

USINAS HIDRELÉTRICAS

Cálculo da Tensão da Geração

Nota de Revisão (R1):

Revisão de consistência técnica realizada pelo autor, sem alteração da metodologia ou dos resultados.

ÍNDICE	PÁG.
1 - OBJETIVO	3
2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
2.1 - Planilhas.....	3
3 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO	3
4 - CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES	3
4.1 - Unidades Geradoras	3
4.2 - Transformadores Elevadores	4
4.3 - Subestação de Alta Tensão Associada	4
5 - TENSÃO DA GERAÇÃO	5
5.1 - Circuito Básico	5
5.2 - Equação do Circuito do Secundário do Transformador Elevador	5
5.3 - Impedância do Transformador Elevador.....	6
5.4 - Impedância do Transformador Elevador para Qualquer Derivação k.....	7
5.5 - Cálculo da Tensão do Secundário do Transformador Elevador	8
6 - CÁLCULO DA TENSÃO DA GERAÇÃO	9
7 - APLICAÇÕES	10
7.1 - Sincronização das Unidades	10
7.2 - Tensão das Unidades Geradoras	12
7.3 - Condições Excepcionais	15
7.4 - Resistência dos Transformadores.....	17

1 - OBJETIVO

O objetivo deste informativo é calcular a tensão das unidades geradoras da Casa de Força em uma usina hidrelétrica, em função da configuração do sistema de geração, da tensão do barramento de alta tensão da subestação associada, das características das unidades geradoras, dos dados do transformador elevador e das condições de operação, com a finalidade de auxiliar na análise do comportamento das tensões nos serviços auxiliares da usina.

O resultado deste informativo, além da definição dos critérios para o cálculo da tensão da geração, será a produção de planilha em Excel, para calcular o valor da tensão da geração, com base nos dados necessários para sua determinação.

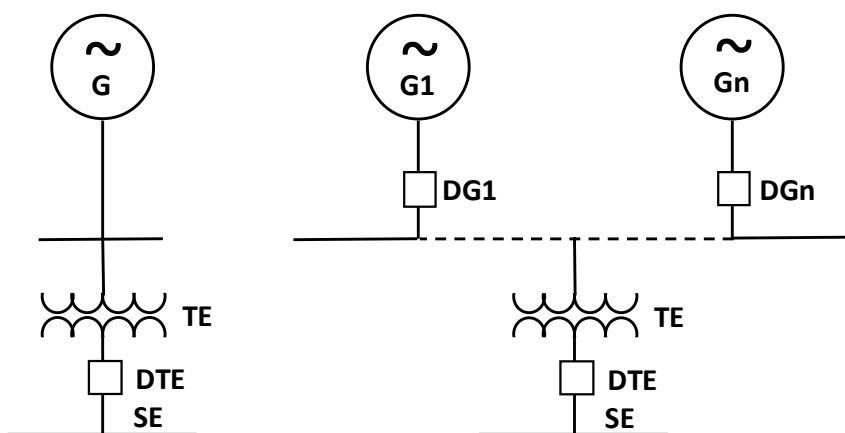
2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

2.1 - Planilhas

PL.EL.SA.CA.06 Usina Hidrelétrica - Cálculo da Tensão da Geração

3 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO

Para efeito deste informativo, será considerada a configuração de uma casa de força, com uma ou mais unidades geradoras, associadas a um transformador elevador.



No caso de uma única unidade geradora por transformador elevador, a sincronização da unidade com a subestação é feita através do disjuntor DTE. No caso de mais de uma unidade geradora por transformador elevador, a sincronização da primeira unidade com a subestação é feita através do disjuntor DTE e as demais unidades são sincronizadas, na barra da geração, através dos disjuntores das respectivas unidades DG1, ..., DGn.

4 - CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES

As características das instalações são definidas pelos usuários em função dos dados do projeto e fabricantes, normas aplicáveis, órgãos reguladores e práticas de operação. Os dados citados a seguir são referências normalmente utilizadas, que podem ser alteradas pelo usuário em função das suas informações.

4.1 - Unidades Geradoras

A potência nominal de cada unidade geradora é, normalmente, igual a potência do transformador elevador. No caso de agrupamento com várias unidades, a potência nominal de cada unidade é a fração correspondente da potência do transformador. Por exemplo, em um sistema com duas unidades geradoras por transformador elevador, cada unidade tem a potência nominal igual a 50% da potência do transformador elevador.

A variação normal da tensão de operação das unidades geradoras é de $\pm 10\%$.

4.2 - Transformadores Elevadores

Os transformadores elevadores ou banco de transformadores elevadores, para efeito deste informativo serão tratados, igualmente, como transformadores elevadores.

Em função da potência elevada, os transformadores elevadores possuem sistemas de resfriamento, normalmente são equipados com um ou dois estágios de ventilação forçada. A cada condição de ventilação corresponde uma potência, sendo que cada estágio de ventilação aumenta a potência base em 1/3. Assim, por exemplo, um transformador com potência nominal de 60MVA, com um estágio de ventilação tem sua potência aumentada para 80MVA e com dois estágios tem sua potência aumentada para 100MVA. Portanto, um transformador elevador com potência nominal de 60MVA e dois estágios de ventilação pode transmitir a energia gerada por 2 unidade geradoras de 50MVA ou 4 de 25MVA.

A tensão nominal do enrolamento primário (baixa tensão) deve ser igual a tensão nominal das unidades geradoras e, a tensão nominal do enrolamento secundário (alta tensão) igual a tensão nominal da subestação associada; O enrolamento secundário possui derivações, que normalmente são de $2 \times \pm 2,5\%$ da tensão nominal.

A impedância nominal dos transformadores elevadores é definida pelo usuário na fase de projeto, e os valores exatos da impedância e resistência são obtidos, nos ensaios, na fábrica dos transformadores. A impedância nominal dos transformadores, quando não especificada de outro modo, se refere sempre a potência nominal. Por exemplo, a impedância nominal de um transformador elevador de 60/80/100MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2) pode ser referida à potência nominal de 60, 80 ou 100MVA.

A impedância real do transformador elevador, obtida nos ensaios de fábrica, deve estar dentro dos limites de tolerância definidos nas normas. A resistência do transformador varia com a temperatura dos enrolamentos, ou seja, em função da carga e das condições da ventilação. Na falta das informações da resistência, sugere-se a adoção do valor nominal de 1%.

4.3 - Subestação de Alta Tensão Associada

As tensões consideradas nos barramentos de alta tensão da subestação associada devem estar de acordo com as definidas na tabela abaixo (ANEEL).

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 $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
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

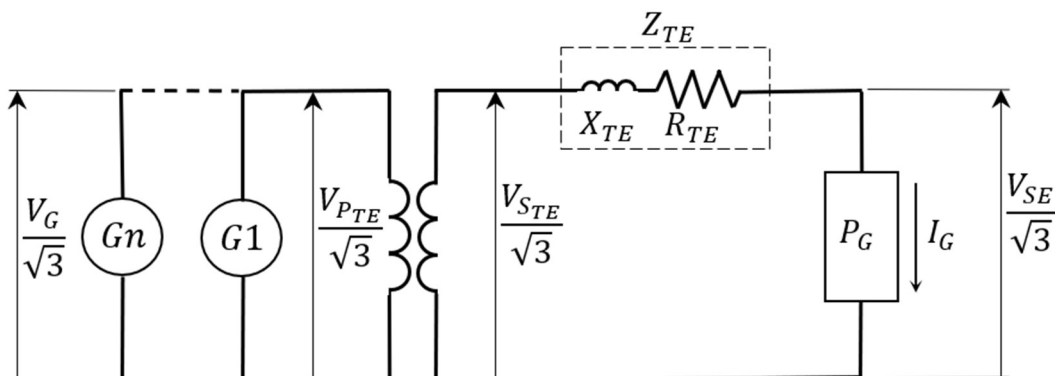
Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,95TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,95TR$ ou $1,05TR < TL \leq 1,07TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,07TR$

5 - TENSÃO DA GERAÇÃO

O cálculo da tensão da geração será feito considerando que toda a potência gerada pelas unidades é transmitida à subestação associada, através do transformador elevador.

5.1 - Circuito Básico

A figura a seguir representa o circuito do sistema que será analisado:



Onde:

G_1, G_n , Unidade(s) geradora(s) associada(s) ao transformador elevador;

V_G Tensão da(s) unidade(s) geradora(s) $G_1, \dots, G_n$,

V_{PTE} Tensão no primário do transformador elevador

V_{STE} Tensão no secundário do transformador elevador

Z_{TE} Impedância do transformador elevador

X_{TE} Reatância do transformador elevador

R_{TE} Resistência do transformador elevador

P_G Potência fornecida pela(s) unidade(s) geradora(s) através do transformador elevador

I_G Corrente da potência fornecida através do transformador elevador

V_{SE} Tensão do barramento da subestação associada

5.2 - Equação do Circuito do Secundário do Transformador Elevador

Para o circuito básico podemos escrever que:

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

Sendo que:

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

Onde:

V_{SE} - Tensão do barramento da subestação associada (kV)

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

Onde:

I_G - Corrente da potência fornecida através do transformador elevador (kA)

P_G - Potência total que passa através do transformador elevador (MVA)

V_{SE} - Tensão do barramento da subestação associada (kV)

FP - Fator de potência da energia total da geração

φ_{PG} - Ângulo do fator de potência da carga total alimentada pelo transformador elevador

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

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

Onde:

Z_{TEk} - Impedância do transformador elevador na derivação k do secundário (Ω)

k - Derivação utilizada do enrolamento secundário do transformador elevador em pu. Por exemplo, para a derivação -5% $k=0,95$; para a derivação -2,5% $k=0,975$; para a derivação nominal $k=1$; para a derivação +2,5% $k=1,025$; para a derivação 5% $k=1,05$.

θ_{TE} - Ângulo da impedância do transformador elevador

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

Onde:

R_n - Resistência nominal do transformador elevador (%)

Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%)

5.3 - Impedância do Transformador Elevador

Considerando que a potência do transformador é constante, para qualquer derivação utilizada do enrolamento secundário, temos que:

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

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

Onde:

Z_{TE_n} - Impedância nominal do transformador elevador (Ω)

V_{STE_n} - Tensão secundária nominal do transformador elevador (kV)

P_{TE_n} - Potência nominal do transformador elevador (MVA)

Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%)

5.4 - Impedância do Transformador Elevador para Qualquer Derivação k

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

Onde:

Z_{TE_k} - Impedância do transformador elevador na derivação k (Ω)

V_{STE_k} - Tensão secundária do transformador elevador na derivação k (kV)

P_{TE_n} - Potência nominal do transformador elevador (MVA)

Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%)

Substituindo P_{TE_n} :

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

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

Substituindo

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

e

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

Temos:

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

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

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

Com os dados da impedância e da resistência do transformador podemos considerar que:

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

Onde:

Z_{TE_k} - Impedância do transformador elevador na derivação k (Ω)

V_{STE_n} - Tensão secundária nominal do transformador elevador (kV)

P_{TE_n} - Potência nominal do transformador elevador (MVA)

k- Derivação utilizada do enrolamento secundário do transformador elevador em pu. Por exemplo, para a derivação -5% k=0,95; para a derivação -2,5% k=0,975; para a derivação nominal k=1; para a derivação +2,5% k=1,025; para a derivação 5% k=1,05.

Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%)

θ_{TE} - Ângulo da impedância do transformador elevador

Sendo que:

$$\theta_{TE} = \arccos \frac{R_{TE_k}}{Z_{TE_k}}$$

Nota: Os valores de R_{TE_k} e Z_{TE_k} devem estar na mesma unidade, ou seja, ambas em pu, % ou Ω .

5.5 - Cálculo da Tensão do Secundário do Transformador Elevador

Com os dados definidos nos itens anteriores, a equação do circuito do secundário transformador elevador pode ser escrita como segue:

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

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

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

Multiplicando os termos 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:

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

Na forma de complexos temos:

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

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

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

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

6 - CÁLCULO DA TENSÃO DA GERAÇÃO

A tensão no secundário do transformador elevador depende da tensão aplicada no primário e da derivação utilizada no secundário. Desta forma, se um transformador tem relação V_p - V_s , com derivações no secundário, a tensão V_{STE} no secundário do transformador será:

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

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

Do esquema do circuito básico podemos verificar que a tensão da geração é exatamente igual à tensão no primário do transformador elevador. Portanto:

$$V_G = V_{PTE} = \frac{V_{PTEn} V_{STE}}{kV_{STE_n}}$$

Substituindo V_{STE} temos:

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

Sendo:

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

Onde:

V_G - Tensão da(s) unidade(s) geradora(s) G_1, G_n , (kV)

V_{PTE_n} - Tensão nominal do primário do transformador (kV)

V_{STE_n} - Tensão nominal do secundário do transformador (kV)

V_{SE} - Tensão da subestação associada (kV)

P_G - Potência total que passa através do transformador elevador (MVA)

P_{TE_n} - Potência nominal do transformador elevador (MVA)

Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%) referida à potência nominal

$\mathcal{P}_{PG}$ - Ângulo do fator de potência da carga total alimentada pelo transformador elevador

θ_{TE} - Ângulo da impedância do transformador elevador

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

Onde:

R_n - Resistência nominal do transformador elevador (%)

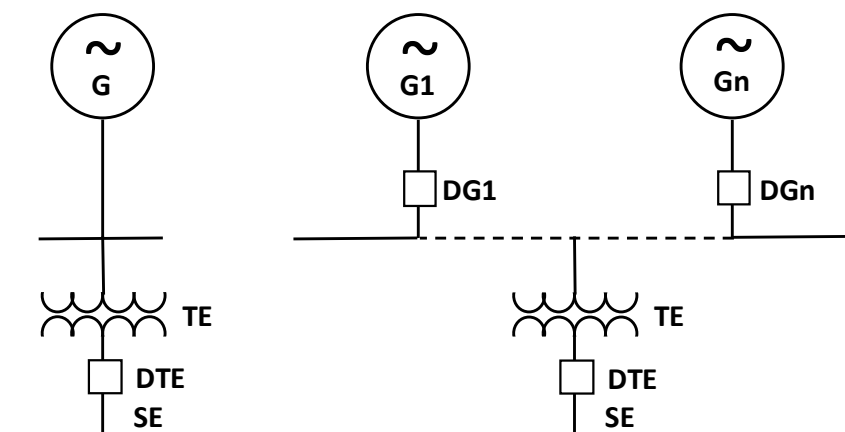
Z_n - Impedância nominal do transformador elevador (%)

k - Derivação utilizada do enrolamento secundário do transformador elevador em pu. Por exemplo, para a derivação -5% $k=0,95$; para a derivação -2,5% $k=0,975$; para a derivação nominal $k=1$; para a derivação +2,5% $k=1,025$; para a derivação 5% $k=1,05$.

7 - APLICAÇÕES

A finalidade deste documento, como definido no início, é auxiliar na análise do comportamento das tensões dos serviços auxiliares da instalação. Nesta análise também pode ser verificada a variação da tensão da geração, desde a fase de sincronização até o fornecimento da geração da potência máxima, considerando as variações de tensão da subestação associada.

7.1 - Sincronização das Unidades



Ainda que exista mais de uma unidade por transformador elevador, a sincronização da primeira unidade ocorre como se as outras não existissem, ou seja, a sincronização da primeira unidade sempre é feita através do disjuntor DTE.

A tensão da geração que permitirá a sincronização da unidade será definida em função da tensão da subestação associada, das tensões nominais do transformador elevador e da derivação utilizada do secundário. Este valor de tensão é calculado pela seguinte fórmula:

$$V_G = V_{PTE} = \frac{V_{PTE_n} V_{SE}}{k V_{STE_n}}$$

Onde:

V_G Tensão da(s) unidade(s) geradora(s) G_1, G_n , (kV)

V_{PTE} Tensão no primário do transformador elevador (kV)

V_{PTE_n} - Tensão nominal do primário do transformador (kV)

V_{STE_n} - Tensão nominal do secundário do transformador (kV)

V_{SE} - Tensão da subestação associada (kV)

k - Derivação utilizada do enrolamento secundário do transformador elevador em pu. Por exemplo, para a derivação -5% $k=0,95$; para a derivação -2,5% $k=0,975$; para a derivação nominal $k=1$; para a derivação +2,5% $k=1,025$; para a derivação 5% $k=1,05$.

A tensão da subestação associada deve estar dentro dos limites definidos pela ANEEL. Considerando que a tensão na subestação deve estar dentro dos limites das tensões Adequada ou Precária, os valores serão os definidos nas tabelas a seguir:

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 $1,05TR < TL \leq 1,07TR$

Das tabelas se pode verificar que, para qualquer tensão nominal da subestação associada, a tensão adequada está entre 95 e 105% da tensão e que, a tensão máxima em regime precário é 107% da tensão nominal. A tensão mínima da subestação associada, em regime precário, é 90% da tensão nominal para sistemas com tensão nominal entre 69 e 230kV e 93% para sistemas com tensão nominal iguais ou superiores a 230kV. Com base nesses valores, a tensão na geração, para permitir a sincronização da primeira unidade, deve ser a indicada na tabela a seguir, calculada utilizando a fórmula acima informada:

		k- Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)				
		-5%	-2,5%	0	+2,5%	+5%
		0,950	0,975	1,000	1,025	1,050
		V _G -Tensão da Geração (pu) (Valores referidos à tensão nominal do primário do transformador elevador)				
Tensão da Subestação Associada (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

As tensões indicadas na tabela acima são as tensões da unidade geradora sem carga, ou seja, após a sincronização, para que a geração forneça energia ao sistema, a tensão da geração deverá ser aumentada para compensar a queda de tensão no transformador elevador. Entretanto, a variação de tensão da geração deverá estar dentro dos limites de operação das unidades geradoras e das tensões máximas suportadas pelos componentes da instalação.

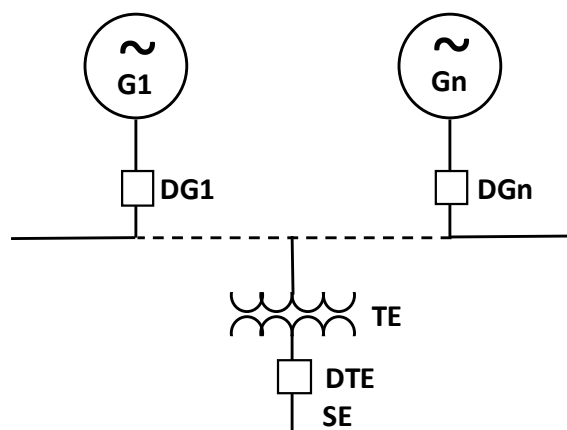
Se a faixa de operação da geração for de $\pm 10\%$, para as condições dos valores indicados em vermelho (ver tabela a seguir), não será possível obter tensões que permitam a sincronização da unidade.

		k- Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)				
		-5%	-2,5%	0	+2,5%	+5%
		0,950	0,975	1,000	1,025	1,050
		V _G -Tensão da Geração (pu) (Valores referidos à tensão nominal do primário do transformador elevador)				
Tensão da Subestação Associada (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 exemplo, se a tensão da subestação associada estiver com 93% da tensão nominal, ou seja, dentro da faixa precária, mas com o secundário do transformador na derivação de +5%, a tensão da geração deveria ser de 88,57% da tensão nominal para permitir a sincronização da primeira unidade, ou seja, a tensão da geração estará abaixo do limite de operação da unidade.

7.2 - Tensão das Unidades Geradoras

Considerando o exemplo da configuração de duas unidades geradoras iguais, conectadas a uma subestação associada através de um transformador elevador, conforme a figura a seguir:



Cujas informações da instalação são:

- Duas unidades geradoras (G1, G2) de 50MVA, 13,8kV ($\pm 10\%$),
- Um transformador elevador de 60/80/100MVA (ONAN/ONAF1/ONAF2), 13,8kV/138 ($\pm 2 \times 2,5\%$) kV, impedância de 10% referida a potência de 60MVA, utilizando a derivação do secundário correspondente a +2,5%.
- Subestação associada de tensão nominal de 138kV e com tensão de 141kV no instante considerado.

Determinar a tensão da geração, considerando que uma unidade forneça a potência de 50MVA, com fator de potência 0,95 e que a outra unidade forneça 40MVA com fator de potência 0,98.

Com as informações disponíveis, e supondo que a resistência do transformador elevador seja de 1% referida à potência de 60MVA, a planilha pode ser preenchida como segue:

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	$V_{P_{TE}}$	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	$V_{S_{TE}}$	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TE}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	1,025
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	
	FP	Fator de Potência da Geração Total	
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	141

V_G	13,76
Tensão da Geração (kV)	

V_G	99,68
(% de V_G)	

Observar que, sem o preenchimento dos dados da carga, o valor da tensão da geração está indicado com sendo 13,76kV (99,68% de V_G), que é o valor da tensão da geração para sincronizar a primeira unidade. Se o valor da tensão da subestação estivesse em 105%, ou seja, com 144,9kV, o valor da tensão da geração seria 14,4kV (102,44% de V_G), conforme calculado na tabela do item anterior.

A primeira unidade será sincronizada, através do disjuntor de alta tensão DTE, com a tensão da primeira unidade em 13,76kV. A segunda unidade pode ser sincronizada, através do disjuntor DG2, de 13,8kV, com a tensão de 13,76kV, se a primeira unidade estiver sem carga, ou na tensão da primeira unidade, se a primeira unidade estiver com carga.

Para que a potência total definida seja fornecida, uma unidade geradora deverá estar com 50MVA e fator de potência 0,95 e a outra com 40MVA e fator de potência 0,98. A potência total fornecida será a indicada na tabela a seguir:

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

Sincronizando a primeira unidade com a tensão de geração de 13,76kV, para fornecer a potência de 50MVA e fator de potência 0,95, a tensão de geração será 14,26kV, conforme calculado na planilha.

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	$V_{P_{TEn}}$	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	$V_{S_{TEn}}$	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TEn}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	1,025
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	50
	FP	Fator de Potência da Geração Total	0,95
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	141

V_G	14,26
Tensão da Geração (kV)	

V_G	103,36
(% de V_G)	

A segunda unidade geradora deverá ser sincronizada, através do disjuntor DG2, com a tensão de 14,26kV e a tensão final será calculada para a carga total de 89,85MVA, com fator de potência 0,97.

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	$V_{P_{TEn}}$	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	$V_{S_{TEn}}$	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TEn}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	1,025
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	89,85
	FP	Fator de Potência da Geração Total	0,97
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	141

V_G	14,59
Tensão da Geração (kV)	

V_G	105,72
(% de V_G)	

Nesta condição, a tensão das duas unidades geradoras será 14,59kV, ou seja, 105,72% da tensão nominal.

Estando a primeira unidade sincronizada e com carga, a segunda unidade deverá ser sincronizada, na barra de 13,8kV com a tensão de 14,26kV e, com a carga de 40MVA e fator de potência 0,98, a tensão das duas unidades atingirá o valor de 14,59kV.

7.3 - Condições Excepcionais

Em função das características dos componentes da instalação e suas condições de operação, pode ocorrer que alguns limites sejam ultrapassados e, ainda assim, possam ser contornados. Essas simulações podem ser feitas com ajuda da planilha.

Por exemplo, supondo que a tensão da subestação associada esteja no limite da tensão precária máxima de 107%, estando o transformador elevador na derivação de -5%, a tensão em vazio da primeira unidade deverá estar 12,63% acima da tensão nominal. Se considerarmos este exemplo, a tensão final da geração será 16,26kV, ou seja, 17,80% acima da tensão nominal das unidades geradoras.

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	V_{PTEn}	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	V_{STEn}	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TEn}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	0,95
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	89,85
	FP	Fator de Potência da Geração Total	0,97
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	147,66

V_G	16,26
Tensão da Geração (kV)	

V_G	117,80
(% de V_G)	

Além dos geradores não estarem projetados para operar com esta tensão, os componentes da instalação (transformadores de potencial, relés auxiliares, instrumentos etc.) também não suportam estes valores de sobretensão.

A solução para este problema específico pode ser utilizar outra derivação do secundário do transformador elevador como, por exemplo, +2,5% ou +5%.

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	$V_{P_{TEn}}$	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	$V_{S_{TEn}}$	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TEn}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	1,025
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	89,85
	FP	Fator de Potência da Geração Total	0,97
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	147,66

V_G	15,19
Tensão da Geração (kV)	

V_G	110,08
(% de V_G)	

Com a derivação +2,5%, a tensão da geração será 14,56kV (5,49% acima da tensão nominal), para a sincronização da primeira unidade, e 15,19kV (10,08% acima da tensão nominal), com a carga total definida.

DADOS DO SISTEMA			
Dados da Geração, Subestação e Transformador Elevador	$V_{P_{TEn}}$	Tensão Nominal do Primário do Transformador (kV)	13,8
	$V_{S_{TEn}}$	Tensão Nominal do Secundário do Transformador (kV)	138
	P_{TEn}	Potência Nominal do Transformador (MVA)	60
	Z_n	Impedância Nominal do Transformador (%)	10
	R_n	Resistência Nominal do Transformador (%)	1
	k	Tensão da Derivação Utilizada do Secundário (pu)	1,05
	P_G	Potência Total Através do Transformador (MVA)	89,85
	FP	Fator de Potência da Geração Total	0,97
	V_{Gn}	Tensão Nominal de Geração (kV)	13,8
	V_{SE}	Tensão na Subestação Associada (kV)	147,66

V_G	14,87
Tensão da Geração (kV)	

V_G	107,78
(% de V_G)	

Com a derivação +5%, a tensão da geração será 14,56kV (5,49% acima da tensão nominal) para a sincronização da primeira unidade e, 14,87kV (7,78% acima da tensão nominal), com a carga total definida.

Com auxílio da planilha, podem ser analisadas alternativas em função das necessidades do usuário e recursos das instalações.

7.4 - Resistência dos Transformadores

Na falta de dados da resistência dos transformadores é utilizado o valor de 1% como padrão. Entretanto, quando os valores das resistências dos transformadores não estiverem disponíveis, também podem ser obtidos, utilizando a relação X/R da figura abaixo, que para o transformador elevador de 100MVA é de aproximadamente 0,27%, considerando a X/R igual a 38.

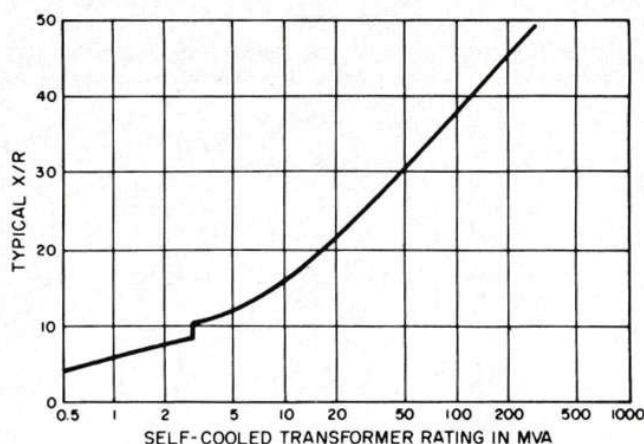


Fig N1.1

X/R Ratio of Transformers (Based on ANSI/IEEE C37.010-1979)

Essas considerações, como muitas outras, podem ser feitas pelo profissional para contornar alguma situações específicas, mas não é necessário adotá-las como regra geral.