



XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 KV

| | | |
|--|--|--|
| Massayuki Suzuki | Dirceu José Ferreira | Josué de Camargo |
| Companhia Piratininga de Força e Luz | Companhia Piratininga de Força e Luz | Expertise Engenharia Ltda |
| msuzuki@cpfl.com.br | djferreira@cpfl.com.br | josue@expertise-eng.com.br |

| | | |
|--|--|--|
| Wilson Martins Borges | Geraldo Peres Caixeta | |
| Expertise Engenharia Ltda | Expertise Engenharia Ltda | |
| wilson@expertise-eng.com.br | g.caixeta@ieee.org | |

Palavras-chave

Banco de Capacitor Série
Capacitor Série
Compensador o Série Modularizado
Regulação de Tensão
Ressonância Subsíncrona

Resumo

O trabalho apresenta o Compensador Série Modularizado – CSM, desenvolvido em um projeto de P&D da CPFL, através de dois protótipos distintos, um aplicando tecnologia com capacitor sobredimensionado, que foi aplicado em um sistema de 13,8 KV, e outro aplicando tecnologia de proteção dos capacitores utilizando varistores de óxido de zinco. O primeiro protótipo resolveu um problema grave de partida de grandes motores, mas teve um trabalho adicional de redimensionamento da reatância capacitiva em virtude da ocorrência de ressonância subsíncrona. O segundo resolveu um problema de regulação de tensão em um alimentador rural e possibilitou o adiamento de investimentos em obras para regulação de tensão por um período estimado de sete anos. Como resultado a CPFL vislumbra um padrão do Compensador Série Modularizado como material de estoque, com custo definido da instalação, o que permite considerar a compensação série como alternativa técnica e econômica para as obras de expansão e melhorias. O padrão permitirá reaproveitar os equipamentos em diversos pontos do sistema elétrico, viabilizando a aplicação da compensação série em maior escala.

1. Introdução

Apesar da aplicação da compensação série na distribuição já ser conhecida há bastante tempo, aliadas às dimensões continentais do Brasil que favorece sua aplicação^{1-2 e 6} a falta de padrões para sua aplicação não permitiu sua viabilização em larga escala, tendo-se apenas alguns

registros de poucas instalações, onde a CPFL se destaca como pioneira. Assim mesmo, cada caso foi tratado de forma customizada, utilizando unidades capacitivas e estruturas totalmente diferentes. Isto fez com que não fosse possível estabelecer um custo da aplicação, inviabilizando as análises frente às demais alternativas para regulação de tensão. Também os poucos estudos e artigos relacionados a distúrbios devido à compensação série, como por exemplo, a Ressonância Subsíncrona, dificultava a tomada de decisão quanto a sua aplicação. Concernentes a estes fatos, o PD-96 NOVO SISTEMA DE COMPENSAÇÃO REATIVA - COMPENSADOR SÉRIE MODULAR acabou sendo um projeto muito rico, pois permitiu a aplicação de dois tipos de padrões diferentes, com capacitor sobredimensionado e com capacitor protegido por varistor de óxido de zinco, com análises econômicas e técnicas para dois sistemas bastante diferentes (13,8 e 23,1 KV). O desenvolvimento do PD-96 é descrito a seguir, apontando a aplicação dos dois protótipos, considerando simulação, análises técnicas e econômicas, especificação, instalação, testes e avaliação do desempenho.

2. Desenvolvimento

2.1. CSM- Compensador Série Modularizado

O PD-96 buscou desenvolver um padrão de compensação série modular, formado por módulos que pudessem se agregar, obtendo uma reatância capacitiva equivalente, conforme valor pré-definido para o ponto escolhido para instalação. O CSM é composto por dois conjuntos de equipamentos:

1- Conjunto de equipamentos que varia em função do ponto de instalação, que está relacionado com a reatância capacitiva do CSM, constituído por:

- Capacitores sobredimensionados para suportar a corrente de curto circuito máxima por um período de 500 ms, que dispensam o uso de varistores, ou capacitores comuns com proteção por varistores de óxido de zinco.

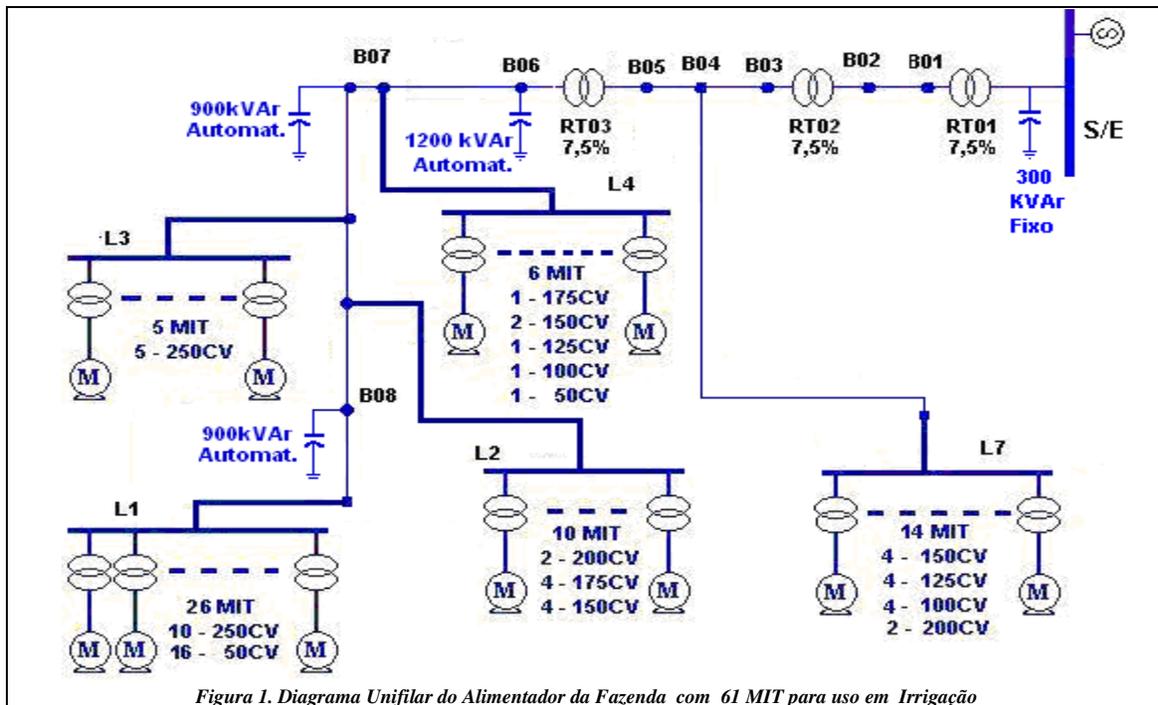
2- Conjunto de Equipamentos que não depende do ponto de Instalação composta por:

- 3 Chaves de by-pass (ou de isolamento): tem a função de colocar e retirar o CSM de serviço por longos períodos de tempo (manutenção);
- 1 RACK: tem a função de sustentação do CSM;
- 3 chaves a vácuo que tem a função de colocar em by-pass temporariamente os capacitores;
- Varistores;
- 3 reatores de amortecimento que tem a função de limitar a corrente de descarga dos capacitores;
- 2 jogos de pará-raios que tem a função de proteger os componentes do CSM contra descarga atmosférica;
- Um Painel de Comando e Proteção que tem a função de comandar a abertura e o fechamento da chave a vácuo;
- Um transformador de distribuição trifásico de 15 kVA, que tem a função de alimentar o painel de comando, controle e proteção e fornecer a tensão a ser monitorada pelo referido painel.

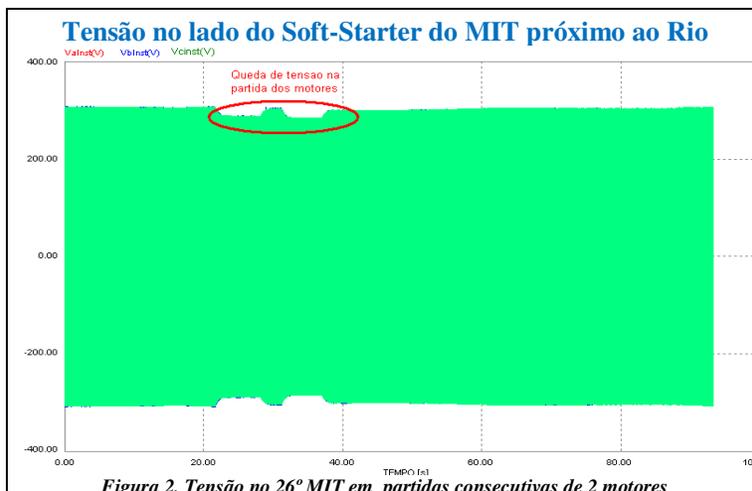
2.2. CSM- 01 Protótipo instalado no sistema de 13,8 KV

O alimentador COB-07 alimenta parte de uma fazenda de plantação de laranja, sendo esta considerada com sendo uma das maiores do mundo. A bitola do cabo deste alimentador é 477 MCM, e as cargas principais são 61 Motores Trifásicos de Indução (MIT), localizadas a mais de 20 km da subestação. A maioria destes MIT possui dispositivos de partida por Soft-Starter, que permanecem ligados após partida dos mesmos, funcionando como controladores da

tensão. Com isto, quando a partida de algum MIT provocava uma queda de tensão maior do que 10% no alimentador, a proteção da chave Soft-Starter operava, chegando a desligar quase todos os demais MIT que estavam em funcionamento. Este tipo de operação fazia com que a configuração anterior de equipamentos corretivos, formada por dois bancos de reguladores de tensão fechados em delta e quatro bancos de capacitores em derivação, não fossem suficientes para manter a estabilidade de tensão, permitindo a entrada em operação de apenas dos primeiros 40 MIT, prejudicando o consumidor e a CPFL. O diagrama unifilar da Figura 1 apresenta os pontos L1-L2-L3- L4 e L7, onde estão instalados os motores, além dos bancos de reguladores de tensão e dos bancos de capacitores.



No intuito de verificar o valor da queda de tensão proporcionada na partida dos motores, foi efetuada uma medição da forma de onda da tensão de alimentação no lado fonte do Soft-Starter do 26° MIT, de 250 CV e instalado no ponto de carga L1, durante a partida consecutiva de outros 2 motores. A Figura 2 apresenta o resultado da medição.



Pela Figura 2, a queda de tensão registrada no 26° MIT foi de 8%, mostrando a possibilidade da partida do 41° provocar uma queda de tensão superior a 10% e conseqüente desligamento em cascata dos demais motores. Visando avaliar a situação foram efetuadas simulações da partida do 41° MIT utilizando o software ATP, segundo a ordem de operação dos motores.

A Figura 3 apresenta o resultado da simulação, mostrando a forma de onda da tensão de alimentação em um dos motores na extremidade da linha, próximo ao Rio Grande, de onde é extraída a água para a irrigação, durante a partida do 41º MIT, confirmando a elevada queda de tensão.

Pela Figura 3, o valor de pico da tensão de fase durante a partida do 41º MIT, no motor próximo ao rio foi de 260,8 [V], correspondendo a 84% da tensão nominal, sendo um indicativo de que a proteção das chaves Soft-Starter dos motores irá atuar desligando os motores. Visando eliminar o problema apresentado foi definido que o CSM-01 seria instalado no COB-07.

Para definição do ponto e instalação e o valor da reatância capacitiva do CSM-01 foram feitas simulações para as condições do sistema em regime permanente considerando fora de serviço: os reguladores de tensão (exceto o RT1) e os bancos de capacitores, visando garantir níveis adequados de tensão, conforme determina a ANEEL.

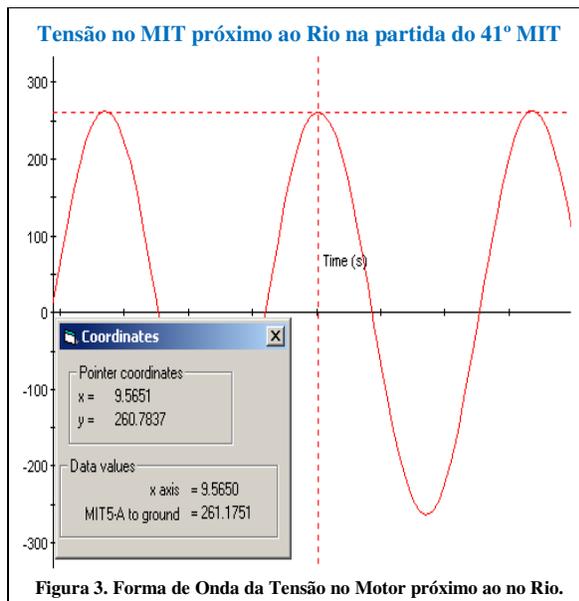


Figura 3. Forma de Onda da Tensão no Motor próximo ao no Rio.

Para resolver o problema de regulação de tensão foi escolhido um ponto a 20,2 km da S/E, onde o valor da reatância indutiva era de 8,8 Ω , e definido o valor da reatância capacitiva de 14,4 Ω . Portanto no ponto haveria uma sobrecompensação de 164%. A Figura 4 mostra o diagrama unifilar da região do alimentador COB-07 com a indicação do ponto de instalação do CSM-01 e a Figura 5 o resultado da simulação do perfil da tensão ao longo do alimentador.

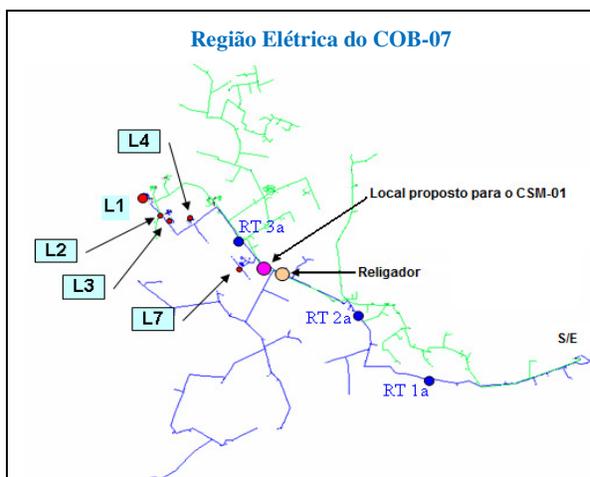


Figura 4. Alimentador COB-07 e local da instalação do CSM-01

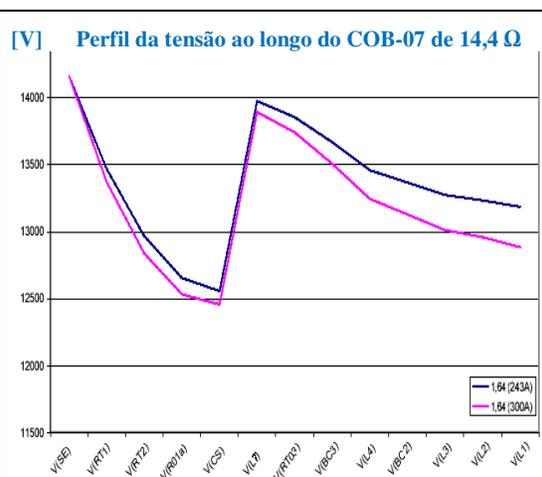


Figura 5. Perfil da Tensão ao longo do Alimentador COB-07

Para definição do tipo de CSM com uma reatância capacitiva de 14,4 Ω e uma corrente de curto circuito máxima de 2.146 A foram feitas análises econômicas considerando duas configurações: 1- capacitor sobredimensionado de forma a suportar o curto-circuito máximo durante 500ms; 2- capacitor normal protegido por varistores de óxido de zinco. O resultado das análises apontou como sendo mais vantajosa a configuração nº. 1. Em virtude da necessidade da operação dos motores da Fazenda, foi elaborada uma versão inicial do CSM-01, mostrada na Figura 6.

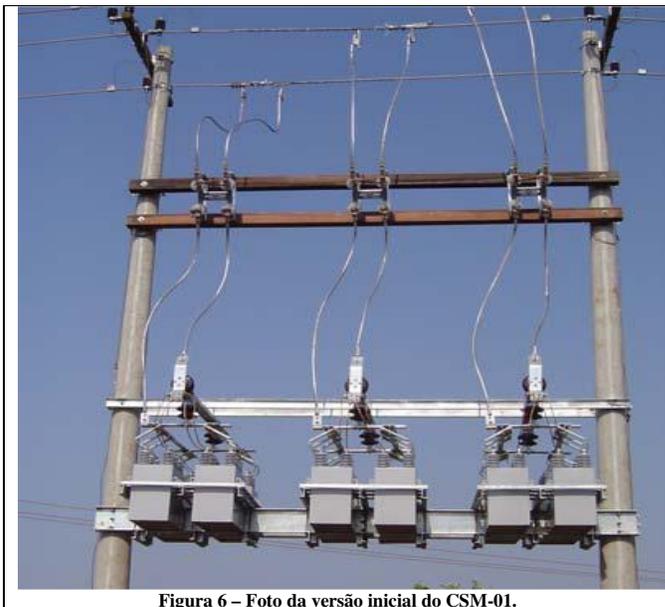


Figura 6 – Foto da versão inicial do CSM-01.

Pela Figura 6, a versão inicial do CSM-01, foi composta por: capacitor sobredimensionado, chave by-pass e pára-raios, sendo a proteção efetuada apenas pelo religador instalado a montante.

A energização do CSM-01 foi realizada sob condições normais de operação, não verificando quaisquer sinais de ferroressonância envolvendo os transformadores, e obtendo uma boa regulação de tensão. Após a energização do CSM-01, foram efetuados os acionamentos dos motores, de acordo com a seqüência normal de partida dos mesmos.

Durante a energização dos primeiros 19 motores, localizados no ponto de carga L1, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. A Figura 7 mostra o resultado do monitoramento da tensão no lado do Soft-Starter em um MIT de 250 CV, no ponto de carga L1 durante a partida consecutiva de outros dois motores, mostrando que realmente o CSM-01 elimina a queda de tensão durante a partida dos motores.

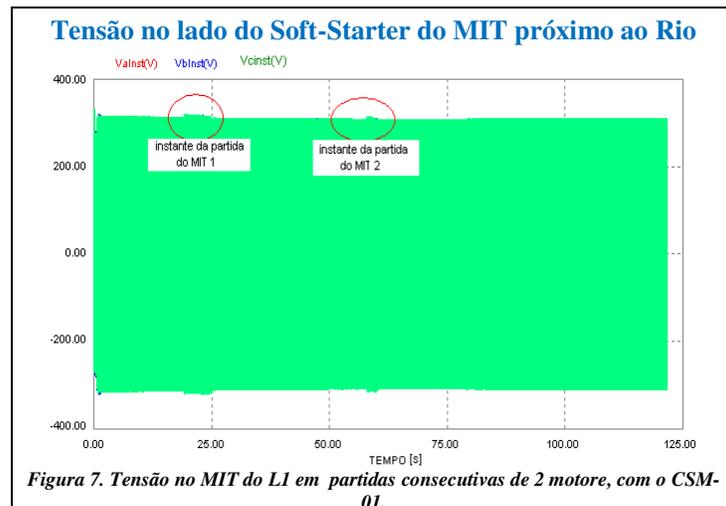


Figura 7. Tensão no MIT do L1 em partidas consecutivas de 2 motore, com o CSM-01.

Porém com a entrada do 20º e 21º motor de 250CV, localizados no ponto de carga L3, houve uma elevação significativa da corrente provocando a atuação do religador por sobrecorrente.

A Figura 8 mostra os resultados dos cinco testes realizados, mostrando as sobrecorrentes que ocorreram durante a partida do 20º ou 21º MIT. Os testes foram realizados com três seqüências diferentes de partida dos motores, mas em todas elas ocorreram sobrecorrentes quando do acionamento do 20º ou 21º MIT, que provocaram a atuação do religador.

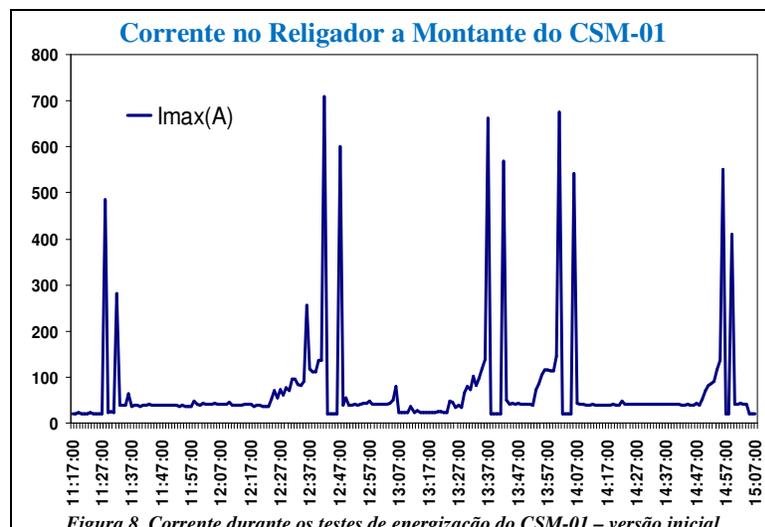
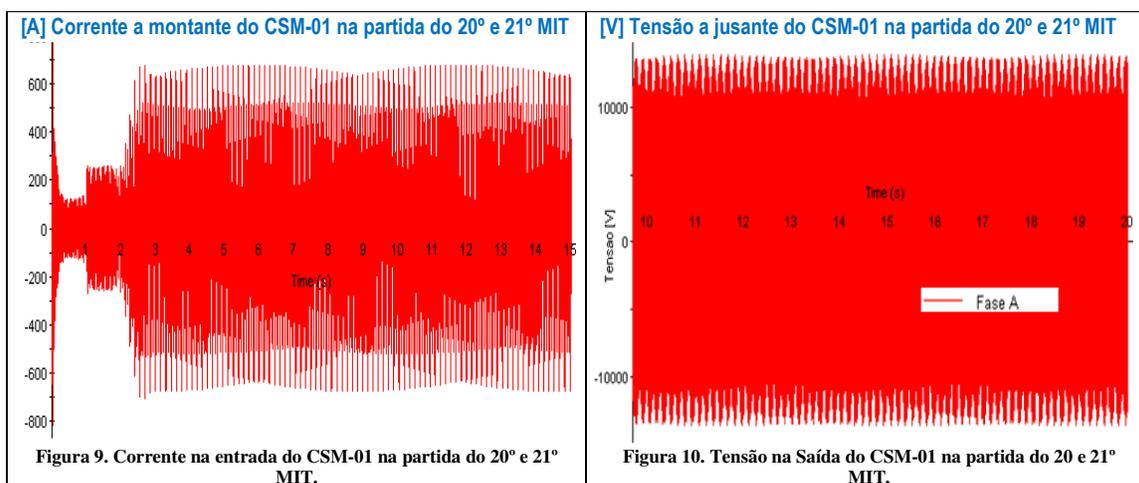


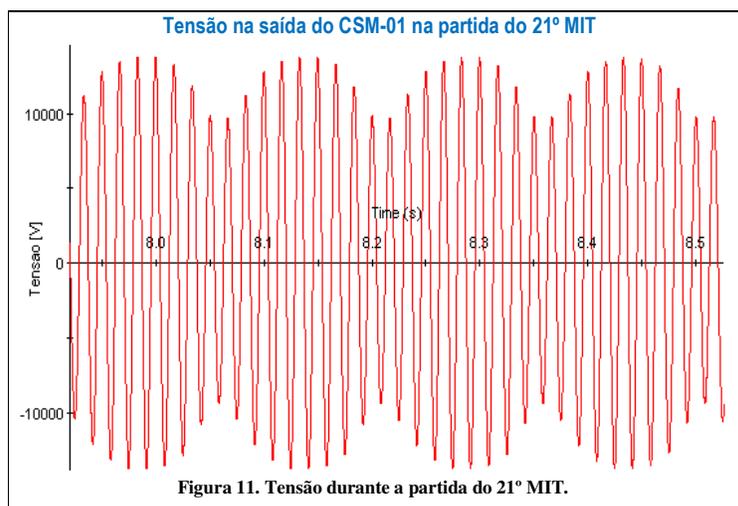
Figura 8. Corrente durante os testes de energização do CSM-01 – versão inicial

Após a realização destes testes o CSM-01 foi colocado em by-pass e o alimentador mudado para a sua configuração original.

Para avaliação dos problemas registrados foram efetuadas várias simulações, utilizando ATP, considerando a modelagem já utilizada, incluindo o sistema elétrico da CPFL, o alimentador, o CSM-01, o banco de regulador de tensão, o transformador com conexão Δ/Y , os bancos capacitores em derivação e os motores, obedecendo a seqüência normal de partida dos motores. Para ampliar o desempenho do ATP, visando permitir a simulação de um número maior de motores, foi utilizada uma metodologia de agregação de motores. As simulações iniciaram com o acionamento dos motores do ponto de carga L1 e em seguida do ponto de carga L2, até o 20º MIT, os resultados obtidos foram satisfatórios. Na simulação do acionamento do 21º MIT ocorreu a sobrecorrente registrada em campo. Como resultados a Figura 9 mostra a corrente a montante do CSM-01 e a Figura 10 mostra a tensão a jusante do CSM-01, durante o acionamento do 20º e 21º MIT.



A Figura 11, ao lado, mostra a forma de onda da tensão, durante a partida dos 21º MIT. Onde se vê claramente a ocorrência de uma Ressonância Sub-Síncrona - RSS^{7 e 8} provocada pela interação do sistema elétrico com o CSM-01, com o sistema mecânico dos motores, através de uma tensão modulada numa frequência abaixo da fundamental, que provocou as sobrecorrentes e as oscilações de tensão³⁻⁵.



Foram estudadas várias possibilidades para eliminar esta ressonância, sendo que a que se mostrou mais eficiente foi a redução do grau de compensação, que consistiu na inserção de mais unidades capacitivas instaladas em paralelo com as unidades existentes. A Figura 12 mostra os resultados da simulação com o grau de compensação (K) reduzido de 164 para 136,84%, obtido através da ampliação da quantidade de unidades capacitivas de 10 para 12, onde se vê que a RSS deixa de ocorrer

no 21° MIT e passa a ocorrer no 25° MIT. Já a Figura 13 mostra o resultado da simulação com o grau de compensação reduzido de 136,84% para 117,29%, quando desaparece a ocorrência da ressonância.

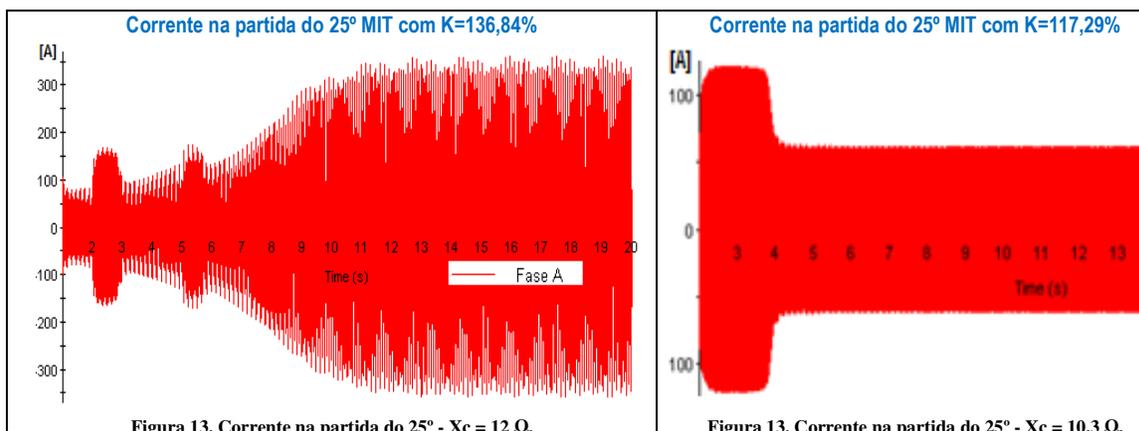


Figura 13. Corrente na partida do 25° - $X_c = 12 \Omega$.

Figura 13. Corrente na partida do 25° - $X_c = 10,3 \Omega$.

A Figura 14, ao lado, mostra a corrente na partida do 61° MIT, com $K = 117,29\%$. Este grau de compensação foi obtido para uma reatância capacitiva de $10,3 \Omega$, através da ampliação das unidades capacitivas para 15 por fase, no acionamento do 61° MIT, onde se vê que a RSS deixa de existir.

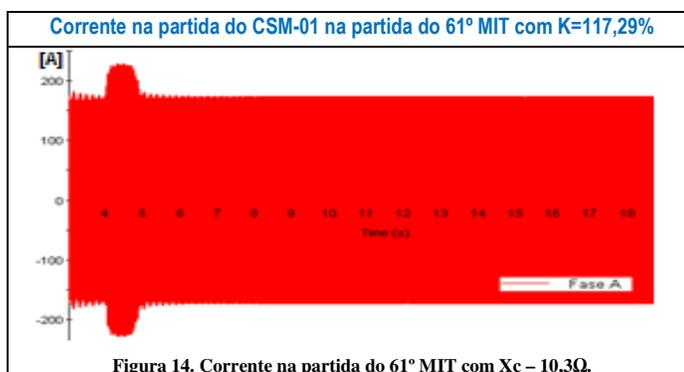


Figura 14. Corrente na partida do 61° MIT com $X_c = 10,3\Omega$.

Em função dos resultados da simulação o CSM-01 foi ampliado, passando de 10 para 15 unidades por fase. A Figura 15 mostra a Foto do CSM-01 na sua versão definitiva, composto por: capacitor, reator, chave a vácuo, chave by-pass, painel de comando e proteção e pára-raios. A Figura 16 mostra o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM-01, com os motores operando normalmente, ou seja, todos os motores funcionando.

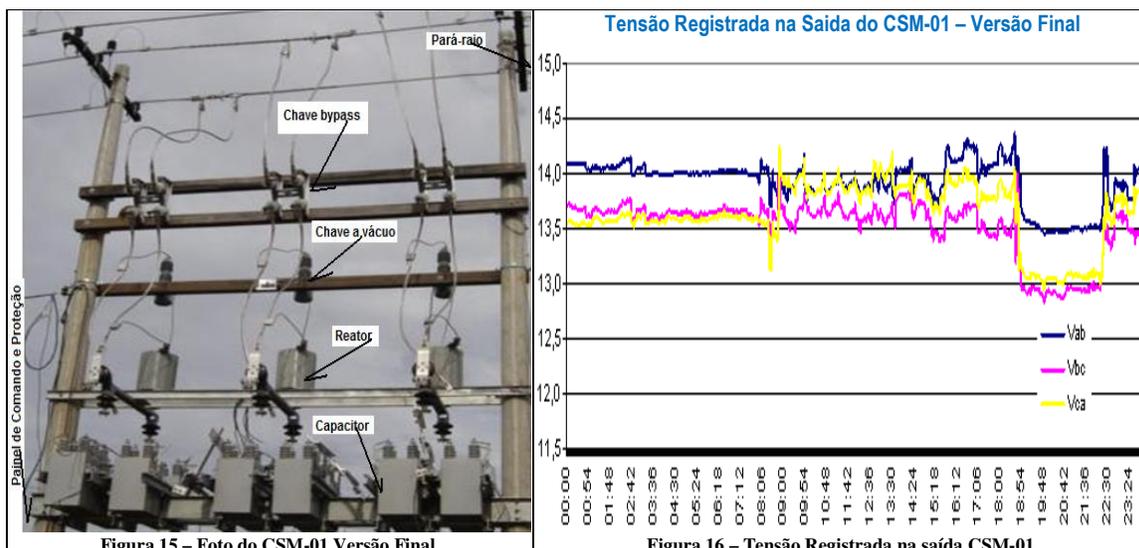


Figura 15 – Foto do CSM-01 Versão Final.

Figura 16 – Tensão Registrada na saída CSM-01.

2.2. CSM- 02 Protótipo instalado no sistema de 23,1 KV

O alimentador IBI-04 atende parte da zona rural do município de Ibiúna, em 23,1 KV. A Figura 17 mostra o resultado da simulação através do perfil da tensão ao longo do alimentador e a Figura 18 mostra a região elétrica deste alimentador. Pela simulação vê-se que o IBI-04 apresenta pontos com tensão de 20,64 kV, que representa 93% de 22 kV, que é a tensão de operação. Como este é o limite inferior da faixa considerada como tensão adequada, pelo nível de tensão, em termos de atendimento a novas cargas, o alimentador estava esgotado. Visando ampliar a capacidade de atendimento do alimentador, em termos de regulação de tensão, foi definido que o CSM-02 seria instalado neste alimentador.

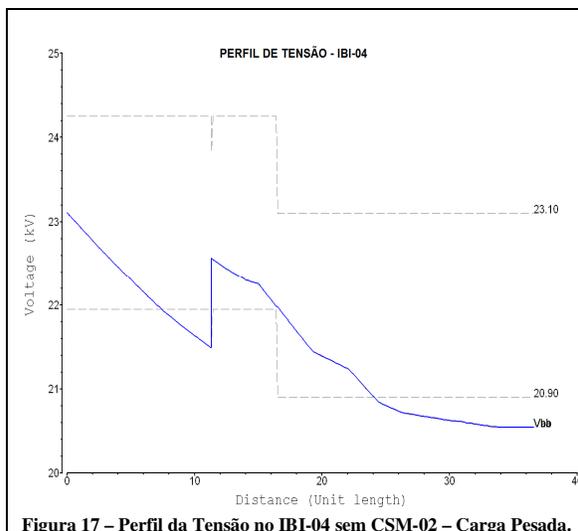


Figura 17 – Perfil da Tensão no IBI-04 sem CSM-02 – Carga Pesada.

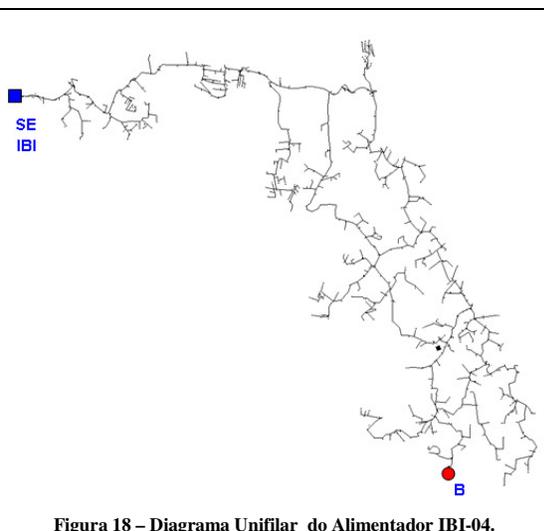


Figura 18 – Diagrama Unifilar do Alimentador IBI-04.

Para definição do ponto de instalação e do valor da reatância capacitiva do CSM-02 foram feitas algumas simulações utilizando o software ADEPT para as condições de regime permanente. Como resultado foi escolhido um ponto do alimentador, situado a 29,5 km da S/E, com uma reatância indutiva de $17,1 \Omega$ onde seria instalado o CSM-02. Considerando os dados da carga e do alimentador foi determinado o valor da reatância capacitiva do CSM-02 como sendo de $20,52 \Omega$, representando uma sobrecompensação de 120%. A Figura 19 mostra o resultado da simulação do perfil da tensão ao longo do alimentador, na carga pesada, com o CSM-02, tendo no ponto da instalação do CSM-02 uma corrente de 17,59 A e um Fator de Potência de 90% e a tensão no ponto B ficou em 0,95 pu. A Figura 20 mostra o diagrama unifilar indicando o ponto de instalação do CSM-02.

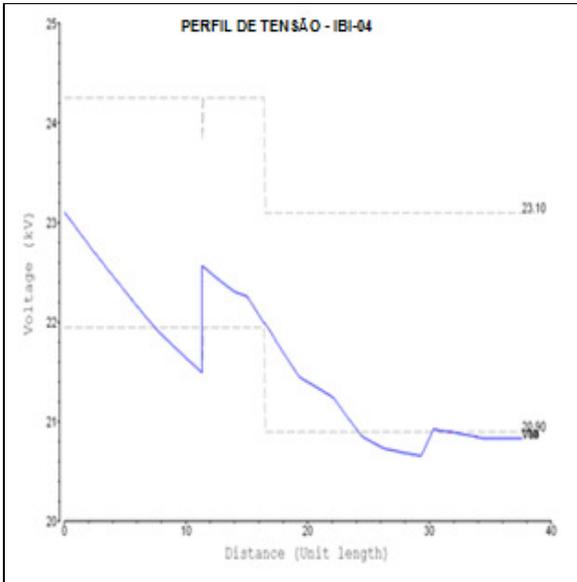


Figura19 – Perfil da Tensão no IBI-04 com CSM-02 – Carga Pesada.

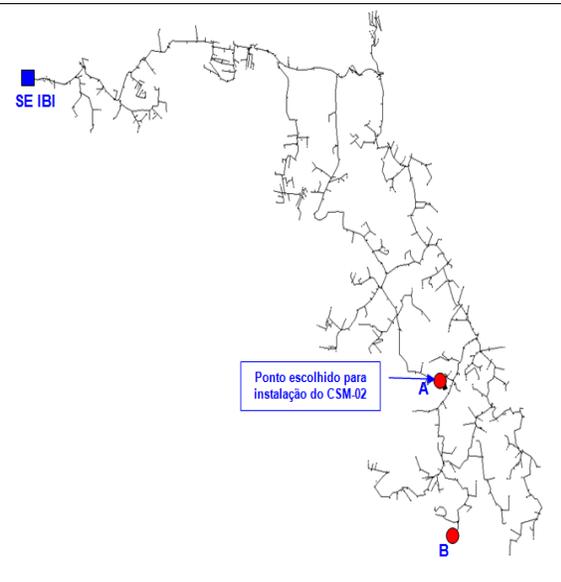


Figura 20 – Ponto da Instalação do CSM-02 .

A Figura 21 mostra o resultado da simulação do perfil da tensão ao longo do alimentador, sem o CSM-02, na carga leve, com uma corrente de 4,85 A e Fator de Potência de 89% no ponto de instalação do CSM-02 e com tensão no ponto B em 1,00 pu. E a Figura 22 o perfil de tensão com o CSM-02, com uma corrente de 4,84 A e Fator de Potência de 90%, no ponto de instalação do CSM-02, e a tensão no ponto B de 1,01 pu.

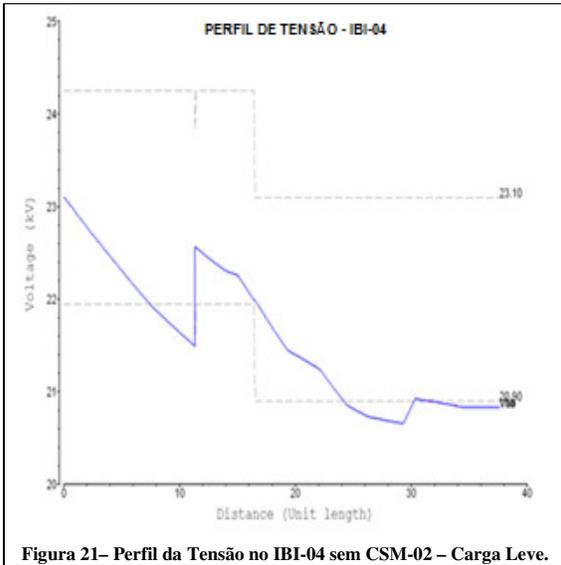


Figura 21– Perfil da Tensão no IBI-04 sem CSM-02 – Carga Leve.

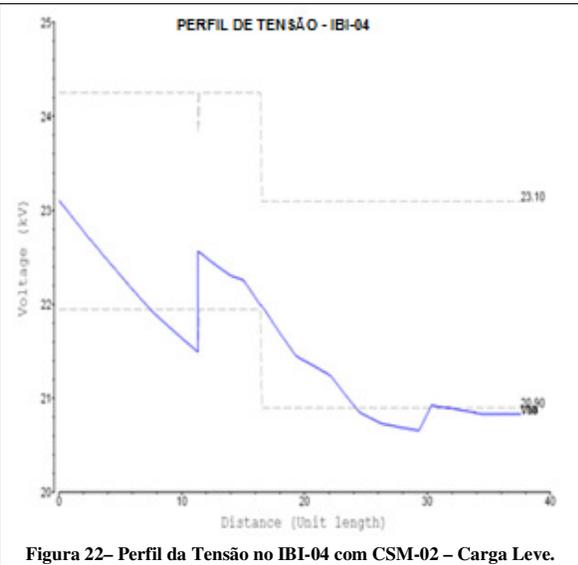
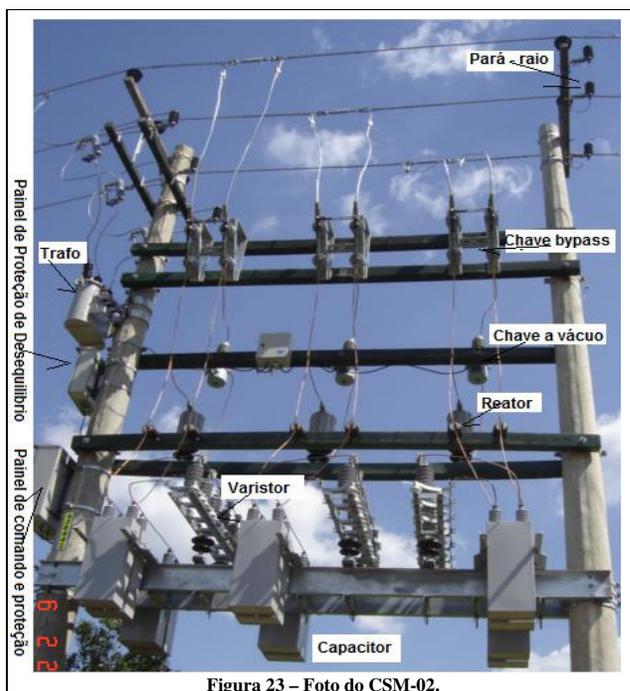


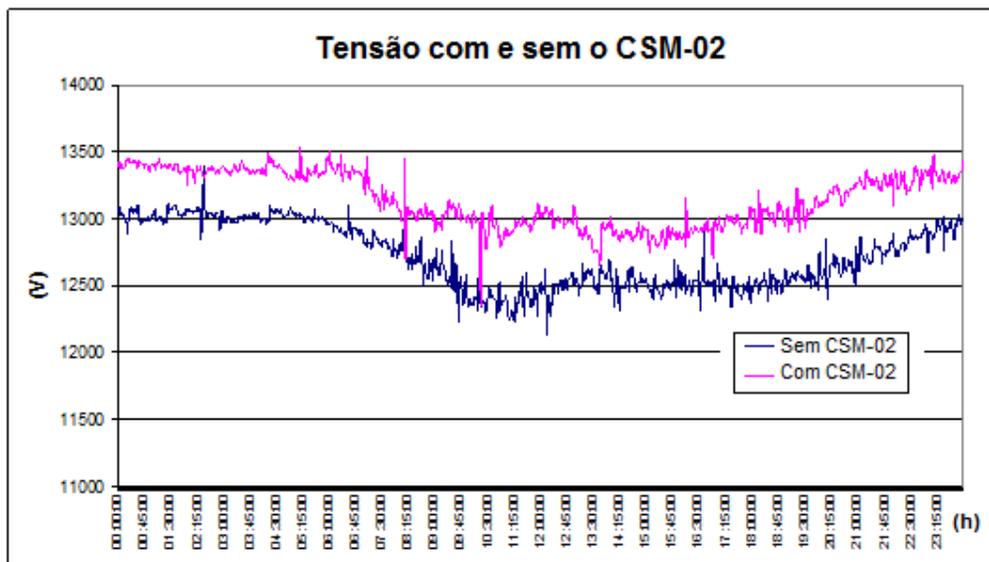
Figura 22– Perfil da Tensão no IBI-04 com CSM-02 – Carga Leve.



Para definição do tipo de CSM a ser utilizado no CSM-02, com reatância de $20,52 \Omega$ e uma corrente de curto circuito máxima de 640 A, foram feitas análises econômicas considerando as seguintes configurações: 1- capacitor dimensionado para suportar o curto-circuito máximo durante 500ms (sobredimensionado); 2- capacitor normal protegido por varistores de óxido de zinco. O resultado das análises apontou como sendo mais vantajosa a configuração nº 2.

A Figura 23, ao lado, mostra a Foto do CSM-02 na configuração composta por: capacitor normal, varistor de óxido de zinco, reator, chave a vácuo, chave by-pass, painel de comando e proteção, painel de proteção contra desequilíbrio de tensão, transformador e pára-raios.

A Figura 24 mostra o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM-02 em dois momentos: um com o banco desligado (22/02) e outro com o banco ligado (12/04). Ainda que a medição tenha sido em dias diferentes, apesar de ser num mesmo dia da semana (quarta-feira) o gráfico permite constatar o ganho de tensão obtido com a aplicação do CSM-02.



3. Conclusão

O protótipo do CSM-02 se mostrou mais adequado para a CPFL, em virtude do seu tamanho, e possibilidade de ser instalado em vias públicas, o que não seria possível com o protótipo do CSM-01, que foi instalado em uma fazenda. Em termos de aplicação, o CSM-01 possibilitou a partida dos 61 motores, quando no sistema de regulação convencional permitia a partida de apenas 40 motores. Já o CSM-02 permitirá um atendimento à carga da região onde foi instalado, até o ano de 2017. Apesar de esta região apresentar crescimento anual da ordem de 4,5%, a expectativa é que ainda em 2010 a

tensão fique abaixo de 0,93 pu. A ocorrência do efeito da ressonância subsíncrona serviu para limitar o grau de compensação, em regiões com áreas de grande concentração de motores, e mostrando a necessidade das análises de transitórios⁸.

Os bons resultados obtidos com a aplicação dos protótipos CSM-01 e CSM-02, protótipos do compensador série modular, mostraram que a CPFL pode dispor de uma nova tecnologia para ampliar a flexibilidade do seu sistema elétrico no atendimento de seus clientes, mantendo os padrões de qualidade do fornecimento, com menos investimento e com mais eficiência.

As duas tecnologias de compensador série modularizado utilizadas, ou seja, capacitor sobredimensionado, para o CSM-01, e capacitor normal protegido por varistores de óxido de zinco para o CSM-02, deverão ser agregadas em apenas uma única. Ou seja, o padrão da CPFL terá um capacitor normal que poderá ser utilizado no CSM até determinado nível de curto circuito a partir do qual será incrementada a proteção com varistor com óxido de zinco. Todos os equipamentos: capacitor, varistor, reator, chave a vácuo, painel de controle, e partes do suporte do CSM, são previamente definidos e dimensionados e farão parte do material normal de estoque. Com isto, a CPFL fará uso dos equipamentos em função do ponto onde os estudos indicaram como sendo o indicado para a instalação do CSM, bem como do valor de reatância que resolve o problema existente, podendo este ser regulação de tensão convencional, partida de motores, eliminação de flicker, etc¹⁻⁷.

4. Bibliografia

1 MARTINS, W.B., J. Camargo, M. Suzuki, D.J. Ferreira, e G.P. Caixeta. Aplicação de um Compensador de Reativos Série Modular numa Localidade Rural com Grande Concentração de Motores de Indução – XVII SENDI – Recife - 2008.

2 Marafão F. P; Camargo J; Zanetti E.R; Jr Souza R.A. “Capacitor Série como Alternativa de Investimentos para a Expansão da Distribuição” - XVI SENDI - Brasília - 2004.

3 OLIVEIRA, H.R.P.M., C.E.C. Figueiredo, N.C. de Jesus. Operação de Sistemas de Compensação Série em Alimentadores de Média Tensão. Eletricidade Moderna, outubro, 2004.

4 JESUS, N. C. de; Torres, A. O. ; Moor Neto, J. A. ; Oliveira, H. R. P. M. ; Figueiredo, C. E. C. ; Libano, F. B. ; Braga, Rodrigo A. M. . Considerações sobre Aplicação de Compensação Série em Sistemas de Distribuição Visando Melhorias na Qualidade de Energia. V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2003, Aracaju, 2003.

5 H. R. P. M. de Oliveira & C. E.C. Figueiredo & N.C. de Jesus "Resultados Obtidos na Operação de Sistemas de Compensação Série em Alimentadores de Média Tensão da AES Sul" XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI 2002.

6 Garcia, F. R. And Mello, G. S., "Compensação Série em Sistemas de Distribuição e Subtransmissão: Novas Tecnologias de Controle e Proteção". XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas-SP, 21 a 26 de outubro de 2001.

7 MISKE, S.A. Considerations for the Application of Series Capacitors to Radial Power Distribution Circuits. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April, 2001.

8 C.F. Wagner., "Self-excitation of Induction Motors with Series Capacitor Series Capacitor" AIEE Transactions, vol.60, 1941, pp.1241-1247.