



Una Solución Innovadora en el Campo de las Protecciones de Barra

Ing. Nilson de Oliveira
ZIV do Brasil

Ing. Otávio M. Koide
ELETROSUL

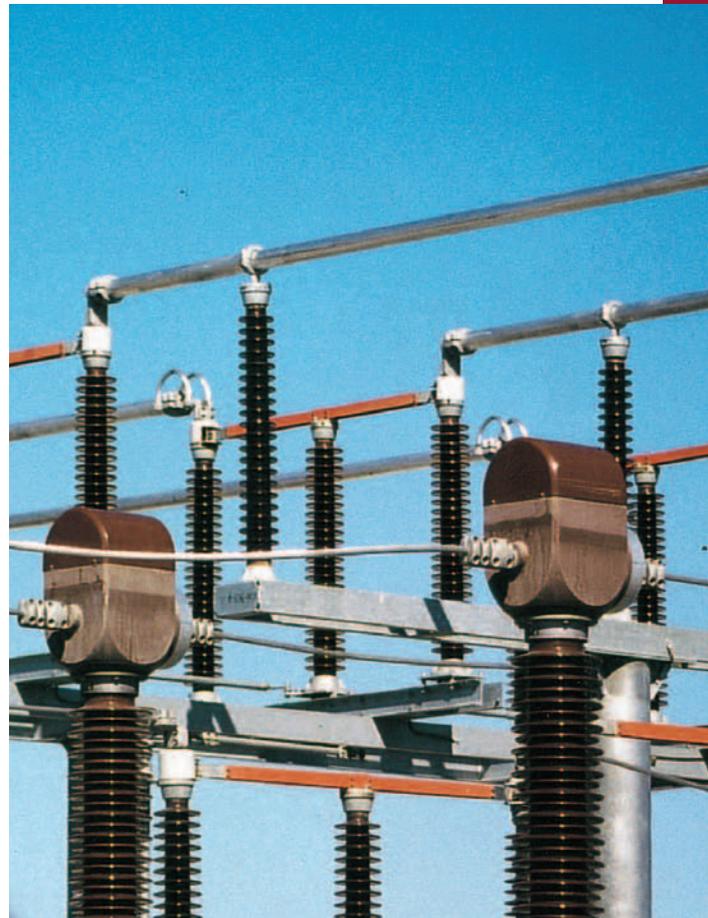
Resumen

Este trabajo presenta una nueva protección diferencial de barras. Además de cumplir con los requisitos fundamentales para este tipo de protección, incorpora un conjunto de funciones complementarias gracias a su gran velocidad de procesamiento y añade la capacidad de supervisión del estado de los distintos seccionadores.

Los resultados de los ensayos de tipo y de funcionalidad y las pruebas de recepción, así como la experiencia en condiciones reales de funcionamiento, demuestran que la protección tiene un alto índice de confiabilidad.

Palabras Clave:

Protección
Protección Digital
Protección de Barras
Protección Distribuida
Recepcionado
Ensayos



1. Introducción

Las barras, como puntos de interconexión de un sistema eléctrico de potencia, son posibles puntos de faltas, entre fases o a tierra, normalmente provocadas por la existencia de elementos extraños en el sistema o fallos en los dispositivos existentes por problemas de contaminación.

A pesar de ser poco frecuente, una falta en una barra puede provocar daños irreparables en la instalación y grandes disturbios en la estabilidad del sistema, agravándose si ocurre en barras de alta o muy alta tensión. Por ello, en los sistemas de transmisión es recomendable la instalación de protecciones de barras con capacidad de eliminación de la falta en pocos ciclos.

El principio de operación de las protecciones de barras está basado en las leyes de Kirchoff, la primera de las cuales dice que la suma vectorial de las corrientes de una misma fase, en un nudo de la red, debe ser nula bajo condiciones normales de operación. La fiabilidad de la protección de barras se ve amenazada por el hecho de que la corriente por el secundario de los transformadores de intensidad (TI's) deja de ser lineal en condiciones de saturación.

Dentro de los distintos tipos de protecciones de barras desarrolladas, aún son altamente utilizadas la Protección Diferencial de Alta Impedancia y la Protección Porcentual Diferencial de Baja Impedancia.

La Protección Diferencial de Alta impedancia se basa en la conexión en paralelo de los distintos transformadores de corriente en un

El principio de la Protección Porcentual Diferencial, el cual será abordado en este trabajo, está caracterizado como una solución clásica para los problemas de saturación de los TI's y fue una de las primeras alternativas usadas en las protecciones diferenciales de barras bajo tecnología analógica.

punto común localizado en el patio de la subestación. La corriente que resulta de la unión es aplicada sobre una impedancia no lineal y el elemento de medida de la protección supervisa, en cada una de las fases, la tensión sobre dicha impedancia.

El principio de la Protección Porcentual Diferencial, el cual será abordado en este trabajo, está caracterizado como una solución clásica para los problemas de saturación de los TI's y fue una de las primeras alternativas usadas en las protecciones diferenciales de barras bajo tecnología analógica. Las primeras protecciones de barras analógicas, basadas en este principio, entraron en operación en la década de los 70 y todavía disfrutaban de un gran prestigio entre los profesionales del área debido a su alta fiabilidad.

2. Preliminares

Con la consolidación de la tecnología digital aplicada en el campo de las protecciones, se definieron minuciosamente los siguientes objetivos para la protección diferencial **DBN**:

- Tecnología digital y arquitectura distribuida con posibilidad de expansión.
- Estabilidad para faltas externas de corriente superior a 20 veces la corriente nominal con saturación de los TI's.
- Obediencia para faltas internas en caso de saturación total de los TI's.
- Utilización de TI's de características magnéticas diferentes y de distintas relaciones de transformación.
- Baja impedancia con restricción porcentual y capacidad de detección de faltas entre fases y a tierra.
- Alta velocidad de actuación con independencia del número de posiciones conectadas a las barras.
- Lógica de seccionadores integrada y adaptabilidad a múltiples esquemas de conexión.
- Funciones informativas e integración en sistemas de protección y control.

En 1999, finalizado el proyecto, se instalaron en campo las primeras unidades **DBN**. Se habían implementado las funciones anteriores y se había sometido al equipo diversos ensayos, incluidos los de potencia, para conocer el comportamiento del equipo en condiciones reales de funcionamiento.

Las primeras protecciones suministradas en Brasil se instalaron en la subestación de Itajaí de **Electrosul** y se encuentra en operación desde enero de 2002.

3. Características de la Protección

3.1 Arquitectura del Sistema

La Protección **DBN** está concebida como una plataforma de hardware compuesta de las siguientes unidades:

Unidad Central: en este módulo reside el algoritmo de protección. Realiza las siguientes funciones: cálculo de las corrientes diferenciales y de frenado y gestión de las comunicaciones con las unidades de posición, con el sistema de telecontrol y con el despacho de protecciones.

Unidad de Posición: el **DBN** puede tener hasta 32 unidades de posición, siendo 28 unidades de corriente y 4 unidades de tensión. Las unidades de posición son las responsables de la adquisición sincronizada de las muestras de la intensidad, de la supervisión del estado del interruptor y de los seccionadores asociados a la posición y del disparo del interruptor. En estas unidades también está implementada la función de fallo interruptor (que habilita el disparo de la protección por activación de una entrada digital proveniente de una protección externa) y las funciones de supervisión de sobreintensidad.

Comunicaciones: el sistema de comunicación entre la Unidad Central y las distintas posiciones está soportado físicamente por fibra óptica de cristal que tiene características específicas para cumplir los requisitos de las funciones de la protección.



DBN. Unidad Central.

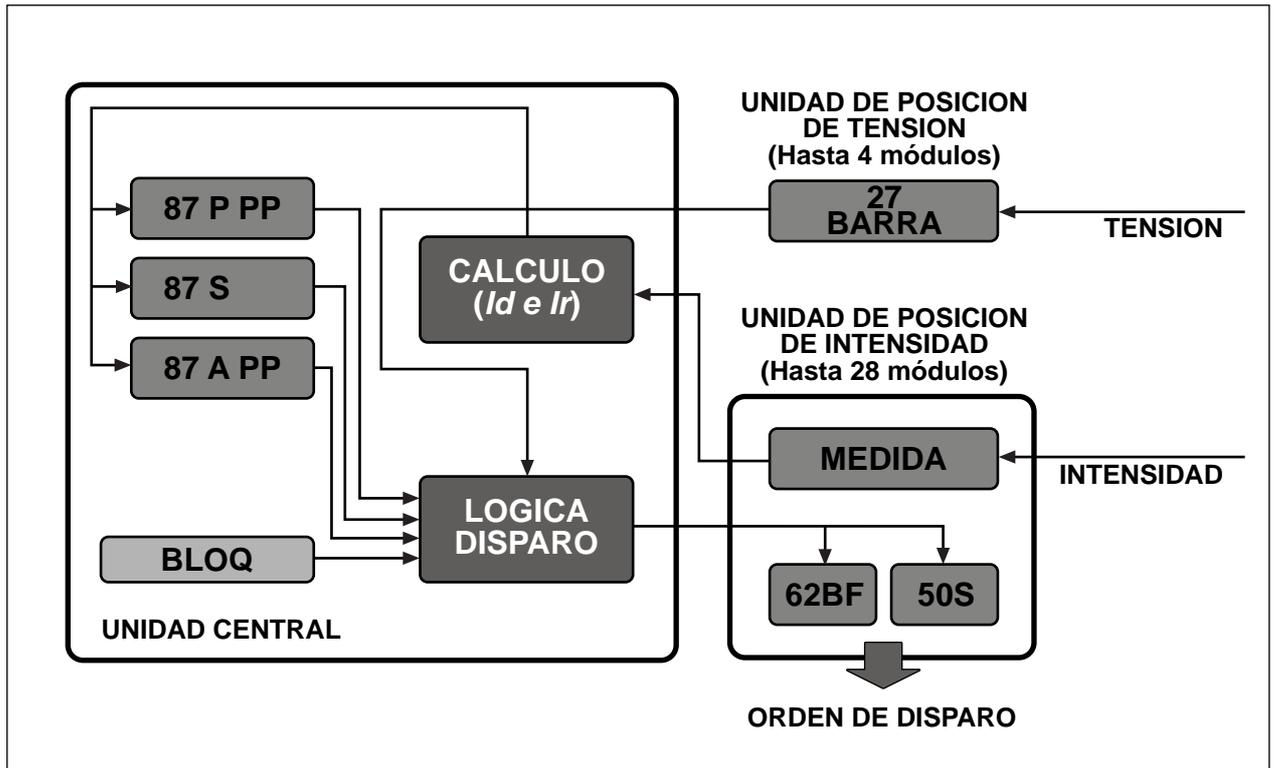


Figura 1. Módulos de la Protección DBN.

El DBN puede tener hasta 32 unidades de posición, siendo 28 unidades de corriente y 4 unidades de tensión.

3.2 Captación de la corriente

Se recogen un total de 48 muestras por ciclo para las posibles 84 intensidades de las unidades de posición, 3 fases x 28 posiciones. El cálculo de las corrientes diferencial y de frenado para cada una de ellas se realiza en cada muestra.

3.3 Unidad Diferencial 87B

La protección posee doce unidades diferenciales monofásicas, siendo tres unidades para cada una de las cuatro barras posibles. Con un frenado porcentual y una característica de baja impedancia permite el uso de transformadores de intensidad de distintas relaciones de transformación. Su característica digital permite que relaciones distintas de los TI's sean igualadas mediante ajustes de software sin ser necesario el uso de ningún elemento externo auxiliar.



DBN. Unidad de Posición.

3.4 Principio de Operación

La corriente diferencial (I_d) es calculada realizando la suma vectorial en cada muestra de corrientes de igual fase; y la intensidad de frenado (I_r) se calcula por la suma de los módulos de las mismas.

La característica de funcionamiento de la protección se controla por las siguientes funciones de apoyo:

- **Detector de saturación (SAT):** se basa en el cálculo de la segunda derivada de la señal de corriente y se compara con un valor de referencia definido por el nivel de saturación de cada uno de los TI's para tener una total independencia de la característica de los mismos.
- **Detector de falta externa (F_EX):** se activa cuando la corriente diferencial se encuentra por debajo del 80% de la intensidad de frenado.
- **Detector direccional (DET_DIR):** compara las fases de las corrientes y únicamente se considera cuando el detector de saturación está activado.

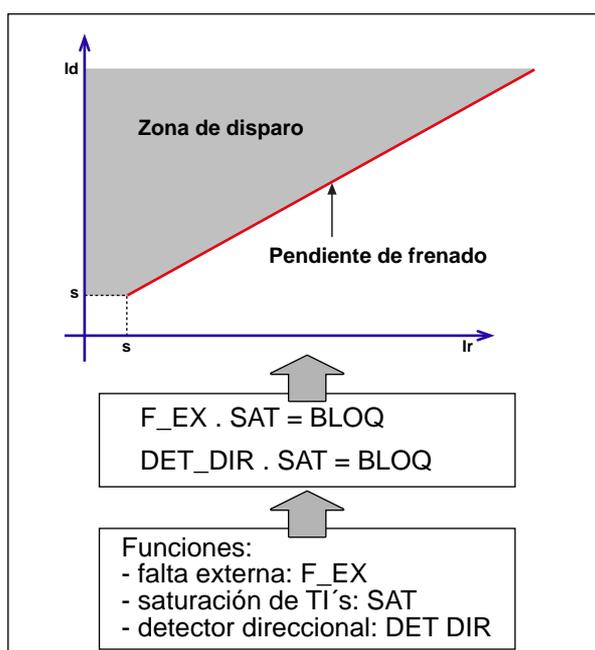


Figura 2. Principios de Operación.

3.5 Unidades de Apoyo 87B

Para implementar la fiabilidad de la protección, el disparo del **DBN** está controlado por las siguientes unidades auxiliares:

- **Unidad Diferencial de Supervisión 87S:** esta unidad es común para todas las barras y evita un disparo indebido de la protección, principalmente en casos de falta de monitorización del estado de los seccionadores, provocado la mayor de las veces por el funcionamiento incorrecto de sus contactos cuando el interruptor se aísla o se transfiere de una barra a otra.
- **Unidad de Alarma Diferencial 87A:** esta unidad actúa provocando un bloqueo de la protección si se produce una anomalía en los circuitos de corriente del secundario de los TI's, provocado la mayor parte de las veces por la rotura de un cable.
- **Unidad de Subtensión 27B:** opcionalmente se puede instalar una unidad de posición, en cada una de las barras, con funciones de subtensión, para condicionar el disparo de la protección a las condiciones de subtensión.

3.6 Unidades de Supervisión de Corriente 50Sup

La protección dispone de tres unidades de corriente, una por fase, para todas las posiciones. Si estas unidades están en servicio, posibilitan que los interruptores, asociados a las posiciones que no pueden aportar intensidad a la falta, no sean disparados en condiciones de falta de la barra.

3.7 Unidad de Fallo Interruptor

Esta unidad tiene como misión detectar un fallo en la orden de disparo del interruptor y permitir la apertura de los demás interruptores que se encuentren conectados a la misma barra.

Para la implementación de esta función se dispone de las siguientes unidades: **unidad de falta monofásica con supervisión de intensidad**, **unidad de falta trifásica con supervisión de intensidad** y **unidad de falta trifásica con supervisión del estado del interruptor**.

El esquema de fallo interruptor, proveniente de la señal de disparo de protecciones externas, puede ser implementado a través la configuración de una de las entradas digitales disponibles en las unidades de posición.

3.8 Velocidad de actuación

La velocidad media de actuación de la protección **DBN** es de 12 ms, incluido el tiempo de cierre de los contactos de disparo. Ello permite que faltas de gran potencia de cortocircuito ocurridas en las barras sean despejadas rápidamente a fin de evitar inestabilidades en los sistemas de transmisión o averías en las máquinas de potencia de la instalación.

3.9 Selección de la topología

La protección **DBN** permite habilitar hasta cuatro unidades diferenciales, que pueden cubrir barras aisladas e independientes o combinadas en diversos tipos de topologías, como: esquemas de barra simple con interruptor de acoplamiento, esquemas de barra principal con barra de transferencia, esquemas de doble barra con cuatro seccionadores en cada posición, esquemas de doble barra con doble interruptor, esquemas de doble barra con interruptor y medio, barras en anillo o triples barras.

La protección DBN permite habilitar hasta cuatro unidades diferenciales, que pueden cubrir barras aisladas e independientes o combinadas.

Un algoritmo inteligente discrimina, a través de la lectura de los contactos de los seccionadores, cuándo una posición está conectada a una u otra barra. Esta lógica permite que el **DBN** automáticamente supervise el estado de cada una de las posiciones de modo que adapta adecuadamente las corrientes de cada sección de barra.

En este algoritmo se prevén todos los estados posibles de las entradas digitales que supervisan estos contactos y un ajuste de tiempo de operación de seccionador esta disponible en el **DBN**, el cual tiene la función de generar una señalización externa a través de los LED's, salidas digitales o salida por comunicaciones cuando se detecta una inconsistencia.

La velocidad media de actuación de la protección DBN es de 12 ms, incluido el tiempo de cierre de los contactos de disparo.

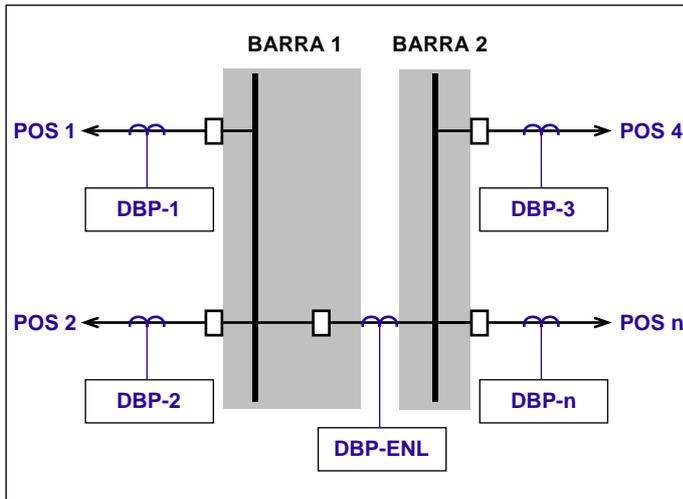


Figura 3. Posición de Enlace con un TI.

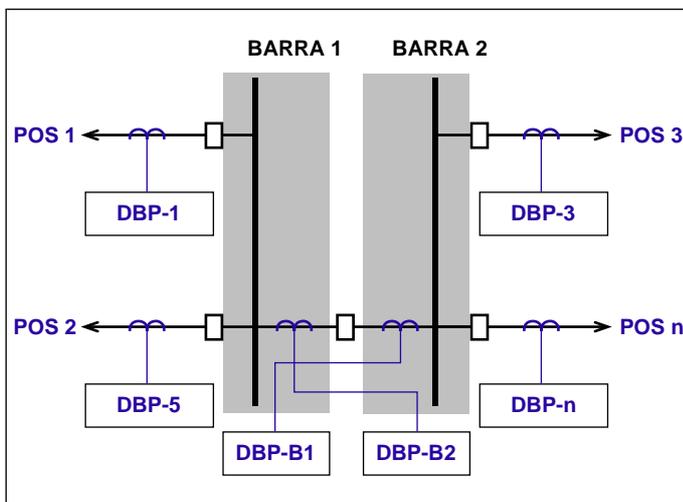


Figura 4. Posición de Enlace con dos TI's.

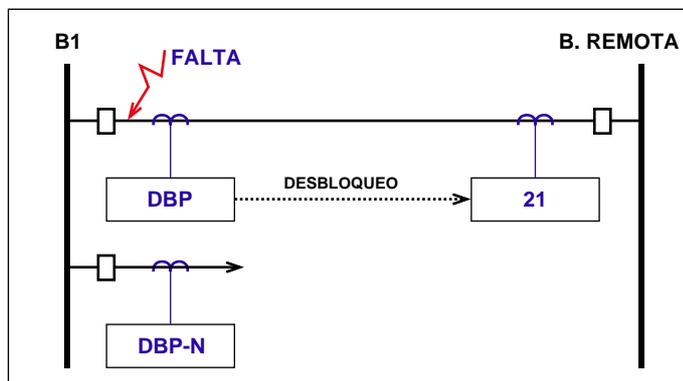


Figura 5. Protección en Punto Extremo.

3.10 Faltas entre el TI y el Interruptor de Enlace

La apertura del interruptor de acoplamiento permite aislar una barra y mantener la continuidad del servicio en las demás. El **DBN** cubre faltas habidas en el llamado "punto ciego", sección entre el TI y el interruptor, a través de dos técnicas:

1. Con el uso de un único TI en la posición de enlace de barras, la corriente que circula por esta posición se suma en cada una de las posiciones con signo distinto.

La incidencia de una falta en la sección entre el TI y el interruptor de enlace provoca, en un primer instante, el disparo de todos los interruptores conectados a la Barra 1, lo que no posibilita totalmente el aislamiento de la falta. En un segundo instante, el algoritmo que controla la unidad de posición del interruptor de enlace permite la actuación de los interruptores de Barra 2 tras unos milisegundos adicionales al tiempo típico de disparo.

2. La intensidad que circula por la posición del enlace se mide con dos TI's situados cada uno a un lado del interruptor.

Esta solución, a pesar de ser menos económica que la anterior, ya que requiere dos transformadores de medida y dos Unidades de Posición (una para cada barra asociada), permite una mejora de la protección, ya que la hace más selectiva y optimiza el tiempo de aislamiento de la falta.

3.11 Faltas entre el TI y el Interruptor de Salida.

La protección **DBN** puede detectar una falta en el extremo de la línea, justo entre el TI y el interruptor, y enviar una señal por teleprotección a la protección remota para acelerar el disparo de aquella y aislar rápidamente la falta con la apertura del interruptor remoto.

3.12 Comunicaciones

La Unidad Central dispone de tres puertos de comunicaciones, un puerto RS232 frontal y dos puertos traseros para fibra óptica de cristal. El software de configuración, generalmente instalado en un ordenador portátil, puede comunicarse con la Unidad Central y con todas las Unidades de Posición desde cualquiera de ellas. Esta característica permite que más de un usuario pueda acceder de manera simultánea al equipo.

3.13 Interface Gráfico

Localmente, a través del teclado y el display de la Unidad Central, es posible introducir los parámetros de configuración de la protección **DBN**. También se pueden visualizar las medidas de intensidad por fase de cada posición, corrientes diferenciales y de frenado.

A través del software de comunicaciones es posible implementar tanto en modo local como remoto, los siguientes ajustes:

- Parámetros de configuración (comunicaciones puerto remoto).
- Ajustes generales de la Unidad Central.
- Ajustes generales y ajustes de protección de las Unidades de Posición.
- Ajustes de los parámetros de los transformadores.
- Ajustes de las lógicas de las Unidades de Posición.
- Ajustes de las unidades de protección de las Unidades de Posición.
- Ajustes de la protección diferencial.

La configuración de las entradas y salidas, sólo se puede hacer localmente, ya que se trata de una operación que normalmente sólo se realiza una vez y que además requiere la verificación del cableado realizado en el equipo.

3.14 Registros

La protección cuenta con una memoria no volátil que puede almacenar el registro cronológico de los últimos 100 sucesos; información del último disparo; los dos últimos registros oscilográficos que contienen datos de 39 ciclos de falta y 2 ciclos de prefalta de todas las intensidades de fase, intensidades diferenciales y de frenado y 171 señales digitales.



Armario DBN.

4. Ensayos

4.1 Ensayos de Potencia

Con el objetivo de analizar el funcionamiento de la protección bajo condiciones extremas de intensidad para faltas internas y externas, se realizaron ensayos simulando condiciones reales de funcionamiento en el Laboratorio de Alta Tensión de LABEIN[4].

4.2 Ensayos Tipo

En LABEIN también se realizaron las pruebas de compatibilidad electromagnética, ensayos climatológicos y mecánicos de acuerdo con la normativa IEC/CEI pertinente para cada caso:

- Ensayos de compatibilidad electromagnética.
- Ensayos climatológicos.
- Ensayos mecánicos.



4.3 Pruebas de Funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en KEMA - Arnhem, Holanda [5] - y tenían como objetivo verificar el funcionamiento de la protección en todas las situaciones límites posibles de faltas internas y externas a la barra. Las pruebas dinámicas, en el caso de las pruebas de cortocircuito, se simulaban con el programa EMTP contemplando las siguientes situaciones:

- Ensayos Dinámicos de Precisión

1. Inyección de intensidad en una Unidad de Posición, con una señal de componente continua con distintos ángulos de incidencia de falta.
2. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición en contra fase con y sin componente continua variando el ángulo de incidencia en la falta.

- Ensayos Dinámicos de Medida de Tiempos de Actuación sin Saturación de los TI's

1. Inyección de intensidad en una Unidad de Posición.
2. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición.

En LABEIN también se realizaron las pruebas de compatibilidad electromagnética, ensayos climatológicos y mecánicos de acuerdo con la normativa IEC/CEI.

- Ensayos Dinámicos de Medida de Tiempos de Actuación con Saturación de los TI's

1. Inyección de intensidad en una Unidad de Posición con TI-5P20.
2. Inyección de intensidad en una Unidad de Posición con TI-5P20 con +80% de remanencia.
3. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, una de ellas con un TI-5P20 y en otra de ellas con un TI ideal, con intensidades en fase y contrafase.
4. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, una de ellas con un TI-5P20 en condiciones de un +80% de remanencia y en otra de ellas con un TI ideal, con intensidades en fase y contrafase.
5. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, una de ellas con un TI-5P20 sin remanencia y en otra de ellas con un TI lineal, con intensidades en fase y contrafase.
6. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, en ambas con un TI-5P20 sin remanencia y con intensidades en fase.
7. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, en ambas con un TI-5P20 con un +80% de remanencia y con intensidades en fase.
8. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, una de ellas con un TI-5P20 con un +80% de remanencia y en otra de ellas con un TI-5P20 con un -80%, con intensidades en fase.
9. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, en ambas con un TI ideal.

- Ensayos Dinámicos de Estabilidad para Faltas Externas sin Saturación de los TI's

1. Inyección de intensidad en dos Unidades de Posición, en ambas con un TI ideal y con intensidades en contrafase.

- Ensayos Dinámicos de Estabilidad para Faltas Externas con Saturación de los TI's

1. Inyección de intensidades en dos Unidades de Posición, ambas con un TI lineal y con intensidades en contrafase.
2. Inyección de intensidades en dos Unidades de Posición, una de ellas con un TI-5P20 y la otra con un TI lineal, con intensidades en contrafase.

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en KEMA - Arnhem, Holanda.



5. Protección de Barras en SE Itajaí

La subestación de Itajaí de **Electrosul**, puesta en funcionamiento en Enero de 2002, tiene dos sectores de 138 kV y 230 kV, configuración de doble barra con cuatro seccionadores por posición tal como se puede ver en las figuras 6 y 7.

Aunque la protección permite el montaje de las Unidades de forma distribuida, en esta subestación los módulos se instalaron todos juntos en un armario para facilitar el montaje de las Unidades de Posición que corresponderán a las nuevas líneas futuras, cuya configuración final está prevista para 10 posiciones en la barra de 230 kV y 20 posiciones para la barra de 138 kV.

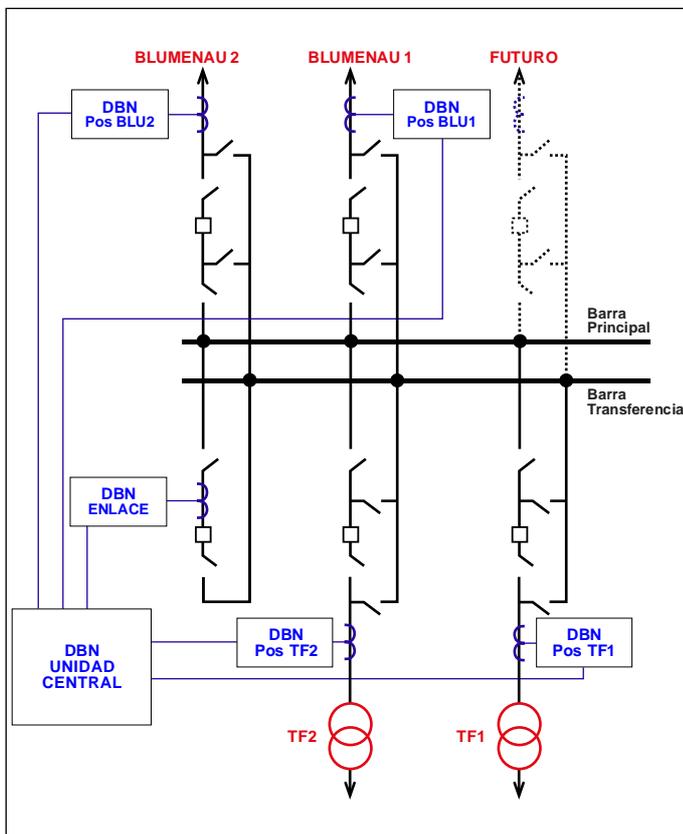


Figura 6. SE Itajaí - Barra de 230 kV.

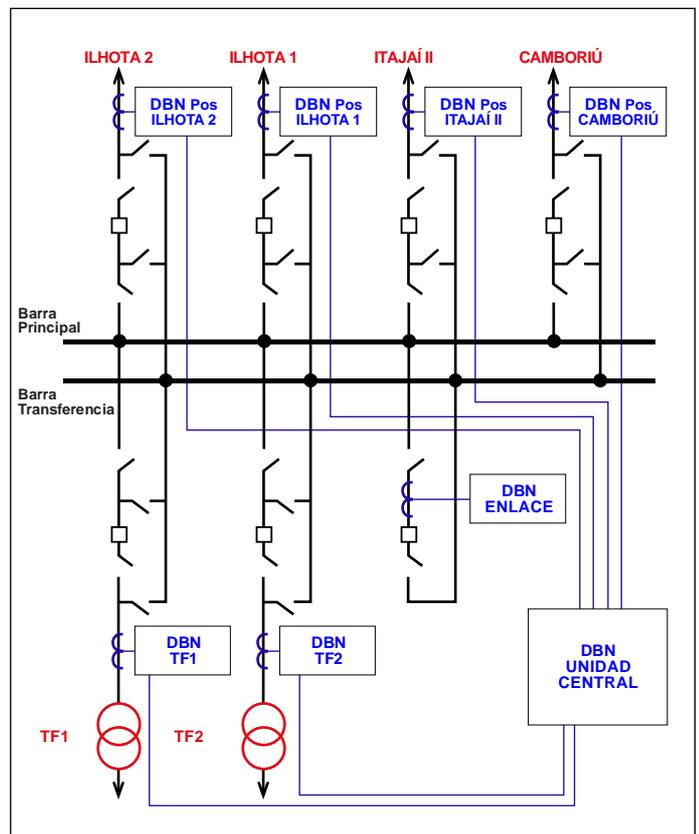


Figura 7. SE Itajaí - Barra de 138 kV.

5.1 Pruebas de Funcionamiento Realizadas

Con el programa EMTP se simularon en KEMA diferentes condiciones anormales de funcionamiento y situaciones de fallo en maniobras. Para la elaboración del estudio se precisaron los siguientes datos:

- Sistema equivalente con todas las topologías posibles.
- Defectos a reproducir.
- Características nominales de los elementos de la instalación.

Se simularon y probaron un total de 255 situaciones diferentes con el programa EMTP. Los resultados obtenidos fueron:

- Tiempo de disparo: 9 a 14 ms.
- Tiempo de reposición inferior a 25 ms.
- No se produjo ninguna orden incorrecta para faltas externas.

Se simularon y probaron un total de 255 situaciones diferentes con el programa EMTP.

5.2 Pruebas de Recepción

Además de las pruebas rutinarias que se hacen en fábrica a todos los equipos, se realizaron las siguientes pruebas tras su configuración:

- Inyección de intensidad en todas las fases para verificar la exactitud de la medida, los ajustes de las relaciones de los TI's configuradas en la protección y el cableado externo.
- Inyección de intensidad en distintas posiciones para simular faltas internas y externas.
- Activación de la característica de unidad diferencial.
- Activación de la característica de unidad diferencial de supervisión.
- Activación de la característica de la unidad diferencial de alarma.
- Simulación de fallo interruptor para comprobar la selectividad de los disparos de las posiciones en función de la topología.
- Simulación de pérdida de comunicaciones entre la Unidad Central y una de las Unidades de Posición para confirmar el bloqueo de la protección.
- Ensayo de la actuación de la unidad de alarma diferencial para confirmar el bloqueo de la protección.
- Simulación de la actuación de la unidad de supervisión diferencial sin la actuación de la unidad diferencial de barra para confirmar el bloqueo de la protección.
- Simulación del cambio en los contactos de los seccionadores para verificar la señalización de posición desconocida.
- Simulación de información incorrecta de los contactos de los seccionadores, donde los seccionadores informan al relé que la posición está conectada, por ejemplo, a la barra 1 y realmente lo está a la barra 2, para confirmar la no-actuación de la protección.
- Inyección de intensidad en una Unidad de Posición, aislada de las barras, para confirmar que la intensidad de ensayo no afecta al cálculo de la intensidad diferencial.

6. Conclusiones

Con los resultados de los ensayos y tras observar su comportamiento en campo, queda demostrada la alta fiabilidad de la protección de barras **DBN**.

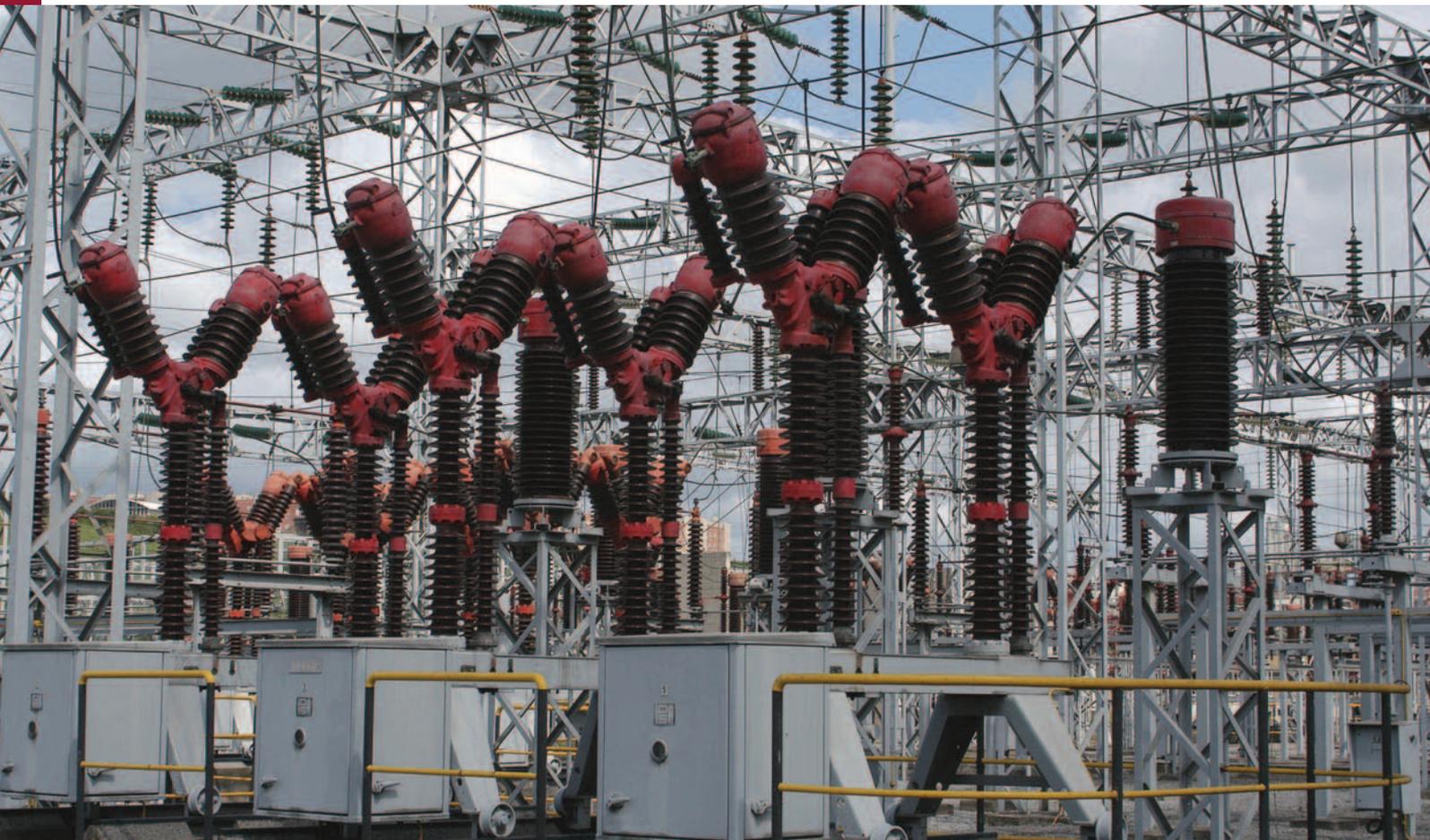
La posibilidad de disponer de todas las medidas de intensidad en cualquiera de los módulos que componen la protección permite una significativa reducción del tiempo empleado para la realización de los ensayos de puesta en marcha.

La característica de baja impedancia que evita el uso de TI's auxiliares de adaptación, sumada a la posibilidad de montaje de las Unidades de Posición tanto en modo distribuido como concentrado, hacen que el **DBN** sea una alternativa económicamente viable en casos en que sea necesaria su instalación en barras de operación con TI's de distintas relaciones de transformación.

7. Referencias

- [1] M.S. Sachdev, "Microprocessor Relays and Protection Systems", IEEE Tutorial Course Text, Publication N^o 88EH0269-1-PWR, February 1988.
- [2] Héctor Jorge Altuve Ferrer, "Introducción a Los Relevadores Y Sistemas Digitales de Protección", Curso Tutorial, Monterrey – México, Noviembre de 1993.
- [3] Manual de Instrucciones DBN.
- [4] Informe de Ensayos, B131/01-67-EE, LABEIN – Centro Tecnológico, Bilbao, España.
- [5] "Limited Examination into the Application of the Numerical Busbar Differential Protection, type DBN, manufacture by ZIV" – 40130051 – TDP 02-24126 KEMA – Arnhem, The Netherlands.





Domicilio Social: Parque Tecnológico, 210
48170-Zamudio, Vizcaya. Aptado.757-48080 Bilbao
Tel.: +34-944 522 003 - Fax: +34-944 522 140
Madrid: Avenida Vía Dos Castillas, 23
Chalet 16 - 28224 Pozuelo de Alarcón - Madrid
Tel.: +34-913 527 056 - Fax: +34-913 526 304

