

# SISTEMA DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS A NIVEL DE 500 kV APLICACIÓN SUBESTACIÓN PIFO

Richard Zambrano, Ing.  
Antonio Bayas, Ing.

## ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Resumen:** se presenta un estudio sobre el esquema de protecciones eléctricas, primeramente se da a conocer las características particulares de los relés, considerando aspectos tales como su confiabilidad, selectividad, fiabilidad, sensibilidad y rapidez. Además se presenta los diversos tipos de relés mostrando sus principales características, funcionalidad, y tomando en cuenta el tipo de operación. Se hace una reseña de los relés según su evolución, así se tiene relés de diferente tecnología como son los estáticos y los numéricos, que al momento son los más utilizados en sistemas de protección.

A continuación se presenta una descripción detallada del tipo de protecciones necesarias para la protección de un transformador, esquema de barras, línea de transmisión y reactor, incluyendo los problemas y fallas más comunes en cada uno de los elementos.

Finalmente se hace un ejemplo de aplicación a la subestación Pifo, considerando los criterios de protección como el ajuste de la protección diferencial al autotransformador, al esquema de barras en disyuntor y medio, al reactor de línea, y la protección de distancia de la línea Pifo-Yaguachi.

### I. INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda energética en nuestro medio, el gobierno nacional, está empeñado en satisfacer dicha demanda por medio de varios proyectos hidroeléctricos para evitar en el futuro posibles cortes de energía, tratando de reducir el costo de la energía y uso de derivados de petróleo.

Para cumplir con la meta de abastecer satisfactoriamente la demanda es necesario adoptar técnicas que permitan transportar la energía eléctrica de manera conveniente, desde los centros de generación hacia los centros de consumo. Como en nuestro caso, que por la ubicación geográfica de los grandes proyectos de centrales hidroeléctricas, es necesario el empleo de líneas de transmisión de alta tensión con capacidad para transportar grandes cantidades de energía a través de largas distancias. Para satisfacer de forma eficiente estos requerimientos ha sido necesario incrementar cada vez más los niveles de voltaje, llegando a transmitir a

niveles de extra alta tensión, con voltajes hasta los 230kV, y como alternativa posterior a 500kV Para el progreso del sistema de transmisión ecuatoriano se está considerando la implementación de líneas y subestaciones a nivel de 500kV [1] [2], ya que la mayoría de países sudamericanos tales como: Colombia, Venezuela, Argentina, Uruguay, Brasil y Chile ya han incorporado a sus sistemas de transmisión niveles de extra alto voltaje.

### II. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO.

La continuidad y la calidad del servicio son dos requisitos íntimamente ligados al funcionamiento satisfactorio de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

El diseño de un sistema eléctrico debe contemplar el hecho de que van a producirse fallas de manera aleatoria e inesperada, por lo que es necesario dotarlo de los medios adecuados para su tratamiento. Por esta razón, los SEP incorporan un sistema de protección que tiene por objetivo minimizar los efectos derivados de los diferentes tipos de fallas.

### INTRODUCCIÓN A LAS PROTECCIONES.

Los sistemas de protecciones eléctricas constituyen el equipo más importante que se incluye en una subestación, por lo tanto se debe conocer los Componentes de un sistema de protecciones.

- Relés de protección.
- Transformadores de medida.
- Disyuntores de poder
- Circuitos de control

### Relés de protección.

El avance tecnológico y el desarrollo del software asociado han permitido que los relés de protección de los sistemas eléctricos se transformen en un dispositivo inteligente que adquiere señales de campo y realiza varias funciones de control, protección y medida.

### Características operativas del relé.

Los relés de un sistema de protección en su conjunto como cada una de las protecciones que lo componen, deben satisfacer las siguientes características operativas:

- Fiabilidad.
- Selectividad.
- Sensibilidad.

- Rapidez.
- Economía y Simplicidad.

#### Tiempos de operación del relé.

El tiempo con que puede actuar una protección depende directamente de la tecnología empleada en su construcción y de la de la velocidad de respuesta del sistema de mando y control de los disyuntores automáticos asociados a la misma.

- Instantáneas.
- Tiempo Definido o con Retraso en Tiempo.

#### Relés estáticos.

Un relé estático, llamado también relé de estado sólido (SSR, Solid State Relays), es un dispositivo de conmutación electrónico que realiza la conexión y desconexión, con ausencia de contactos móviles en su interior.

#### Relé numérico.

Se basan exclusivamente en la técnica de microprocesadores. Estos aparatos representan la generación más potente y moderna de los aparatos de protección, caracterizados por sus capacidades como son, relacionar enlaces matemáticos de valores de medida, procesar operaciones aritméticas y adoptar decisiones lógicas.

Los relés digitales ofrecen la precisión y superioridad de la técnica digital de protección frente a dispositivos de protección convencionales, y se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Elevada precisión de medida gracias al procesamiento digital de los valores de medida.
- Indicación de fallas mediante LEDs.
- Márgenes extremadamente amplios del voltaje de alimentación, gracias a su etapa de alimentación universal de amplio margen.
- Márgenes de ajuste muy grandes con escalonamiento de ajuste muy pequeño.
- Intercambio de datos con técnica de comunicaciones gracias a una interface serie, que se puede montar a posteriori.
- Medición de valor efectivo real.
- Tiempos de respuesta sumamente rápidos.

La utilización de tecnología digital en las protecciones de sistemas eléctricos proporciona la reducción de complejidad de proyectos eléctricos, pero tiene que ver con dos elementos de suma importancia: el software y la comunicación.

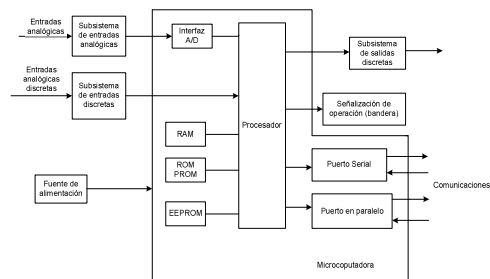
**Tabla 1.** Propiedades del relé numérico de distancia  
Protección de Distancia. (Incluyendo algunos esquemas).

Protección de sobre corriente (direccional / no direccional)
Supervisor del transformador de corriente
Supervisor del Transformador de voltaje
Protección de corriente se secuencia negativa.
Protección de bajo voltaje.
Protección de sobrevoltaje.
Protección de Falla
Localización de falla.
Auto recierre.
Verificación de Sincronismo.
Condición de Monitoreo
Medidas del Sistema de Potencia (Corriente Voltaje, etc.)
Obtención de fallas/eventos/disturbios

**Tabla 2.** Avances del relé numérico el relé estático

Parámetros de ajuste.
Diagnostico de fallas internas.
Disponibilidad de las medidas del sistema de potencia.
Distancia de localización de fallas.
Obtención de disturbios
Función de protecciones auxiliares (conductor dañado, secuencia negativa, etc.)
Monitorio (Estado y condición del sistema).
Respaldo de la función de protecciones.

En la siguiente figura se presenta el diagrama de bloques general de un relevador digital.



**Figura 2.** Módulo del Relé y flujo de información

#### Clasificación de relés numéricos según su tipo.

Relé de Sobrecorriente: Son los encargados de abrir los elementos de protección cuando la corriente que circula supera un valor predeterminado.

- De manera instantánea.
- Con temporización de tiempo definido.
- Con temporización de tiempo inverso.

Relé de Sobrevoltaje.

Relé Diferencial

Relé de Distancia.

Relé Direccional.

- *Unidad de sobrecorriente:* Vigila el valor del módulo de la corriente.
- *Unidad direccional:* Determina el sentido en el que está circulando la intensidad comparando el ángulo eléctrico que forma el fasor de corriente con el fasor de una magnitud de referencia

#### **Transformadores de medida y protección.**

Los aparatos de medida y los relés de protección, utilizados en las instalaciones eléctricas, generalmente no están construidos para soportar altas tensiones ni elevadas intensidades de corriente. Además estos aparatos deben estar aislados de las altas tensiones para prevenir accidentes, para lo cual se tienen dos tipos, que se denominan:

- Transformadores de Corriente (TC)
- Transformadores de Potencial (TP)

#### **Finalidad de los transformadores de medida y protección.**

Los transformadores de medida tienen la finalidad de reducir en adecuada relación los valores de corriente y voltaje, además otras consideraciones:

#### **Transformador de corriente TC.**

Es un transformador en el cual en condiciones normales la corriente secundaria es proporcional a la corriente primaria y difiere de este en el ángulo de desfase, que es aproximadamente cero.

La intensidad de la corriente primaria tiene una relación con la corriente secundaria y se denomina *relación de transformación real* del transformador de intensidad, siendo inversamente proporcional al número de espiras.

$$K_I = \frac{I_1}{I_2} \quad (1)$$

#### **Especificaciones del TC.**

Los factores importantes para la selección de los TC son:

Corriente primaria y secundaria nominal  
 Relación de transformación real  
 Relación de transformación nominal  
 Error de relación.  
 Error de fase  
 Clase de precisión  
 Carga de precisión  
 Potencia de precisión  
 Nivel de aislamiento nominal  
 Corriente térmica nominal de corta duración(Ith)  
 Corriente dinámica nominal (Idin)  
 Corriente térmica permanente

Normas (IEC, IEEE)  
 Nivel de Aislamiento.  
 Corriente Nominal Primaria  
 Corriente Nominal Secundaria.  
 Corriente Nominal Térmica Continúa.  
 Corriente Térmica de corto tiempo (Ith) y  
 Corriente dinámica (Idyn)  
 Carga (Burden) y Exactitud

#### **Transformador de potencial.**

Un transformador de voltaje es un dispositivo destinado a la alimentación de aparatos de medición y /o protección con tensiones proporcionales a las de la red en el punto en el cual está conectado.

#### **Especificaciones del Transformador de Potencial**

Los factores importantes para la selección los TP son:

Voltaje primario y secundario nominal  
 Relación de transformación real  
 Relación de transformación nominal  
 Error de relación.  
 Error de fase  
 Clase de precisión  
 Carga de precisión  
 Potencia de precisión  
 Coeficiente de puesta a tierra  
 Red con neutro puesto a tierra  
 Normas (IEC, IEEE)  
 Nivel de aislamiento  
 TP inductivo o capacitivo.  
 Nivel de voltaje de servicio  
 Altitud sobre nivel del mar (si es >1000 m)  
 Voltaje nominal primario  
 Voltaje nominal secundario  
 Relación  
 Factor de voltaje nominal  
 Burden (Carga) y exactitud para cada núcleo  
 Nivel de contaminación.

### **III SISTEMA DE PROTECCIONES EN LA SUBESTACIÓN.**

Las subestaciones forman parte indispensable de los sistemas eléctricos de potencia pues son centros de transformación, de ahí la importancia que tiene la protección en la subestación ya que cada elemento está sujeto a una falla o corto circuito y otros tipos de eventos que afectarán a la subestación, para lo cual se utiliza relés numéricos que detectaran las fallas, e iniciarán la operación de los dispositivos de interrupción en los circuitos. Protección del transformador de potencia.

El transformador de potencia es uno de los elementos más vitales e importantes del sistema de eléctrico de potencia. La elección

de la protección apropiada puede estar condicionada tanto por consideraciones técnicas, de confiabilidad, económicas y por el tamaño del transformador.

### Crterios generales de equipamiento.

La protección que se dará al transformador de la subestación será contra fallas internas y contra sobrecalentamientos, causados por sobrecargas o por fallas externas prolongadas:

### Protección diferencial.

El relé diferencial de corriente es el tipo de protección usada más comúnmente para transformadores de 10 MVA en adelante. La protección diferencial es muy adecuada para detectar las fallas que se producen tanto en el interior del transformador como en sus conexiones externas.

Tipos de Relés Diferenciales para Protección.

- Protección diferencial usando relés de sobrecorriente temporizados.
- Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales.
- Protección diferencial usando relés diferenciales porcentuales con restricción de armónicos.

### Protección de sobrecorriente.

Esta protección se utiliza como protección de respaldo de la protección diferencial en el transformador de potencia, como para fallas externas, los diferentes tipos de esta protección son:

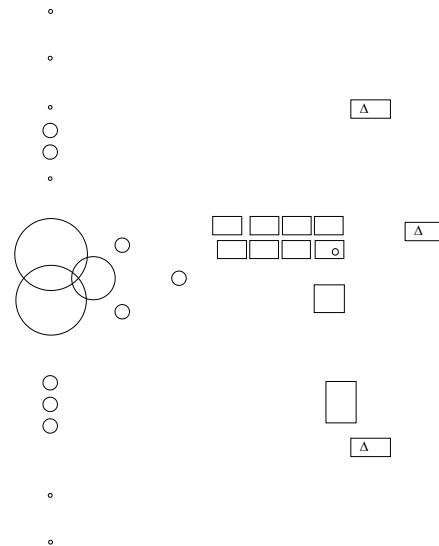
- Sobrecorriente de Fase Instantánea.
- Protección de Falla a Tierra.
- Protección de Sobrecorriente para el Devanado Terciario.
- Protección del Transformador de Puesta a Tierra.

### Protecciones mecánicas.

Son protecciones propias del transformador:

- Relé de Presión Súbita o Válvula de Sobrepresión (SPR).
- Relé Buchholz.
- Detectores de Nivel de Aceite.
- Detectores de Temperatura.
- Relé de Imagen Térmica.

A continuación se muestra las protecciones que deben incluirse en la protección del transformador.



**Figura 3.** Esquema unifilar de las protecciones de un transformador de potencia.

### Protección de barras.

La Barra es un elemento que dispone de una alta confiabilidad sin embargo ocurren fallas, llegando a ser un elemento crítico en el sistema de potencia ya que es el punto de convergencia de muchos circuitos tales como: transmisión, generación o carga.

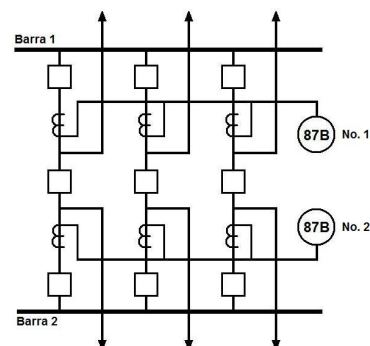
En la protección de barras se usan varios esquemas:

Protección Diferencial de Barras.

- *Protección diferencial de alta impedancia.*
- *Protección diferencial porcentual.*
- *Protección diferencial porcentual con alta impedancia moderada.*
- *Protección Diferencial Parcial.*
- *Protección de Barras con Comparación Direccional.*
- *Zonas Diferenciales Combinadas.*

### Esquema de Disyuntor y Medio "1 ½"

Con este esquema se logra un alto grado de confiabilidad, dado que cualquier disyuntor se puede retirar de operación, manteniendo todas las líneas de transmisión energizadas,



### Protección de líneas.

Las líneas son los elementos del sistema eléctrico que interconectan dos o más subestaciones por lo tanto están sometidos permanentemente a las consecuencias de los fenómenos meteorológicos y de otro tipo como maniobras humanas, por tal razón es importante su protección, pero tomando en cuenta los siguientes características:

- Confiabilidad.
- Fiabilidad.
- Seguridad.
- Selectividad y Coordinación.
- Velocidad o Tiempo de Despeje de Fallas.
- Sensibilidad de la Protección.
- Simplicidad.

### Protecciones principales de línea.

Las principales protecciones de línea son:

- Protección de Distancia.

Es una protección más selectiva y por lo mismo puede ser rápida o lenta dependiendo de la longitud de la línea,

Normalmente la protección de distancia comprende de tres a cinco zonas de protección y medición independiente cada una de ellas.

- Zona 1. Se utiliza para detectar fallas ajustada aproximadamente 80 a 85%.
- Zona 2. Su objetivo es proteger el tramo restante de la línea. Se escoge como criterio inicial el alcance del 100% de la línea protegida más el 50% de la línea adyacente.
- Zona 3. Proporciona protección de respaldo, cuyo ajuste deberá ser tal que cubra no sólo la línea protegida, para lo cual se debe considerar lo siguiente:

- Protecciones de Sobre y Bajo Voltaje.

La protección de sobre y baja voltaje opera a un tiempo determinado cuando se supera un valor de voltaje específico pero antes de hacer el ajuste de estas funciones es necesario definir el voltaje operativo del área de influencia

- Relé de Recierre y Verificación de Sincronismo.

Se utiliza para comprobar las condiciones al cierre del disyuntor. Este relé se implementa para restaurar la parte fallada del sistema de transmisión, una vez que la falla se ha extinguido

### Protección del reactor.

La protección de los reactores debido a corrientes de falla altas se hace a través de relés de sobrecorriente, protección diferencial o por combinación de estos esquemas. Para

niveles de falla bajos se debe brindar por medio de relés de impedancia, térmicos, de acumulación de gas, de sobrepresión o por una combinación de estos relés.

Las protecciones de reactores de líneas son las siguientes

- Protecciones de Sobrecorriente y Diferencial de Reactor.
- Protección Buchholz, Presión Súbita y Sobretemperatura.
- Protecciones de Sobre/Bajo Voltaje.

### Efectos Sobre el Sistema de las Fallas de Reactores de Línea.

Al presentarse una falla de reactores de línea, pueden generarse los siguientes efectos:

#### *Sobrevoltaje.*

*Teledisparos:* Para reactores conectados directamente a una línea se despeja la falla mediante el disparo del disyuntor local y se da el envío de disparo directo transferido al disyuntor remoto. Ambos disyuntores son usualmente bloqueados para el cierre.

*Saturación:* Cuando una línea compensada es desenergizada, el circuito resonante paralelo puede producir una onda de voltaje sinusoidal amortiguada a una frecuencia generalmente inferior a 60Hz con una voltaje inicial que puede acercarse al voltaje nominal del sistema. Este valor de voltaje a una frecuencia reducida puede causar mal funcionamiento de transformadores de potencial tipo capacitivo por saturación de la etapa inductiva de bajo voltaje, lo cual a su vez afecta a los relés de impedancia empleados para la protección de reactores en derivación y de línea, y al mismo transformador de potencial que puede presentar sobretensiones inaceptables en su lado secundario

### Protección del reactor de barra.

El equipamiento de protecciones será coincidente con el de los reactores de fase conectados a líneas, además se puede incorporar como protección adicional a la protección diferencial de entrada de la línea, con una actuación instantánea y con máxima sensibilidad de ajuste (mínima corriente diferencial de accionamiento). Será de funcionamiento similar a la protección diferencial total.

## IV APLICACIÓN DIRECTA A LA SUBESTACIÓN DE 500KV (S/E PIFO).

La subestación Pífo será una de las S/E más importantes a 500kV en el Sistema Nacional Interconectado, la cual recibirá energía del

nuevo proyecto de generación "Coca Codo Sinclair", y estará conectada con la Subestación Yaguachi situada en Guayaquil, estará ubicada en la comunidad de "El Inga Bajo" perteneciente a la Parroquia Pifo del cantón Quito.

### Protección del banco de autotransformadores monofásico.

La protección del banco de autotransformador monofásico se puede hacer por medio de relés diferenciales, el más utilizado es la protección diferencial de alta impedancia [7].

Descripción técnica del banco de autotransformador monofásicos:

- Número de fases 1
- Frecuencia 60 Hz.
- Altitud 2700 msnm.
- Temperatura ambiente 20°C
- Líquido refrigerante Aceite
- Tipo de instalación Exterior.

Tensiones nominales en vacío:

- EHV. 500 kV
- HV. 230 kV
- LV. 34.5 kV

Conexiones:

- Arrollamiento EHV Y con neutro.
- Arrollamiento HV Y con neutro.
- Arrollamiento LV Delta

Grupo de conexiones:

- EHV, HV, LV YN0yn0d1

### Determinación del TC

Para determinar la relación de transformación de un TC y su carga se debe tomar en cuenta lo siguiente:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n}$$

$$I_{L_{500kV}} = \frac{450.000kVA}{\sqrt{3} \cdot 500kV}$$

$$I_{L_{500kV}} = 519,62A$$

Donde:

- $I_n$  Corriente nominal
- $P_n$  Potencia nominal
- $V_n$  Voltaje nominal
- $I_{L_{500kV}}$  Corriente de línea sector 500kV.

Corriente nominal con sobrecarga del 5%

$$I_{sob_{L_{500kV}}} = 519,62 \cdot 1,05$$

$$I_{sob_{L_{500kV}}} = 545,60A$$

TC's lado EHV (500kV) 600/5 según IEC

$$i_{L_{500kV}} = 545,60A \frac{5}{600}$$

$$i_{L_{500kV}} = 4,55A$$

**Tabla 3.** Resumen de resultado de corrientes nominales primarias y secundarias.

Sector	I nominal primaria [A]	I nominal secundaria [A]
500kV	545,6	4,55
230kV	1186,06	4,94
34,5kV	2635,73	4,39

### Determinación de la Carga (Burden).

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (4.2)$$

Donde:

- R Impedancia del conductor en
- $\rho$  Resistividad del cobre
- L Longitud del conductor
- S Sección del conductor, en mm<sup>2</sup>

Se obtiene una impedancia del conductor de:

$$R = 0,017 \cdot \frac{100}{8,37}$$

$$R = 0,20310 \Omega$$

Potencia consumida:

$$P = R \cdot I^2 \quad (4.3)$$

$$P = R_c \cdot I^2$$

Donde:

- $R_c$  resistencia del conductor

Potencia consumida del cable más la resistencia interna del TC, la resistencia interna del TC se lo coge un valor referencial de 0,5

$$P_1 = (0,203) \cdot 5^2$$

$$P_1 = 17,575W$$

Potencia Total consumida incluyendo el valor de los equipos

$$P = 5,077 + 0,1$$

$$P = 5,177W$$

### Determinación del Factor Límite de Precisión (FLP).

$$FLP = FLP' \frac{P_i + P_B}{P_i + P_N} \quad 0;$$

$$FLP = FLP' \frac{R_{TC} + R_B}{R_{TC} + R_N}$$

Donde:

- FLP Factor limite de precisión

FLP'	Factor limite de precisión
$P_N$	Carga nominal del TC
$P_i$	Carga interna del TC $P_i = R_{TC} \cdot I_{NS}^2$
$P_B$	Carga actualmente conectada
	$P_i = R_B \cdot I_{NS}^2$
$I_{NS}$	Corriente nominal secundaria
$R_{TC}$	Resistencia interna secundaria del TC
$R_B$	Resistencia de la carga ( $R_C + R_R$ )
$R_C$	Resistencia del conductor conectado al TC
$R_R$	Resistencia del relé

$$FLP' = \frac{I_F}{I_N}$$

$$R_{TC}: 0.4$$

$$P_N: 10VA$$

$$P_B: 5,177W$$

$$FLP' = \frac{9328A}{600A}$$

$$FLP' = 15,55$$

$$FLP \geq 15,55 \frac{10 + 5,18}{10 + 10}$$

$$FLP \geq 11,80$$

Por lo tanto el valor de Precisión será de 5P15 de acuerdo a la Norma IEC

#### Resumen del cálculo de los TC's.

A continuación se muestra un resumen de los valores de TC's.

**Tabla 4.** Datos Técnicos principales del Transformador de corriente.

	Unid.	500kV	230kV
Tipo:		1φ	1φ
Montaje		exterior	exterior
Núcleos		3N	1N
Vnominal	kV	500	230
Vnominal máx	kV	525	245
Inominal	A	600	1200
primaria	A	5	5
Inominal secundaria			Medición 10
Núcleo 1;			
• Utilización.	VA	Medición	Clase 0,5
• Prestación		10	
• Precisión.		Clase 0,5	
Núcleo 2.			10
• Utilización.	VA	Protección	20
• Prestación.		10	5P
• FLP		15	
• Precisión		5P	

Núcleo 3.		Protección	
• Utilización.		10	10
• Prestación.		15	20
• FLP		5P	5P
• Precisión			

#### Cálculo de la protección diferencial del autotransformador.

Corrientes primarias según la Tabla 3 donde se muestra el resultado:

$$I_{L1\_500kV} = 545,60A$$

$$I_{L1\_230kV} = 118608A$$

$$I_{L1\_34,5kV} = 263573A$$

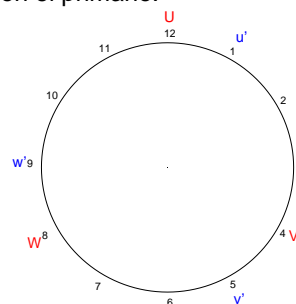
Datos de los TC's,.

TC's EAT (500kV)600/5

TC's AT (230kV)1200/5

TC's BT (34,5kV) 3000/5

El análisis fasorial para ver el grupo de conexión del autotransformador, se sugiere suponer que no existe un lado de los arrollamientos, con eso se puede combinar el terciario con el primario.



**Figura 4.** Diagrama de corrientes sector 500kV y 34,5 desfasado 30° por conexión YN0yn0d1.

Corrientes Secundarias.

$$i_{L\_500kV} = 4,55A$$

$$i_{L\_230kV} = 4,94A$$

$$i_{L\_34,5kV} = 4,39A$$

Ajustes de la protección diferencial.

Corrientes que entraran a la protección diferencial con la compensación del diagrama de corrientes se tiene:

$$i'_{\_500kV} = 7,88A$$

$$i'_{\_230kV} = 8,55A$$

$$i_{-34,5kV} = 4,39A$$

Cálculo del valor del TAP.

$$\frac{i'_{-500kV}}{i'_{-230kV}} = \frac{TAP}{5}$$

$$TAP = \left( \frac{i'_{-500kV}}{i'_{-230kV}} \right) \cdot 5$$

$$TAP = \left( \frac{7,88}{8,55} \right) \cdot 5$$

$$TAP = 4,608$$

**Protección de barras, configuración disyuntor y medio “1½”.**

La Selección del esquema de barras de configuración 1½ se le hizo asumiendo en base a otras subestaciones implementas para el nivel de voltaje 500kV, de diferentes países.

**Especificación de TC**

En base a los valores probables de corrientes para las diferentes posiciones indicados en la Tabla 4, se especifican los transformadores

**Protección Diferencial de Barras**

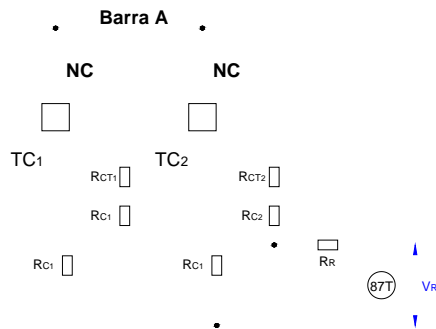


Figura 5. Esquema de la protección diferencial de alta impedancia.

$$V_R = \frac{(R_{CT} + 2R_C)I_f}{N} \quad (4.7)$$

Donde:

- $V_R$  voltaje en el relé
- $R_{CT}$  Resistencia interna
- $R_C$  Resistencia del conductor
- $I_f$  Corriente de falla
- $N$  Relación de Transformación.

Con el fin de proporcionar un margen superior para la condición de falla externa, el ajuste pickup es calculado por:

$$V_R = \frac{1,6K(R_{CT} + kR_C)I_f}{N}$$

Donde

K factor de rendimiento del TC.

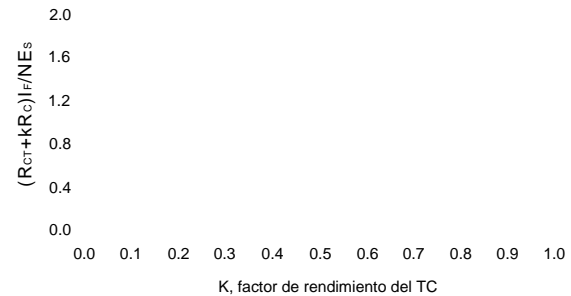


Figura 6. Factor de rendimiento del TC para condición de falla [7]

Cálculo de ajustes de la protección diferencial.

Se obtiene una impedancia del conductor:

$$R_C = 0,017 \cdot \frac{100}{8,37}$$

$$R_C = 0,203106$$

$$E_s: 120$$

$$R_C: 0.203\Omega$$

$$R_{CT}: 0.4$$

$$I_{f1\phi}: 9601[A]$$

$$I_{f3\phi}: 9328[A]$$

Para Máxima Falla Trifásica.

$$\frac{(R_{CT} + kR_C)I_f}{N \cdot E_s} = \frac{(0.4 + 0.203)9328}{(600/5)120} = 0.391$$

Según la figura 5 el valor de K se selecciona tal como se muestra en la figura siguiente:

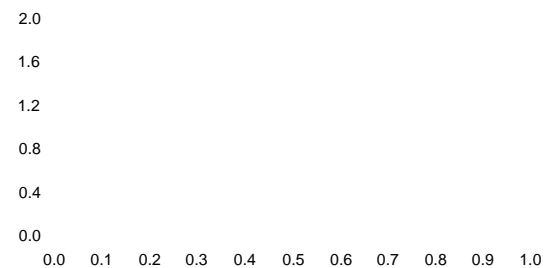


Figura 7. Selección de K para condición de falla trifásica.



$K: 0.853$

Según la ecuación 4.8 se tiene:

$$V_R = \frac{1,6K(R_{CT} + kR_C)I_f}{N}$$

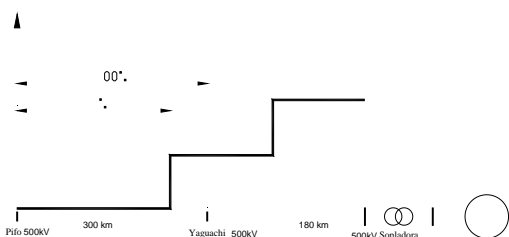
$$V_R = \frac{16 \cdot 0.853(0.4 + 0.203)9328}{(600/5)}$$

El voltaje de ajuste requerido será:

$$V_R = 639.72$$

### Protección de la línea Pifo - Yaguachi.

La protección de distancia emplea varias zonas para proteger la línea de transmisión: zona 1, zona 2, zona 3 y zona reversa



**Figura 8.** Diagrama unifilar sencillo de la línea que se utilizará como modelo para ajustar las zonas del relé de distancia

### Especificación de los TC

En base a los valores de corriente obtenidos, se especifican según la Tabla 4.

### Transformador de Potencial.

Cálculo:

$$RTP = \frac{500}{\frac{\sqrt{3}}{0,115}} = 4348$$

El TP seleccionado según la relación de transformación será:

$$TP's = \frac{500}{\sqrt{3}} / \frac{0,115}{\sqrt{3}}$$

**Tabla 5.** Datos Técnicos principales del Transformador de Potencial.

Subestación Pifo 500kV TPC	Unid.	Valor
Tipo:	-	Monofásico
Montaje	-	exterior
Tipo	-	Capacitivo
Arrollamientos Secundarios	Nº	3
Vnominal (Vn)	kV	500
V nominal máx	kV	525/√3
V primario	kV	500/√3
V secundario	V	115v/√3
Arrollamiento 1		Protección
- Utilización.		10
- Prestación	VA	3P
- Precisión.		
Arrollamiento 2.		Protección
- Utilización.		10
- Prestación	VA	3P
- Precisión.		
Arrollamiento 3		Medición
- Utilización.		10
- Prestación.	VA	0,5
- Precisión		

### Cálculo de ajuste de la protección de distancia

**Tabla 6** Parámetros usados en la simulación para L/T de 500kV.

Secuencias	R (Ω/km)	X (Ω/km)	B (μs/km)
Positiva (+) y Negativa (-)	0.0229	0.3234	5.1011
Cero (0)	0.2956	1.1025	3.3581

**Tabla 7.** Parámetros de distancias de cada línea del sistema de 500kV.

Líneas
Pifo – Yaguachi (300 km)
Yaguachi – Sopladora (180 km)

La impedancia de la línea Pifo-Yaguachi será:

$$Z_{L/T(Pifo-Yaguachi)} = 6.87 + j88.68$$

$$Z_{L/T(Pifo-Yaguachi)} = 88.95 \angle 85.57^\circ$$

Donde la impedancia debe ser expresada en ohmios para el lado secundario, para que mida el relé será:

$$Z_{secundario} = Z_{primario} \cdot \frac{RTC}{RTP}$$

por lo tanto la impedancia secundaria:

$$Z_{secundario} = (88.95 \angle 85.57^\circ) \cdot \frac{120}{4348}$$

$$Z_{secundario} = 2.45 \angle 85.57^\circ$$

$$Z_{LT(\text{Piño-Yaguachi})} = 0.189 + j2.448$$

### Ajuste de la Zona 1 de Protección.

En la zona 1 se ajustará a un 85% de la impedancia de la línea

$$Z_1 = K \cdot Z_L$$

Donde:

$Z_1$	Ajuste de la zona 1
K	Constante.
$Z_L$	Impedancia de línea.

$$Z_{LT(\text{Piño-Yaguachi})} = 0.189 + j2.448$$

$$Z_1 = 85\% \cdot (0.189 + j2.448)$$

$$Z_1 = 0.161 + j2.081$$

### Ajuste de la Zona 2 de Protección.

Como valor mínimo de ajuste se escoge el 120% de la impedancia de la línea

$$Z_{LT(\text{Piño-Yaguachi})} = 0.189 + j2.448$$

$$Z_2 = 120\% \cdot (0.189 + j2.448)$$

$$Z_2 = 0.228 + j2.937$$

### Ajuste de la Zona 3 de Protección.

El alcance de la zona tres se determina por:

$$Z_3 = 100\% \cdot Z_{LT12} + 120\% \cdot Z_{LT23}$$

$$Z_3 = 100\% \cdot Z_{LT(P-Y)} + 120\% \cdot Z_{LT(Y-S)}$$

$$Z_{LT(P-Y)} = 0.189 + j2.448$$

$$Z_{LT(Y-S)} = 4.122 + j53.21$$

$$Z_{LT(Y-S)} = 53.369 \angle 85.57^\circ$$

$$Z_{secundario} = (53.369 \angle 85.57^\circ) \cdot \frac{120}{4348}$$

$$Z_{secundario} = 1.473 \angle 85.57^\circ$$

$$Z_{LT(Y-S)} = 0.114 + j1.469$$

$$Z_3 = 100\% \cdot (0.189 + j2.448) + 120\% \cdot (0.114 + j1.469)$$

$$Z_3 = 0.326 + j4.210$$

### Protección diferencial del reactor.

El reactor como elemento importante, dentro de un sistema eléctrico de potencia, deberá ser protegido de una manera selectiva, rápida y segura.

### Calculo del TC en el Lado de 500kV.

Cálculo de la corriente nominal del banco de reactores monofásicos en el lado de 500kV.

$$I_{Nreactor} = \frac{120.000 \text{ MVAR}}{\sqrt{3} \cdot 500 \text{ kV}}$$

$$I_{Nreactor} = 138,56 \text{ A}$$

Corriente nominal con sobrecarga del 5%

$$Isob_{reactor} = 138,56 \cdot 1,05$$

$$Isob_{reactor} = 145,49 \text{ A}$$

TC's 200/5

La corriente secundaria aplicando la relación de transformación:

$$i_{Nreactor} = 145,49 \text{ A} \cdot \frac{5}{200}$$

$$i_{L_{500kV}} = 3.64 \text{ A}$$

**Tabla 8.** Resumen de resultado de corrientes nominales primarias y secundarias en el reactor

Sector	I nominal primaria [A]	I nominal secundaria [A]
500kV	145,49	3,64

**Tabla 9.** Resumen de valores de TC

Reactor de Línea		
Vnominal máx (RTC)	kV	525 200/5
Núcleo 1; • Utilización. • Prestación • Precisión.	VA	Medición 10 Clase 0,5
Núcleo 2. • Utilización. • Prestación. • FLP • Precisión	VA	Protección 10 15 5P

### Diagrama Unifilar de la S/E

A continuación se muestra el diagrama unifilar con sus respectiva protecciones.

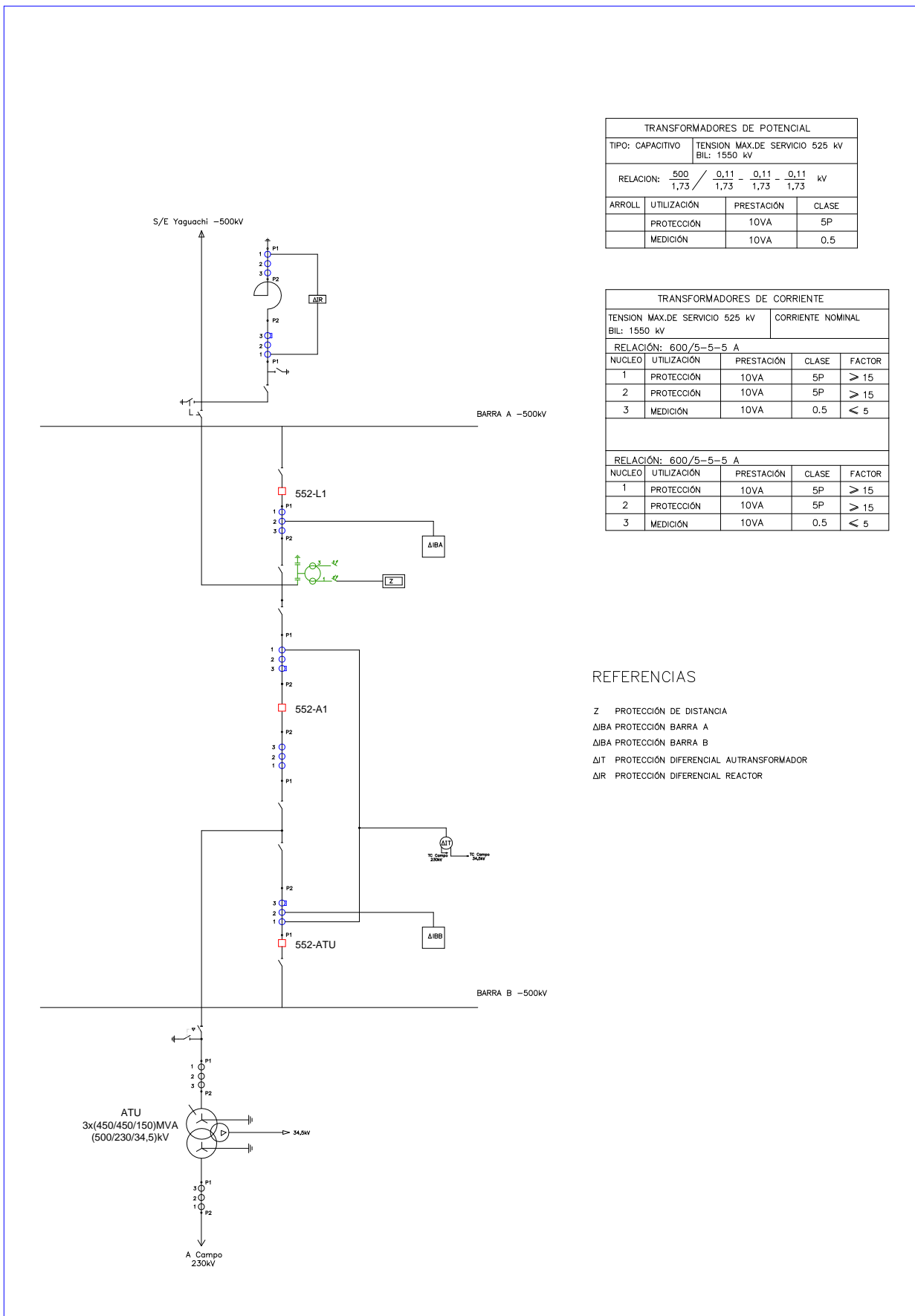


Figura 9. Diagrama unifilar de la subestación Pifo con sus respectivas protecciones

## V CONCLUSIONES.

- La utilización de la nueva tecnología en la protección de sistemas de potencia, resulta eficiente, porque en un solo dispositivo tiene incorporado diferentes funciones inclusive con uno solo se puede proteger toda una subestación.
- El buen funcionamiento de un relé de protección está relacionado con el comportamiento del transformador de corriente y de potencial asociado,
- La ventaja de utilizar relés numéricos es que ayudan a corregir todos los factores que influyen en el buen funcionamiento de relé.
- En la protección del transformador no difiere mucho cuando se trate un transformador trifásico o un banco de transformadores monofásicos, porque para el caso del banco se toma con un trifásico y se sigue el mismo procedimiento al momento de protegerlo.
- Es muy importante tener un esquema de protección de respaldo o redundante que se conecte en paralelo con el principal, con esto se evita la indisponibilidad de la línea o equipo ante falla o ante la ausencia de actuación por avería de una protección principal.
- Los valores para la calibración del relé se puede ajustar de acuerdo a los requerimientos que se necesiten y se pueden cambiar con facilidad en caso que sea necesario

## VI RECOMENDACIONES.

- En el presente trabajo se desarrolló la aplicación de únicamente un tipo de protección para cada elemento de la subestación, aún cuando se describió el conjunto de protecciones que cada elemento debería tener De aquí que será importante seguir con la investigación más detalla en cada uno de los elementos de protección que completen un esquema total de protecciones de la subestación Pifo.
- Para encontrar los transformadores de corriente y tensión, no se tomo en cuenta muchos factores que intervienen para las protecciones como por ejemplo el nivel de aislamiento que se necesita para 500kV, el efecto de saturación que tendrá a dicho nivel y otros parámetros necesarios para que tenga un mejor funcionamiento la protección, por lo que sería recomendable hacer un estudio más detallado de los TC's y TP's tomando en cuenta los parámetros necesarios para el voltaje de 500kV.
- La coordinación de protecciones es otra parte importante en la protección, por lo que se debería seguir su estudio, previo la obtención de todas las protecciones necesarias en la S/E a 500kV.

## VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONELEC, Plan maestro de electrificación 2007-2016, Ecuador, diciembre 2007.
- [2] TRANSELECTRIC S.A, Sistema de Transmisión de 500 kV, Descripción de la Prefactibilidad del Proyecto, mayo 2008.
- [3] TRANSELECTRIC S.A, Plan de Expansión de Transmisión Período 2008 – 2017, diciembre 2007.
- [4] COES SINAC, Comité de operación económica del sistema interconectado nacional, Requerimientos Mínimos de Equipamiento para los sistemas de protección del SEIN.
- [5] ISA. Interconexión Eléctrica S.A. "E.S.P", Consultoría para elaborar manual de procedimientos para la coordinación de protecciones en el CND, Guías para el buen ajuste y la coordinación de protecciones del SNT, Itagüí julio de 2000
- [6] TRANSENER S.A., Guías de diseño para estaciones transformadoras, Sistema de transporte de energía eléctrica en alto voltaje, Guía de diseño y normas de protecciones.
- [7] ANDERSON, Paul M. Power System Protection. McGraw-Hill: IEEE Press, New York 1999.
- [8] MASON, Russell, The Art & science of protective relaying.
- [9] ABB, RET 670 Technical reference manual, Document ID: SA2008-000519 Differential Protection Schemes for Auto-Transformers.

## IX. BIOGRAFÍAS.



Richard H. Zambrano. Q. Nacido en Quito el 21 de diciembre de 1982, realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional Técnico "Alangasi" obteniendo el título de bachiller contador posteriormente continuó con

sus estudios en la Escuela Politécnica Nacional.

Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en el año 2008.

Ing. Antonio Bayas. Ing. Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, al momento se desempeña como profesor de la EPN.