

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Tensiones Nominales de Baja Tensión y Variaciones de Tensión

ÍNDICE	PÁG.
1 - OBJETIVO	3
2 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA	3
2.1 - Normas	3
2.2 - Informativos Técnicos y Planillas	3
3 - CONSIDERACIONES INICIALES	3
4 - TENSIONES NOMINALES	4
4.1 - Tensiones Nominales de los Sistemas de Baja Tensión	4
4.2 - Tensiones Nominales de las Cargas Generales	4
4.3 - Tensiones Nominales de los Motores	4
4.4 - Transformadores de Control y Dispositivos de Control	5
5 - SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA DE LA CENTRAL.....	5
5.1.1 - Subestación de Alta Tensión	6
5.1.2 - Unidades Generadoras G1, G2 y G3	6
5.1.3 - Transformadores Elevadores TE1, TE2 e TE3	6
5.1.4 - Transformadores de Servicios Auxiliares TSA1, TSA2 e TSA3	6
5.1.5 - Fuente Externa de 13,8 kV	7
5.1.6 - Grupo Electrónico Diésel de Emergencia	7
6 - TENSIONES DE GENERACIÓN	7
7 - TENSIONES DE LOS SISTEMAS DE BAJA TENSIÓN.....	8
7.1 - Unidades Generadoras como Fuente de Alimentación	8
7.2 - Subestación de Alta Tensión como Fuente de Alimentación.....	9
7.3 - Fuente Externa como Fuente de Alimentación.....	10
7.4 - Resumen de las Tensiones Evaluadas.....	11
8 - TENSIONES EN LAS CARGAS	11
8.1 - Límites de Caída de Tensión	11
8.2 - Medidas para Reducir Problemas de Subtensión	13
8.2.1 - Motores	13
8.2.2 - Transformadores y Dispositivos de Control	14
9 - CONCLUSIONES	14

1 - OBJETIVO

El objetivo de este documento es definir las principales tensiones nominales de los sistemas de corriente alterna de baja tensión, motores, cargas generales y dispositivos de control utilizados en centrales hidroeléctricas y, a partir de estas definiciones y sus variaciones, analizar las diferentes condiciones de operación y sus consecuencias sobre el desempeño global de la instalación.

2 - DOCUMENTOS DE REFERENCIA

2.1 - Normas

Las normas mencionadas o utilizadas en el desarrollo de este trabajo se presentan a continuación. Otras normas, como las normas británicas, definen valores adicionales que pueden analizarse utilizando los mismos criterios adoptados en este documento.

ABNT – Asociación Brasileña de Normas Técnicas

IEC - International Electrotechnical Commission

ANSI – American National Standards Institute

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

NEC – National Electrical Code

2.2 - Informativos Técnicos y Planillas

IT.EL.SA.CA.03 Cálculo de la Tensión de Generación

IT.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potencia – Cálculo de la Tensión en los Terminales

PL.EL.SA.CA.06 Cálculo de la Tensión de Generación

PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potencia – Cálculo de la Tensión en los Terminales

3 - CONSIDERACIONES INICIALES

Una central hidroeléctrica está compuesta por una gran cantidad de equipos y sistemas con características y aplicaciones específicas. Sin embargo, también incluye equipos comúnmente encontrados en otros tipos de instalaciones, tales como bombas, compresores, transformadores, equipos de manipulación de cargas, sistemas contra incendios, sistemas de ventilación y aire acondicionado, entre otros. Por lo tanto, los conceptos aplicados en estas instalaciones también pueden aplicarse a otras instalaciones, realizando las adaptaciones necesarias.

Las tensiones de la subestación de alta tensión de la central, conectada al Sistema Interconectado Nacional (SIN), deben cumplir los requisitos establecidos por ANEEL. Las variaciones de tensión de los sistemas de media y baja tensión que no suministran energía a consumidores externos deben satisfacer las necesidades de las cargas internas. Por ejemplo, las tensiones de los sistemas de media tensión no necesariamente deben cumplir los límites establecidos por ANEEL, y las caídas de tensión en los alimentadores tampoco necesitan ajustarse obligatoriamente a los límites normativos, siempre que la operación y la integridad de las cargas conectadas no se vean afectadas.

Al analizar el comportamiento de un sistema, no deben considerarse simultáneamente las condiciones operativas más desfavorables y las peores condiciones de todos los equipos, ya que ello podría llevar a la conclusión de que cualquier proyecto es inviable. Sin embargo, deben existir medios para resolver o minimizar los posibles problemas.

En este documento se utiliza como ejemplo una central hidroeléctrica ficticia para simular las etapas reales necesarias para definir el sistema, sus condiciones de operación y las alternativas que pueden ser adoptadas por el ingeniero responsable del estudio.

La planilla asociada al Informativo Técnico TE.EL.SA.CA.03 – Cálculo de la Tensión de Generación resulta extremadamente útil para evaluar alternativas, especialmente porque durante las etapas iniciales de un nuevo proyecto o rehabilitación suele ser difícil disponer de información definitiva sobre las tensiones de operación de una central cuyas características aún no han sido completamente definidas.

4 - TENSIONES NOMINALES

La selección de las tensiones nominales de sistemas y equipos depende de las normas y reglamentos locales, de los requisitos del cliente, de los equipos instalados y de los fabricantes disponibles en el mercado.

Como este documento se enfoca principalmente en los sistemas de baja tensión de centrales hidroeléctricas, se analizarán los niveles de tensión normalmente utilizados en este tipo de instalaciones. Los conceptos y evaluaciones presentados también son aplicables a otras instalaciones, especialmente industriales.

A diferencia de algunos países europeos y de los Estados Unidos, Brasil no posee una estandarización completa de las tensiones nominales de sistemas y equipos. Por ello, la selección de las tensiones nominales debe basarse en normas reconocidas internacionalmente.

4.1 - Tensiones Nominales de los Sistemas de Baja Tensión

La tensión nominal de los sistemas de baja tensión deberá ser de 400 V o 480 V. En este documento se adoptará una tensión nominal de 480 V.

Los sistemas existentes con tensiones nominales de 380 V y 440 V deberán, cuando sea posible, convertirse a 400 V y 480 V, respectivamente. Los motores y demás componentes generalmente pueden operar con estos nuevos niveles de tensión, siempre que se analice el comportamiento global del sistema y se realicen los ajustes necesarios.

Debe recordarse que la frecuencia del sistema eléctrico brasileño es de 60 Hz, al igual que en los Estados Unidos, mientras que en Europa normalmente es de 50 Hz.

4.2 - Tensiones Nominales de las Cargas Generales

Las cargas generales, excepto aquellas constituidas exclusivamente por motores, normalmente incluyen transformadores, sistemas de calefacción, sistemas de ventilación, sistemas de aire acondicionado, equipos de elevación y motores.

La tensión nominal de estas cargas deberá ser de 400 V o 480 V, dependiendo de la tensión nominal del sistema. En este documento se adoptará una tensión nominal de 480 V.

4.3 - Tensiones Nominales de los Motores

La tensión nominal de los motores deberá ser de 380 V para sistemas de 400 V y de 460 V para sistemas de 480 V. En este documento se considerará una tensión nominal de motor de 460 V.

Tanto en instalaciones existentes como en nuevas instalaciones, los motores de 440 V podrán continuar operando en sistemas de 480 V. Cuando sea conveniente, podrán sustituirse por motores de 460 V. Los motores de 380 V no requieren sustitución, ya que su tensión nominal es adecuada.

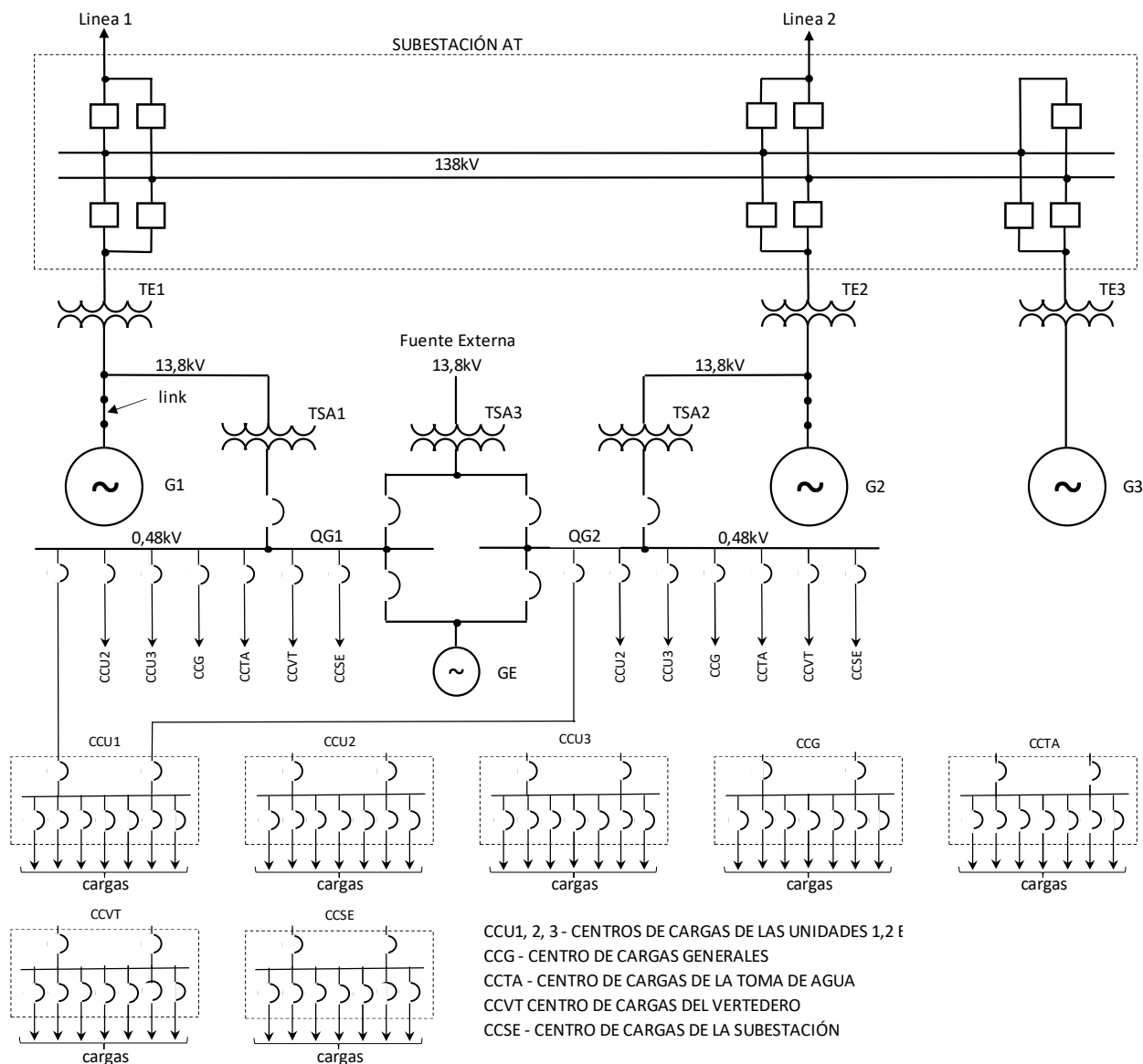
4.4 - Transformadores de Control y Dispositivos de Control

Para sistemas de 400 V, los transformadores de control deberán poseer relación 400-115 V y los dispositivos de control deberán tener tensión nominal de 115 V.

Para sistemas de 480 V, los transformadores de control deberán poseer relación 480-120 V y los dispositivos de control podrán tener tensión nominal de 120 V o 115 V, dependiendo de los criterios adoptados y de los resultados obtenidos.

5 - SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA DE LA CENTRAL

La configuración básica del sistema eléctrico de la central hidroeléctrica puede representarse mediante el diagrama unifilar simplificado mostrado a continuación.



Las unidades generadoras G1, G2 y G3 producen la energía suministrada al Sistema Interconectado Nacional (SIN) a través de los transformadores elevadores TE1, TE2 y TE3 y de la subestación de alta tensión.

Las unidades generadoras también suministran la energía necesaria para las instalaciones de baja tensión de la central. En el ejemplo considerado, las unidades G1 y G2 realizan este suministro mediante los transformadores de servicios auxiliares TSA1 y TSA2.

La subestación de alta tensión también puede suministrar energía a las instalaciones de baja tensión a través de los transformadores elevadores TE1 y TE2 y de los

transformadores de servicios auxiliares TSA1 y TSA2, desconectando la conexión con las unidades generadoras correspondientes.

Una fuente externa también puede suministrar energía a las instalaciones de baja tensión mediante el transformador de servicios auxiliares TSA3.

Para facilitar la comprensión de los análisis presentados en este documento, se adoptarán las características descritas a continuación.:

5.1.1 - Subestación de Alta Tensión

En Brasil, los límites operativos de una subestación de 138 kV están definidos por ANEEL y pueden clasificarse como adecuados, precarios o críticos.

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 $TL > 1,07TR$

La norma IEC 61000-3 recomienda definir la tensión de referencia como la tensión nominal del sistema.

La tensión en la subestación de alta tensión (138 kV) se considerará dentro del rango apropiado, del 95 % al 105 % de la tensión nominal, es decir, entre 131,1 kV y 144,9 kV.

Si la tensión se encuentra en un rango precario o crítico, y esta situación compromete alguna instalación, el técnico podrá utilizar otra toma del primario del transformador elevador para realizar los ajustes necesarios.

5.1.2 - Unidades Generadoras G1, G2 y G3

Tensión nominal: 13,8 kV

Potencia nominal: 100 MVA

Potencia generada y factor de potencia: 100 MVA con factor de potencia 0,95.

5.1.3 - Transformadores Elevadores TE1, TE2 e TE3

Potencia nominal: 100 MVA

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

Impedancia: 10%

Resistencia: Se considerará que la resistencia es del 1%.

La derivación utilizada para el devanado de 138 kV viene definida por el funcionamiento de la planta y depende de las condiciones del sistema. Sin embargo, si esta información no está disponible, el profesional puede realizar simulaciones para analizar las distintas posibilidades, con el fin de definir el sistema de baja tensión para los servicios auxiliares de la planta.

5.1.4 - Transformadores de Servicios Auxiliares TSA1, TSA2 e TSA3

Potencia nominal: 1000 kVA

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

Impedancia: 6%

Resistencia: Se considerará que la resistencia es del 1%.

Carga constante normal: 460 V, 300 kVA, FP 0,85

Carga constante máxima: 460 V, 600 kVA, FP 0,85

Carga variable normal: 480 V, 75 kVA, FP 0,90

Carga variable máxima: 480 V, 150 kVA, FP 0,90

Nota: El sistema de corriente alterna es redundante; es decir, un transformador de servicio auxiliar normalmente suministra la mitad de la carga, pero tiene capacidad para suministrar la carga completa. La carga normal es la que corresponde al funcionamiento de ambos transformadores de servicio auxiliar, y la carga máxima se produce cuando solo uno está en funcionamiento.

La carga constante se refiere a las cargas compuestas principalmente por motores, mientras que las cargas variables incluyen todos los demás tipos de cargas.

5.1.5 - Fuente Externa de 13,8 kV

La fuente externa de 13,8 kV puede provenir de un transformador instalado en la subestación de alta tensión o de una compañía eléctrica. Para los fines de este documento, se considerará que la fuente externa proviene de una compañía eléctrica. Por lo tanto, debe cumplir con el rango de tensión del sistema de 13,8 kV definido por ANEEL.

En este estudio, se considerará que la tensión de la fuente externa estará dentro del rango de tensión apropiado, es decir, entre el 93 % y el 105 % de la tensión 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 $TL > 1,05TR$

La tensión en la fuente externa variará en el rango de 12,834 kV a 14,49 kV.

5.1.6 - Grupo Electrógeno Diésel de Emergencia

Aunque constituye una de las fuentes de alimentación de la central, su análisis detallado no forma parte del alcance de este documento.

La tensión nominal del grupo eléctrico diésel de emergencia será de 480 V.

6 - TENSIONES DE GENERACIÓN

Utilizando la hoja de cálculo PL.EL.SA.CA.06, Cálculo de Tensión de Generación, mencionada en la documentación de referencia, se pueden realizar simulaciones de la tensión en las unidades generadoras considerando las siguientes condiciones:

- Tensión de la subestación de alta tensión (138 kV) en los valores máximo y mínimo de la tensión nominal, es decir, en el rango de 131,1 kV a 144,9 kV;
- Unidades generadoras operando con potencia y factor de potencia nominales;
- Derivación utilizada del devanado de 138 kV con valor nominal, es decir, 1,00;
- Derivación utilizada del devanado de 138 kV con valor de 1,025;

Para las condiciones anteriores, podemos escribir la siguiente tabla:

Tensión en las Unidades Generadoras				
Tensión Mínima/Maxima en la Subestación AT (kV)	131,1		144,9	
Potência Fornecida por G1/G2 -FP	100MVA - FP 0,95		100MVA - FP 0,95	
Tap TE1/TE2	1,00	1,025	1,00	1,025
Tensión en G1/G2 (kV)	13,76	13,46	15,07	14,73

Para la derivación 1.00, el rango de variación de tensión en los terminales de las unidades generadoras estará entre 13,76 kV y 15,07 kV. Para la derivación 1.025, el rango de variación de tensión en los terminales de las unidades generadoras estará entre 13,46 kV

y 14,73 kV. Ambos rangos se encuentran dentro de los límites operativos de las unidades generadoras. El profesional puede realizar otras simulaciones, con las tensiones que considere más convenientes y con otras derivaciones de los transformadores elevadores, y elegir la más adecuada a sus necesidades. En este documento, adoptaremos la derivación 1.00.

El rango de variación de tensión en el sistema de 13,8 kV, para la derivación elegida, estará entre el 99,71 % y el 109,20 %, diferente de los rangos de tensión definidos en la Tabla 3 de ANEEL. Sin embargo, dado que no se trata de un punto de conexión, no es necesario que cumpla con estas restricciones.

7 - TENSIONES DE LOS SISTEMAS DE BAJA TENSIÓN

La tensión en los terminales secundarios de los transformadores de servicio auxiliar depende de las fuentes de alimentación y las condiciones de funcionamiento de las instalaciones. El sistema de baja tensión puede alimentarse mediante las unidades generadoras G1 y G2, la subestación de alta tensión, a través de los transformadores TE1 y/o TE2, o mediante una fuente externa.

Como se puede observar, al seleccionar las tomas de los devanados de los transformadores, elevadores y servicios auxiliares, se puede ajustar la tensión en los sistemas de baja tensión. El objetivo de esta selección es evitar que se supere la tensión máxima del equipo. La tensión máxima del sistema debe limitarse al 110 % de la tensión nominal, es decir, 528 V (480 + 10 %).

En el caso de los motores, cabe considerar que, con las prácticas adoptadas para mitigar posibles problemas, estos pueden estar sometidos a tensiones superiores o inferiores a las normalmente definidas en las normas. Estas prácticas consisten en especificar motores diseñados para la clase de aislamiento B, pero fabricados con materiales de clase F, y definir un factor de servicio superior a 1,00.

En la siguiente tabla, extraída del libro "Motores: Manual de aplicación y mantenimiento" de Robert W. Smeaton, se enumeran los posibles problemas de sobretensión y subtensión que pueden surgir en los motores:

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

Se puede afirmar que las subtensiones y sobretensiones son aceptables en la mayoría de los casos, incluso para motores con una tensión nominal de 440 V, que a menudo se conservan durante las renovaciones de las centrales eléctricas.

7.1 - Unidades Generadoras como Fuente de Alimentación

Considerando que la tensión de la subestación de alta tensión (138 kV) está en el rango de 131,1 kV a 144,9 kV, que las unidades generadoras operan a potencia nominal y factor de

potencia, que los transformadores elevadores están en la toma 1,00, y que los transformadores de servicio auxiliar TSA1 y TSA2 están en la toma 1,00, utilizando las hojas de cálculo relacionadas en los documentos de referencia, para las condiciones de carga estimadas, tenemos:

Tensión en el secundario de TSA1 y TSA2 - Alimentación eléctrica por las unidades generadoras						
Tensión Mínima/Máxima em la Subestación AT (kV)	131,1			144,9		
Potencia suministrada por G1/G2 - FP	100MVA - FP 0,95					
Tap TE1/TE2	1					
Tensión em G1/G2 (kV)	13,76			15,07		
Tap TSA1/TSA2	1					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión em el Secundario de TSA1/TSA2 (V)	478,61	471,49	464,08	524,17	517,47	510,53

La tensión mínima en el lado secundario de los transformadores TSA1 y TSA2 estará entre 464,08 V y la máxima de 524,17 V, lo que corresponde, respectivamente, al 100,89 % y al 113,95 % de la tensión nominal de los motores y entre el 96,68 % y el 109,92 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

La planta opera en condiciones normales cuando las instalaciones de baja tensión se alimentan desde las unidades generadoras, a través de los dos transformadores de servicio auxiliar. La tensión normal de las instalaciones de baja tensión dependerá del valor de tensión en la subestación de alta tensión y estará entre 471,49 V y 517,47 V, lo que corresponde, respectivamente, al 102,50 % y al 111,41 % de la tensión nominal de los motores y entre el 98,23 % y el 107,81 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

7.2 - Subestación de Alta Tensión como Fuente de Alimentación

Cuando la fuente de alimentación del sistema de baja tensión es la subestación de alta tensión, considerando que la tensión de la subestación de alta tensión (138 kV) se encuentra en el rango de 131,1 kV a 144,9 kV, que los transformadores elevadores están conectados a la toma 1,00 y que los transformadores de servicio auxiliar TSA1 y TSA2 están conectados a las tomas 1,00, 0,975 o 0,95.

Para estos cálculos, utilice la hoja de cálculo PL.EL.SA.AC.01 «Transformadores de potencia - Cálculo de tensión en terminales», que se encuentra en la documentación de referencia, considerando que, para los transformadores elevadores, la tensión nominal primaria es la del lado de alta tensión (138 kV). Para las condiciones de carga estimadas, tenemos:

Tensión en el secundario de TSA1 y TSA2 - Alimentación por la subestación de alta tensión						
Tensión Mínima/Máxima em la Subestación AT (kV)	131,1			144,9		
Tap TE1/TE2	1					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión em el lado de 13,8kV del TE1/TE2 (kV)	13,11	12,68	12,24	14,40	13,93	13,45
Tap TSA1/TSA2	1					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensãõ no Secundario do TSA1/TSA2 (V)	456,00	433,44	410,00	500,87	477,34	453,07
Tap TSA1/TSA2	0,975					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión em el Secundario del TSA1/TSA2 (V)	467,69	445,32	421,88	513,71	490,35	466,06
Tap TSA1/TSA2	0,95					
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión em el Secundario del TSA1/TSA2 (V)	480,00	457,65	434,60	527,23	503,74	479,67

La toma que mejor se aproxima a las tensiones de alimentación de las unidades generadoras es 0,95. La tensión mínima será de 434,60 V y la máxima de 527,23 V, que corresponden, respectivamente, al 94,48 % y al 114,62 % de la tensión nominal de los motores y al 90,54 % y al 109,84 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

Esta condición de funcionamiento puede preverse en caso de que una de las unidades generadoras, G1 o G2, permanezca en mantenimiento durante un período prolongado y la fuente de alimentación externa no exista o no esté disponible. En estos casos, el transformador de servicio auxiliar correspondiente operará junto con el otro, desde la otra unidad, al 50 % de la carga. La tensión de las instalaciones de baja tensión dependerá del valor de la tensión en la subestación de alta tensión, y estará entre 457,65 y 503,74 V, lo que corresponde, respectivamente, al 99,49 % y al 109,40 % de la tensión nominal de los motores y entre el 95,34 % y el 104,95 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

7.3 - Fuente Externa como Fuente de Alimentación

Cuando la alimentación del sistema de baja tensión es una fuente externa, considerando que la tensión de la fuente está dentro del rango apropiado del 93 al 105% de la tensión nominal, es decir, entre 12,834 kV y 14,49 kV, según lo definido por ANEEL, y que el transformador de servicios auxiliares TSA3 está en toma 1,00, 0,975 o 0,95, utilizando la hoja de cálculo PL.EL.SA.AC.01 Power Transformers - Terminal Voltage Calculation, relacionada en los documentos de referencia, para las condiciones de carga estimadas, tenemos:

Tensión secundaria TSA3 - Alimentación por la fuente externa						
Tensión Mínima/Máxima em la Fuente (kV)	12,834			14,49		
Tap TSA3	1			1		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión en el Secundario del TSA3 (V)	446,40	438,92	431,08	504,00	497,12	489,99
Tap TSA3	0,975			0,975		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión en el Secundario del TSA3 (V)	482,59	450,88	443,60	516,92	510,50	503,85
Tap TSA3	0,95			0,95		
Carga Constante 460V, FP 0,85 (MVA)	0	300	600	0	300	600
Carga Variable 480V, FP 0,90 (MVA)	0	75	150	0	75	150
Tensión en el Secundario del TSA3 (V)	469,89	463,40	456,66	530,53	524,53	518,35

La toma que mejor se aproxima a las tensiones de alimentación de las unidades generadoras es 0,95. La tensión mínima será de 456,66 V y la máxima de 530,53 V, que corresponden, respectivamente, al 99,27 % y al 115,33 % de la tensión nominal de los motores y al 95,14 % y al 110,53 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

Esta situación se produce si una o ambas unidades generadoras, G1/G2, permanecen en mantenimiento durante un período prolongado. En estos casos, el transformador de servicio auxiliar TSA3 correspondiente funcionará junto con el otro transformador, de la otra unidad en funcionamiento, al 50 % de la carga. La tensión de las instalaciones de baja tensión dependerá del valor de la tensión de la fuente externa y oscilará entre 463,40 V y 524,53 V, lo que corresponde, respectivamente, al 100,74 % y al 114,03 % de la tensión nominal de los motores y entre el 96,54 % y el 109,28 % de la tensión nominal de las cargas generales y del sistema.

Esta situación también puede darse cuando las unidades se detienen, por ejemplo, debido a un problema de inestabilidad del sistema y el generador diésel de emergencia no está disponible.

7.4 - Resumen de las Tensiones Evaluadas

Las tensiones máximas generalmente se producen cuando los transformadores están sin carga. Por lo tanto, con las selecciones adoptadas, la ocurrencia de sobretensiones en sistemas de baja tensión es altamente improbable.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los límites de tensión mínimos, normales y máximos para las condiciones seleccionadas.:

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

La evaluación de las posibilidades operativas del sistema de baja tensión de la central eléctrica en cuestión permite explorar diversas alternativas. En este caso, la única restricción fue evitar sobretensiones. Por otro lado, evitar sobretensiones implica admitir subtensiones que deben analizarse y, cuando sea necesario, mitigarse con intervenciones puntuales para evitar problemas mayores.

En condiciones normales de operación, el sistema de baja tensión se alimenta mediante las unidades generadoras G1 y G2, y la tensión de operación oscilará entre 471,49 V y 517,47 V, dependiendo de la tensión en la subestación de alta tensión y la toma utilizada en los transformadores elevadores TE1 y TE2 y los transformadores de servicio auxiliar TSA1 y TSA2. Las demás posibilidades son contingencias que pueden ocurrir, pero son condiciones temporales.

Las tensiones mínimas en los sistemas de baja tensión pueden ocurrir cuando las fuentes de alimentación presentan tensiones mínimas y, simultáneamente, cargas máximas en las instalaciones. Durante la operación de instalaciones nuevas o renovadas, se pueden realizar ajustes para mejorar las condiciones de funcionamiento de los sistemas.

Los nuevos productos que aparecen en el mercado y las actualizaciones de las normas deben tenerse en cuenta en el desarrollo de proyectos. La reducción de costes de los equipos y el uso de nuevas técnicas deben formar parte de la definición de las instalaciones y, siempre que sea posible, aplicarse a las mismas.

8 - TENSIONES EN LAS CARGAS

La tensión en las cargas dependerá de la tensión en las fuentes de alimentación de baja tensión, la configuración del sistema y los circuitos de alimentación involucrados. En el caso considerado, las cargas se alimentan directamente desde paneles de instalación específicos, que a su vez se alimentan desde paneles generales que, debido a la configuración del sistema de baja tensión, se ubican cerca de los transformadores de servicio auxiliar.

Dado que las configuraciones de los sistemas de baja tensión pueden variar según las dimensiones de la central eléctrica, el número y la potencia de las unidades, así como otros factores no considerados aquí, se realizarán consideraciones generales que se aplican a las condiciones de cualquier configuración.

8.1 - Límites de Caída de Tensión

Las normas suelen definir límites de caída de tensión en los circuitos, según su finalidad y las condiciones de funcionamiento de las cargas. Sin embargo, lo importante es que, independientemente de estos límites, partiendo de la tensión de la fuente, la tensión en la carga cumpla con sus condiciones de funcionamiento. Como ejemplo, podemos citar la norma NBR 5410, que define que:

"6.2.7.1 En cualquier punto de uso de la instalación, la caída de tensión verificada no debe exceder los siguientes valores, expresados en relación con la tensión nominal de la instalación:

6.2.7.1 a) 7%, calculado desde los terminales secundarios del transformador de media/baja tensión, en el caso de un transformador propiedad de la(s) unidad(es) consumidora(s);"

En las centrales hidroeléctricas, la caída de tensión máxima entre los terminales secundarios del transformador de media/baja tensión (MT/BT) y la carga debe ser del 7 % de la tensión nominal del sistema. Sin embargo, en estas centrales, los transformadores de MT/BT suelen estar alimentados directamente por los generadores. Estos generadores también tienen un rango de operación limitado, generalmente de ± 10 %, e incluso operando dentro de un rango menor, por ejemplo, +8 %, -5 %, debe considerarse la caída de tensión en el propio transformador de MT/BT y en los componentes del circuito, como los cuadros eléctricos y los cables. Por lo tanto, este límite del 7 % puede respetarse de forma involuntaria, pero no debe ser una limitación estricta.

En los centros de carga de instalaciones específicas, cercanos a los centros de carga generales, no es necesario limitar la caída de tensión en sus alimentadores, ya que, debido al dimensionamiento basado en la capacidad de transporte de corriente y la longitud del circuito, la caída de tensión suele ser baja. Con frecuencia se presentan situaciones en las que, para reducir ligeramente la caída de tensión en un alimentador, la sección transversal nominal del cable debe ser tan grande que, en ocasiones, ni siquiera es posible conectarlo a la carga. Un ejemplo son los motores, que cuentan con cajas de conexiones de dimensiones limitadas. En estos casos, se deben realizar esfuerzos para reducir la caída de tensión en otros alimentadores.

Cabe destacar que, cuando el sistema de baja tensión se alimenta desde la subestación de alta tensión, se calculó una tensión mínima de 434,60 V para las peores condiciones de funcionamiento, es decir, tensión mínima en la subestación y carga máxima en los transformadores de servicio auxiliar. Este cálculo también consideró una resistencia del transformador elevador del 1 %, cuando en realidad este valor puede ser mucho menor, ya que depende de la potencia y la temperatura del transformador, que a su vez dependen de la carga. Los valores de las resistencias del transformador, cuando no estén disponibles, se pueden obtener utilizando la relación X/R que se muestra en la figura siguiente, la cual, para el transformador elevador de 100 MVA, es aproximadamente del 0,27 %, considerando una relación X/R igual a 38.

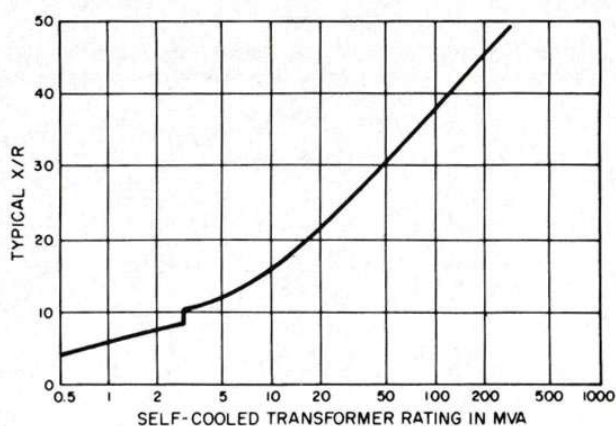


Fig N1.1
X/R Ratio of Transformers (Based on ANSI/IEEE C37.010-1979)

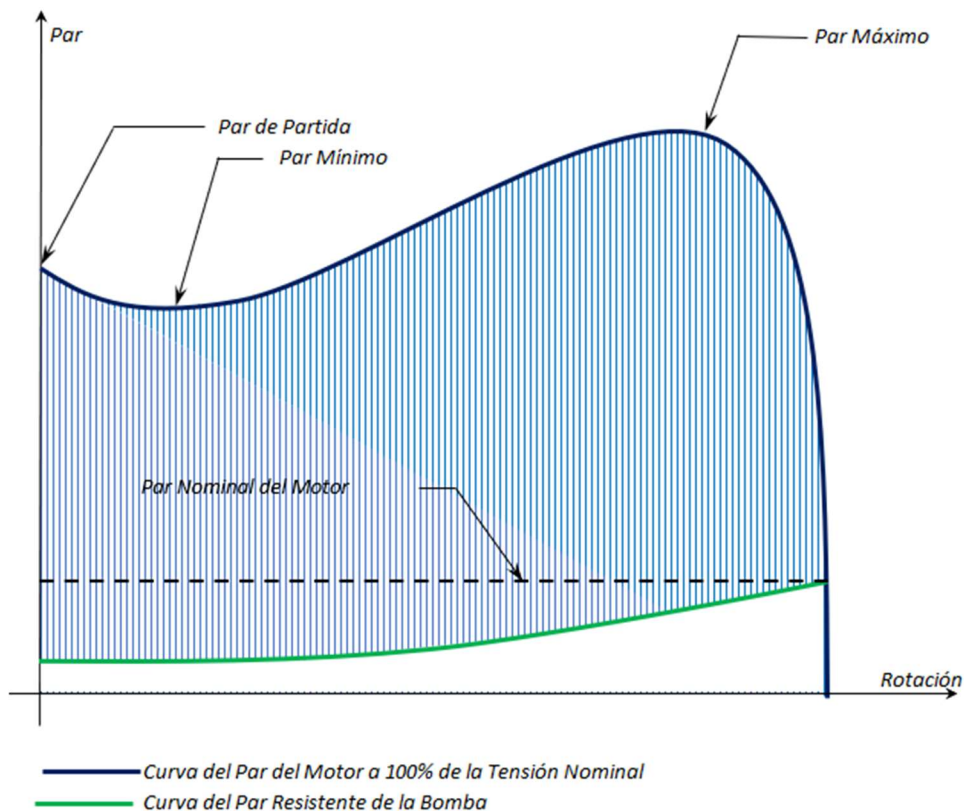
Estas consideraciones, al igual que muchas otras, pueden ser tenidas en cuenta por los profesionales para abordar situaciones específicas, pero no es necesario adoptarlas como regla general.

8.2 - Medidas para Reducir Problemas de Subtensión

8.2.1 - Motores

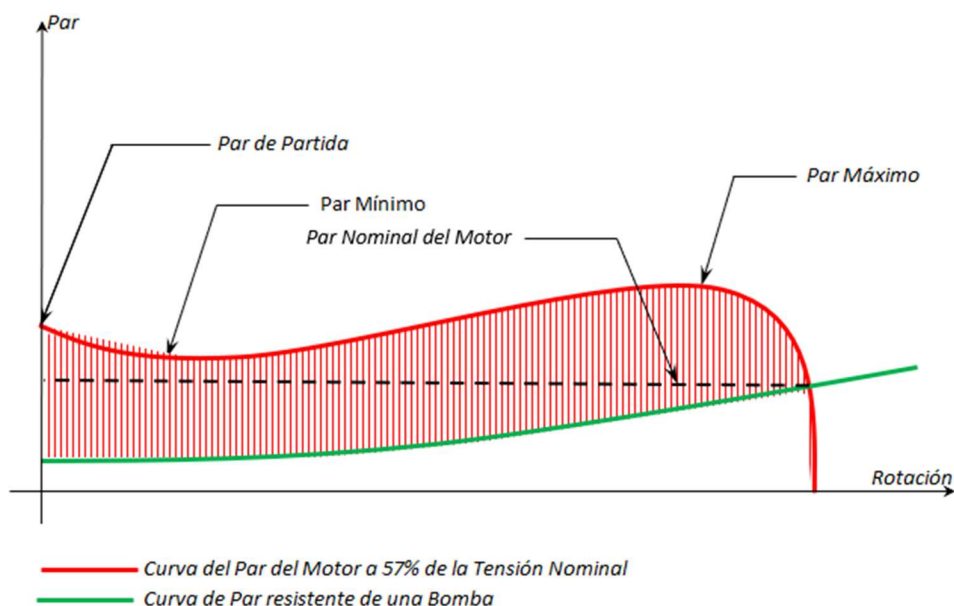
El arranque directo a plena tensión para motores de inducción es actualmente el método más utilizado en centrales hidroeléctricas.

La siguiente figura muestra las curvas de par frente a velocidad del motor y del par de carga, con el 100 % de la tensión nominal aplicada. El área sombreada representa el par de aceleración que define el tiempo de arranque del conjunto.



La curva es típica de los motores que accionan bombas y compresores.

La figura siguiente muestra la curva del motor con arranque estrella-triángulo, donde se aplica el 57 % de la tensión nominal, y la curva de par de carga.



Como se puede observar, el arranque de motores de bombas y compresores puede realizarse con tensiones inferiores a las definidas por las normas, siempre que el motor arranque dentro de un tiempo determinado y la caída de tensión resultante no afecte al funcionamiento de su control ni a otras cargas del sistema.

El arranque estrella-triángulo de los motores se realiza reduciendo la tensión de arranque; es decir, en lugar de arrancar el motor con el 100 % de la tensión nominal, se arranca con el 57,73 % (tensión fase-neutro en lugar de fase-fase), lo que reduce la corriente de arranque del motor y, por consiguiente, la caída de tensión en los alimentadores y circuitos de control, pero también reduce el par motor al 33 % del par nominal.

El área sombreada representa el par de aceleración del conjunto. En el caso del arranque estrella-triángulo, cuando la rotación alcanza aproximadamente el 90 % de la rotación nominal, la conexión se conmuta de estrella a triángulo, ya que la corriente de arranque se reduce significativamente. Cabe destacar que el motor podría funcionar con voltaje reducido (conexión en estrella), pero la corriente de operación, con un voltaje del 57 % del voltaje nominal, sería del 175 % de la corriente nominal, y el motor sufriría un sobrecalentamiento.

Con la aparición de nuevas tecnologías y la reducción de costos, los arrancadores suaves y los variadores de frecuencia pueden reemplazar los sistemas de arranque directo con sistemas que, además de reducir la sección transversal de los cables de alimentación, reducen las caídas de voltaje en motores con altas corrientes de arranque.

En los arrancadores suaves, el funcionamiento es similar al arranque estrella-triángulo. Los arrancadores suaves se ajustan para aplicar un voltaje inicial que venza la inercia de la carga y aumentan su valor linealmente hasta alcanzar el voltaje nominal. De esta manera, el motor tiene un arranque más rápido y suave, reduciendo la corriente de arranque y, por consiguiente, la caída de voltaje en los alimentadores. Los arrancadores suaves también tienen la ventaja de proteger los motores y monitorear diversos parámetros.

8.2.2 - Transformadores y Dispositivos de Control

Actualmente, en el mercado se encuentran disponibles transformadores de control con una amplia gama de tensiones primarias y secundarias, como 440/460/480-110/115/120 V. Además, se pueden especificar transformadores con dos tomas de $\pm 2,5$ % para correcciones puntuales de tensión.

Por lo tanto, en principio, la elección de la tensión nominal más adecuada se basa en la tensión máxima del sistema de baja tensión y de los dispositivos de control y mando, para evitar daños.

La tensión nominal de las bobinas de contactores, relés auxiliares, etc., puede ser de 115 o 120 V.

Con los ajustes definidos, será imposible que se produzcan sobretensiones en los equipos y componentes, excepto en los motores, para los que se han realizado evaluaciones y recomendaciones.

Los contactores y relés tienen una tensión de activación y desactivación del 85 % y 70 %, respectivamente, que puede ser inferior según el fabricante.

Si los componentes aún no cumplen con los criterios de caída de tensión, se pueden utilizar componentes de control de corriente continua.

9 - CONCLUSIONES

Las conclusiones presentadas en este documento corresponden a un conjunto específico de supuestos adoptados para las tensiones de alimentación, cargas, tipos de carga y tomas del transformador, tal como se definen en las tablas utilizadas. El objetivo del estudio no es

agotar todas las configuraciones posibles del sistema, sino proporcionar apoyo técnico para la evaluación de alternativas de diseño, siendo el profesional responsable el encargado de analizar otras combinaciones cuando sea necesario.

Dado que existen numerosas variables que los profesionales responsables de los proyectos pueden aplicar y explorar, no existe una regla fija para definir todas las variables del sistema. Sin embargo, los documentos TE.EL.SA.CA.03 Cálculo de Tensión de Generación y PL.EL.SA.CA.06 Cálculo de Tensión de Generación, junto con TE.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potencia - Cálculo de Tensión en Terminales y PL.EL.SA.AC.01 Transformadores de Potencia - Cálculo de Tensión en Terminales, son herramientas muy útiles para esta tarea. La información restante proporciona datos de apoyo que permiten el estudio de alternativas, teniendo en cuenta que el personal responsable de la operación y el mantenimiento de las instalaciones puede adoptar prácticas para resolver, aunque sea temporalmente, cualquier problema con los voltajes del sistema. Estas alternativas incluyen el uso de otras tomas de los transformadores elevadores, servicios auxiliares y sistemas de control.