

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

**ELEVAÇÃO DO LIMITE DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS RADIAIS COM MÚLTIPLOS
COMPENSADORES ESTÁTICOS ATRAVÉS DA EXPANSÃO DOS SEUS NOMINAIS CAPACITIVOS**

Manfredo Correia Lima *

UPE - CHESF

Antonio Roseval F. Freire
Adolpho Calazans

Ugenilson T. Souza

Luciano R. Lins

Luiz Torres S. Leitão

Roberto Finizola F. Sobral

Antonio Ricardo M. Tenório

CHESF

RESUMO:

A transmissão de grandes parcelas de energia em sistemas radiais através de elevadas distâncias representa grande desafio, particularmente quando a expansão do sistema é retardada por restrições financeiras. Isto ocorre no subsistema Norte da CHESF, onde verificou-se, com a elevação dos limites capacitivos dos compensadores estáticos (CE) Milagres e Fortaleza, uma sensível elevação do limite de transmissão, com significativa redução do risco de corte de carga. Para determinação destes novos limites, sem implicar em risco de danificação ou perda de vida útil para qualquer dos componentes dos CE, foram realizados os estudos e ensaios de campo descritos neste informe técnico.

PALAVRAS CHAVE: Compensador Estático — Limite Capacitivo – Capacidade de Sobrecarga – Limite de Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

O emprego de compensadores estáticos (CE) representa atraente alternativa para elevação dos níveis de qualidade de energia, devido à sua rápida ação de controle sobre a tensão do sistema, em regime permanente e em condições transitórias (1). Para possibilitar melhorias no controle de tensão, dois CE foram instalados, nos anos 80, nas subestações (SE) Milagres e Fortaleza, localizadas no subsistema Norte da CHESF, de características radiais (Figura 1), formado por 700km de linhas de transmissão em

230kV e conectando o complexo gerador de Paulo Afonso à SE Fortaleza. Os referidos compensadores foram planejados para operar em torno de 0Mvar, com o objetivo de fornecer à rede elétrica margens de potência reativa em condições de contingência. O crescimento da carga com taxas anuais acima das previsões de mercado e restrições de ordem financeira à expansão do sistema de transmissão que ocorreram nos anos 90 levaram à possibilidade do não atendimento à demanda em seus horários de pico, com todas as implicações técnicas, econômicas e sociais decorrentes. Os CE Fortaleza e Milagres possuem, cada um deles, dois bancos de capacitores fixos e dois reatores controlados a tiristores (RCT), que juntamente com um transformador abaixador, formam sistemas de 12 pulsos, dimensionados para fornecer valores de potência reativa compreendidos entre 200Mvar capacitivos e 140Mvar indutivos (CE Fortaleza) e entre 100Mvar capacitivos e 70Mvar indutivos (CE Milagres).

A Figura 2 mostra um diagrama unifilar simplificado do CE Fortaleza. O CE Milagres possui arranjo similar ao mostrado na Figura 2, sendo o seu banco de capacitores fixo conectado a um reator e comendo com este um filtro de 5° harmônico.

2.0 - COMENTÁRIOS GERAIS

Estudos de regime permanente mostraram uma sensível elevação da capacidade de transmissão do

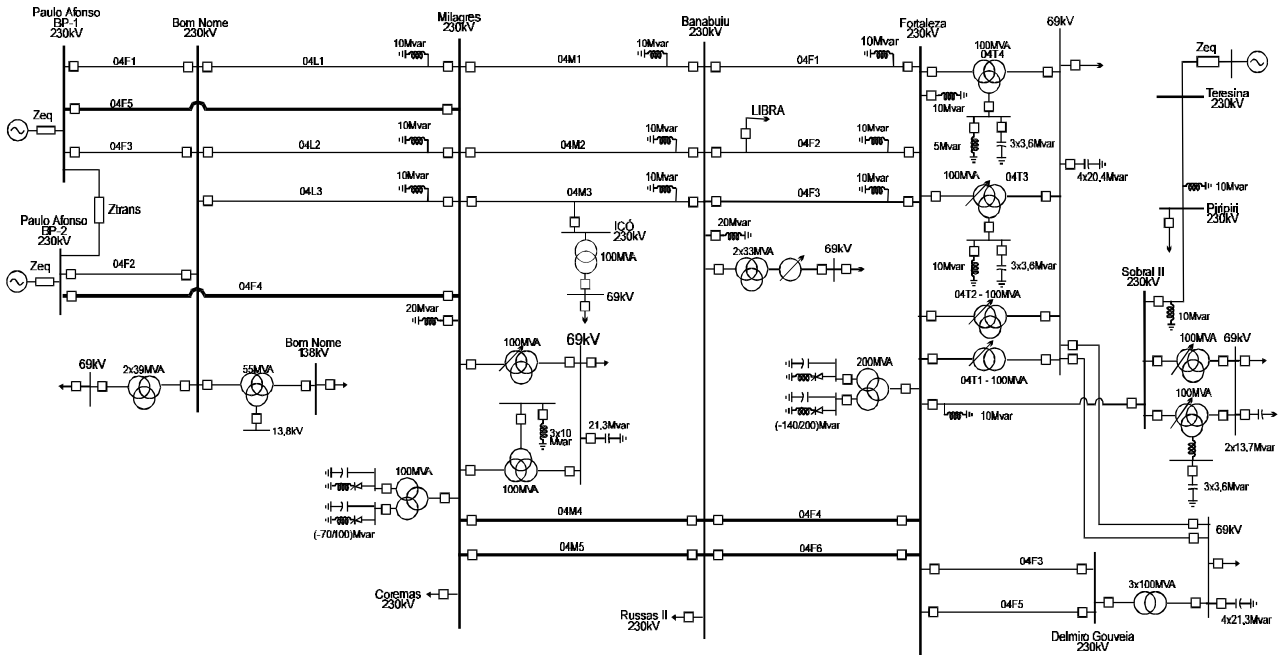


FIGURA 1. Diagrama Unifilar do Subistema Norte da CHESF

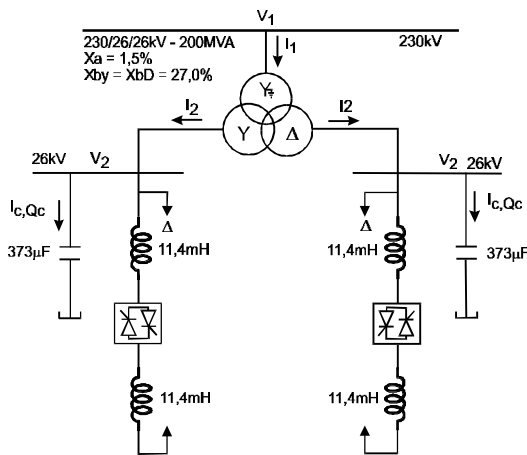


FIGURA 2. Compensador Estático de Fortaleza

subistema Norte da CHESF, com a conseqüente redução dos riscos de corte de carga durante os horários de pico de demanda, caso fosse possível elevar os limites capacitivos originais dos CE Fortaleza (200MVar) e Milagres (100Mvar). Esta possibilidade deve-se ao fato de tais equipamentos terem sido especificados para fornecer seus limites nominais indutivos e capacitivos na faixa de tensão terminal de $230\text{kV} \pm 5\%$. Desta forma, quando se opera os referidos CE com tensões terminais superiores ao limite inferior do citado intervalo, existe a disponibilidade de uma faixa adicional de potência reativa (teoricamente dada por $(1,05/0,95)^2 = 1,22\text{pu}$ ou 22%), cujo valor real foi determinado através dos trabalhos descritos neste informe técnico. Os estudos

foram realizados buscando a determinação da máxima capacidade de sobrecarga capacitiva disponível nos referidos compensadores, sem implicar em risco de danificação ou perda de vida útil para qualquer dos seus componentes. Para isto, foram efetuadas análises de suportabilidade de equipamentos e de proteção.

3.0 – CONSIDERAÇÕES DE SISTEMA

Em 23.04.98, a demanda do subistema Norte da CHESF atingiu cerca de 1284MW, tendo o CE Fortaleza, nesta situação, operado no seu limite nominal capacitivo (200Mvar). A operação dos CE Fortaleza e Milagres próximos aos seus limites nominais capacitivos em condições de elevados carregamentos no sistema de transmissão implica em dificuldades no controle de tensão e elevado risco de corte de carga, pelos motivos a seguir relatados. A característica peculiar da carga suprida pela SE Fortaleza, que possui elevada parcela de cargas dinamicamente ativas, implica em forte risco de colapso de tensão caso os CE atinjam seus limites nominais capacitivos e a demanda de potência ativa continue a crescer. Isto se dá pelo fato de tais cargas possuírem a característica de manter sua potência constante, elevando a corrente e solicitando da rede um maior valor de potência reativa durante afundamentos de tensão (3). Para minimizar tais riscos, foi estabelecida pela CHESF uma rotina de corte seletivo de carga, visando aliviar o carregamento dos CE e afastando o sistema de transmissão da região de colapso de tensão. Além disso, estabeleceu-se uma

margem de segurança de 10Mvar para os CE Fortaleza e Milagres, devendo o corte seletivo de carga iniciar-se quando os mesmos atingissem, respectivamente, 190 e 90Mvar capacitivos.

Considerando que um corte de carga, mesmo seletivo, representa grandes prejuízos para o consumidor e o supridor, buscou-se eliminar tal possibilidade através da expansão dos limites nominais capacitivos dos CE Fortaleza e Milagres.

4.0 – CAPACIDADE DE SOBRECARGA DOS CE

4.1 CE Fortaleza

Estudos de regime permanente indicam que o limite atual de transmissão do subsistema Norte é da ordem de 1275MW, nas condições de carregamento dos CE definidas no item anterior. Os referidos estudos mostram que considerando o carregamento do CE Milagres limitado em 100Mvar capacitivos, cada 10Mvar de carregamento adicional no CE Fortaleza implica em um acréscimo de 20MW no limite de transmissão do subsistema Norte e de 15MW na carga suprida.

As condições contratuais de aquisição do CE Fortaleza estipulam que este equipamento deve ser capaz de operar continuamente fornecendo ao barramento de 230kV uma potência reativa de 200Mvar capacitivos, para temperatura ambiente de 40°C, tap fixo do transformador abaixador na posição nominal (230kV), sem a operação de equipamentos redundantes e reservas de qualquer natureza, com a tensão de 230kV da SE Fortaleza situada em qualquer ponto no interior do intervalo 230kV±5%. As tensões e correntes nos diversos equipamentos do CE Fortaleza para as tensões limites da faixa de tensão contratual são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1

V ₁ (kV)	α (°)	V ₂ (kV)	I ₁ (A)	2I ₂ (A)	I _C (A)	Q _C (Mvar)
218,5	170,8	28,66	528,5	2337,4	2327,2	115,5
241,5	149,0	30,88	478,1	2114,8	2507,8	134,1

Onde:

V₁ é a tensão primária do CE

V₂ é a tensão secundária do CE

α é o ângulo de disparo dos RCT

I₁ é a corrente primária do CE

I₂ é a corrente secundária em cada seção do CE

I_C é a corrente em cada um dos bancos de capacitores do CE

Q_C é a potência reativa gerada por cada um dos bancos de capacitores do CE

Esta simbologia é utilizada nas demais tabelas apresentadas ao longo deste informe técnico.

Os valores nominais de placa dos equipamentos componentes do CE Fortaleza são listados a seguir.

- Banco de capacitores: potência nominal de 139,44Mvar, corrente nominal de 2556A, tensão nominal de 31,5kV.
- Válvula de tiristores: tensão nominal de 31,5kV
- Transformador abaixador: correntes nominais de 502A (230kV), 2220A (26kV-Y) e 1282A (26kV-Δ), com tap nominal.

Através da Tabela 1, observa-se que as máximas correntes permitidas no transformador pelas condições contratuais são 5,28% superiores aos valores de placa deste equipamento. Entretanto, durante o ensaio de aquecimento do referido transformador realizado em fábrica, foi utilizada uma corrente de 529A e obtidas elevações de temperatura cerca de 15°C inferiores aos limites especificados, o que sugere a existência neste equipamento de uma margem de sobrecarga.

A Tabela 2 apresenta os valores das grandezas do CE Fortaleza calculados para um ângulo de disparo máximo de 165° nos reatores controlados a tiristores e tap nominal (230kV) no transformador abaixador. O ângulo de 165° foi definido considerando-se uma margem de segurança de 5° aplicada ao valor máximo de 170° garantido pelo fabricante.

Para os cálculos apresentados na Tabela 2, foram considerados os seguintes valores de base:

- Transformador abaixador: corrente primária de 528,5A e corrente secundária de 2337,2A.
- Tensão secundária: 31,5kV
- Bancos de capacitores: potência nominal de 139,4Mvar e corrente nominal de 2556A.

Conforme mostrado na Tabela 2, uma sobrecarga de 7,59% no transformador abaixador permite a operação do CE Fortaleza com carregamentos na faixa capacitiva de até 237,84Mvar (ganho de 18,92% sobre o limite original de 200Mvar). A operação do CE Fortaleza com os carregamentos apresentados na Tabela 2 durante o período de carga máxima (cerca de

30 minutos diários, de segunda a sexta-feira) produzirá ganhos de cerca de 50MW na demanda

TABELA 2

V ₁ (kV)	Q ₁ (Mvar)	I ₁ , I ₂ (%)	Q _C (%)	I _C (%)	V ₂ (%)
230	215,73	102,46	91,11	95,49	95,41
231	217,61	102,91	91,90	95,90	95,82
232	219,50	103,35	92,70	96,32	96,23
233	221,40	103,80	93,50	96,74	96,65
234	223,30	104,24	94,31	97,15	97,06
235	225,21	104,60	95,12	97,57	97,48
236	227,13	105,15	95,93	97,98	97,89
237	229,06	105,58	96,74	98,40	98,31
238	231,00	106,04	97,56	98,81	98,72
239	232,94	106,47	98,38	99,23	99,14
240	234,90	106,93	99,20	99,64	99,55
241,5	237,84	107,59	100,45	100,27	100,17

limite do subsistema Norte da CHESF, ou de 38MW na carga suprida. Isto corresponde a 50% dos ganhos obtidos com a expansão do feixe das linhas de transmissão Paulo Afonso / Milagres / Banabuiú / Fortaleza (2) ou 40% daqueles obtidos com a instalação de bancos de capacitores 230kV/50,5Mvar nos subsistemas Norte e Oeste, sem que seja necessário nenhum investimento adicional.

Para avaliar de forma conservadora os efeitos dos carregamentos da Tabela 2 sobre o transformador abaixador, foi tomado como base um ciclo de carregamento de 50% da sua capacidade nominal durante toda a jornada diária e temperatura ambiente de 40°C, com exceção do período de ponta, com duração estimada em 60min, onde foi considerado o carregamento máximo indicado na Tabela 2.

Estudos realizados com base em tais premissas indicaram como desprezível a redução de vida útil do transformador elevador decorrente da aplicação do citado carregamento.

Foi também efetuada análise dos efeitos da aplicação dos carregamentos máximos da Tabela 2 nos demais equipamentos que compõem o CE Fortaleza, com destaque para os seguintes:

- Disjuntores de alta e baixa tensão
- Chaves seccionadoras e barramentos de 26kV
- Bancos de capacitores

- Pára-raios fase-fase no secundário do transformador abaixador
- TP e TC de 26kV

Considerando que tais equipamentos foram especificados para tensão nominal de 36kV e que a máxima tensão aplicada sobre os mesmos na pior condição considerada é de 31,55kV, a operação dos mesmos foi considerada segura.

Quanto aos transformadores de aterramento das seções de 26kV, foi efetuada consulta ao fabricante, uma vez que a tensão nominal indicada na placa destes equipamentos é 26kV. A operação dos referidos equipamentos nas condições da Tabela 2 foi autorizada pelo fabricante.

Além disso, foi necessário efetuar a substituição dos medidores de potência reativa injetada no 230kV e dos transdutores associados. Quanto aos sistemas de proteção, não foi necessário efetuar qualquer adequação.

4.2 CE Milagres

As condições contratuais de aquisição do CE Milagres estipulam que o mesmo deve ser capaz de operar continuamente fornecendo ao barramento de 230kV uma potência reativa de 100Mvar capacitivos, para temperatura ambiente de 40°C, tap fixo do transformador abaixador na posição nominal (230kV), sem a operação de equipamentos redundantes e reservas de qualquer natureza, com a tensão de 230kV da SE Milagres situada em qualquer valor no intervalo 230kV±5%. As tensões e correntes nos diversos equipamentos do CE Milagres nestas condições são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3

V ₁ (kV)	α (°)	V ₂ (kV)	I ₁ (A)	2I ₂ (A)	I _C (A)	Q _C (Mvar)
218,5	160,6	13,63	264,2	2470,5	2554,7	60,32
241,5	144,7	14,68	239,1	2235,2	2750,5	69,92

A Tabela 4 apresenta os valores das grandezas do CE Milagres calculados em função da tensão do 230kV, para um ângulo de disparo máximo de 160° nos reatores controlados a tiristores e tap nominal (230kV) no transformador abaixador.

Utilizando-se metodologia similar àquela empregada para o CE Fortaleza e considerando, por razões similares às do CE Fortaleza, um ângulo de disparo máximo de 160°, tem-se para o CE Milagres os valores máximos de carregamento indicados na Tabela 4.

TABELA 4

V ₁ (kV)	V ₂ (kV)	Q ₁ (Mvar)	Q _c (Mvar)	I ₁ (A)	I _c (A)
240,0	14,97	120,23	72,70	289,2	2804,7
241,5	15,06	121,74	73,61	291,0	2822,3

Considerando que os equipamentos de baixa tensão do CE Milagres foram especificados para tensão nominal de 15kV, optou-se por utilizar a potência reativa capacitiva máxima de 120,23Mvar, o que significa uma maior margem de segurança quanto à integridade dos mesmos. Além disso, análise similar àquela efetuada para o CE Fortaleza indicou que tais valores podem ser utilizados sem que isto implique em risco de danificação ou perda de vida útil para qualquer dos equipamentos envolvidos.

De maneira similar ao CE Fortaleza, foi efetuada a substituição dos medidores de potência reativa injetada no 230kV e dos transdutores associados. Não foi necessário efetuar qualquer adequação nos sistemas de proteção do CE Milagres.

4.3 Sistema de Controle dos CE

Os CE Fortaleza e Milagres possuem nos seus sistemas de controle esquemas de limitação dinâmica de potência reativa capacitiva e tensão secundária (1). O primeiro destina-se à proteção do transformador abaixador, enquanto que o segundo destina-se a proteger os bancos de capacitores contra sobretensões. Adequações foram efetuadas nos ajustes dos referidos limitadores, considerando os valores de tensão e potência reativa capacitiva da Tabela 5, de forma a permitir a operação dos referidos equipamentos com os seus limites capacitivos expandidos.

TABELA 5

CE	Q ₁ (Mvar)	Q ₂ (Mvar)	V ₂ (kV)
FTZ	237,84	274,86	31,55
MLG	120,23	140,19	14,97

4.0 – ENSAIOS DE CAMPO

Foram realizados ensaios de campo para ratificar as conclusões dos estudos realizados e liberar para operação comercial os novos limites capacitivos dos CE Milagres e Fortaleza. Os ensaios consistiram em levar os compensadores, operando em manual, aos seus máximos limites capacitivos, onde permaneceram

operando por um período máximo de 60min. Durante os ensaios, foram efetuadas medições de termovisão nos barramentos de baixa tensão de ambos os compensadores e nenhuma anormalidade foi detetada.

Os valores máximos para o limites capacitivos dos CE Fortaleza e Milagres obtidos durante os ensaios são indicados na Tabela 6.

TABELA 6

CE	Q ₁ (Mvar)	V ₁ (kV)	α (°)
Fortaleza	220,0	235,0	165,0
Milagres	113,2	237,0	168,6

Por restrições do controle de tensão do subsistema Norte da CHESF nos horários de realização dos ensaios, optou-se por não operar com tensões superiores às indicadas na Tabela 6 durante os mesmos, realizados em condições de carga mínima. Entretanto, em condições de carga pesada, tem-se tensões da ordem de 238kV nas SE Fortaleza e Milagres. Com este valor de tensão e os ângulos de disparo atingidos durante os ensaios, são obtidos valores de potência reativa capacitiva de 224,0Mvar para o CE Fortaleza e 114,0Mvar para o CE Milagres.

As diferenças entre os valores calculados durante os estudos e os obtidos nos ensaios de campo devem-se às tolerâncias dos equipamentos que compõem os CE e à imprecisão do segmento final da curva de linearização dos reguladores de tensão destes equipamentos.

5.0 – CONCLUSÕES

Após a realização dos trabalhos descritos neste informe técnico, foi autorizada a operação comercial dos CE Fortaleza e Milagres com seus limites potência reativa capacitiva expandidos para, respectivamente, 224,0 e 114,0Mvar, por um período máximo de 60min diários, reduzindo significativamente os riscos de corte de carga no subsistema Norte da CHESF durante os períodos de carga máxima.

Finalmente, considerando o valor estimado de US\$ 75/kVar, a capacidade de sobrecarga adicional obtida para os compensadores representa, em termos econômicos, um ganho de US\$ 1.800.000,00 para o CE Fortaleza e de US\$ 1.050.000,00 para o CE Milagres, sem qualquer investimento adicional, além de não implicar em risco de danificação nem perda de vida útil para qualquer dos equipamentos envolvidos.

6.0 - REFERÊNCIAS

(1) A. N. VASCONCELOS, A. J. P. RAMOS, J. S. MONTEIRO, M. CORREIA LIMA, H. D. SILVA, L.

R. LINS. Detailed Modeling of an Actual Static Var Compensator For Electromagnetic Transient Studies; IEEE Transactions on Power Systems, pp. 11-19, Volume 7, Number 1, February 1992.

(2) REGIS, O. Jr. et alli. Elevação dos Limites de Transmissão de Circuitos em 230kV Através do Conceito de Feixe Expandido; CIGRÉ Brasil, Anais do XIII SNPTEE, Camboriú, Brasil, Outubro de 1995.

(3) MANFREDO C. LIMA, ANTONIO R. F. FREIRE, UGENILSON TRIGUEIRO. Power Quality Problems in Heavily Loaded Radial Systems with Multiple Static Var Compensators, Expanded Bundle Transmission Lines and Dynamic Active Loads, Proceedings of 8th International Conference of Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece October, 1998.