



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GAT/31
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

Investigação sobre a eficácia da aplicação de “Fast Protective Devices” em Capacitores Série com fins de mitigar as TRTs impostas aos disjuntores de linha

José Geraldo B. M. de Andrade(*)
ABB

Carl Heyman
ABB

Christian Mendes
ABB

RESUMO

Sabe-se que o emprego de capacitores série em sistemas de transmissão de energia se constitui em uma alternativa consagrada para reforçar a capacidade de transmissão em linhas de transmissão longas uma vez que, além dos benefícios técnicos “naturais” à sua aplicação, a citar: o aumento nas margens de estabilidade de tensão e de estabilidade angular, divisão mais uniforme de corrente entre circuitos paralelos diferentes, aumento da capacidade de potência, ainda há os benefícios ambientais e econômicos auferidos ao se postergar, ou até mesmo eliminar, a adição de novas linhas de transmissão ao sistema elétrico. Por outro lado, a aplicação de capacitores série requer uma série de estudos na etapa de planejamento com o intuito de determinar desde características básicas, como: localização e grau de compensação destes dispositivos, até características técnicas bem mais específicas, como: corrente de sobrecarga admissível, capacidade nominal dos Varistores de Óxido Metálico (MOVs) empregados em cada uma das fases do banco série. A partir de tais informações, os fabricantes desenvolvem estudos mais detalhados com o intuito de definir a solução mais adequada para atender aos requisitos impostos pelo sistema elétrico. Neste contexto, este trabalho aborda uma das preocupações inerentes aos estudos desenvolvidos pelos usuários destes equipamentos: o aumento significativo da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) sobre os disjuntores presentes nas linhas de transmissão onde os capacitores série são instalados e os benefícios que podem ser alcançados a partir da aplicação de capacitores série equipados com os denominados “Dispositivos de Proteção Rápida” (*Fast Protective Devices* - *FPD*). Demonstra-se, a partir de simulações realizadas para um modelo em ATP da interligação Tucuruí-Manaus, que a magnitude das TRTs impostas aos disjuntores das linhas que possuem bancos série equipados com os *FPDs*, sob determinadas condições discutidas no presente trabalho, têm magnitude inferior quando comparadas aos respectivos cenários em que as linhas que possuem bancos série equipados com centelhadores tradicionais.

PALAVRAS-CHAVE

Tensão de Restabelecimento Transitória, Capacitores Série, *Fast Protective Devices*

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda de eletricidade impõe a necessidade de se desenvolver, em um ritmo compatível, a infraestrutura necessária para transmissão de energia. Por outro lado, sabe-se que sistemas de transmissão compostos por linhas longas requerem estudos detalhados com o objetivo garantir a manutenção da estabilidade angular e da estabilidade de tensão, mesmo quando estes se encontram sob condições de falta. No caso do SIN, tais afirmações são particularmente verdadeiras quando nos referimos aos níveis de tensão de 500kV, 525kV e 765kV uma vez que nestes se observa uma grande quantidade de potência transmitida através de linhas de transmissão tipicamente longas.

Uma abordagem tradicional para o planejamento da expansão do sistema transmissão consiste em simplesmente construir mais linhas com o intuito de interligar a geração de energia aos centros de carga. Entretanto nem sempre

esta é considerada a melhor abordagem uma vez que a construção de linhas longas e com grande capacidade de transmissão de energia exige: investimentos elevados, prazos longos para execução das obras e, geralmente, resultam em impactos ambientais consideráveis (de fato, nos últimos anos, as restrições ambientais têm, de certa forma, dificultado a obtenção das permissões necessárias para a realização de tais obras). Tal cenário incentiva abordagens focadas na utilização mais eficiente da infraestrutura existente no sistema de transmissão. O emprego de capacitores série em linhas de transmissão existentes se encaixa neste tipo de abordagem.

A aplicação bem sucedida de capacitores série em linhas de transmissão longas ao passar anos, inclusive em linhas de 765kV, já demonstrou sua eficiência para reforçar a capacidade de transmissão do sistema elétrico [6]. Sabe-se que o uso de capacitores série além de aumentar a capacidade de transmissão das linhas existentes ainda oferece outras vantagens como: a melhoria da estabilidade angular e da estabilidade de tensão do sistema elétrico [6]. Por outro lado, a existência de capacitores necessários para a realização de tais obras pode aumentar significativamente a amplitude da tensão transitória entre os pólos dos disjuntores que protegem a linha quando estes são solicitados a extinguir uma falta [1]. Tal tensão é conhecida na literatura como Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e é um dos principais aspectos, dentre outros, que deve ser observado durante a especificação destes disjuntores. Neste contexto, este trabalho analisa o impacto causado pela existência de capacitores série na linha sobre a TRT dos disjuntores e discute os benefícios que podem ser alcançados quando se substituem os centelhadores tradicionais (*Spark Gaps*) por dispositivos de proteção rápida (*Fast Protective Devices - FPDs*) no sistema de proteção dos bancos de capacitores série.

2.0 - ESQUEMAS EMPREGADOS PARA PROTEÇÃO DE BANCOS CAPACITORES SÉRIE

No passado existiam basicamente três esquemas para proteção de capacitores série para faltas na linha de transmissão [5,6]:

- a) Esquemas compostos por centelhador (*Spark Gap*), reator de amortecimento e chave de *bypass*;
- b) Esquemas compostos por varistor de óxido metálico (MOV), reator de amortecimento e chave de *bypass*;
- c) Esquemas compostos por válvula semicondutora, reator de amortecimento e chave de *bypass*.

Os dois primeiros esquemas possuem arranjos extremamente flexíveis que são definidos em função: dos requisitos de desempenho impostos pelo sistema em análise e com o objetivo de minimizar custos. Cada particular arranjo possui vantagens e desvantagens específicas.

Os esquemas de proteção que utilizam centelhadores (item a) começaram a ser empregados há mais de 50 anos. No início, os centelhadores tinham o seu desempenho determinado por sua tensão natural de *flashover* (tipo *self triggered*). Com o passar dos anos, estes se tornaram *forced triggered* (bastante utilizados em esquemas de proteção que utilizam MOVs) e, desta forma, passaram a funcionar como um tipo de chave extremamente rápida, capaz de curto-circuitar o banco de capacitores série bem antes que a chave de *bypass* em resposta a um sinal enviado por um relé de proteção encarregado de calcular a energia dissipada pelo MOV.

Os esquemas de proteção que utilizam MOVs (item b) começaram a ser empregados na década de 80 e apresentam desempenho excelente. Entretanto, podem apresentar custos elevados dependendo da quantidade de varistores exigidos pela aplicação. Conforme mencionado acima, é possível obter uma redução significativa de custos caso sejam empregados centelhadores do tipo *forced triggered* em conjunto com os MOVs no projeto do banco série.

Os esquemas de proteção que utilizam válvula semicondutora (item c) consistem em uma versão simplificada do capacitor série controlado. São geralmente mais complexos e caros se comparados aos esquemas que empregam uma combinação de varistores e centelhadores tipo *forced triggered*. São adequados em aplicações que impõem requisitos muito específicos para o ciclo de curto-circuito e para desempenho da proteção do banco de capacitores série [3].

Como alternativa aos esquemas supracitados, as referências [2] e [3] apresentam os denominados “Dispositivos de Proteção Rápida” (*Fast Protective Devices - FPD*) que são capazes de substituir os centelhadores nos esquemas de proteção supramencionados. Os FPDs basicamente são compostos por chaves extremamente rápidas e hermeticamente seladas. Mais especificamente são compostos por uma chave mecânica denominada (*Fast Contact - FC*) em paralelo com um “Injetor de Arco de Plasma” (*Arc Plasma Injector – API*) que, de forma simplificada, comportam-se como um centelhador cuja condução pode ser forçada através de um comando externo, mesmo em situações em que a tensão série sobre os terminais do banco de capacitores possui baixa magnitude. Desta forma, quando empregados em conjunto com os MOVs, possibilitam o *bypass* do banco com maior controle, ou seja, mesmo para cenários em que a tensão série sobre o banco de capacitores não seria suficiente para desencadear o *bypass* dos centelhadores tradicionais empregados nos esquemas de proteção. O FPD pode ser acionado uma determinada quantidade de vezes dentro de um mesmo ciclo de falta com o intuito de propiciar o *bypass* e a reinserção do capacitor série. Adicionalmente, o FPD também possui uma Unidade de Operação de Supervisão (*Operation and Supervision Unit - OSU*) que é composta por uma unidade de fornecimento de energia situada ao nível do solo, alimentadores que interligam a unidade de fornecimento de energia à plataforma onde os capacitores encontram-se instalados e um armário, situado na plataforma, contendo capacitores cuja função é armazenar energia com o intuito de garantir a atuação da chave *CapThor®* mesmo quando a magnitude da tensão série sobre seus terminais é baixa.

A figura 1 ilustra o esquema de proteção empregado em um banco série quando se substitui os centelhadores tradicionais pelo FPD. Pode-se verificar que, de forma similar às soluções tradicionais, o FPD requer um reator de

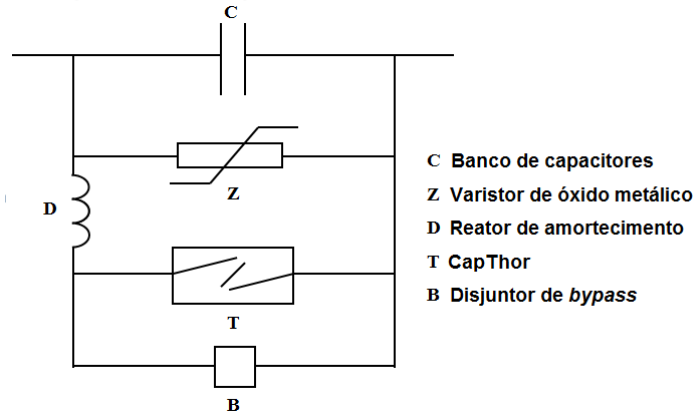


FIGURA 1 – Exemplo de esquema de proteção empregado em um capacitor série com FPD

A figura 2 ilustra uma fase da Unidade de Operação de Supervisão (OSU) empregada no esquema do FPD.

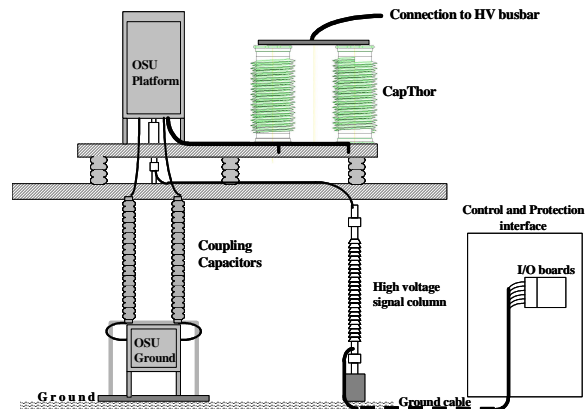


FIGURA 2 – Esquemático de uma fase da Unidade de Operação de Supervisão OSU empregada no FPD (CapThor)

Convém mencionar que o esquema FPD apresenta uma série de vantagens quando comparado com o esquemas de proteção baseados em centelhadores, a citar [3]:

- Compacta;
- Imune à interferências ambientais, uma vez que a chave CapThor é hermeticamente selada;
- *Bypass* do capacitor é possível para qualquer magnitude de tensão série sobre seus terminais;
- Tempo de atuação menor que os centelhadores tradicionais;
- Pode ser instalado em bancos série existentes para substituir os centelhadores tradicionais;
- Fácil de instalar;
- Não requer a manutenção requerida pelos centelhadores tradicionais;
- Possui mecanismo de auto supervisão.

3.0 - MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO TUCURUI-MACAPA-MANAUAS

Com o intuito de efetuar uma análise comparativa entre o esquema de proteção tradicional (empregando MOV e centelhadores) e o esquema de proteção baseado em FPDs (empregando MOV e chaves CapThor) modelou-se parte do sistema de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus no software ATP. Sabe-se que esta interligação compreende aproximadamente 1490km de linhas de transmissão de 500kV conectando a SE Tucuruí à SE Lechuga (em Manaus), compreendendo quatro subestações intermediárias, a citar: Xingu, Jurupari, Oriximiná e Silves. Trata-se de um sistema de transmissão em que as linhas encontram-se com elevado grau de compensação (somente para citar, as linhas de 500kV que interligam as subestações Jurupari, Oriximiná, Silves e Lechuga possuem 70% de compensação série) e sua entrada em operação está prevista para o segundo semestre de 2012. Inicialmente, terá uma capacidade de 1730MW com capacidade de expansão para 2530MW. A figura 3 ilustra um diagrama unifilar de parte do modelo concebido em ATP para as simulações.

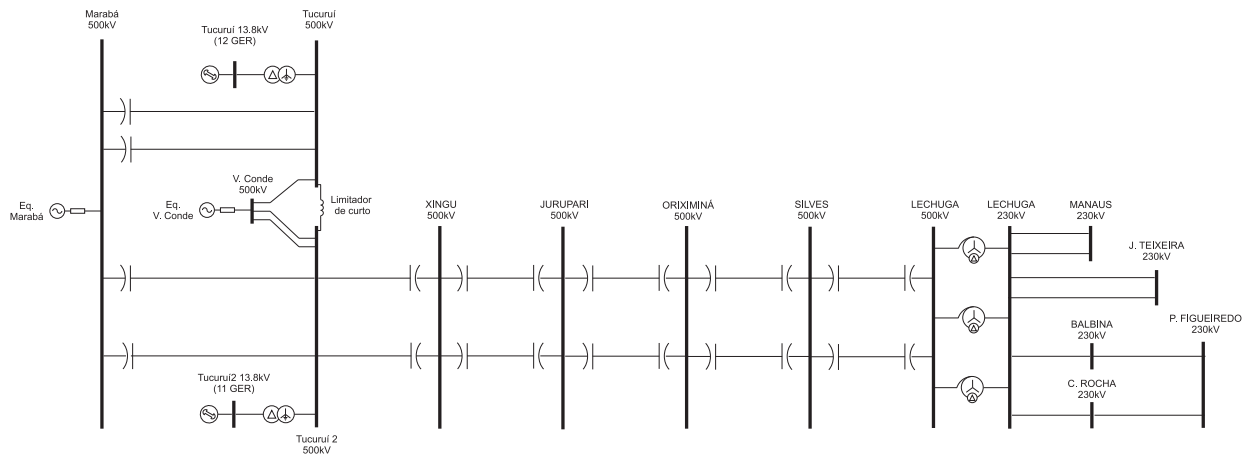


FIGURA 3 – Modelo em ATP do sistema de transmissão TUCURUI-MACAPÁ-MANAUS

Os parâmetros elétricos dos equipamentos foram extraídos das bases de dados oficiais do ONS e EPE. Convém esclarecer que, apesar do unifilar da figura 3 não conter qualquer menção à dispositivos como: reatores de linha, reatores de barra e compensadores estáticos, os mesmos encontram-se representados no modelo confeccionado em ATP. As informações relacionadas aos esquemas de proteção dos bancos série localizados nas linhas Oriximiná-Silves e Silves-Lechuga foram obtidas a partir da referência [4]. Para os bancos série situados nas demais linhas, utilizaram-se as mesmas premissas contidas em [4] para determinar a quantidade de MOV e os ajustes a serem empregados em seus esquemas de proteção.

O comportamento dos centelhadores, disjuntores de *bypass*, FPDs e disjuntores de linhas foram modelados em linguagem MODELS resumidamente da seguinte forma:

- os centelhadores foram modelados como chaves TACS, tipo 13, cujo fechamento depende da magnitude do valor de pico da tensão nos seus terminais (no caso considerou-se 1.8 pu) e da recepção de um sinal de TRIP oriundo de uma lógica, também implementada em MODELS, que calcula a energia e corrente instantânea do MOV;
- os disjuntores de *bypass* foram modelados como chaves TACS, tipo 13, cujo fechamento depende da recepção de um sinal de TRIP oriundo de uma lógica, também implementada em MODELS, que calcula a energia e corrente instantânea do MOV;
- os FPDs foram modelados como chaves TACS, tipo 13, cujo fechamento depende da recepção de um sinal de TRIP oriundo de uma lógica, também implementada em MODELS, que calcula a energia e corrente instantânea do MOV;
- os disjuntores de linha foram modelados em linguagem MODELS e possuem os seguintes recursos: traçar os envelopes de TRT uma vez que seus parâmetros sejam fornecidos pelo usuário; calcular a corrente RMS através do disjuntor; calcular o tempo e o valor do 1º pico da TRT e calcular o valor da TCTRT máxima encontrada na simulação.

4.0 - SIMULAÇÕES REALIZADAS E RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar o impacto dos esquemas de proteção adotados para os capacitores série sobre as TRTs efetuaram-se diversas simulações de curtos circuitos fase-terra e trifásicos ao longo do circuito duplo Oriximiná-Silves 500kV, supondo ambas as linhas em operação e uma contingência simples de uma das linhas que compõem este circuito. Para estas simulações observaram-se as TRTs induzidas nos disjuntores das linhas Oriximiná-Silves 500kV supondo um cenário em que os bancos de capacitores série encontram-se equipados com centelhadores do tipo *forced triggered* versus um segundo cenário em que os bancos de capacitores série encontram-se equipados com os FPDs. Convém ressaltar que, para ambos os cenários, adotou-se uma filosofia de proteção em que, para faltas internas à linha Oriximiná-Silves 500kV, os bancos série sofrem *bypass* dos centelhadores ou FPDs via esquema de *tele-by-passing*, disparado pela zona 1 da função de proteção de distância (21/21N), antes da abertura dos disjuntores da linha e a consequente interrupção da falta. As tabelas a seguir apresentam-se alguns resultados obtidos.

Pode-se observar nas tabelas 1 e 2, a seguir, que as TRTs impostas ao disjuntor localizado na barra ORIXIMINÁ 500kV foram significativamente reduzidas para curtos fase-terra quando empregaram-se FPDs nos capacitores série. Já nas tabelas 3 e 4, pode-se observar que para curtos trifásicos as TRTs impostas ao mesmo disjuntor possuem a mesma ordem de grandeza quando se adota centelhadores do tipo *forced triggered* ou FPDs nos capacitores série. Uma explicação possível para tais resultados pode ser atribuída à magnitude das correntes envolvidas para os tipos de curto simulados. Nas simulações realizadas observaram-se que, ao longo da linha ORIXIMINÁ-SILVES 500kV, os níveis de curto fase-terra são, em média, duas vezes inferiores aos trifásicos. Assim, pode-se afirmar que para os curtos trifásicos a magnitude da tensão resultante sobre centelhadores do tipo *forced triggered* é suficientemente grande para garantir um desempenho bastante similar aos FPDs.

Tabela 1 – TRTs calculadas no disjuntor em ORIXIMINÁ 500kV
para curtos fase-terra ao longo da linha ORIXIMINÁ – SILVES 500kV, com C1 e C2 em serviço

Distância da falta [km] (a partir de ORIXIMINÁ 500kV)	Resistência de falta [Ω]	<i>forced triggered sparkgaps</i>		<i>FPDs</i>	
		1o pico TRT [kV]	Fase	1o pico TRT [kV]	Fase
0	0	506.79	B	442.76	A
56	0	492.60	A	378.22	A
168	0	583.76	B	386.43	B
280	0	482.85	B	338.26	C
336	0	481.07	C	199.35	A
0	30	552.08	B	462.70	A
56	30	510.09	B	375.28	A
168	30	440.95	C	339.88	B
280	30	440.65	B	320.77	C
336	30	426.54	C	178.37	A

Tabela 2 – TRTs calculadas no disjuntor em ORIXIMINÁ 500kV
para curtos fase-terra ao longo da linha ORIXIMINÁ – SILVES 500kV com contingência na linha C2

Distância da falta [km] (a partir de ORIXIMINÁ 500kV)	Resistência de falta [Ω]	<i>forced triggered sparkgaps</i>		<i>FPDs</i>	
		1o pico TRT [kV]	Fase	1o pico TRT [kV]	Fase
0	0	625.76	A	613.22	A
56	0	669.82	A	546.97	A
168	0	576.00	A	489.60	B
280	0	533.37	B	443.36	C
336	0	741.97	A	648.66	A
0	30	635.31	A	623.42	A
56	30	623.69	A	559.28	A
168	30	614.28	B	574.53	B
280	30	542.07	B	487.86	C
336	30	702.07	A	601.13	A

Tabela 3 – TRTs calculadas no disjuntor em ORIXIMINÁ 500kV
para curtos trifásicos ao longo da linha ORIXIMINÁ – SILVES 500kV, com C1 e C2 em serviço

Distância da falta [km] (a partir de ORIXIMINÁ 500kV)	Resistência de falta [Ω]	<i>forced triggered sparkgaps</i>		<i>FPDs</i>	
		1o pico TRT [kV]	Fase	1o pico TRT [kV]	Fase
0	0	876.61	B	873.63	C
56	0	657.74	B	682.16	C
168	0	569.25	C	571.41	C
280	0	533.07	B	526.31	B
336	0	420.63	B	392.72	B
0	30	758.41	C	779.53	C
56	30	606.22	C	621.19	C
168	30	470.38	C	466.65	C
280	30	439.10	C	440.10	C
336	30	321.89	C	321.88	C

Tabela 4 – TRTs calculadas no disjuntor em ORIXIMINÁ 500kV
para curtos trifásicos ao longo da linha ORIXIMINÁ – SILVES 500kV com contingência na linha C2

Distância da falta [km] (a partir de ORIXIMINÁ 500kV)	Resistência de falta [Ω]	<i>forced triggered sparkgaps</i>		<i>FPDs</i>	
		1o pico TRT [kV]	Fase	1o pico TRT [kV]	Fase
0	0	1178.96	C	1178.58	C
56	0	1110.95	C	1113.32	C
168	0	829.44	C	823.17	C
280	0	929.08	A	919.98	B
336	0	983.77	A	991.78	A
0	30	1114.48	B	1107.70	B
56	30	971.78	C	976.92	C
168	30	770.49	C	776.86	C
280	30	927.26	C	930.57	C
336	30	971.42	C	959.13	C

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise comparativa do impacto sobre as TRTs impostas aos disjuntores presentes nas linhas de transmissão com compensação série quando se empregam *Forced Triggered Sparkgaps* ou *Fast Protective Devices* nos esquemas de proteção de sobretensão de seus capacitores. Demonstra-se, a partir de simulações realizadas para um modelo em ATP da interligação Tucuruí-Manaus, que a magnitude das TRTs impostas aos disjuntores das linhas que possuem bancos série equipados com os FPDs é inferior em relação às linhas que possuem bancos série equipados com *Forced Triggered Sparkgaps* para curtos fase-terra. Para curtos trifásicos, observou-se que o impacto sobre as TRTs é bastante similar para os dois esquemas de proteção analisados. Tal comportamento pode ser explicado pelos níveis de curto envolvidos: para os curtos trifásicos a magnitude da tensão resultante sobre centelhadores do tipo *forced triggered* é suficientemente grande para garantir um desempenho bastante similar aos FPDs, o mesmo não se pode garantir para os curtos fase-terra, conforme ilustrado nas simulações apresentadas neste artigo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Iliceto, F. ; Gatta, F.M. ; Cinieri, E. ; Asan, G., TRVs across circuit breakers of series compensated lines-status with present technology and analysis for the Turkish 420 kV grid, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 7, pages 757-766, 1992.
- (2) Heyman, C., Willforss, S., Grunbaum, R., Oliveira, F., Field Experience of Encapsulated Fast Protective Device for Series Capacitors; XII SEPOPE, Rio de Janeiro, Maio 2012.
- (3) Redlund, J., Fecteau, J.; Paulsson, L.; Rollin, L.-P., "A new fast protective device for high voltage series capacitors", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- (4) LIMA, M. C., et al. Tucuruí - Macapá – Manaus System: Relevant Design Aspects and Benefits Associated to the Application of Series Capacitors in High Voltage AC Power Transmission; XII SEPOPE, Rio de Janeiro, Maio 2012.
- (5) IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power systems, IEEE Standard 824-2004, May 2005
- (6) Anderson, P.M., Farmer, R. G., Series Compensation of Power Systems, Encinitas: PBLSH! Inc, 1996.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Geraldo B. M. de Andrade nasceu em São Paulo em 1974. Concluiu a Graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, respectivamente em 1999, 2001 e 2008, todos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atuou como pesquisador nos seguintes grupos da EPUSP: L-Prot/USP, Enerq/USP e GAGTD/USP. Atualmente coordena o grupo de estudos de sistemas elétricos de potência da ABB Consulting Brasil.



Carl Heyman nasceu em 1982. Concluiu a Graduação e o Mestrado em *Engineering Physics*, ambos pela Uppsala University, respectivamente em 2008 e 2009. Desde 2008, trabalha com pesquisa e desenvolvimento de novos dispositivos FACTS na área de Pesquisa e Desenvolvimento da ABB em Västerås na Suécia. Também desde 2008, atua, na mesma área, como coordenador de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento para dispositivos empregados Compensação Série. Desde 2012, atua como Gerente de Produto para dispositivos de Compensação Série da ABB em Västerås na Suécia.



Christian Bergsten Mendes nasceu em São Paulo em 1971. Concluiu a Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência em 1995 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atuou como coordenador técnico em diversos empreendimentos FACTS no Brasil e exterior. Atualmente coordena o grupo de engenharia de aplicação da ABB FACTS Brasil.