

USINAS HIDRELÉTRICAS
Tensões Nominais e Variações de Tensão

ÍNDICE	PÁG.
1 - OBJETIVO	3
2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
2.1 - Normas	3
2.2 - Informativos e Planilhas	3
3 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	3
4 - TENSÕES NOMINAIS	4
4.1 - Tensões Nominais do Sistema de Baixa Tensão	4
4.2 - Tensões Nominais de Cargas em Geral	4
4.3 - Tensões Nominais dos Motores	4
4.4 - Transformadores e dispositivos de Controle	5
5 - SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA DA USINA.....	5
5.1.1 - Subestação de Alta Tensão	6
5.1.2 - Unidades Geradores G1, G2 e G3	6
5.1.3 - Transformadores Elevadores TE1, TE2 e TE3	6
5.1.4 - Transformadores de Serviços Auxiliares TSA1, TSA2 e TSA3	6
5.1.5 - Fonte Externa de 13,8kV	7
5.1.6 - Grupo Diesel Gerador de Emergência GD	7
6 - TENSÃO NAS UNIDADES GERADORAS	7
7 - TENSÕES NO SISTEMA DE BAIXA TENSÃO	8
7.1 - Unidades Geradoras como Fonte de Alimentação.....	8
7.2 - Subestação como Fonte de Alimentação.....	9
7.3 - Fonte Externa como Fonte de Alimentação.....	10
7.4 - Resumo das Tensões Analisadas.....	11
8 - TENSÕES NAS CARGAS	11
8.1 - Limites de Quedas e Tensão	11
8.2 - Medidas Atenuadoras das Subtensões.....	13
8.2.1 - Motores	13
8.2.2 - Transformadores e dispositivos de Controle	14
9 - CONCLUSÕES	14

1 - OBJETIVO

O Objetivo deste documento é definir as principais tensões nominais dos sistemas de corrente alternada de baixa tensão, motores, cargas em geral e dispositivos de comando controle para usinas hidrelétricas e, com base nessas definições e suas variações, analisar as diversas condições de operação e suas consequências no funcionamento do conjunto.

2 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

2.1 - Normas

As normas que são mencionadas ou utilizadas para o desenvolvimento do trabalho são as abaixo relacionadas. Existem outras normas, como a British Standard, que definem outros valores que podem ser analisados com os mesmos critérios que são adotados neste documento.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IEC - International Electrotechnical Commission

ANSI – American National Standards Institute

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

NEC – National Electrical Code

2.2 - Informativos e Planilhas

IT.EL.SA.CA.03 Cálculo da Tensão da Geração

IT.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais

PL.EL.SA.CA.06 Cálculo da Tensão da Geração

PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais

3 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma usina hidrelétrica é formada por uma grande quantidade de equipamentos e sistemas que têm suas características e utilização específicas, mas também são compostos por equipamentos das linhas normais de fabricação e comercialização que existem em outros tipos de instalações. Entre estes equipamentos se podem citar bombas, compressores, transformadores, equipamentos de movimentação de cargas, sistemas de incêndio, climatização etc. Portanto, os conceitos aplicados a estas instalações podem ser aplicados a outras, com as devidas adequações.

As tensões na subestação de alta tensão da usina, interligadas ao SIN (Sistema Interligado Nacional), devem atender os requisitos definidos pela ANEEL. As variações de tensão nos sistemas de média e baixa tensão, que não forneçam energia a outros consumidores, devem atender às necessidades dos consumidores internos. Por exemplo, a tensão nos sistemas de média tensão não precisam atender, obrigatoriamente, as faixas de tensão da ANEEL e, as quedas de tensão nos ramais alimentadores, não necessitam respeitar as definições das normas, desde que não seja comprometido o funcionamento e integridade das cargas.

Ao se analisar o comportamento de um sistema não se devem considerar simultaneamente as piores condições de operação e as situações mais desfavoráveis de todos os equipamentos, pois se corre o risco de concluir pela inviabilidade de qualquer empreendimento. Entretanto, devem ser previstos meios de solucionar ou mitigar eventuais problemas.

No desenvolvimento deste trabalho é utilizado um exemplo fictício, de uma usina hidrelétrica, no qual se simulam os passos reais que devem ser seguidos para a definição do sistema e condições de operação com as alternativas que podem ser adotadas pelo profissional responsável pelo estudo.

A ferramenta do informativo TE.EL.SA.CA.03, Cálculo da Tensão da Geração, é extremamente útil para avaliação das soluções principalmente porque, quando se inicia um projeto novo ou de uma reforma, é difícil obter as informações das tensões de operação de uma usina que ainda não tem todas suas características definidas.

4 - TENSÕES NOMINAIS

A escolha das tensões nominais dos sistemas e componentes também depende das normas e regulamentos locais, eventuais padrões do Cliente, tipos de componentes instalados e dos fabricantes dos equipamentos existentes no mercado.

Como o enfoque do documento está mais voltado para sistemas de baixa tensão de hidrelétricas, os níveis de tensão destas instalações serão os abordados. Os conceitos e avaliações feitas também são válidos para outras áreas, principalmente as industriais.

Não existe no Brasil, como existe em outros países da Europa e nos Estados Unidos, uma padronização de tensões nominais de sistemas e equipamentos. Portanto, as tensões nominais dos sistemas e componentes devem ser selecionadas com base em normas internacionais consagradas.

4.1 - Tensões Nominais do Sistema de Baixa Tensão

A tensão nominal dos sistemas de baixa tensão, deve ser 400V ou 480V. Neste documento consideraremos que a tensão nominal do sistema é 480V.

Sistemas antigos com tensões nominais de 380V e 440V devem, assim que possível, ser alterados para 400V e 480V sem nenhum problema, pois os motores e componentes podem conviver com estes novos valores, bastando fazer uma análise do comportamento do conjunto e realizar eventuais ajustes de alguns componentes.

Cabe ressaltar que a frequência do sistema no Brasil é 60Hz, como nos Estados Unidos, enquanto na Europa é 50Hz. A alteração da frequência no Brasil, de 50 para 60Hz, foi feita nas décadas de 1960 e 1970.

4.2 - Tensões Nominais de Cargas em Geral

As cargas, exceto quando constituídas apenas por motores, são cargas variadas compostas, simultaneamente, por transformadores, sistemas de aquecimento, ventilação, ar-condicionado, movimentação de cargas, inclusive motores.

A tensão nominal dessas cargas deve ser 400V ou 480V, em função da tensão nominal dos sistemas. Neste documento consideraremos que a tensão nominal as cargas em geral é 480V.

4.3 - Tensões Nominais dos Motores

A tensão nominal dos motores deve ser 380V para sistemas de 400V e 460V para sistemas de 480V. Neste documento consideraremos que a tensão nominal dos motores é 460V.

Em sistemas antigos e novos os motores com tensão nominal de 440V podem continuar operando com nos sistemas de 480V, devendo, quando conveniente, ser substituídos por motores de 460V. Os motores de 380V, de instalações antigas ou novas não necessitam ser substituídos porque já estão com a tensão nominal adequada.

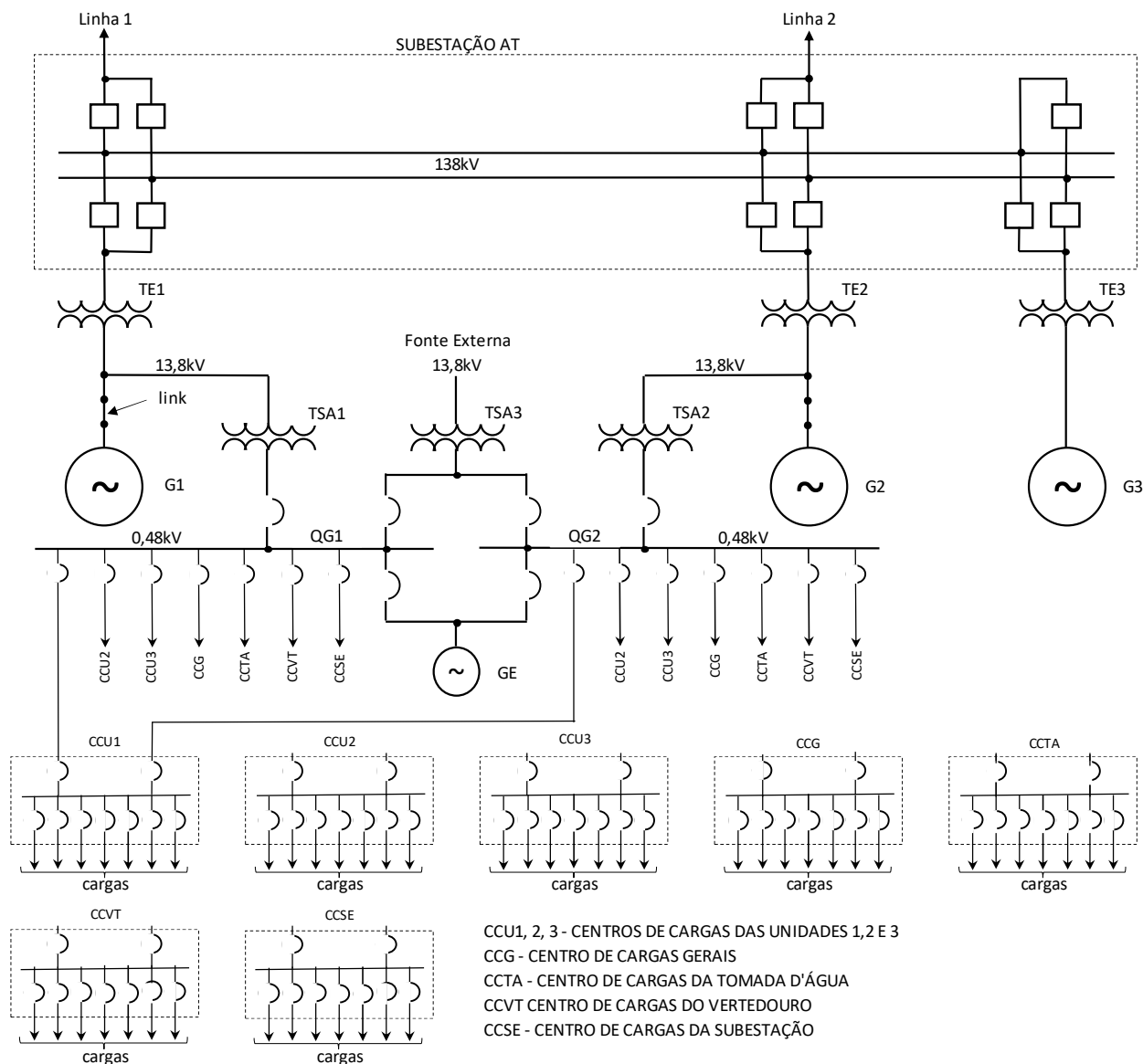
4.4 - Transformadores e dispositivos de Controle

Para sistemas de 400V os transformadores de controle deverão ter a relação 400-115V e os dispositivos de comando e controle deverão ter tensão nominal de 115V.

Para sistemas de 480V os transformadores de controle deverão ter a relação de 480-120V e os dispositivos de comando e controle poderão ter tensão nominal de 120V ou 115V, dependendo das considerações analisadas e seus resultados.

5 - SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA DA USINA

A configuração básica do sistema elétrico de uma usina hidrelétrica pode ser representada pelo diagrama unifilar da figura a seguir.



As unidades geradoras (G1, G2 e G3) produzem a energia que é transmitida ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através dos transformadores elevadores (TE1, TE2 e TE3) e da subestação elevadora de alta tensão (SUBESTAÇÃO AT).

As unidades geradoras também fornecem a energia que alimenta as instalações elétricas de baixa tensão da usina. No caso, duas unidades se encarregam dessa alimentação (G1 e G2) através dos transformadores de serviços auxiliares (TSA1 e TSA2).

A subestação de alta tensão pode alimentar as instalações de baixa tensão, através dos transformadores elevadores TE1 e TE2 e transformadores de serviços auxiliares (TSA1 e

TSA2), removendo o(s) link(s) do(s) gerador(es) da unidade(s). Este recurso é utilizado quando uma ou mais unidades permanecem em manutenção por muito tempo.

Uma fonte externa pode alimentar as instalações de baixa tensão, através do transformador de serviços auxiliares (TSA3).

Para facilitar o entendimento das considerações que serão feitas no documento, se considerará que os dados dos equipamentos serão os indicados a seguir:

5.1.1 - Subestação de Alta Tensão

No Brasil, a faixa de tensões de operação de uma subestação de 138kV são definidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e, de acordo com a tabela 2, pode ser adequada, precária ou crítica.

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 $TL > 1,07TR$

IEC 61000-3 recomenda a definição da tensão de referência como a tensão nominal do sistema.

Se considerará que a tensão da subestação de alta tensão (138kV) esteja na faixa adequada, de 95% a 105% da tensão nominal, ou seja, na faixa de 131,1kV a 144,9kV. Caso a tensão esteja na faixa precária ou crítica, e essa situação estiver comprometendo alguma instalação, o profissional poderá utilizar outra derivação do primário do transformador elevador para efetuar os ajustes necessários.

5.1.2 - Unidades Geradores G1, G2 e G3

Tensão Nominal: 13,8kV

Potência Nominal: 100MVA

Potência Fornecida e fator de Potência: 100MVA com FP 0,95

5.1.3 - Transformadores Elevadores TE1, TE2 e TE3

Potência Nominal: 100MVA

Relação de Tensão: 13,8/138($\pm 2 \times 2,5\%$) kV

Impedância: 10%

Resistência: A resistência será considerada com sendo 1%.

A derivação utilizada do enrolamento de 138kV é definida pela operação da usina e depende das condições do sistema. Entretanto, caso essa informação não esteja disponível, o profissional pode fazer as simulações para analisar as diversas possibilidades, visando a definição do sistema de baixa tensão dos serviços auxiliares da usina.

5.1.4 - Transformadores de Serviços Auxiliares TSA1, TSA2 e TSA3

Potência Nominal: 1000kVA

Relação de Tensão: 13,8($\pm 2 \times 2,5\%$) /0,48kV

Impedância: 6%

Resistência: A resistência será considerada com sendo 1%.

Carga Constante Normal e Fator de Potência: 460V, 300kVA e FP=0,85

Carga Constante Máxima e Fator de Potência: 460V, 600kVA e FP=0,85

Carga Variável Normal e Fator de Potência: 480V, 75kVA e FP=0,90

Carga Variável Máxima e Fator de Potência: 480V, 150kVA e FP=0,90

Obs.: O sistema de corrente alternada é redundante, isto é, um transformador de serviços auxiliares normalmente alimenta metade da carga, mas tem capacidade de alimentar toda a carga. A carga normal é a que corresponde aos dois transformadores de serviços auxiliares em operação e a máxima quando opera apenas um.

Entenda-se como carga constante a constituída basicamente por motores e as variáveis as demais.

5.1.5 - Fonte Externa de 13,8kV

A fonte externa de 13,8kV pode ser oriunda de transformador instalado na subestação de alta tensão ou de uma concessionária. Para efeitos deste documento, se considerará que a fonte externa é proveniente de uma concessionária. Portanto, deve estar de acordo com a faixa tensão do sistema de 13,8kV definida pela ANEEL.

Neste estudo será considerado que a tensão da fonte externa estará dentro da faixa adequada de tensão, ou seja, entre 93% e 105% da tensão nominal.

Tabela 3 – Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

A tensão na fonte externa variará na faixa de 12,834kV e 14,49kV.

5.1.6 - Grupo Diesel Gerador de Emergência GD

O grupo diesel gerador de emergência, apesar de ser também uma das fontes de alimentação do sistema de baixa tensão da usina, não será incluído no escopo deste documento, pois se trata de uma fonte com tensão regulada, que deve ser objeto da escolha e avaliação específica. A sua tensão nominal deve ser de 480V.

6 - TENSÃO NAS UNIDADES GERADORAS

Utilizando a planilha PL.EL.SA.CA.06, Cálculo da Tensão da Geração, relacionada nos documentos de referência, se podem fazer as simulações da tensão das tensões nas unidades geradoras considerando as seguintes condições:

- Tensão da subestação de alta tensão (138kV) nos valores máximo e mínimo da tensão nominal, ou seja, na faixa de 131,1kV a 144,9kV;
- Unidades geradoras operando com potência e fator de potência nominais;
- Derivação utilizada do enrolamento de 138kV no valor nominal, ou seja, 1,00;
- Derivação utilizada do enrolamento de 138kV no valor 1,025;

Para as condições acima podemos escrever a seguinte tabela:

Tensão nas Unidades Geradoras				
Tensão Mínima/Máxima na Subestação AT (kV)	131,1		144,9	
Potência Fornecida por G1/G2 -FP	100MVA - FP 0,95		100MVA - FP 0,95	
Derivação TE1/TE2	1,00	1,025	1,00	1,025
Tensão em G1/G2 (kV)	13,76	13,46	15,07	14,73

Para a derivação 1,00, a faixa de variação de tensão nos terminais das unidades geradoras estará entre 13,76kV e 15,07kV. Para a derivação 1,025, a faixa de variação de tensão nos terminais das unidades geradoras estará entre 13,46kV e 14,73kV. Ambas estão dentro dos limites de operação das unidades geradoras. O profissional poderá fazer outras simulações, com as tensões que julgar mais convenientes e com outras derivações dos transformadores elevadores, e escolher a mais adequada às suas necessidades. Neste documento adotaremos a derivação 1,00.

A faixa de variação de tensão no sistema de 13,8kV, para a derivação escolhida, estará entre 99,71 e 109,20%, diferente das faixas de tensão definidas na Tabela 3 da ANEEL. Entretanto, como não é um ponto de conexão, não precisa atender essas restrições.

7 - TENSÕES NO SISTEMA DE BAIXA TENSÃO

A tensão nos terminais secundários dos transformadores de serviços auxiliares, depende das fontes de alimentação e condições de operação das instalações. A alimentação do sistema de baixa tensão pode ser feita pelas unidades geradoras G1 e G2, pela subestação de alta tensão, através dos transformadores TE1 e/ou TE2, ou pela fonte externa.

Como se poderá observar, através da seleção das derivações dos enrolamentos dos transformadores, elevadores e de serviços auxiliares, se pode ajustar a tensão nos sistemas de baixa tensão. O objetivo da escolha é evitar que a tensão máxima dos equipamentos seja ultrapassada. A tensão máxima do sistema deve ser limitada a 110% da tensão nominal, ou seja. 528V (480+10%).

Para os motores se deve considerar que, com as práticas adotadas para mitigar eventuais problemas, os motores podem ser submetidos a tensões mais elevadas ou mais baixas que as normalmente definidas nas normas. Essas práticas consistem em especificar motores projetados para classe de isolamento B, mas fabricados com materiais classe F e definir fator de serviço maior que 1,00.

Eventuais problemas de sobretensão e subtensão que podem surgir nos motores estão relacionados na tabela a seguir, obtida do livro Motors Application and Maintenance Handbook de Robert W. Smeaton:

General Effect of Voltage Variation on Induction-motor Characteristics				
Characteristics		Voltage variation		
		120% voltage	110% voltage	90% voltage
Starting and max running torque		Increase 44%	Increase 21%	Decrease 19%
Synchronous Speed		No change	No change	No change
% slip		Decrease 30%	Decrease 17%	Increase 23%
Full-load speed		Increase 1,5%	Increase 1%	Decrease 114%
Efficiency	Ful load	Small Decrease	Increase 0,5-1% point	Decrease 2 points
	3/4 load	Decrease 0,5-2 points	Practically no change	Practically no change
	1/2 load	Decrease 7-20 points	Decrease 1-2 points	Increase 1-2 points
Power factor	Ful load	Decrease 5-15 points	Decrease 3 points	Increase 1 point
	3/4 load	Decrease 10-30 points	Decrease 4 points	Increase 2-3 points
	1/2 load	Decrease 15-40 points	Decrease 5-6 points	Increase 4-5 points
Full-load current		Decrease 11%	Decrease 7%	Increase 11%
Starting current		Increase 25%	Increase 10-12%	Decrease 10-12%
Temperature rise full load		Decrease 5-6°C	Decrease 3-4°C	Increase 6-7 °C
Max overload capacity		Increase 44%	Increase 21%	Decrease 19%
Magnetic noise - no load in particular		Noticeable Increase	Increase slightly	Decrease slightly

Pode-se afirmar que as subtensões e sobretensões podem ser admitidas para a maioria dos casos, inclusive para motores com tensão nominal de 440V, que muitas vezes são mantidos nas reformas de usinas.

7.1 - Unidades Geradoras como Fonte de Alimentação

Considerando que a tensão da subestação de alta tensão (138kV) esteja na faixa de 131,1kV a 144,9kV, que as unidades geradoras operem com potência e fator de potência

nominais, os transformadores elevadores estejam na derivação 1,00, que os transformadores de serviços auxiliares TSA1 e TSA2 estejam na derivação 1,00, utilizando as planilhas relacionadas nos documentos de referência, para as condições de carga estimadas, temos:

Tensão no Secundário dos TSA 1 e TSA2 - Fonte de Alimentação Unidades Geradoras						
Tensão Mínima/Máxima na Subestação AT (kV)	131,1			144,9		
Potência Fornecida por G1/G2 -FP	100MVA - FP 0,95					
Derivação TE1/TE2	1					
Tensão em G1/G2 (kV)	13,76			15,07		
Derivação TSA1/TSA2	1					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA1/TSA2 (V)	478,61	471,49	464,08	524,17	517,47	510,53

A tensão mínima no secundário dos transformadores TSA1 e TSA2 estará entre 464,08V e a máxima 524,17V, que correspondem, respectivamente, a 100,89% e 113,95% da tensão nominal dos motores e, entre 96,68% e 109,92% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

A condição normal de operação da usina ocorre quando as instalações de baixa tensão são alimentadas pelas unidades geradoras, através dos dois transformadores de serviços auxiliares. A tensão normal das instalações de baixa tensão dependerá do valor da tensão na subestação de alta tensão, e estará entre 471,49 e 517,47V, que corresponde, respectivamente, a 102,50% e 111,41% da tensão nominal dos motores e, entre 98,23% e 107,81% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

7.2 - Subestação como Fonte de Alimentação

Quando a fonte de alimentação do sistema de baixa tensão for a subestação de AT, considerando que a tensão da subestação de alta tensão (138kV) esteja na faixa de 131,1kV a 144,9kV, que os transformadores elevadores estejam na derivação 1,00, que os transformadores de serviços auxiliares TSA1 e TSA2 estejam na derivação 1,00, 0,975 ou 0,95.

Para estes cálculos, utilizar a planilha PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais, relacionada nos documentos de referência, considerando que para os transformadores elevadores, a tensão nominal primária é a do lado de alta tensão (138kV). Para as condições de carga estimadas, temos:

Tensão no Secundário dos TSA 1 e TSA2 - Fonte de Alimentação Subestação de AT						
Tensão Mínima/Máxima na Subestação AT (kV)	131,1			144,9		
Derivação TE1/TE2	1					
Carga Constante no TE1/TE2 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no lado de 13,8kV do TE1/TE2 (kV)	13,11	12,68	12,24	14,40	13,93	13,45
Derivação TSA1/TSA2	1					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA1/TSA2 (V)	456,00	433,44	410,00	500,87	477,34	453,07
Derivação TSA1/TSA2	0,975					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA1/TSA2 (V)	467,69	445,32	421,88	513,71	490,35	466,06
Derivação TSA1/TSA2	0,95					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA1/TSA2 (V)	480,00	457,65	434,60	527,23	503,74	479,67

A derivação que mais se aproxima das tensões da alimentação feita pelas unidades geradoras é a de 0,95. A tensão mínima será 434,60V e a máxima 527,23V, que correspondem, respectivamente, a 94,48% e 114,62% da tensão nominal dos motores e, 90,54% e 109,84% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

Esta condição de operação pode ser prevista para o caso de uma das unidades geradoras, G1 ou G2, permanecer em manutenção por longo período, e a fonte externa não existir ou estiver indisponível. Nestes casos, o transformador de serviços auxiliares correspondente operará com o outro, da outra unidade, com 50% da carga. A tensão das instalações de baixa tensão dependerá do valor da tensão na subestação de alta tensão, e estará entre 457,65 e 503,74V, que corresponde, respectivamente, a 99,49% e 109,40% da tensão nominal dos motores e, entre 95,34% e 104,95% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

7.3 - Fonte Externa como Fonte de Alimentação

Quando a fonte de alimentação do sistema de baixa tensão for a Fonte Externa, considerando que a tensão da fonte esteja na faixa adequada de 93 a 105% da tensão nominal, ou seja, entre 12,834kV a 14,49kV, conforme definido pela ANEEL, e que o transformador de serviços auxiliares TSA3 esteja na derivação 1,00, 0,975 ou 0,95, utilizando a planilha PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais, relacionada nos documentos de referência, para as condições de carga estimadas, temos:

Tensão no Secundário do TSA3 - Alimentação Fonte Externa						
Tensão Mínima/Máxima na Fonte (kV)	12,834			14,49		
Derivação TSA3	1			1		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA3 (V)	446,40	438,92	431,08	504,00	497,12	489,99
Derivação TSA3	0,975			0,975		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA3 (V)	482,59	450,88	443,60	516,92	510,50	503,85
Derivação TSA3	0,95			0,95		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variável 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensão no Secundário do TSA3 (V)	469,89	463,40	456,66	530,53	524,53	518,35

A derivação que mais se aproxima das tensões da alimentação feita pelas unidades geradoras é a de 0,95. A tensão mínima será 456,66V e a máxima 530,53V, que correspondem, respectivamente, a 99,27% e 115,33% da tensão nominal dos motores e, 95,14% e 110,53% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

Esta condição ocorre para o caso de uma ou as duas unidades geradoras, G1/G2, permanecerem em manutenção por longo período. Nestes casos o transformador de serviços auxiliares TSA3 correspondente operará com o outro, da outra unidade em operação, com 50% da carga. A tensão das instalações de baixa tensão dependerá do valor da tensão fonte externa, e estará entre 463,40 e 524,53V, que corresponde, respectivamente, a 100,74% e 114,03% da tensão nominal dos motores e, entre 96,54% e 109,28% da tensão nominal das cargas gerais e do sistema.

Esta condição também pode ocorrer em casos de as unidades pararem, por exemplo devido a um problema de instabilidade do sistema e o grupo diesel de emergência estiver indisponível.

7.4 - Resumo das Tensões Analisadas

As tensões máximas ocorrem, em geral, quando os transformadores estão sem carga. Portanto, com as seleções adotadas, a ocorrência de sobretensão nos sistemas de baixa tensão torna-se altamente improvável.

O resumo dos limites das tensões mínimas, normais e máximas para as condições selecionadas está indicado na tabela a seguir:

Fonte de Alimentação	Tensão Mínima (V)	Tensão Normal (V)	Tensão Máxima (V)
Unidades Geradoras	464,08	471,49-517,47	524,17
Subestação de AT	434,60	457,65-503,74	527,23
Fonte Externa	456,66	463,40-524,53	530,53

A avaliação das possibilidades de operação do sistema de baixa tensão, da usina considerada, permite uma gama de alternativas que podem ser exploradas pelo profissional responsável. No caso, a única restrição que foi feita foi a de evitar que ocorram sobretensões. Por outro lado, evitar sobretensões implica em admitir subtensões que devem ser analisadas e, quando necessário, ser mitigadas com intervenções pontuais para evitar maiores problemas.

Em condições normais de operação o sistema de baixa tensão é alimentado pelas unidades geradoras G1 e G2 e a tensão de operação oscilará entre 471,49 e 517,47V, dependendo da tensão na subestação de alta tensão e da derivação utilizada nos transformadores elevadores TE1 e TE2 e transformadores de serviços auxiliares TSA1 e TSA2. As demais possibilidades são contingências que podem ocorrer, mas são condições temporárias.

As tensões mínimas nos sistemas de baixa tensão podem ocorrer nos casos de tensões mínimas nas fontes de alimentação e, simultaneamente, cargas máximas nas instalações. Durante a operação das instalações, novas ou reformadas, ajustes podem ser feitos para melhorar as condições de operação dos sistemas.

Novos produtos que surgem no mercado e atualização das normas devem ser considerados no desenvolvimento dos projetos. A redução dos custos de equipamentos e a utilização de novas técnicas devem fazer parte da definição das instalações e, sempre que possível, ser aplicadas nas instalações.

8 - TENSÕES NAS CARGAS

A tensão nas cargas dependerá da tensão nas fontes de alimentação de baixa tensão, configuração do sistema e dos circuitos alimentadores envolvidos. No caso considerado, as cargas são alimentadas diretamente por quadros de instalações específicas, que por sua vez são alimentados por quadros gerais que, pela configuração do sistema de baixa tensão, ficam próximos dos transformadores de serviços auxiliares.

Como as configurações do sistema de baixa tensão podem variar em função das dimensões da Casa de Força, número e potência das unidades, além de outros fatores que não são aqui considerados, serão feitas considerações de caráter, geral que se aplicam para as condições de quaisquer configurações.

8.1 - Limites de Quedas e Tensão

As normas costumam definir limites de quedas de tensão nos circuitos, dependendo da sua finalidade e condições de operação das cargas. Entretanto, o importante é que, independentemente desses limites, partindo da tensão da fonte, a tensão na carga atenda às suas condições de operação. Como exemplo se pode citar a norma NBR 5410 onde se define que:

6.2.7.1 Em qualquer ponto de utilização da instalação, a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, dados em relação ao valor da tensão nominal da instalação:
6.2.7.1 a) 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador de propriedade da(s) unidade(s) consumidora(s);”

Para o caso de hidrelétricas, a queda de tensão máxima, desde os terminais secundários do transformador MT/BT até a carga, deveria ser de 7% da tensão nominal do sistema. Ocorre que, nas usinas hidrelétricas, os transformadores MT/BT são, na maior parte do tempo, alimentados diretamente pelos geradores da usina. Os geradores da usina também têm uma faixa limite de operação, geralmente $\pm 10\%$ e, apesar de operar em uma faixa menor, por exemplo, +8%, -5%, ainda se deve considerar a queda de tensão no próprio transformador MT/BT e componentes dos circuitos, como quadros e cabos. Portanto, esse limite de 7% pode ser involuntariamente respeitado, mas não deve ser um limitante rígido.

Para Centros de Cargas de instalações específicas, que estão próximos dos Centros de Cargas Gerais, não é necessário limitar a queda de tensão nos seus alimentadores porque, pelo próprio dimensionamento pela capacidade condução de corrente e comprimento do circuito, a queda de tensão costuma ser baixa.

Com frequência se encontram situações em que, para reduzir ligeiramente a queda de tensão em um alimentador, a seção nominal do cabo deve ser tão grande que às vezes nem é possível conectá-lo à carga. Como exemplo se podem citar casos de motores, que tem as caixas de ligações com dimensões limitadas. Nestes casos se deve tentar reduzir a queda de tensão em outros alimentadores.

Observar que quando a alimentação do sistema de baixa tensão é feita pela Subestação de AT, se calculou a tensão mínima de 434,60V para as piores condições de operação, ou seja, tensão mínima na subestação e carga máxima nos transformadores de serviços auxiliares. Esse cálculo também considerou que a resistência do transformador elevador é de 1%, quando na realidade esse valor pode ser muito inferior pois depende da potência e temperatura do transformador, que por sua vez depende da carga. Os valores das resistências dos transformadores, quando não estiverem disponíveis 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.

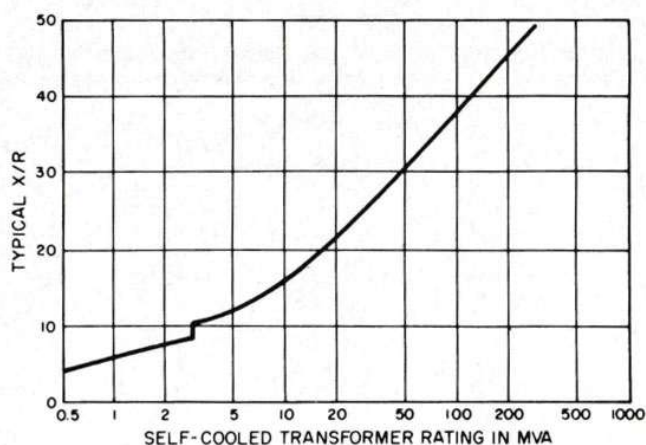


Fig N1.1
X/R Ratio of Transformers (Based on ANSI/IEEE C37.010-1979)

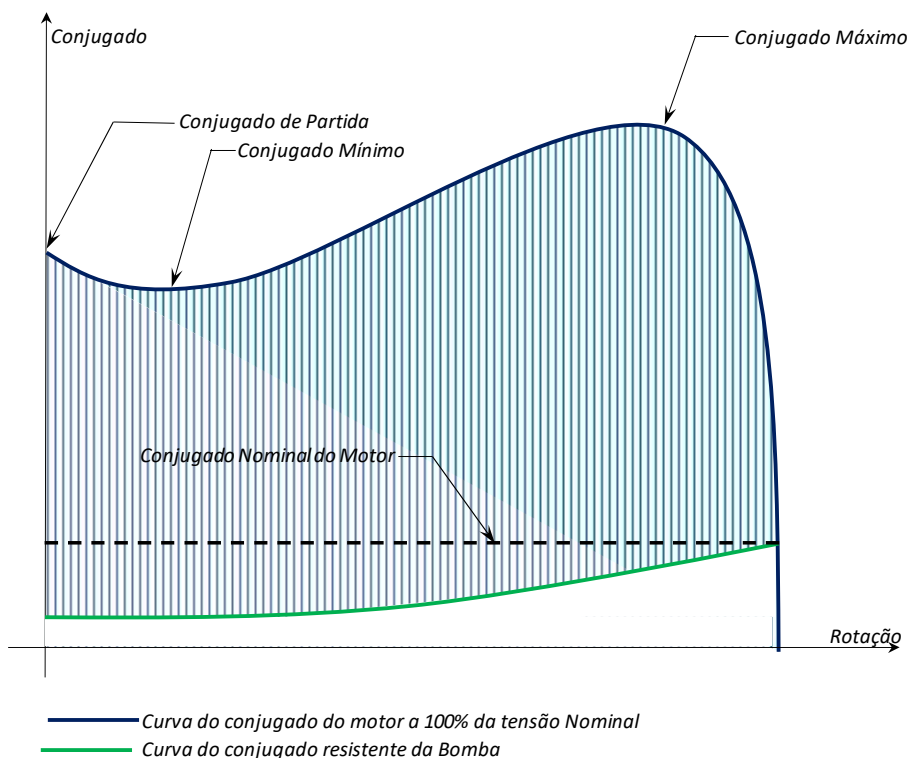
Essas considerações, como muitas outras, podem ser feitas pelo profissional para contornar alguma situações específicas, mas não é necessário adotá-las como regra geral.

8.2 - Medidas Atenuadoras das Subtensões

8.2.1 - Motores

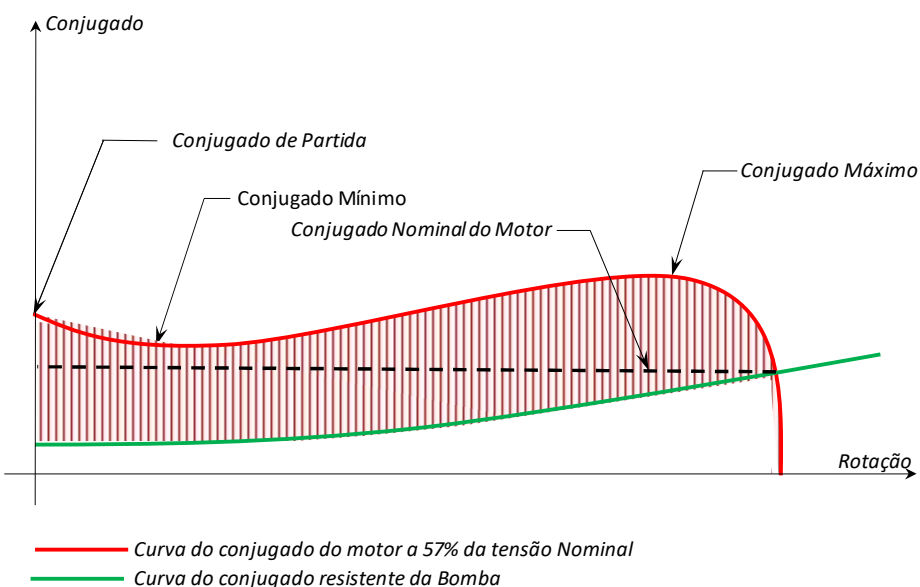
A partida direta à plena tensão de motores de indução é, por enquanto, a mais utilizada nas instalações de usinas hidrelétricas.

Na figura abaixo são mostradas as curvas dos conjugados x rotação do motor e do conjugado resistente da carga, com aplicação de 100% da tensão nominal. A área hachurada representa o conjugado de aceleração que define o tempo de partida do conjunto.



Curva é típica para motores acionando bombas e compressores.

Na figura abaixo é mostrada a curva do motor com partida estrela-triângulo, onde é aplicada 57% da tensão nominal, e a curva do conjugado resistente da carga.



Como se pode ver, a partida de motores de bombas e compressores pode ser feita com tensões mais baixas que as definidas pelas normas, desde que o motor parta dentro de determinado tempo e a queda de tensão provocada não afete o funcionamento do seu controle e demais cargas do sistema.

A partida estrela triângulo de motores, é feita com a redução da tensão na partida, ou seja, em vez de partir o motor com 100% da tensão nominal, se parte com 57,73% (tensão fase-neutro em vez de fase-fase), o que reduz a corrente de partida do motor e conseqüentemente a queda de tensão nos alimentadores e circuitos de controle, mas reduz também o conjugado do motor a 33% do conjugado nominal.

A área hachurada representa o conjugado de aceleração do conjunto. No caso de partida estrela-triângulo, quando a rotação atinge aproximadamente 90% da rotação nominal, é feita a comutação da ligação estrela para triângulo, pois a corrente de partida está bastante reduzida. Observar que o motor até poderia operar com tensão reduzida (ligação em estrela), mas a corrente de operação, com a tensão de 57% da tensão nominal, seria 175% da corrente nominal e o motor sofreria um aquecimento excessivo.

Com o surgimento de novas tecnologias e redução de custos, os soft starters e inversores de frequência, podem substituir sistemas de partida direta por sistemas que, além de reduzir as seções dos cabos alimentadores, reduzem as quedas de tensão em motores com altas correntes de partida.

Nas partidas com soft starters o funcionamento é similar à partida estrelas-triângulo. Os soft starters são ajustados para aplicar uma tensão inicial que vença a inércia da carga, e aumentam o valor dessa tensão, linearmente, até atingir a tensão nominal. Dessa forma, o motor tem uma partida mais rápida e suave, reduzindo a corrente de partida dos motores e, conseqüentemente, queda de tensão nos alimentadores. Os soft starters também têm a vantagem proteger os motores e monitorar diversos parâmetros.

8.2.2 - Transformadores e dispositivos de Controle

Atualmente se encontram no mercado transformadores de controle com uma grande variedade de tensões primárias e secundárias como, por exemplo, 440/460/480-110/115/120V. Adicionalmente, se podem especificar transformadores com derivações de $2 \times \pm 2,5\%$, para correções pontuais de tensão.

Portanto, a princípio, a escolha da tensão nominal mais adequada é feita em função da tensão máxima do sistema de baixa tensão e dos dispositivos de comando e controle, para evitar que sejam danificados.

A tensão nominal das bobinas dos contadores, relés auxiliares etc. poderá ser 115 ou 120V.

Para as definições dos ajustes definidos, será impossível que ocorram sobretensões nos equipamentos e componentes, exceto para motores para os quais foram feitas avaliações e recomendações.

Os contadores e relés têm uma tensão de pick-up e drop-out de 85 e 70%, respectivamente, podendo ser menores, dependendo do fabricante.

Se ainda assim os componentes não atenderem os critérios de queda de tensão, se podem utilizar componentes de controle em corrente contínua.

9 - CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas neste documento correspondem a um conjunto específico de hipóteses adotadas para tensões de alimentação, cargas, tipos de cargas e derivações dos transformadores, conforme definido nas tabelas utilizadas. O objetivo do estudo não é esgotar todas as possibilidades de configuração do sistema, mas fornecer subsídios

técnicos para a avaliação das alternativas de projeto, cabendo ao profissional responsável a análise de outras combinações quando necessário.

Como existem muitas variáveis que podem ser aplicadas e exploradas pelos profissionais responsáveis pelos projetos, não existe uma regra fixa para definir todas as variáveis do sistema. Entretanto, os documentos TE.EL.SA.CA.03 Cálculo da Tensão da Geração e PL.EL.SA.CA.06 Cálculo da Tensão da Geração, associados aos TE.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais e PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potência - Cálculo da Tensão nos Terminais são ferramentas muito úteis para ajudar na tarefa.

As demais informações são subsídios que permitem estudar alternativas, lembrando que o pessoal da operação e manutenção das instalações podem adotar práticas para solucionar, ainda que temporariamente, eventuais problemas com as tensões dos sistemas. Entre estas alternativas estão a utilização de outras derivações dos transformadores elevadores, de serviços auxiliares e de controle.