TMB1B: RMB5A  
 RMB1B: TMB5A

TMB2B: RMB6A  
 RMB2B: TMB6A

TMB3B: RMB7A  
 RMB3B: RMB7A

TMB4B: RMB8A  
 RMB4B: TMB8A

Con la programación anterior se garantiza el envío de la información del relevador PP de la Línea 1 al relevador PP de la Línea 2 de una misma subestación.

En los relevadores de la subestación remota se repite la misma programación.

La programación de los cuatro relevadores de las dos líneas garantiza el intercambio constante de información de teleprotección, a través de dos canales de comunicaciones para cada línea. Esto asegura la redundancia de canales de comunicaciones para la protección de ambas líneas: la protección se mantiene en operación ante la pérdida del canal de cualquiera de las líneas. La única contingencia que no cubre esta programación es la pérdida de ambos canales de forma simultánea, la cual tiene muy baja probabilidad de ocurrencia.

### III. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un sistema de protección consta de dos aspectos: dependabilidad y seguridad. La dependabilidad es la habilidad del sistema de protección de operar correctamente cuando ocurre una falla en su zona de protección; la seguridad es la capacidad del sistema de protección de no operar cuando no existe falla u ocurre una falla fuera de su zona de protección.

Desafortunadamente, estos dos aspectos tienden a contraponerse: si se incrementa la seguridad tiende a disminuir la dependabilidad y viceversa.

Los fallos de operación son eventos aleatorios, por lo que las técnicas probabilísticas son las más apropiadas para cuantificar la confiabilidad. En general, la confiabilidad puede evaluarse en base a las tasas de fallos o a los índices de indisponibilidad de los equipos y sistemas.

En este artículo se utiliza el método de evaluación de confiabilidad denominado Análisis de Árbol de Fallos [3]. Este método se utiliza para evaluar la probabilidad de que ocurra un tipo particular de evento, por ejemplo, un fallo de un equipo o sistema. En el análisis se modelan únicamente los elementos del sistema que tienen influencia para que ocurra el evento.

El Análisis de Árbol de Fallos se basa en la combinación de tasas de fallos o de índices de indisponibilidad de los diferentes dispositivos que componen un sistema. Las tasas de fallos y los índices de indisponibilidad pueden estimarse en base a cálculos teóricos o experiencias de campo. En este artículo se utilizan índices de indisponibilidad.

Si un sistema consta de diferentes elementos, el árbol de fallos se elabora combinando los índices de indisponibilidad de los diferentes componentes. Si se tiene un sistema con dos componentes no redundantes, con índices de indisponibilidad de  $100 \times 10^{-6}$  cada uno, el índice de indisponibilidad total del sistema es de  $200 \times 10^{-6}$  es decir, la suma de los índices de ambos componentes. La sumatoria de los índices refleja el hecho de que cualquier componente no redundante puede causar el fallo del sistema. Por otro lado, si se analiza un sistema con dos componentes redundantes, con índices de indisponibilidad de  $100 \times 10^{-6}$ , el índice total será el producto de ambos, dividido por su suma, o sea,  $50 \times 10^{-6}$ . Este cálculo del índice toma en cuenta que el sistema solamente fallará si los dos componentes redundantes fallan.

En este trabajo se aplica el Análisis de Árbol de Fallos a la evaluación comparativa de la confiabilidad de los canales de comunicaciones redundante y no redundante.

Los elementos básicos que tienen influencia en la operación y confiabilidad de los canales de comunicaciones del esquema de protección se muestran en la Tabla I. También se dan los valores de los índices de indisponibilidad de estos elementos, tomados de [3].

El árbol de fallos del esquema con canal redundante se muestra en la Fig. 6. La rama de la izquierda representa la indisponibilidad resultante del fallo del canal de

comunicaciones principal, es decir, el canal de la línea protegida. Esta es la solución tradicional, en que el único canal disponible para la protección de cada línea es el canal de fibra óptica de esa línea. De acuerdo con [3], el índice de no disponibilidad del canal de fibra óptica se estima en  $100 \times 10^{-6}$ . En el canal también hay que considerar los transceptores de fibra óptica de los relevadores de ambos extremos, cuyo índice de indisponibilidad, según [3], es de  $10 \times 10^{-6}$  cada uno. Como la fibra óptica y los transceptores son elementos no redundantes, sus índices de indisponibilidad se suman, lo que da un índice total de  $120 \times 10^{-6}$ . Tomaremos este valor como referencia para la comparación con la solución propuesta de canales redundantes.

TABLA I  
COMPONENTE Y SUS ÍNDICES DE  
INDISPONIBILIDAD

Componente	Indisponibilidad x 10 <sup>-6</sup>
Canal de fibra óptica	100
Relevador	40
Transceptor	10

Para el canal redundante tenemos que considerar todos los elementos que intervienen: los dos relevadores de la línea paralela, la fibra óptica de esa línea paralela, seis transceptores, y los cables de fibra óptica (o cobre) que comunican los relevadores de una misma subestación, en ambas subestaciones. El árbol de fallos correspondiente al canal redundante está representado por la rama derecha de la Fig. 6. Los índices de indisponibilidad se toman de la Tabla I, excepto el índice correspondiente a los cables de fibra óptica o cobre que comunican los relevadores dentro de cada subestación. No se dispone de este dato, pero se tomó un valor de  $20 \times 10^{-6}$ , considerando que la probabilidad de que estos enlaces fallen es mucho más baja que la de que falle un cable de fibra óptica tendido entre subestaciones (por su mayor longitud y exposición a daños mecánicos). Nuevamente, los elementos del canal de respaldo no son redundantes entre sí, por lo que sus índices de indisponibilidad se suman. Esto da un índice de indisponibilidad del canal redundante de  $280 \times 10^{-6}$  (ver Fig. 6).

El canal principal y el redundante son redundantes entre sí, por lo que el índice de indisponibilidad total se calcula como el producto de los índices de ambos canales, dividido por su suma. Esto da como resultado un índice total de  $84 \times 10^{-6}$ . Este valor, comparado con el índice de  $120 \times 10^{-6}$  del canal de la línea propia, representa una mejora del 30% en disponibilidad. Es decir, la protección con canal redundante tiene una disponibilidad 30% mayor que la protección tradicional, que solo utiliza el canal de la línea propia.



*Medición del tiempo del canal de comunicaciones principal:*

La medición de tiempo del canal principal se inicia con la activación del elemento TMB1A, y termina con la activación del elemento RMB1A. El registro del relevador para esta prueba es el siguiente:

=>>SER

SEL-311C POTT Date: 05/23/05 Time: 16:25:13.156  
LINEA 1 SUBESTACION A

FID=SEL-311C-R107-V0-Z004003-D20020703 CID=15C5

#	Date	Time	Element	State
4	05/23/05	16:24:36.492	TMB1A	Asserted
3	05/23/05	16:24:36.496	TMB1A	Deasserted
2	05/23/05	16:24:36.513	RMB1A	Asserted
1	05/23/05	16:24:36.517	RMB1A	Deasserted

=>>

La diferencia entre los tiempos de activación de los elementos TMB1A y RMB1A es el tiempo total de ida y regreso de la señal en el canal principal. Este tiempo es de 21 ms. Este tiempo se divide entre dos, para obtener el tiempo de canal de comunicaciones en una sola dirección; el resultado es 10.5 ms.

*Medición del tiempo del canal de comunicaciones redundante:*

La medición para el canal redundante se inicia con la activación del elemento TMB1B, y termina con la activación del elemento RMB1B. El registro del relevador para esta prueba es el siguiente:

=>>SER

SEL-311C POTT Date: 05/24/05 Time: 10:57:58.378  
LINEA 1 SUBESTACION A

FID=SEL-311C-R107-V0-Z004003-D20020703 CID=15C5

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
4	05/24/05	10:57:54.100	TMB1B	Asserted
3	05/24/05	10:57:54.104	TMB1B	Deasserted
2	05/24/05	10:57:54.146	RMB1B	Asserted
1	05/24/05	10:57:54.150	RMB1B	Deasserted

=>>

Al igual que en el caso anterior, para determinar el tiempo total del canal redundante se resta el tiempo de activación de TMB1B del tiempo de activación de

RMB1B; el resultado es 46 ms, lo que resulta en un tiempo de canal en una sola dirección de 23 ms.

Se concluye que el retardo adicional que resulta de la operación de la protección a través del canal redundante (cuando falla el canal principal) es de  $23 - 10.5 = 12.5$  ms, es decir, aproximadamente tres cuartos de ciclo. Este retardo adicional es un valor aceptable en la operación de la protección primaria de una línea de subtransmisión.

## V. CONCLUSIONES

- En los esquemas normalizados de líneas de subtransmisión (69 a 161 kV) se asegura la redundancia de los relevadores, pero no la del canal de comunicaciones, dado su elevado costo. En arreglos de líneas paralelas, cada línea tiene su propio canal de comunicaciones, y tampoco hay redundancia de canal.
- En este trabajo se propone un esquema que permite lograr la redundancia del canal de comunicaciones en líneas paralelas, en esquemas de protección piloto por comparación direccional.
- El esquema utiliza como canal redundante para cada línea el canal de comunicaciones de la línea paralela, y se basa en la capacidad de comunicación relevador-relevador y la lógica programable disponible en los relevadores digitales actuales.
- Se hizo un análisis de confiabilidad basado en el método del Árbol de Fallos. El índice de indisponibilidad del canal principal es  $120 \times 10^{-6}$ . El índice del canal redundante es  $280 \times 10^{-6}$ . El índice total, incluyendo el canal redundante, es  $84 \times 10^{-6}$ .
- En resumen, la protección con canal redundante tiene una disponibilidad 30% mayor que la protección tradicional, que solo utiliza el canal de la línea propia.
- En una prueba de laboratorio se determinó que el retardo adicional que resulta de la operación de la protección a través del canal redundante (cuando falla el canal principal) es de aproximadamente tres cuartos de ciclo. Este es un valor aceptable en la operación de la protección primaria de una línea de subtransmisión.
- En cada uno de los relevadores es posible tener monitoreo y registro de la operación del canal principal y del canal redundante.

- Se requiere una inversión mínima para implementar el esquema redundante: programación de los relevadores y dos cables de fibra óptica, para comunicar los relevadores de las dos líneas dentro de cada subestación.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Comisión Federal de Electricidad, *Norma de Referencia NRF-041-CFE-2005, Esquemas Normalizados de Protecciones Para Líneas de Transmisión*, Abril de 2005.
- [2] K. Behrendt, "Relay-To-Relay Digital Logic Communication For Line Protection, Monitoring and Control", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 1998.
- [3] E. O. Schweitzer III, Bill Fleming, Tony J. Lee, and Paul M. Anderson, "Reliability Analysis of Transmission Protection Using Fault Tree Method," *Proceedings of the 24<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 1997.
- [4] Martín R Monjarás Méndez, Alfredo Dionicio Barrón, Ignacio Muñoz González, Héctor J Altuve Ferrer, "Protección por Comparación Direccional de Líneas Cortas de 115 kV con Canal de Comunicación por Radio", *Décimoquinta Reunión de Verano de Potencia del IEEE Sección México*, Acapulco, Gro., Julio de 2002.

## VI. BIOGRAFÍAS

**Gerardo Urrea Grijalva** se graduó de Ingeniero Electricista en el Instituto Tecnológico de Hermosillo en 1997. De Abril a Octubre 1997 radicó como Becario en Adiestramiento en Investigación Tecnológica (AIT) en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en el Departamento de Simulación (URS). En 1997 trabajó en la CFE en el Departamento Divisional de Proyectos y Construcción, ocupando de 1997 a 2001 el puesto de Supervisor de Construcción, en la División de Distribución Noroeste. De Abril de 2001 a Abril de 2003 trabajó en la CFE en la Zona Guaymas, ocupando el puesto de Supervisor de Protección de la Zona Guaymas. Del 2003 al 2004 trabajó como Ingeniero de Diseño de Protecciones en Schweitzer Engineering Laboratories, S. A. de C. V. En Abril de 2004 fue promovido como Ingeniero del Centro de Soporte Técnico Occidente de Schweitzer Engineering Laboratories, S. A. de C. V.

**Héctor Jorge Altuve Ferrer** se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Central de Las Villas, Cuba, en 1969. Recibió el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Politécnico de Kiev, URSS, en 1981. De 1969 a 1993 trabajó como Profesor Titular en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Las Villas. De 1993 a 2001 fue Profesor Titular del Programa Doctoral de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Fue Profesor Visitante de Washington State University en el curso 1999-2000. Desde 2001 trabaja en Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V., donde actualmente ocupa el puesto de Director General. Su área de investigación es la protección, control y supervisión de sistemas eléctricos de potencia. Es Senior Member del IEEE y Conferencista Distinguido de su Sociedad de Potencia.

**Iván Yáñez Félix** es Ingeniero Electricista, egresado del Instituto Tecnológico de Hermosillo en 1994. De 1995 a 1998 trabajó en CFE-Área de Transmisión y Transformación Noroeste, en la Subgerencia de Protección, donde se desempeñó como Ing. de Protecciones. De 1998 a 2000 trabajó en INELAP-PQE como Ingeniero de Puesta en Servicio. Desde el 2000 labora en Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V., donde actualmente desempeña la función de Ingeniero de Soporte Técnico.