

**B4 – Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência****DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO ELETROMECÂNICO DE SSSC NO ORGANON E SUAS VANTAGENS PARA OPERADORES DE SISTEMAS**

<b>J.L. JARDIM*</b> HPPA Brasil Jorge.jardim@hpa.com.br	<b>V. NAKASHIMA</b> ISA-CTEEP Brasil vnakashima@isactEEP.com.br	<b>R. GUIMARÃES</b> ISA-CTEEP Brasil rgribeiro@isactEEP.com.br
<b>F. MELO</b> ISA-CTEEP Brasil frodrigues@isactEEP.com.br	<b>J.M. AREIZA</b> ISA Colômbia jareiza@ISA.com.co	<b>S. MESA</b> SMART WIRES Colômbia santiago.mesa@smartwires.com
<b>A. PRIOLI</b> SMART WIRES Brasil andre.priolli@smartwires.com	<b>S. GOMEZ</b> SMART WIRES Colômbia santiago.gomez@smartwires.com	<b>P. PENNA</b> HPPA Brasil ppenna@hpa.com.br

**Resumo** – Atualmente, os operadores do sistema elétrico contam com poucos elementos além do redespacho de geração para evitar condições operativas críticas que geram sobrecargas nos principais corredores de intercâmbio elétrico entre os sub-sistemas. O redespacho, no entanto, é uma medida que usualmente aumenta geração de maior custo em detrimento de outras de menor custo, trazendo impactos a tarifa de energia.

O SSSC (Static Synchronous Series Compensator) é uma nova tecnologia para controlar fluxo de potência em sistemas elétricos. Ao injetar uma tensão série em quadratura, adiantada ou atrasada em relação à corrente da linha, obtém-se efeito indutivo ou capacitivo no circuito onde este elemento é inserido e, conseqüentemente, diminui ou aumenta-se o fluxo de potência de acordo com as necessidades de operação. Ou seja, ao introduzir este elemento, as Linhas de Transmissão tornam-se despacháveis e sua controlabilidade algo extremamente valioso para os operadores de sistemas, evitando-se assim o redespacho de geração para controle de fluxos.

O trabalho descreve a aplicação prática do SSSC no sistema elétrico Brasileiro, operando nos seus diferentes modos de operação disponíveis, e apresenta resultados de simulações tanto em regime permanente (fluxo de potência) quanto transitórios eletromecânicos para um estudo de caso da LT CD 138kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2 da rede DIT do interior de SP. Os benefícios e facilidades operativas desta nova tecnologia são destacados com exemplos. Também são apresentadas as principais características operativas e sistemas de controle.

**Palavras-chave:** FACTS – SSSC – Desempenho dinâmico – Operação flexível – Inovação – Modelo - Gerenciamento de sobrecargas – Controle de fluxo de potência

## 1 INTRODUÇÃO

Estudos de planejamento indicam a necessidade imediata de reconstrução dos dois circuitos da linha de transmissão (LT) entre as subestações de Porto Ferreira e Ribeirão Preto em 138 kV, para se evitar o risco de sobrecarga em regime normal. Porém, a implantação dessa obra demanda um prazo de 48 meses.

\* HPPA, Avenida das Américas, 1155 sala 2008, 22631-902, Rio de Janeiro, RJ, [jorge.jardim@hpa.com.br](mailto:jorge.jardim@hpa.com.br)

Desse modo, os autores analisaram uma alternativa de menor custo e implantação mais rápida, em relação à reconstrução da linha, composta pela instalação de compensadores série síncronos estáticos – SSSC (Static Synchronous Series Compensator) nas referidas linhas de transmissão. Esses compensadores permitem controlar o fluxo de potência na LT através da injeção de uma tensão série, adiantada ou atrasada, em quadratura com a corrente da linha, obtendo-se efeito indutivo ou capacitivo.

Este artigo descreve a aplicação prática do SSSC no sistema elétrico Brasileiro, operando nos seus diferentes modos de operação disponíveis, e apresenta resultados de simulações tanto em regime permanente (fluxo de potência) quanto transitórios eletromecânicos para um estudo de caso da LT CD 138kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2 da rede DIT do interior de SP. Os benefícios e facilidades operativas desta nova tecnologia são destacados com exemplos.

Para realizar as simulações foram implantados os modelos de SSSC no programa Organon. Na Seção 2 estão apresentadas as principais características do SSSC e os detalhes de modelagem. A Seção 3 mostra os resultados de simulação. As conclusões estão na Seção 4.

## 2 MODELO DO SSSC

### 2.1 Princípios de Funcionamento

Um SSSC atua injetando uma tensão em série no ramo em que está instalado. A tensão é produzida por um conversor VSC (Voltage Source Control) diretamente conectado ao ramo ou através de um transformador. Realiza uma função similar a de uma compensação série convencional, porém com a vantagem de compensação não depender da corrente no ramo. O princípio de funcionamento é ilustrado na Fig. 1, em comparação com uma compensação fixa ou de um TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) [1].

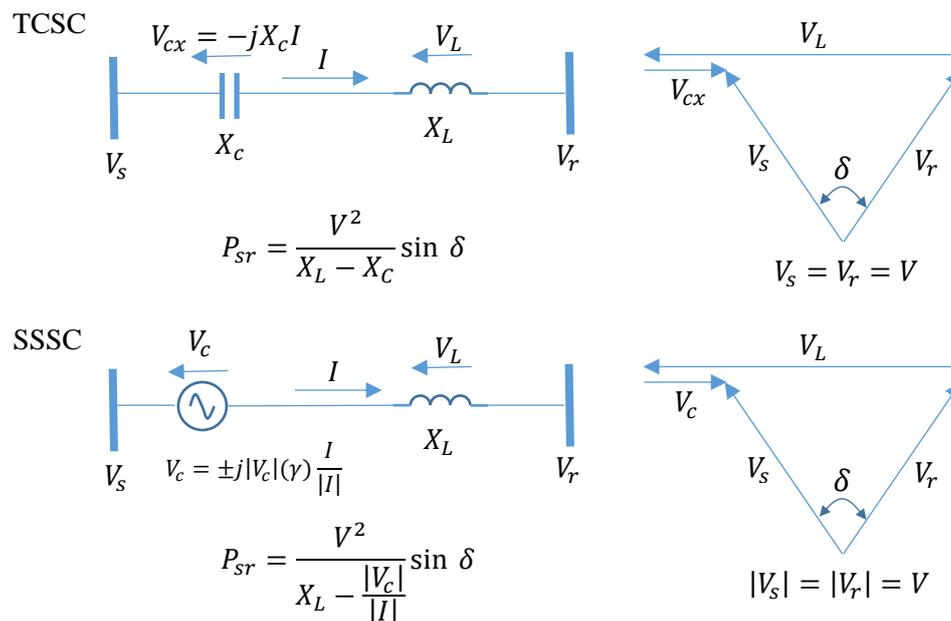


Fig. 1. Ilustração do princípio de funcionamento de um SSSC, analogamente ao funcionamento de uma compensação série fixa ou de um TCSC

A tensão  $V_c$  injetada pelo SSSC está em quadratura com a corrente no ramo, assim como a tensão  $V_{cx}$  através do capacitor  $X_c$ .  $V_{cx}$  depende da corrente, mas  $V_c$  não depende, o que aumenta a controlabilidade de fluxo de potência de um SSSC em relação a de um TCSC. Os limites de tensão dependem do número de conversores (ou válvulas) conectados em série.

## 2.2 Equações do Fluxo de Potência

Com base no diagrama da Fig. 2, as equações de fluxo de potência podem ser escritas da seguinte forma.

$$V_k = Z_{km}I_{km} + V_c + V_m \quad (1)$$

$$P_{km} = -|V_k||V_m|B_{km} \sin(\delta_{km}) - |V_k||V_c|B_{km} \sin(\delta_{kc}) \quad (2)$$

$$Q_{km} = -B_{km}|V_k|^2 + |V_k||V_m|B_{km} \cos(\delta_{km}) + |V_k||V_c|B_{km} \cos(\delta_{kc}) \quad (3)$$

$$P_c = B_{km}|V_c|(|V_k| \sin(\delta_{ck}) - |V_m| \sin(\delta_{cm})) \quad (4)$$

Onde

$$B_{km} = \frac{-1}{X_{km}}$$

$P_c$  é a potência ativa drenada pelo SSSC. Os fluxos  $P_{mk}$  e  $Q_{mk}$  são deduzidos de forma similar. As componentes de corrente ativa e reativa vista pela barra k são

$$Ip_{km} = -|V_m|B_{km} \sin(\delta_{km}) - |V_c|B_{km} \sin(\delta_{kc}) \quad (5)$$

$$Iq_{km} = -B_{km}|V_k| + |V_m|B_{km} \cos(\delta_{km}) + |V_c|B_{km} \cos(\delta_{kc}) \quad (6)$$

$$I_{km} = \sqrt{Ip_{km}^2 + Iq_{km}^2} \quad (7)$$

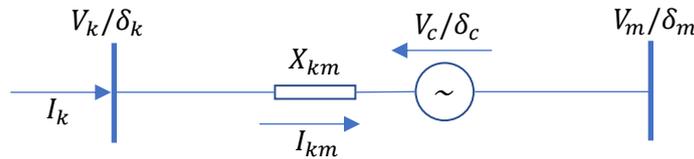


Fig. 2. Circuito equivalente de um SSSC.

## 2.3 Restrições

A operação do SSSC está restrita a níveis de corrente e tensão, conforme ilustrado na Fig. 3 [2].

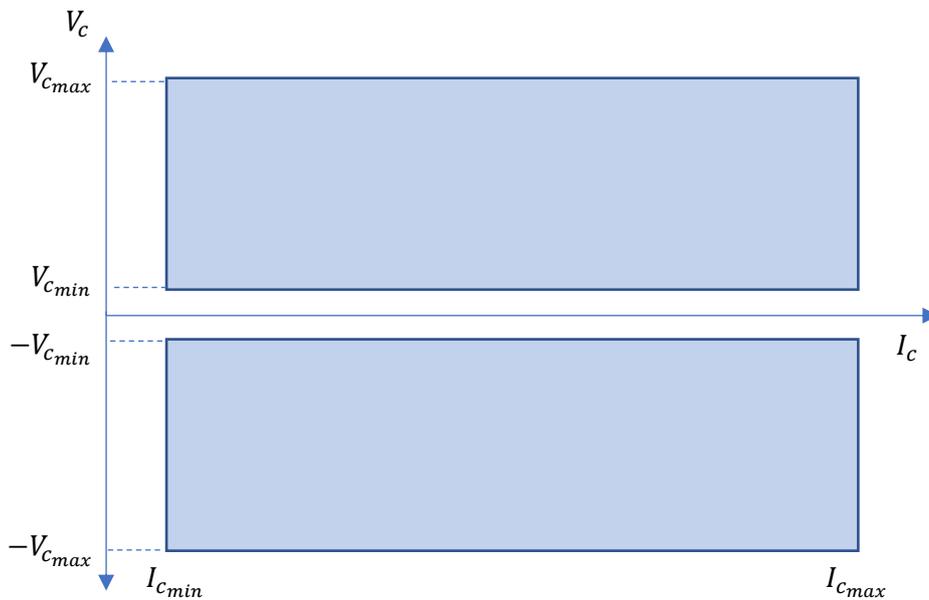


Fig. 3. Região de capacidade do SSSC

## 2.4 Modos de Operação

O SSSC pode operar nos seguintes modos [2]:

- Impedância fixa.
- Tensão injetada fixa.
- Controle de corrente, se a corrente ultrapassa um limiar especificado.

Nos modos de impedância ou tensão fixa, o SSSC pode opcionalmente mover para o modo de controle de corrente se a corrente ultrapassar um limiar especificado, seja capacitivo ou indutivo. O controle é exercido segundo uma característica de regulação (droop).

## 2.5 Modelagem no Cálculo de Fluxo de Potência

Para respeitar a capacidade, independentemente do modo de operação, o SSSC deve ser removido por by-pass nos casos em que a corrente esteja fora dos limites operacionais de corrente,  $I_{c_{min}} \leq |I_{km}| \leq I_{c_{max}}$ , e tensão,  $V_c < V_{c_{min}}$ . A tensão máxima injetada também não pode ser maior que a máxima, evidentemente.

O modelo pode ser simplificado no modo de operação com impedância constante fazendo-se  $B_{km}$  igual ao valor equivalente do ramo e considerando  $V_c$  nula.

No modo tensão constante, o ângulo  $\delta_c$  é controlado de forma que  $P_c$  seja nula e, conseqüentemente, garantindo que  $V_c$  esteja em quadratura com a corrente.

No modo de controle de corrente, além do controle de  $\delta_c$  para manter a tensão em quadratura,  $V_c$  é controlada para satisfazer a característica de regulação desejada, Eq. (8).

$$V_c = Droop(I_{km} - I_{ref}) \quad (8)$$

Uma forma alternativa de implantação do controle de corrente é usar a formulação de impedância constante com ajustes alternados da susceptância equivalente,  $B_{km} = I_{km}/V_c$ , ou seja, entre iterações. A desvantagem é que esta abordagem requer um número significativamente maior de iterações.

## 2.6 Modelagem Dinâmica

O modelo dinâmico tem uma lógica extensa para controle dos limites operacionais, ajuste do valor de referência de tensão injetada e transições de operação capacitiva para indutiva e vice-versa. Do ponto de vista da resposta a perturbações eletromecânicas, o sistema de controle é relativamente simples, ou seja, não havendo violação de limite operacional, o SSSC mantém uma injeção de tensão constante. A Fig. 4 ilustra, simplificada, as principais funções de controle, cuja a representação detalhada no Organon requereu aproximadamente 400 funções lógicas elementares.

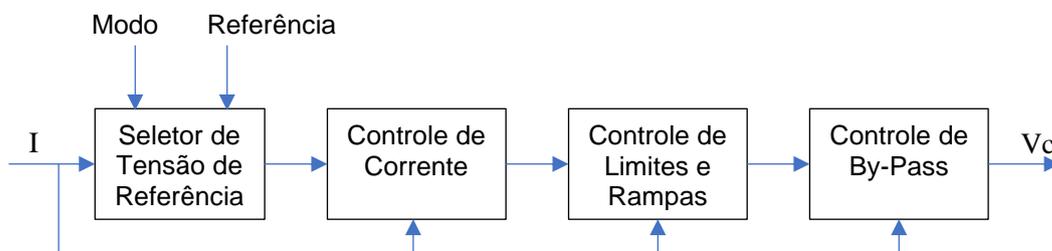


Fig. 4. Módulos do sistema de controle do SSSC

Variações no valor de referência do controle estão limitadas por taxa de variação e por um período morto de transição entre os modos capacitivos e indutivos. A Fig. 5 mostra um teste de resposta a 4 eventos de variação da referência de tensão injetada partindo de zero para 3, 10, -10 e 0 kV.

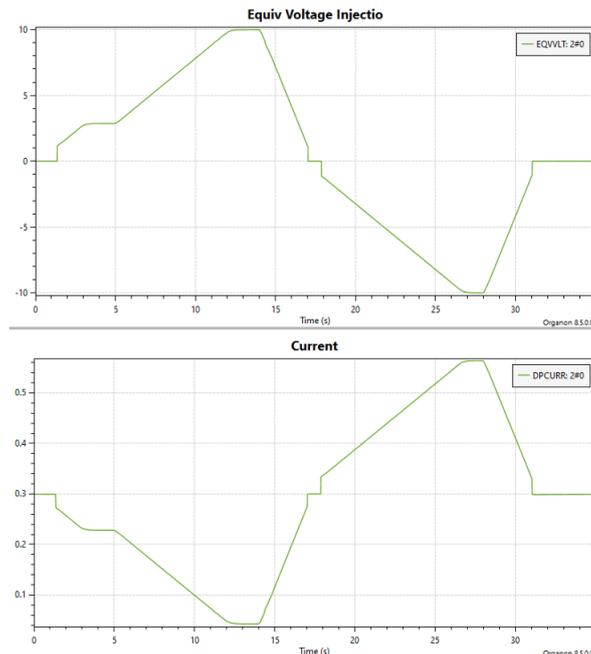


Fig. 5. Teste de degraus na tensão injetada pelo SSSC

### 3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO NA LT 138 kV RIBEIRÃO PRETO – PORTO FERREIRA

#### 3.1 Casos de Estudo

O desempenho do SSSC nas LTs 138 kV Ribeirão Preto - Porto Ferreira C1/C2 e Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1 foi estudado com cenários PAR/PEL e PDE para os horizontes de 2024 a 2035. As configurações nestas duas bases de dados são mostradas na Fig. 6. Entretanto, neste artigo são apresentados apenas os resultados com o sistema PAR por limitação de espaço. O artigo [4] apresenta mais detalhes sobre os estudos realizados.

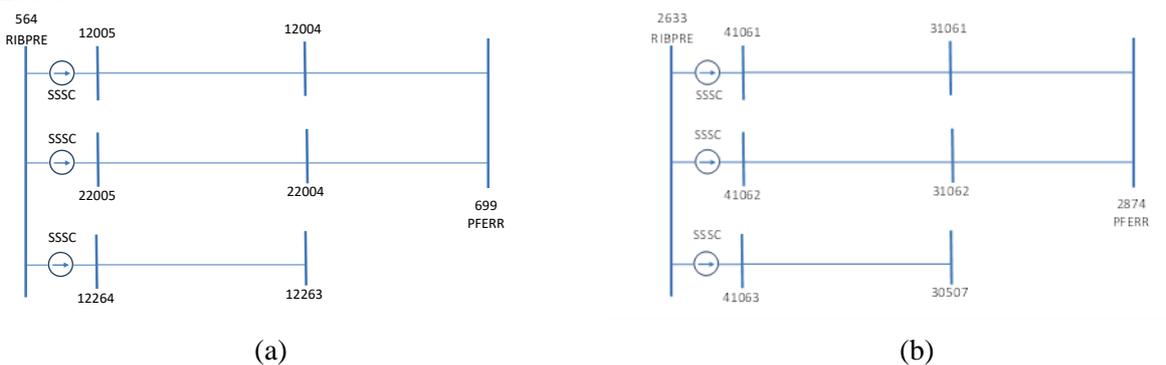


Fig. 6. Locais de inserção do SSSC, (a) PAR; (b) PDE

O modo de controle de corrente foi utilizado em todas as simulações. O dimensionamento do SSSC foi definido atendendo ao seguinte critério.

**Critério:** Os limites de tensão do SSSC em série foram dimensionados para que, em todos os casos e condições operativas (N e N-1), os carregamentos da LT 138 kV Porto Ferreira – Ribeirão C1/C2 e da LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1 apresentem valores próximos aos observados com a reconstrução das LTs Porto Ferreira – Ribeirão C1/C2. As simulações foram realizadas com observância aos Procedimentos de Rede [3].

### 3.2 Estudos de Fluxo de Potência

O dimensionamento dos limites de tensão dos SSSC, para atender o critério descrito anteriormente no horizonte de médio prazo (PAR/PEL 2022-2026), apresentou o quantitativo exposto na Tabela I.

TABELA I - RESUMO DA QUANTIDADE DE SMARTVALVES

Base de Dados	Horizonte	LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1 /C2	LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1
PAR/PEL 2022-2026	2022 à 2026	2 válvulas/fase 12 válvulas no total	1 válvulas/fase 3 válvulas no total

A Tabela II resume os resultados obtidos considerando um Droop de 100 V/A e um limite de corrente em 290, 326 ou 360 A, para cada uma das 3 válvulas/fase. Com estes limiares as correntes são significativamente reduzidas para a condição N-1 em relação às outras alternativas.

Foram avaliadas 3 alternativas para tratar os problemas da referida LT:

- Não Reconstrução da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2 (Original);
- Reconstrução da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2;
- Não Reconstrução da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2, implantação de 2xSVs/fase nessa LT e 1xSV/fase na LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1.

TABELA II – RESUMO DE CARREGAMENTO (% DE L1 PARA N E % DE L2 PARA N-1 / MVA) DAS LTS POR ALTERNATIVA

Ano	Alternativa	Caso FP	%/MVA RIBPRE- EUC C1 N	%/MVA RIBPRE- EUC C1 N-1	%/MVA RIBPRE- EUC C2 N	%/MVA RIBPRE- EUC C2 N-1	%/MVA RIBPRE- PFERR N	%/MVA RIBPRE- PFERR N-1
2024	Original	BTERMICA	80/85	63/91	25/27	19/27	96/104	93/123
		RSUL	79/80	59/87	25/27	19/27	95/102	94/123
		TIETE	84/86	65/93	25/27	19/27	93/99	85/120
	SSSC	BTERMICA	80/82	63/89	25/27	19/27	84/91	76/99
		RSUL	80/82	60/86	25/27	19/27	83/90	75/98
		TIETE	82/84	63/89	25/27	19/27	81/88	75/97
2026	Original	RSUL	80/82	61/89	25/27	19/27	96/103	96/126
		TIETE	95/98	72/105	27/29	20/29	100/108	100/130
	RECON	RSUL	75/77	83/85	26/28	19/28	66/136	73/176
		TIETE	91/92	69/100	27/29	20/29	68/141	76/183
	SSSC (326) <sup>1</sup>	RSUL	80/82	61/88	26/28	19/28	84/91	77/100
		TIETE	88/90	65/95	27/29	20/29	85/92	78/102
	SSSC (326,360) <sup>2</sup>	RSUL	83/84	64/92	26/28	19/28	84/91	77/100
		TIETE	94/95	69/100	27/29	20/29	85/92	78/102
	SSSC (290,360) <sup>2</sup>	RSUL	84/85	65/93	26/28	19/28	79/85	72/93
		TIETE	94/95	70/100	27/29	20/29	81/87	73/95

1 - Ajuste de referência de corrente (Amperes) igual para os 3 SSSC.

2 - Ajustes de referência de corrente para os SSSC Ribeirão Preto – Porto Ferreira e Ribeirão – Euclides, respectivamente.

Na Tabela III são apresentadas todas as sobrecargas identificadas no sistema monitorado, para os casos mais severos do PAR/PEL 2022-2026 para o carregamento da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2, considerando 3 alternativas para tratar os problemas da referida LT. Conforme pode ser observado, nota-se

que a alternativa com SSSC não causa novas sobrecargas no sistema da região e em alguns casos alivia ou agrava marginalmente as sobrecargas existentes nos casos base.

TABELA III – VIOLAÇÕES DE LIMITES DE CIRCUTOS NA CONDIÇÃO N-1 PARA TODAS AS ALTERNATIVAS. CASOS PAR

Ano	Alternativa	Caso FP	LT 138 kV Poços de Caldas – S. J. Boa vista 2 C1/C2	LT 138 kV Euclides da Cunha – Mococa 4 C1	SE 440/138 kV Araraquara – TR-2	LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1	LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C2
2024	Original	BTERMICA	113.8	107.1	-	-	-
		RSUL	-	106.5	107.4	100.2	-
		TIETE	107.2	107.2	-	-	-
	SSSC	BTERMICA	113.9	107.	-	-	-
		RSUL	-	106.4	107.5	-	-
		TIETE	107	107.2	-	-	-
2026	Original	RSUL	-	-	108.6	101.	100.3
		TIETE	112.2	-	102.4	100.7	100.
	RECON	RSUL	-	-	107.7	-	-
		TIETE	109	-	101.5	-	-
	SSSC (326) <sup>Erro!</sup> Indicador não definido.	RSUL	-	-	108.7	-	-
		TIETE	112.3	-	102.6	-	-
	SSSC (326,360) <sup>Erro!</sup> Indicador não definido.	RSUL	100.7	-	109	-	-
		TIETE	114.2	-	102.9	-	-
	SSSC (290,360) <sup>Erro!</sup> Indicador não definido.	RSUL	101.1	-	109.1	-	-
		TIETE	114.5	-	103	-	-

### 3.3 Estudos de Transitórios Eletromecânicos

Diante do objetivo da análise de transitórios eletromecânicos que visa apenas demonstrar o comportamento dinâmico dos SSSC e não dimensionar a solução, foram selecionados apenas os casos base de fluxo de potência que apresentaram o máximo fluxo de potência passante pela LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2, quais sejam: VM-RSUL e VM-TIETÊ do ano 2026. Ou seja, tais casos foram utilizados para comparar o desempenho das Alternativas de Reconstrução da referida LT e da Implantação apenas dos SSSC.

A Fig. 7 mostra as tensões para uma falta trifásica na barra de Ribeirão Preto, seguida da abertura da LT Ribeirão Preto – São Simão C1. A Fig. 8 mostra as correntes através dos SSSC e as respectivas tensões injetadas.

Nota-se que os SSSC são capazes de suportar as correntes de falta sem que haja alteração da tensão injetada ou by-pass. Ou seja, atua com uma injeção de tensão constante. Os mesmos resultados foram observados para as diversas outras faltas monofásicas e trifásicas aplicadas para os diversos cenários simulados.

## 4 CONCLUSÕES

As simulações mostraram que os SSSC são efetivos para controle de fluxo de potência, oferecendo um elevado grau de controlabilidade à rede CA. Como mostrado no exemplo da aplicação nas LT Ribeirão Preto

– Porto Ferreira C1/C2 e Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1, os fluxos de potência foram mantidos dentro dos limites pretendidos. Do ponto de vista dos transitórios eletromecânicos, não foi observado efeito adverso. Para os níveis de curto-circuito nos locais de instalação, os SSSC suportaram as correntes sem alteração na injeção de tensão.

Os modelos de regime permanente e dinâmico dos SSSC foram implantados no Organon com sucesso, tendo sido validado por comparação com resultados de simulações no programa DigSilent. O modelo dinâmico utiliza a mesma lógica nos dois programas, o modelo de fluxo de potência do Organon foi implantado com um algoritmo similar ao do DigSilent.

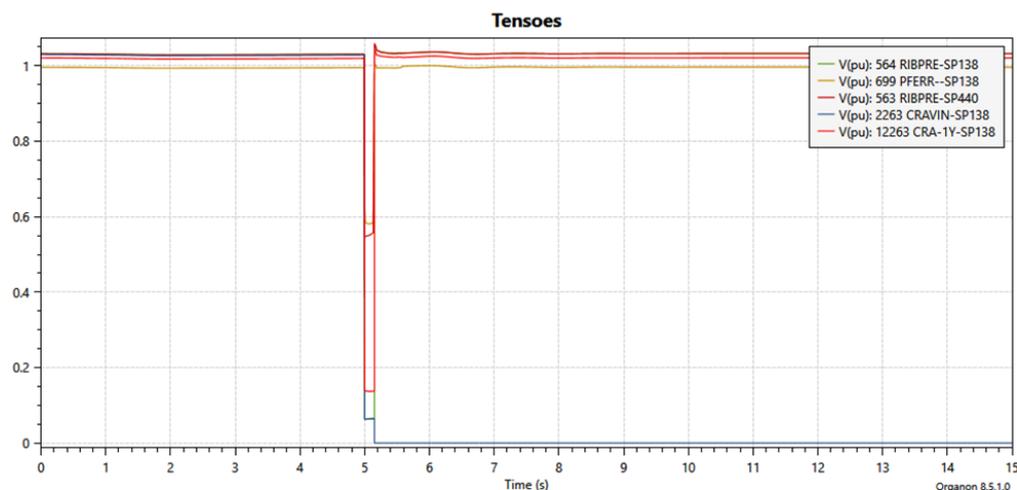


Fig. 7. Tensões para falta trifásica na barra de 138 kV de Ribeirão preto, seguida de abertura da LT Ribeirão Preto – São Simão C1

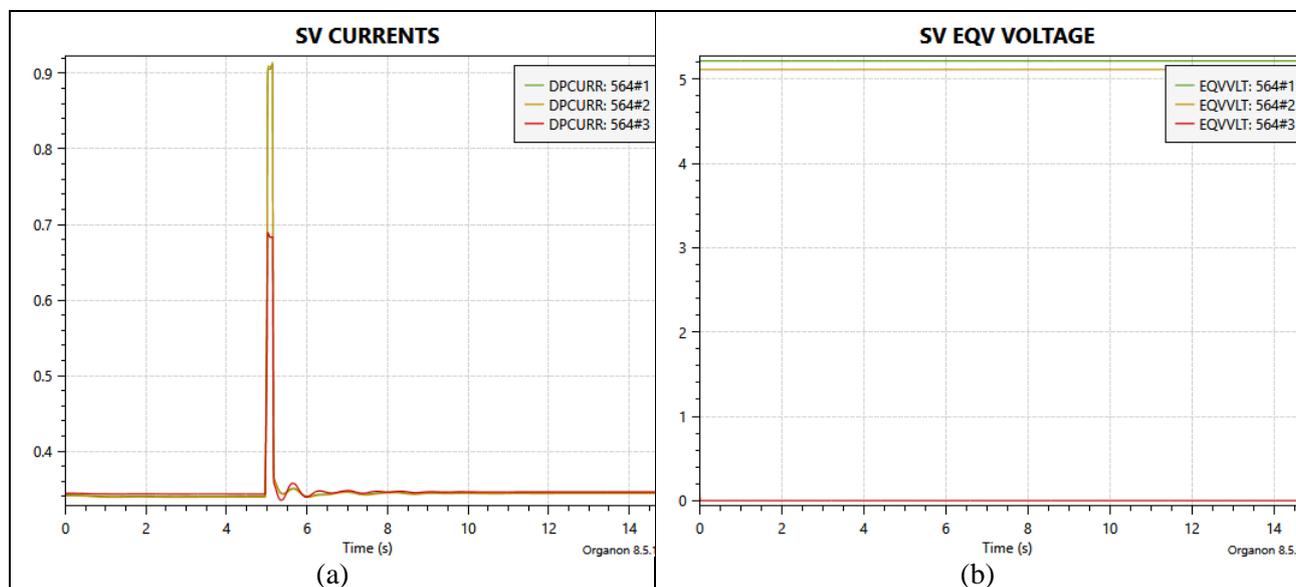


Fig. 8. Correntes e tensões injetadas pelos SSSC para falta trifásica na barra de 138 kV de Ribeirão preto, seguida de abertura da LT Ribeirão Preto – São Simão C1

## 5 REFERÊNCIAS

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems”, IEEE Press, NJ, USA, 2000.
- [2] Smart Wires “User Manual for the SmartValve Integrated Model”, June 10th 2022.
- [3] Submódulo 2.3-CR dos Procedimentos de Rede do ONS (Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos), 2021.

- [4] V.M. Nakashima, R.G. Ribeiro, F.M. Rodrigues, J.M. Areiza, A. Priolli, S. Gomes, J. Jardim “O Estudo de Caso da LT CD 138 KV Ribeirão Preto – Porto Ferreira: Comparação Técnico-Econômica Entre a Solução Tradicional (Reconstrução da LT) e Uma Solução Inovadora Composta Pela Implantação do Modular – Static Synchronous Series Compensator”, Cigré, XIX ERIAC, Foz do Iguaçu. PR, Brasil, 21 a 25 de maio de 2023.