

**CENTRAL HIDROELÉCTRICA**  
**Cálculo de la Tensión de Generación**

| ÍNDICE   | PÁG. |
|--|------|
| 1 - OBJETIVO .....   | 3    |
| 2 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA .....   | 3    |
| 2.1 - Planillas .....  | 3    |
| 3 - CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN .....                            | 3    |
| 4 - CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES .....                               | 3    |
| 4.1 - Unidades Generadoras .....   | 3    |
| 4.2 - Transformadores Elevadores .....                                       | 4    |
| 4.3 - Subestación Asociada de Alta Tensión .....                             | 4    |
| 5 - TENSIÓN DE GENERACIÓN .....  | 5    |
| 5.1 - Circuito Básico .....  | 5    |
| 5.2 - Ecuación del Circuito Secundario del Transformador Elevador .....      | 5    |
| 5.3 - Impedancia del Transformador Elevador .....                            | 6    |
| 5.4 - Impedancia del Transformador Elevador para Cualquier Derivación k..... | 7    |
| 5.5 - Cálculo de la Tensión del Secundario del Transformador Elevador .....  | 8    |
| 6 - CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE GENERACIÓN .....                                | 9    |
| 7 - APLICACIONES .....   | 10   |
| 7.1 - Sincronización de las Unidades .....                                   | 10   |
| 7.2 - Tensión de la Unidad Generadora .....                                  | 12   |
| 7.3 - Condiciones Excepcionales .....  | 15   |

## 1 - OBJETIVO

El objetivo de este informativo es calcular la tensión de las unidades generadoras de la Casa de Máquinas en una planta hidroeléctrica, en función de la configuración del sistema de generación, la tensión de la subestación asociada, las características de las unidades generadoras, los datos del transformador del elevador y de las condiciones de operación, con el fin de auxiliar en el análisis del comportamiento de las tensiones en los servicios auxiliares de la planta.

El resultado de este informativo, además de la definición de los criterios para calcular la tensión de generación, será la producción de una planilla en Excel, para calcular el valor de la tensión de generación, con base en los datos necesarios para su determinación.

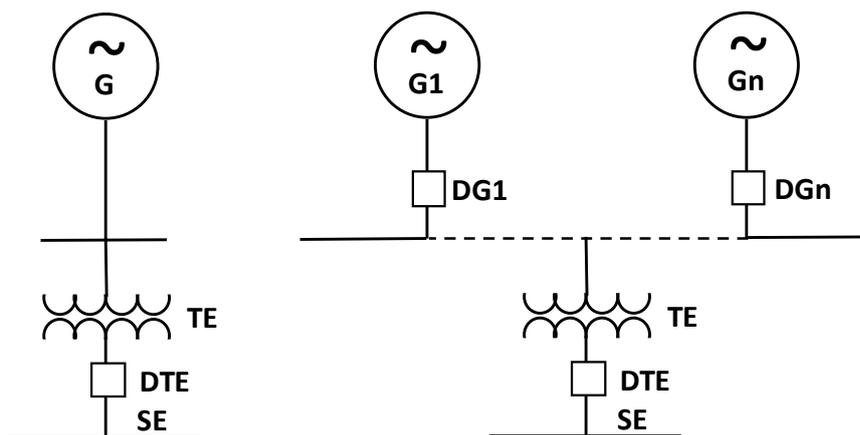
## 2 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA

### 2.1 - Planillas

PL.EL.SA.CA.06.R0 Central Hidroeléctrica - Cálculo de la Tensión de Generación

## 3 - CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

Para el propósito de este informativo, se considerará la configuración de una Casa de Máquinas, con una o más unidades generadoras, asociadas con un transformador elevador.



En el caso de una sola unidad generadora por transformador elevador, la sincronización de la unidad con la subestación se realiza a través del disyuntor DTE. En caso de más de una unidad generadora por transformador elevador, la sincronización de la primera unidad con la subestación se realiza a través del disyuntor DTE y las demás unidades se sincronizan, en la barra de generación, a través de los disyuntores de las respectivas unidades DG1, ..., DGn.

## 4 - CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES

Las características de las instalaciones son definidas por los usuarios de acuerdo con los datos del proyecto y fabricantes, normas aplicables, los organismos reguladores y las prácticas operativas. Los siguientes datos son referencias normalmente utilizadas, que pueden ser cambiadas por el usuario dependiendo de su información.

### 4.1 - Unidades Generadoras

La potencia nominal de cada unidad generadora es, normalmente, igual a la potencia del transformador del elevador. En caso de grupo con varias unidades, la potencia nominal de cada unidad es la fracción correspondiente de la potencia del transformador. Por ejemplo, en un sistema con dos unidades generadoras por transformador de elevador, cada unidad tiene una potencia nominal igual al 50% de la potencia del transformador de elevador.

La variación normal en la tensión de operación de las unidades generadoras es de  $\pm 10\%$ .

#### 4.2 - Transformadores Elevadores

Los transformadores de elevadores o banco de transformadores elevadores, para efecto de este informativo, también se tratarán como transformadores elevadores.

Debido a la alta potencia, los transformadores elevadores tienen sistemas de enfriamiento, generalmente son equipados con una o dos etapas de ventilación forzada. A cada condición de ventilación corresponde a una potencia, y cada etapa de ventilación aumenta la potencia base en 1/3. Así, por ejemplo, un transformador con una potencia nominal de 60MVA, con una etapa de ventilación tiene su potencia aumentada a 80MVA y con dos etapas tiene su potencia aumentada a 100MVA. Por lo tanto, un transformador elevador con potencia nominal de 60MVA y dos etapas de ventilación puede transmitir la energía generada por 2 unidades generadoras de 50MVA o 4 de 25MVA.

La tensión nominal del devanado primario (baja tensión) será igual a la tensión nominal de las unidades generadoras, y la tensión nominal del devanado secundario (alta tensión), igual a la tensión nominal de la subestación asociada; El devanado secundario tiene derivaciones, que normalmente son  $2 \times \pm 2,5\%$  de la tensión nominal.

La impedancia nominal de transformadores elevadores es definida por el usuario en la fase de diseño, y los valores exactos de impedancia y resistencia se obtienen, en las pruebas, en la fábrica de los transformadores. La impedancia nominal de los transformadores, cuando no se especifica lo contrario, siempre se refiere a la potencia nominal. Por ejemplo, la impedancia nominal de un transformador elevador de 60/80/100MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2) puede referirse a la potencia nominal de 60, 80 o 100MVA.

La impedancia real del transformador elevador, obtenida en las pruebas de fábrica, debe estar dentro de los límites de tolerancia establecidos en las normas. La resistencia del transformador varía con la temperatura de los devanados, es decir, depende de la carga y las condiciones de ventilación. En ausencia de información sobre la resistencia, se sugiere la adopción del valor nominal del 1%.

#### 4.3 - Subestación Asociada de Alta Tensión

Las tensiones consideradas en la barra de alta tensión de la subestación asociada deben estar de acuerdo con las definidas en la tabla siguiente (ANEEL).

**Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV**

| <b>Tensão de Atendimento (TA)</b> | <b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b> |
|-----------------------------------|---|
| Adequada                          | $0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$  |
| Precária                          | $0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$                                    |
| Crítica                           | $TL < 0,93TR$ ou $TL > 1,07TR$  |

**Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV**

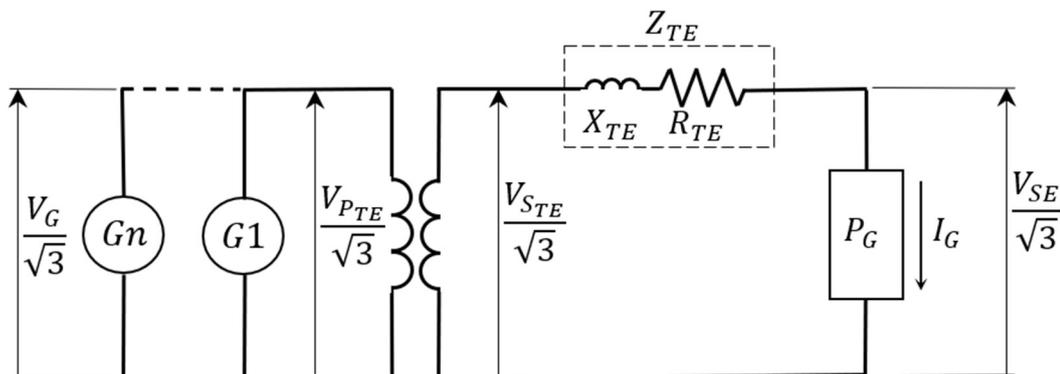
| <b>Tensão de Atendimento (TA)</b> | <b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)</b> |
|-----------------------------------|---|
| Adequada                          | $0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$  |
| Precária                          | $0,90TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$                                    |
| Crítica                           | $TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$  |

## 5 - TENSIÓN DE GENERACIÓN

El cálculo de la tensión de la generación se realizará considerando que toda la potencia generada por las unidades se transmite a la subestación asociada, a través del transformador elevador.

### 5.1 - Circuito Básico

La siguiente figura representa el circuito del sistema que se analizará:



Dónde:

$G_1, G_n$ , Unidad(es) generadora(s) asociada(s) al transformador del elevador;

$V_G$  Tensión de la(s) unidad(es) generadora(s)  $G_1, \dots, G_n$ ,

$V_{PTE}$  Tensión en el primario del transformador elevador.

$V_{STE}$  Tensión en el secundario del transformador elevador.

$Z_{TE}$  Impedancia del transformador elevador.

$X_{TE}$  Reactancia del transformador elevador.

$R_{TE}$  Resistencia del transformador elevador

$P_G$  Potencia suministrada por la(s) unidad(es) generadora(s) a través del transformador elevador.

$I_G$  Corriente de la potencia suministrada a través del transformador elevador

$V_{SE}$  Tensión de la barra de la subestación asociada

### 5.2 - Ecuación del Circuito Secundario del Transformador Elevador

Para el circuito básico podemos escribir que:

$$\frac{\vec{V}_{STE}}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{SE}}{\sqrt{3}} + \vec{I}_G \cdot \vec{Z}_{TE}$$

Mientras que:

$$\vec{V}_{SE} = \left( \frac{V_{SE}}{\sqrt{3}}, 0 \right)$$

Donde:

$V_{SE}$ - Tensión de la barra de la subestación asociada (kV)

$$\vec{I}_G = \left( \frac{P_G}{\sqrt{3} V_{SE}}, -\varphi_{PG} \right)$$

Dónde:

$I_G$  - Corriente de la potencia suministrada a través del transformador del elevador (kA)

$P_G$  - Potencia total que pasa por el transformador del elevador (MVA)

$V_{SE}$  - Tensión de la barra de la subestación asociada (kV)

$FP$  - Factor de potencia de la energía total generada.

$\varphi_{PG}$  - Ángulo del factor de potencia de la carga total alimentada por el transformador elevador.

$$\varphi_{PG} = \arccos(FP)$$

$$\vec{Z}_{TE} = (Z_{TEk}, \theta_{TE})$$

Dónde:

$Z_{TEk}$  - Impedancia del transformador elevador en la derivación secundaria k ( $\Omega$ )

$k$ - Derivación utilizada del devanado secundario del transformador elevador en pu. Por ejemplo, para la derivación -5%  $k=0,95$ ; para la derivación -2,5%  $k=0,975$ ; para la derivación nominal  $k=1$ ; para la derivación +2,5%  $k=1,025$ ; para la derivación -5%  $k=0,95$ .

$\theta_{TE}$ - Ángulo de impedancia del transformador elevador.

$$\theta_{TE} = \arccos \frac{R_n}{Z_n}$$

Dónde:

$R_n$ -Resistencia nominal del transformador elevador (%)

$Z_n$ - Impedancia nominal del transformador elevador (%)

### 5.3 - Impedancia del Transformador Elevador

Teniendo en cuenta que la potencia del transformador es constante, para cualquier derivación utilizada del devanado secundario, tenemos:

$$Z_{TE_n} = \frac{V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

$$P_{TE_n} = \frac{V_{STE_n}^2}{Z_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

Dónde:

$Z_{TE_n}$  - Impedancia nominal del transformador elevador ( $\Omega$ )

$V_{STE_n}$  - Tensión secundaria nominal del transformador elevador (kV)

$P_{TE_n}$  - Potencia nominal del transformador elevador (MVA)

$Z_n$ - Impedancia nominal del transformador del elevador (%)

**5.4 - Impedancia del Transformador Elevador para Cualquier Derivación k**

$$Z_{TE_k} = \frac{V_{STE_k}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

Dónde:

$Z_{TE_k}$  - Impedancia del transformador elevador en la derivación k ( $\Omega$ )

$V_{STE_k}$  - Tensión secundaria del transformador elevador en la derivación k (kV)

$P_{TE_n}$  - Potencia nominal del transformador elevador (MVA)

$Z_n$  - Impedancia nominal del transformador del elevador (%)

Reemplazando  $P_{TE_n}$ :

$$Z_{TE_k} = \frac{V_{STE_k}^2}{\frac{V_{STE_n}^2}{Z_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

$$Z_{TE_k} = Z_{TE_n} \cdot \frac{V_{STE_k}^2}{V_{STE_n}^2}$$

Reemplazando

$$V_{STE_k} = k \cdot V_{STE_n}$$

y

$$Z_{TE_n} = \frac{V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

Tenemos:

$$Z_{TE_k} = \frac{V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100} \cdot \frac{(k \cdot V_{STE_n})^2}{V_{STE_n}^2}$$

$$Z_{TE_k} = \frac{V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100} \cdot \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{V_{STE_n}^2}$$

$$Z_{TE_k} = \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

Con los datos de la impedancia y resistencia del transformador podemos considerar que:

$$\vec{Z}_{TE_k} = \left( \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}, \theta_{TE} \right)$$

Dónde:

$Z_{TE_k}$  - Impedancia del transformador elevador en la derivación k ( $\Omega$ )

$V_{STE_n}$  - Tensión nominal secundaria del transformador elevador (kV)

$P_{TE_n}$  - Potencia nominal del transformador elevador (MVA)

k- Derivación utilizada del devanado secundario del transformador elevador en pu. Por ejemplo, para la derivación -5% k=0,95; para la derivación -2,5% k=0,975; para la derivación nominal k=1; para la derivación +2,5% k=1,025; para la derivación -5% k=0,95.

$Z_n$  - Impedancia nominal del transformador del elevador (%)

$\theta_{TE}$  - Ángulo de impedancia del transformador elevador

Siendo que:

$$\theta_{TE} = \text{arc cos.} \frac{R_{TE_k}}{Z_{TE_k}}$$

Nota: Los valores de  $R_{TE_k}$  y  $Z_{TE_k}$  deben estar en la misma unidad, es decir, ambas en pu, % o  $\Omega$ .

### 5.5 - Cálculo de la Tensión del Secundario del Transformador Elevador

Con los datos definidos en los ítems anteriores, la ecuación del circuito del secundario del transformador elevador se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\vec{V}_{STE}}{\sqrt{3}} = \frac{\vec{V}_{SE}}{\sqrt{3}} + \vec{I}_G \cdot \vec{Z}_{TE}$$

$$\frac{\vec{V}_{STE}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{SE}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left( \frac{P_G}{\sqrt{3} V_{SE}}, -\mathcal{P}_{PG} \right) \cdot \left( \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}, \theta_{TE} \right)$$

$$\frac{\vec{V}_{STE}}{\sqrt{3}} = \left( \frac{V_{SE}}{\sqrt{3}}, 0 \right) + \left[ \left( \frac{P_G}{\sqrt{3} V_{SE}} \cdot \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100} \right), (-\mathcal{P}_{PG} + \theta_{TE}) \right]$$

Multiplicando por  $\sqrt{3}$

$$\vec{V}_{STE} = (V_{SE}, 0) + \left[ \left( \frac{P_G}{V_{SE}} \cdot \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100} \right), (\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}) \right]$$

Considerando que:

$$A = \frac{P_G}{V_{SE}} \cdot \frac{k^2 V_{STE_n}^2}{P_{TE_n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

En forma de complejos tenemos:

$$\vec{V}_{STE} = (V_{SE} + j0) + [A \cdot \cos(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}) + jA \cdot \text{sen}(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG})]$$

$$\vec{V}_{STE} = (V_{SE} + A \cdot \cos(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG})) + jA \cdot \text{sen}(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG})$$

$$|V_{STE}|^2 = (V_{SE} + A \cdot \cos(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2 + (A \cdot \sin(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2$$

$$V_{STE} = \sqrt{(V_{SE} + A \cdot \cos(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2 + (A \cdot \sin(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2}$$

## 6 - CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE GENERACIÓN

La tensión en el secundario del transformador elevador depende de la tensión aplicada al primario y de la derivación utilizada en el secundario. Por lo tanto, si un transformador tiene relación  $V_p - V_s$  con derivaciones en el secundario, la tensión  $V_{STE}$  en el secundario del transformador será:

$$\frac{V_{PTE}}{V_{STE}} = \frac{V_{PTEn}}{kV_{STE n}}$$

$$V_{PTE} = \frac{V_{PTE n} V_{STE}}{kV_{STE n}}$$

A partir del diagrama básico del circuito podemos verificar que la tensión de generación es exactamente igual a la tensión del primario del transformador elevador. Así que:

$$V_G = V_{PTE} = \frac{V_{PTE n} V_{STE}}{kV_{STE n}}$$

Remplazando  $V_{STE}$  tenemos:

$$V_G = \frac{V_{PTE n} \sqrt{(V_{SE} + A \cdot \cos(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2 + (A \cdot \sin(\theta_{TE} - \mathcal{P}_{PG}))^2}}{kV_{STE n}}$$

Siendo:

$$A = \frac{P_G}{V_{SE}} \cdot \frac{k^2 V_{STE n}^2}{P_{TE n}} \cdot \frac{Z_n}{100}$$

Dónde:

$V_G$  - Tensión de la(s) unidad(es) generadora(s)  $G_1, G_n$ , (kV)

$V_{PTE n}$  - Tensión nominal del primario del transformador (kV)

$V_{STE n}$  - Tensión nominal del secundario del transformador (kV)

$V_{SE}$  - Tensión de la subestación asociada (kV)

$P_G$  - Potencia total que pasa por el transformador elevador (MVA)

$P_{TE n}$  - Potencia nominal del transformador elevador (MVA)

$Z_n$  - Impedancia nominal del transformador elevador (%) referida a la potencia nominal

$\mathcal{P}_{PG}$  - Ángulo del factor de potencia de carga total alimentada por transformador elevador

$\theta_{TE}$  - Ángulo de la impedancia del transformador elevador

$$\theta_{TE} = \text{arc cos.} \frac{R_n}{Z_n}$$

Dónde:

$R_n$  - Resistencia nominal del transformador elevador (%)

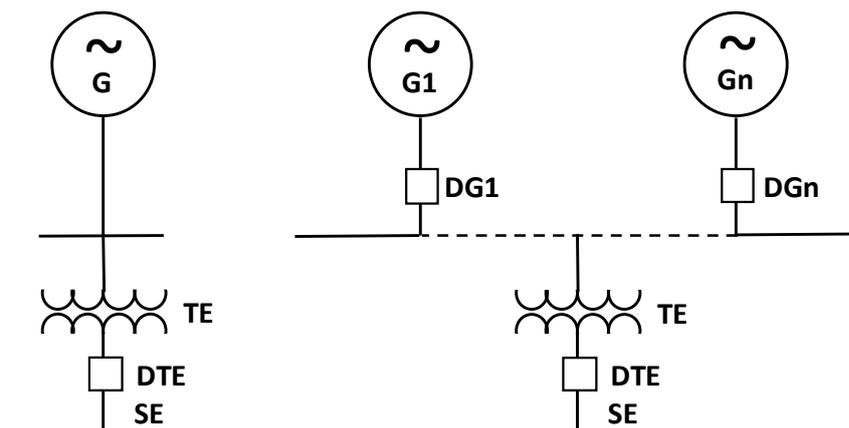
$Z_n$  - Impedancia nominal del transformador elevador (%)

$k$  - Derivación utilizada devanado secundario del transformador elevador en pu. Por ejemplo, para la derivación -5%  $k=0,95$ ; para la derivación -2,5%  $k=0,975$ ; para la derivación nominal  $k=1$ ; para la derivación +2,5%  $k=1,025$ ; para la derivación -5%  $k=0,95$ .

## 7 - APLICACIONES

El propósito de este documento, tal como se definió al principio, es ayudar en el análisis del comportamiento de las tensiones de los servicios auxiliares de la instalación. En este análisis también se puede verificar la variación de la tensión de la generación, desde la fase de sincronización hasta el suministro de la generación máxima de potencia, considerando las variaciones de tensión de la subestación asociada.

### 7.1 - Sincronización de las Unidades



Aunque exista más de una unidad por transformador elevador, la sincronización de la primera unidad se produce como si las otras no existieran, es decir, la sincronización de la primera unidad siempre se realiza a través del disyuntor DTE.

La tensión de generación que permitirá la sincronización de la unidad se definirá en función de la tensión de la subestación asociada, las tensiones nominales del transformador elevador y la derivación utilizada del secundario. Este valor de tensión se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_G = V_{P_{TE}} = \frac{V_{P_{TE_n}} V_{SE}}{k V_{S_{TE_n}}}$$

Dónde:

$V_G$  Tensión de la(s) unidad(es) generadora(s)  $G_1, G_n$ , (kV)

$V_{P_{TE}}$  Tensión en el primario del transformador elevador (kV)

$V_{P_{TE_n}}$  - Tensión nominal del primario del transformador (kV)

$V_{STE_n}$  - Tensión nominal del secundario del transformador (kV)

$V_{SE}$  - Tensión en la subestación asociada (kV)

$k$ - Derivación utilizada del devanado secundario del transformador elevador en pu. Por ejemplo, para la derivación -5%  $k=0,95$ ; para la derivación -2,5%  $k=0,975$ ; para la derivación nominal  $k=1$ ; para la derivación +2,5%  $k=1,025$ ; para la derivación -5%  $k=0,95$ .

La tensión de la subestación asociada debe estar dentro de los límites definidos por ANEEL. Considerando que la tensión en la subestación debe estar dentro de los límites de tensiones adecuadas o precarias, los valores serán los definidos en las siguientes tablas:

**Tabela 1 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV**

| Tensão de Atendimento (TA) | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|----------------------------|--|
| Adequada                   | $0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$   |
| Precária                   | $0,93TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$                             |

**Tabela 2 – Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV**

| Tensão de Atendimento (TA) | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|----------------------------|--|
| Adequada                   | $0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$   |
| Precária                   | $0,90TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$                             |

De las tablas se puede observar que, para cualquier tensión nominal de la subestación asociada, la tensión adecuada está entre el 95 y el 105% de la tensión y que, la tensión máxima, en régimen precario es del 107% de la tensión nominal. La tensión mínima de la subestación asociada, en régimen precario, es del 90% de la tensión nominal para sistemas con tensión nominal entre 69 y 230kV y del 93% para sistemas con tensión nominal igual o superior a 230kV. En base a estos valores, la tensión de generación, para permitir la sincronización de la primera unidad, debe ser la indicada en la siguiente tabla, calculada utilizando la fórmula anterior:

|   |      | k- Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu)   |        |        |        |        |
|---|------|---|--------|--------|--------|--------|
|   |      | -5%   | -2,5%  | 0      | +2,5%  | +5%    |
|   |      | 0,950   | 0,975  | 1,000  | 1,025  | 1,050  |
| Tensión de la Subestación Asociada (pu) |      | V <sub>G</sub> -Tensión de Generación (pu) (Valores referidos a la tensión nominal del primario del transformador elevador) |        |        |        |        |
|   |      | 0,9   | 0,9474 | 0,9231 | 0,9000 | 0,8780 |
|   | 0,93 | 0,9789  | 0,9538 | 0,9300 | 0,9073 | 0,8857 |
|   | 0,95 | 1,0000  | 0,9744 | 0,9500 | 0,9268 | 0,9048 |
|   | 1,05 | 1,1053  | 1,0769 | 1,0500 | 1,0244 | 1,0000 |
|   | 1,07 | 1,1263  | 1,0974 | 1,0700 | 1,0439 | 1,0190 |

Las tensiones indicadas en la tabla son las tensiones de la unidad generadora sin carga, es decir, después de la sincronización, para que la generación suministre energía al sistema, se debe aumentar la tensión de generación para compensa la caída de tensión en el transformador elevador. Sin embargo, la variación de tensión de generación debe estar

dentro de los límites de funcionamiento de las unidades generadoras y de las tensiones máximas soportadas por los componentes de la instalación.

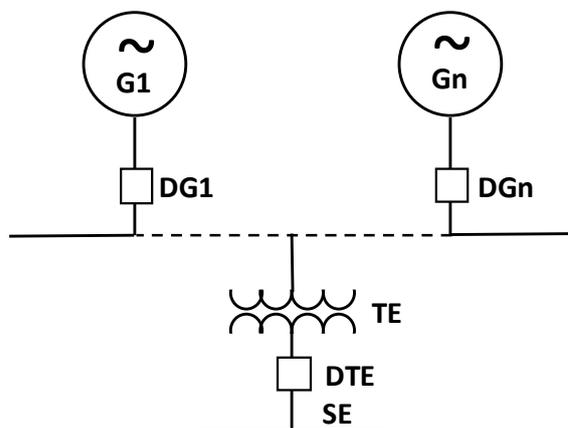
Si el rango de operación de generación es  $\pm 10\%$ , para las condiciones de los valores indicados en rojo (ver tabla abajo), no será posible obtener tensiones que permitan sincronizar la unidad.

|   |      | k- Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu)   |        |        |        |        |
|---|------|---|--------|--------|--------|--------|
|   |      | -5%   | -2,5%  | 0      | +2,5%  | +5%    |
|   |      | 0,950   | 0,975  | 1,000  | 1,025  | 1,050  |
|   |      | V <sub>G</sub> -Tensión de Generación (pu) (Valores referidos a la tensión nominal del primario del transformador elevador) |        |        |        |        |
| Tensión de la Subestación Asociada (pu) | 0,9  | 0,9474  | 0,9231 | 0,9000 | 0,8780 | 0,8571 |
|   | 0,93 | 0,9789  | 0,9538 | 0,9300 | 0,9073 | 0,8857 |
|   | 0,95 | 1,0000  | 0,9744 | 0,9500 | 0,9268 | 0,9048 |
|   | 1,05 | 1,1053  | 1,0769 | 1,0500 | 1,0244 | 1,0000 |
|   | 1,07 | 1,1263  | 1,0974 | 1,0700 | 1,0439 | 1,0190 |

Por ejemplo, si la tensión de la subestación asociada está al 93% de la tensión nominal, es decir, dentro del rango precario, pero con el transformador secundario en la derivación de +5%, la tensión de generación debe ser del 88,57% de la tensión nominal para permitir la sincronización de la primera unidad, es decir, la tensión de la generación estará por debajo del límite de operación de la unidad.

### 7.2 - Tensión de la Unidad Generadora

Considerando el ejemplo de la configuración de dos unidades generadoras iguales, conectadas a una subestación asociada a través de un transformador elevador, como se muestra a continuación:



Cuyas informaciones de la instalación son:

- Dos unidades generadoras (G1, G2) de 50MVA, 13,8kV ( $\pm 10\%$ ),
- Un transformador elevador de 60/80/100MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2), 13.8kV/138 ( $\pm 2 \times 2.5\%$ ) kV, impedancia del 10% referida a la potencia de 60MVA, utilizando la derivación del secundario correspondiente a +2.5%.
- Subestación asociada de tensión nominal de 138kV y con tensión de 141kV en el momento considerado.

Determine la tensión de generación, considerando que una unidad suministra la potencia de 50MVA, con factor de potencia 0.95 y que, la otra unidad suministra 40MVA con factor de potencia 0.95.

Con las informaciones disponibles, y suponiendo que la resistencia del transformador elevador es del 1% referida a la potencia de 60MVA, la planilla se puede llenar de la siguiente manera:

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |       |
|---|----------------|--|-------|
| Datos de Generación, Subestación y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8  |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138   |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60    |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10    |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1     |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 1,025 |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        |       |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generación Total              |       |
|   | $V_{G_n}$      | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8  |
|   | $V_{SE}$       | Tensión en la Subestación Asociada (kV)                | 141   |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 13,76 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| $V_G$                          | 99,68 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |       |

Teniendo en cuenta que, sin llenar los datos de carga, el valor de la tensión de generación se indica como siendo 13,76kV (99,68% de  $V_G$ ), que es el valor de la tensión de generación para sincronizar la primera unidad. Si el valor de Tensión de la subestación fuera del 105%, es decir, a 144.9kV, el valor de la tensión de generación sería de 14.4kV (102.44%  $V_G$ ), como se calcula en la tabla del ítem anterior.

La primera unidad se sincronizará, a través del disyuntor de alta tensión DTE, con la tensión de la primera unidad en 13,76kV. La segunda unidad se puede sincronizar, a través del disyuntor DG2 de 13,8 kV, con una tensión de 13,76 kV, si la primera unidad no está con carga, o con la tensión de la primera unidad, si la primera unidad está con carga.

Para que se suministre la potencia total definida, una unidad generadora debe suministrar 50MVA con un factor de potencia de 0,95 y la otra, 40MVA con un factor de potencia de 0,95. La potencia total suministrada se indica en la siguiente tabla:

|              | Carga            | MW    | MVAR  |
|--------------|------------------|-------|-------|
| <b>G1</b>    | 50MVA, FP 0,95   | 47,50 | 15,61 |
| <b>G2</b>    | 40MVA FP 0,98    | 39,20 | 7,96  |
| <b>Total</b> | 89,85MVA FP 0,97 | 86,70 | 23,57 |

Sincronizando la primera unidad con la tensión de generación de 13,76kV, para proporcionar una potencia de 50MVA con un factor de potencia de 0,95, la tensión de generación será de 14,26kV, como calculado en la planilla.

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |       |
|---|----------------|--|-------|
| Datos de Generación, Subestacion y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8  |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138   |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60    |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10    |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1     |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 1,025 |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        | 50    |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generacion Total              | 0,95  |
|   | $V_{Gn}$       | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8  |
|   | $V_{SE}$       | Tensión em la Subestación Asociada (kV)                | 141   |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 14,26 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| $V_G$                          | 103,36 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |        |

La segunda unidad generadora debe sincronizarse, a través del disyuntor DG2, con la tensión de 14,26kV, y la tensión final se calculará para la carga total de 89,85MVA, con factor de potencia 0,97.

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |       |
|---|----------------|--|-------|
| Datos de Generación, Subestacion y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8  |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138   |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60    |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10    |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1     |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 1,025 |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        | 89,85 |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generacion Total              | 0,97  |
|   | $V_{Gn}$       | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8  |
|   | $V_{SE}$       | Tensión em la Subestación Asociada (kV)                | 141   |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 14,59 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| $V_G$                          | 105,72 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |        |

En esta condición, la tensión de las dos unidades generadoras será de 14,59 kV, es decir, el 105,72% de la tensión nominal.

Estando la primera unidad sincronizada y con carga, la segunda unidad debe sincronizarse, a la barra de 13,8kV, con la tensión de 14,26kV y, con la carga de 40MVA y factor de potencia 0,98, la tensión de las dos unidades alcanzará el valor de 14,59kV.

### 7.3 - Condiciones Excepcionales

Dependiendo de las características de los componentes de la instalación y sus condiciones de funcionamiento, puede ocurrir que se superen algunos límites y, aun así, se puedan contornar. Estas simulaciones se pueden hacer con la ayuda de la planilla de cálculo.

Por ejemplo, suponiendo que la tensión de la subestación asociada está en el límite máximo de tensión precaria del 107%, con el transformador elevador en la derivación de -5%, la tensión en vacío de la primera unidad debe estar 12,63% por encima de la tensión nominal. Si consideramos este ejemplo, la tensión final de la generación será de 16,26kV, es decir, un 17,80% por encima de la tensión nominal de las unidades generadoras.

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |        |
|---|----------------|--|--------|
| Datos de Generación, Subestación y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8   |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138    |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60     |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10     |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1      |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 0,95   |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        | 89,85  |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generación Total              | 0,97   |
|   | $V_{G_n}$      | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8   |
|   | $V_{SE}$       | Tensión en la Subestación Asociada (kV)                | 147,66 |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 16,26 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| $V_G$                          | 117,80 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |        |

Además de que los generadores no están diseñados para funcionar a esta tensión, los componentes de la instalación (transformadores potenciales, relevadores auxiliares, instrumentos, etc.) tampoco soportan estos valores de sobretensión.

La solución a este problema específico puede ser utilizar otra derivación secundaria del transformador del elevador, como +2.5% o +5%.

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |        |
|---|----------------|--|--------|
| Datos de Generación, Subestación y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8   |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138    |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60     |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10     |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1      |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 1,025  |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        | 89,85  |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generación Total              | 0,97   |
|   | $V_{Gn}$       | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8   |
|   | $V_{SE}$       | Tensión en la Subestación Asociada (kV)                | 147,66 |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 15,19 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| $V_G$                          | 110,08 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |        |

Con la derivación +2.5% la tensión de generación será de 14,41kV (4,39% por encima de la tensión nominal), para la sincronización de la primera unidad y 15.19kV (10.08% por encima de la tensión nominal), con la carga total establecida.

| DATOS DEL SISTEMA   |                |  |        |
|---|----------------|--|--------|
| Datos de Generación, Subestación y Transformador Elevador | $V_{P_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Primaria del Transformador (kV)        | 13,8   |
|   | $V_{S_{TE_n}}$ | Tensión Nominal Secundaria del Transformador (kV)      | 138    |
|   | $P_{TE_n}$     | Potencia Nominal del Transformador (MVA)               | 60     |
|   | $Z_n$          | Impedancia Nominal del Transformador (%)               | 10     |
|   | $R_n$          | Resistencia Nominal del Transformador (%)              | 1      |
|   | $k$            | Tensión de la Derivación Utilizada del Secundario (pu) | 1,05   |
|   | $P_G$          | Potencia Total a Través del Transformador (MVA)        | 89,85  |
|   | $FP$           | Factor de Potencia de la Generación Total              | 0,97   |
|   | $V_{Gn}$       | Tensión Nominal de la Generación (kV)                  | 13,8   |
|   | $V_{SE}$       | Tensión en la Subestación Asociada (kV)                | 147,66 |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| $V_G$                            | 14,87 |
| <b>Tensión de Generación(kV)</b> |       |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| $V_G$                          | 107,78 |
| <b>(% de <math>V_G</math>)</b> |        |

Con la derivación +5%, la tensión de generación será de 14,06kV (1,90% por encima de la tensión nominal), para la sincronización de la primera unidad y, de 14,87kV (7,78% por encima de la tensión nominal), con la carga total establecida.

Con la ayuda de la planilla de cálculo se pueden analizar alternativas, dependiendo de las necesidades del usuario y de los recursos de las instalaciones.