

**C1 – Desenvolvimento de Sistemas Elétricos e Economia****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****Victor M. Nakashima*¹****ISA CTEEP****Brasil****vnakashima@isactEEP.com.br****Renato G. Ribeiro****ISA CTEEP****Brasil****rgribeiro@isactEEP.com.br****Felipe M. Rodrigues****ISA CTEEP****Brasil****frodrigues@isactEEP.com.br****Jorge M. Areiza****ISA Colômbia****Colômbia****jareiza@ISA.com.co****André Priolli****Smart Wires****Brasil****Andre.Priolli@smartwires.com****Santiago Gomes****Smart Wires Colômbia****Colômbia****Santiago.Gomez@smartwires.com****Jorge Jardim****HPPA****Brasil****jorge.jardim@hppa.com.br**

Resumo – A LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2, localizada no estado de São Paulo – Brasil, atualmente já apresenta riscos de sobrecarga em regime normal de operação (N). A solução estrutural tradicional para este problema demanda um prazo de implantação de 48 meses. Diante do exposto, este artigo apresenta um estudo de caso de uma alternativa composta por dispositivos pertencentes a tecnologia Modular – Static Synchronous Series Compensator, para eliminar o referido problema. As análises efetuadas demonstraram que tal solução inovadora é capaz de atender a necessidade sistêmica em um prazo de até 15 meses, além de apresentar investimentos e robustez competitivos com a solução tradicional.

Palavras-chave: Planejamento Flexível, M-SSSC, D-FACTS, FACTS, Inovação, Otimização do SIN

1 INTRODUÇÃO

A partir do Plano de Ampliações e Reforços (PAR/PEL) 2021 - Ciclo 2022-2026, o Operador Nacional do Sistema (ONS) identificou o risco imediato de sobrecarga em regime normal de operação (N) na LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2, em determinados cenários operativos [1]. É importante ressaltar que o ciclo subsequente do PAR/PEL (2023-2027) ratificou tal problema.

Diante da necessidade sistêmica urgente, o Ministério de Minas e Energia (MME) consolidou este reforço no âmbito do Plano de Outorgas de Transmissão de Energia (POTEE) - 2020 e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) autorizou a ISA CTEEP, através de resolução autorizativa (REA) específica, a implantar essa obra. Tal REA foi publicada em agosto de 2022, com prazo para entrada em operação comercial de 48 meses.

¹ Endereço: Av. Nações Unidas, nº 14.171, Torre Crystal - 6º andar. São Paulo - SP – CEP 04794-000 (ISA CTEEP). E-mail: vnakashima@isactEEP.com.br

Nesse contexto, os autores desse artigo realizaram estudos de fluxo de potência e análises econômicas para avaliar o desempenho de uma solução inovadora no Brasil, composta por *Modular – Static Synchronous Series Compensator* (M-SSSCs). Tais dispositivos são inseridos em série com as linhas de transmissão e permitem o controle do fluxo de potência ativa pelas mesmas.

2 OBJETIVOS

Diante do exposto, os principais objetivos desse artigo técnico são os elencados a seguir:

1. Comprovar que uma alternativa composta apenas por M-SSSCs é capaz de eliminar as sobrecargas inadmissíveis previstas para a LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2 no curto prazo e apresenta um desempenho técnico satisfatório no horizonte de médio e longo prazo; e
2. Comprovar que tal alternativa formada por M-SSSCs demanda um investimento competitivo com o da reconstrução da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2.

3 SISTEMA DE INTERESSE

O sistema de interesse é apresentado na Fig. 1 e está localizado no Estado de São Paulo. Tal rede é composta por uma ampla malha de linhas e subestações em 138 kV, pertencentes às Demais Instalações de Transmissão (DITs). O suprimento dessa rede é realizado principalmente através das seguintes subestações de fronteira com a Rede Básica: Ribeirão Preto 500/440/138 kV, Araraquara 440/138 kV, Araras 440/138 kV, Mogi Mirim 3 440/138 kV e Poços de Caldas 345/138 kV. Adicionalmente, tal suprimento energético é complementado pela geração das usinas hidrelétricas de Euclides da Cunha, Caconde e Limoeiro, além de outras usinas térmicas a biomassa de menor porte. As cargas da região pertencem às concessionárias de distribuição CPFL Paulista e Elektro.

Por fim, a Fig. 1 também apresenta em destaque (retângulo azul) a LT 138 kV Ribeirão Preto (RPR) – Porto Ferreira (POF) C1/C2, sendo essa a principal linha analisada neste estudo.

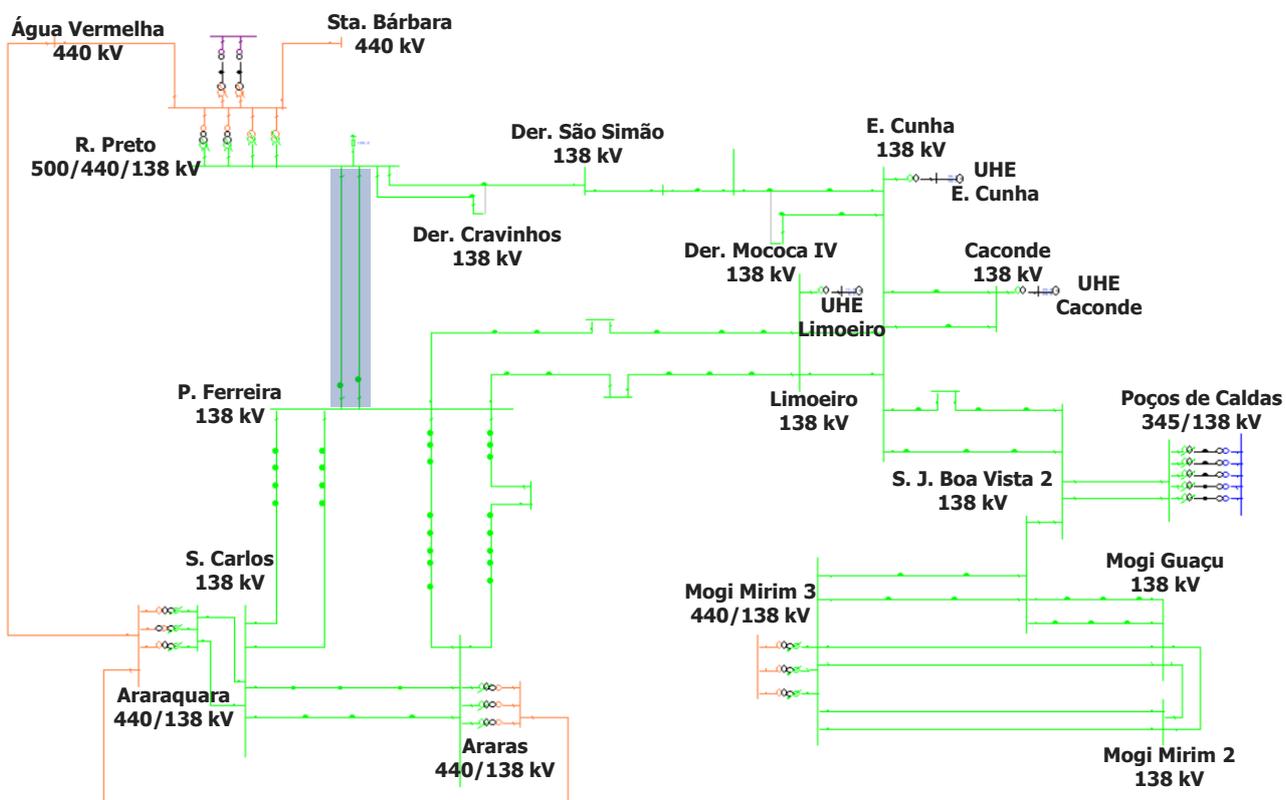


Fig. 1 - Sistema Interesse.

4 CRITÉRIOS E PREMISSAS

Nessa seção são apresentadas todos os critérios e premissas técnico - econômicos adotados neste estudo.

4.1 Modelos Elétricos do *Modular – Static Synchronous Series Compensator*

Em virtude do ineditismo dos M-SSSCs no Brasil, os programas desenvolvidos pelo CEPEL, e comumente adotados pelo setor elétrico nacional, ainda não contemplam um modelo elétrico para essa tecnologia.

Diante do exposto e em função da urgência por uma solução para a LT 138 kV RPR – POF C1/C2, os autores desenvolveram um modelo elétrico para os M-SSSCs no programa Organon®, o qual é resumido a seguir e detalhado em artigo específico também submetido à este congresso [2].

Os M-SSSCs são utilizadas como um controlador série de fluxo de potência através da injeção de tensão em série com o circuito. Tal tensão é inserida em quadratura com a corrente no circuito. A Fig. 2 e a Fig. 3 ilustram este conceito.

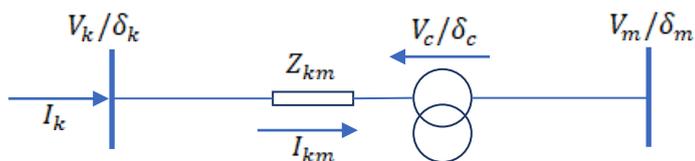


Fig. 2 - Circuito equivalente do *Modular – Static Synchronous Series Compensator*.

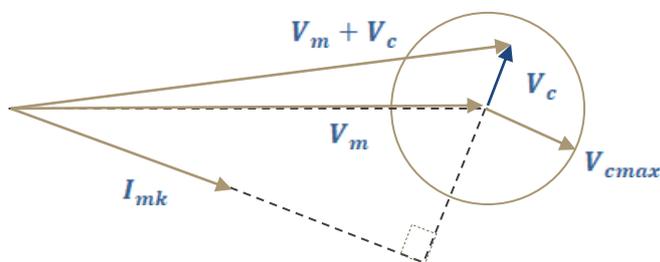


Fig. 3 - Relação fasorial das tensões e correntes de um *Modular – Static Synchronous Series Compensator*.

O M-SSSC pode operar em modos de reatância fixa, tensão fixa ou controle de corrente, sendo este último o modo de controle adotado nesse estudo.

4.2 Casos de Trabalho

Os casos base de fluxo de potência consistiram dos cenários alternativos do PAR/PEL 2022 – 2026 e do PDE - 2031 que apresentaram os máximos fluxos de potência passantes pela LT 138 kV RPR – POF C1/C2 e são ilustrados na TABELA I.

TABELA I – CASOS DE TRABALHO.

Base de Dados	Ano	Intercâmbio	Patamar de Carga	Especificidade do caso
PAR/PEL 2022-2026	2024	Verão	Média	RSUL = 11.400 MW
				Base Térmica no SE/CO
	2026	Verão	Média	RSUL = 11.370 MW
				Tietê, Pardo e Paranapanema 20%
PDE 2031	2025 à 2035 ²	Norte Úmido	Média	Tietê, Pardo e Paranapanema 20%

² Apesar do ano de 2036 pertencer ao horizonte prospectivo do PDE 2031, o mesmo não foi considerado nessas análises uma vez que apresentou dificuldades de convergência para diversas contingências aplicadas.

A seguir é apresentada uma breve descrição das especificidades dos casos de trabalho:

- RSUL: cenário em que a região do estado de São Paulo apresenta uma elevada importação de potência da região Sul do país;
- Base Térmica no SE/CO: cenário em que a região SE/CO está com baixa geração hidráulica e com elevado despacho de suas usinas térmicas; e
- Tietê, Pardo e Paranapanema 35% e 20%: cenário em que as usinas hidrelétricas das bacias dos rios Tietê, Pardo e Paranapanema apresentam baixo despacho de geração correspondentes a 35% ou 20% de suas respectivas potências instaladas.

4.3 Condições Operativas

As análises de fluxo de potência foram simuladas considerando as condições do sistema operando em regime normal de operação (N) e em emergência (N-1). Foram aplicadas contingências simples em todos os elementos presentes no sistema de interesse apresentado na seção 3 desse artigo.

4.4 Limites Operativos

Os limites operativos de tensão e carregamento considerados neste estudo são expostos a seguir:

4.4.1 Tensão

Os limites de tensão considerados neste estudo foram aqueles descritos no item 2.2.4.2 do Sub-módulo 2.3 dos Procedimentos de Rede [3], para avaliar o desempenho das redes de 500 kV, 440 kV, 345 kV e 138 kV da região de interesse.

4.4.2 Carregamento

Os valores considerados para as capacidades operativas de longa e curta duração dos circuitos pertencentes à Rede Básica e Rede Básica de Fronteira foram aqueles declarados pelas concessionárias de transmissão nos termos aditivos vigentes dos seus respectivos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPSTs). Já para os circuitos pertencentes às Demais Instalações de Transmissão (DITs) foram considerados os valores informados pelos agentes de transmissão, para compor a base de dados do ONS e da EPE.

4.5 Parâmetros Econômicos

Para o custeamento das novas instalações foram utilizadas as seguintes premissas:

- Reconstrução da LT 138 kV RPR – POF C1/C2: Investimento ANEEL autorizado à ISA CTEEP através de REA específica, na base de junho/2022; e
- M-SSSCs: investimento de implantação orientativo, na base de junho/2022.

Os demais parâmetros econômicos adotados são os elencados abaixo:

- Taxa de Desconto: 8 % ao ano;
- Ano de Referência: 2022;
- Ano Horizonte: 2035; e
- Tempo de vida útil das instalações: 30 anos.

5 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA DE INTERESSE

Nessa seção é apresentado um breve diagnóstico do desempenho da LT 138 kV RPR – POF C1/C2, com base nas análises executadas pelo ONS nos estudos do PAR/PEL 2021 - ciclo 2022-2026 [4]. Vale a pena destacar que o ciclo subsequente do PAR/PEL ratificou os resultados descritos abaixo.

No patamar de carga média de verão, nos cenários de elevada importação de potência da região de São Paulo a partir da região sul e também de geração reduzida nas usinas hidrelétricas das bacias dos rios Pardo, Paranapanema e Tietê, em regime normal de operação (N) são observados elevados carregamentos na LT 138 kV RPR – POF C1/C2, de até 95% da sua capacidade operativa de longa duração (2x108 MVA). Nos mesmos cenários, mas na condição de emergência (N-1), são previstas sobrecargas de até 15% em relação à

capacidade de longa duração, o que corresponde à um carregamento de 96% da capacidade de curta duração (1x130 MVA) da referida LT.

Adicionalmente, considerando a ocorrência da simultaneidade dos valores dos Montantes de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) contratados pelas distribuidoras dessa região (cenário utilizado pelo ONS para avaliação da contratação do MUST), em regime normal de operação, já são verificadas sobrecargas na LT 138 kV RPR – POF.

Desse modo, nos relatórios do PAR/PEL 2021 - ciclo 2022-2026 [1], o ONS classificou a solução estrutural para eliminar o problema de sobrecarga na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 como “P1”, ou seja, para evitar cortes de carga em regime normal de operação.

6 ALTERNATIVAS ANALISADAS

Nessa seção são apresentadas as duas alternativas analisadas neste estudo.

6.1 Alternativa 1: Reconstrução da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira C1/C2

Essa alternativa consiste na reconstrução da LT 138 kV RPR – POF C1/C2, e adequação dos equipamentos terminais, aumentando sua capacidade operativa dos atuais 108/130 MVA (normal/emergência) para 206/242 MVA (normal/emergência), por circuito. Tal obra é destacada pelo retângulo azul na Fig. 4.

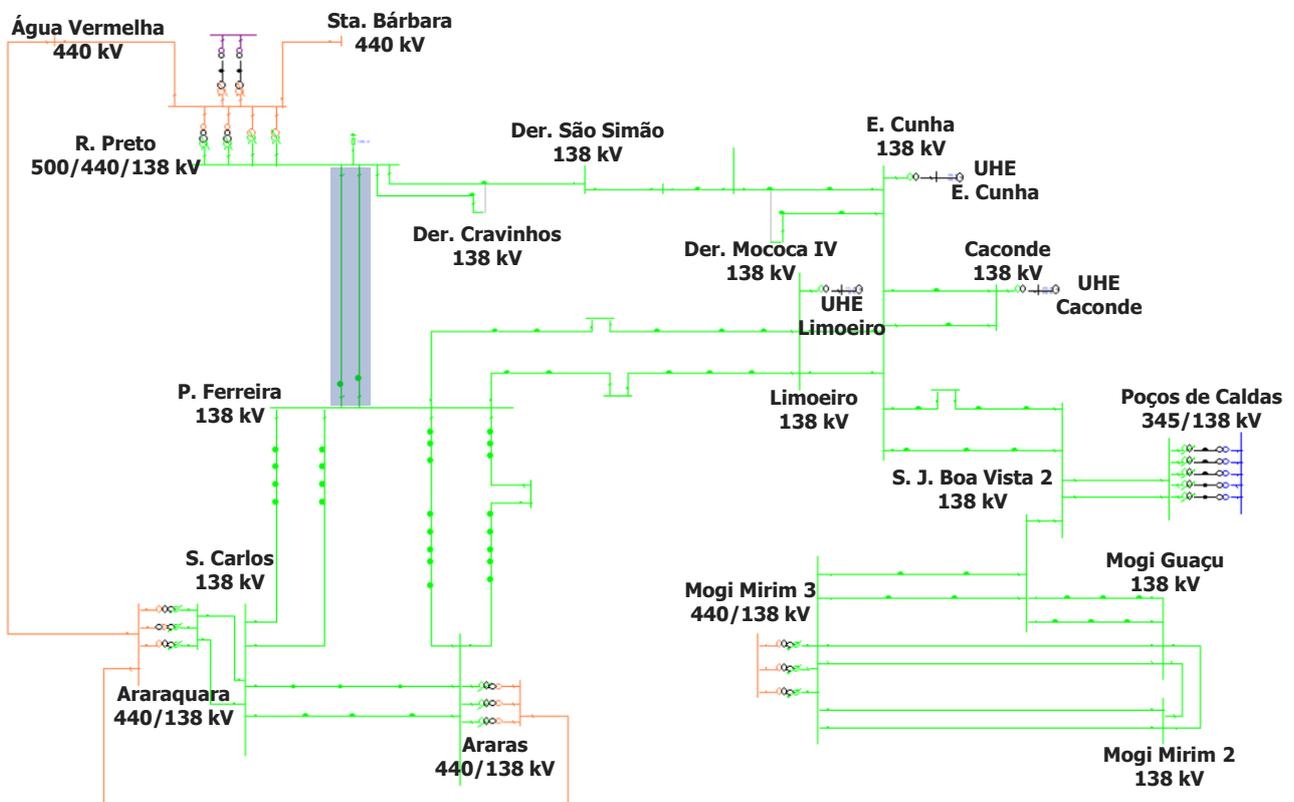


Fig. 4 - Alternativa 1: Reconstrução da LT 138 kV RPR – POF C1/C2.

6.2 Alternativa 2: Instalação de M-SSSCs na SE 138 kV Ribeirão Preto

Essa alternativa é composta pela implantação de M-SSSCs na SE 138 kV Ribeirão Preto em série com os módulos de entrada de linha associados às LT 138 kV RPR – POF C1/C2 e LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1/C2, conforme destacado pelos retângulos em azul na Fig. 5.

Adicionalmente, os estudos indicaram que essa alternativa pode ser escalonada em 3 etapas, conforme descrito na TABELA II.

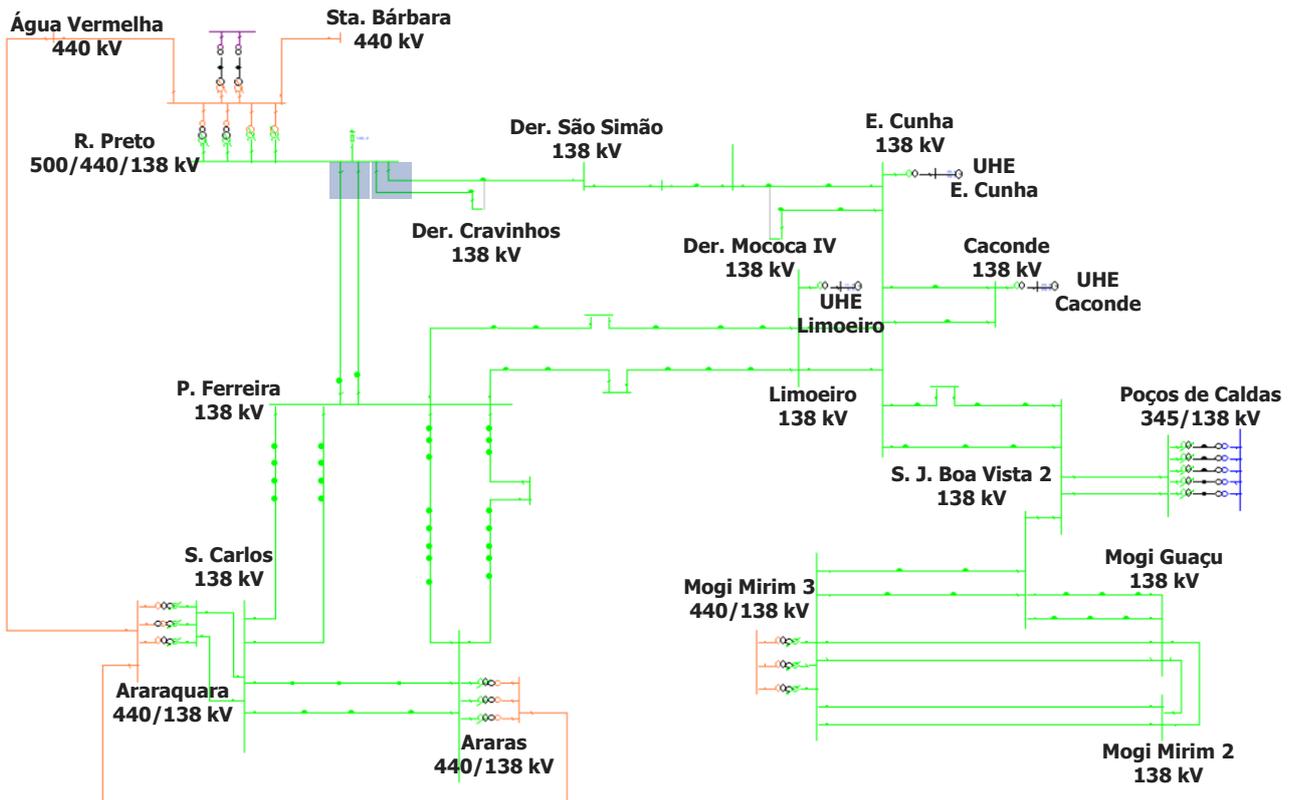


Fig. 5 - Alternativa 2: Instalação de M-SSSCs na SE 138 kV Ribeirão Preto.

TABELA II – COMPOSIÇÃO E ESCALONAMENTO DA ALTERNATIVA 2.

Ano de entrada em Operação	LT 138 kV RPR - POF C1 /C2	LT 138 kV RPR - EUC C1 ³	LT 138 kV RPR - EUC C2 ⁴
2024	1 M-SSSC/fase 6 M-SSSCs no total	1 M-SSSC/fase 3 M-SSSCs no total	-
2031	1 M-SSSCs/fase 6 M-SSSCs no total	-	-
2035	-	-	1 M-SSSC/fase 3 M-SSSCs no total
Configuração Final	2 M-SSSC/fase 12 M-SSSCs no total	1 M-SSSC/fase 3 M-SSSCs no total	1 M-SSSC/fase 3 M-SSSCs no total

7 DESEMPENHO DA ALTERNATIVA 2

Nessa seção, são apresentados os principais resultados dos estudos de fluxo de potência executados para a Alternativa 2, caracterizada pela implantação de M-SSSCs na SE Ribeirão Preto.

³ LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1 é o circuito que atualmente já fecha malha entre essas duas subestações.

⁴ Circuito original é a LT 138 kV Ribeirão Preto – Cravinhos (radial). Nessa análise está sendo considerada a sua plena expansão apenas a partir de 2035 até a SE Euclides da Cunha.

A Fig. 6 apresenta os máximos carregamentos observados na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 para os casos de trabalho do PAR/PEL 2022-2026 e do PDE 2031. Tal LT apresenta as capacidades operativas de longa e curta duração de 2x108 MVA e 1x130 MVA, respectivamente.

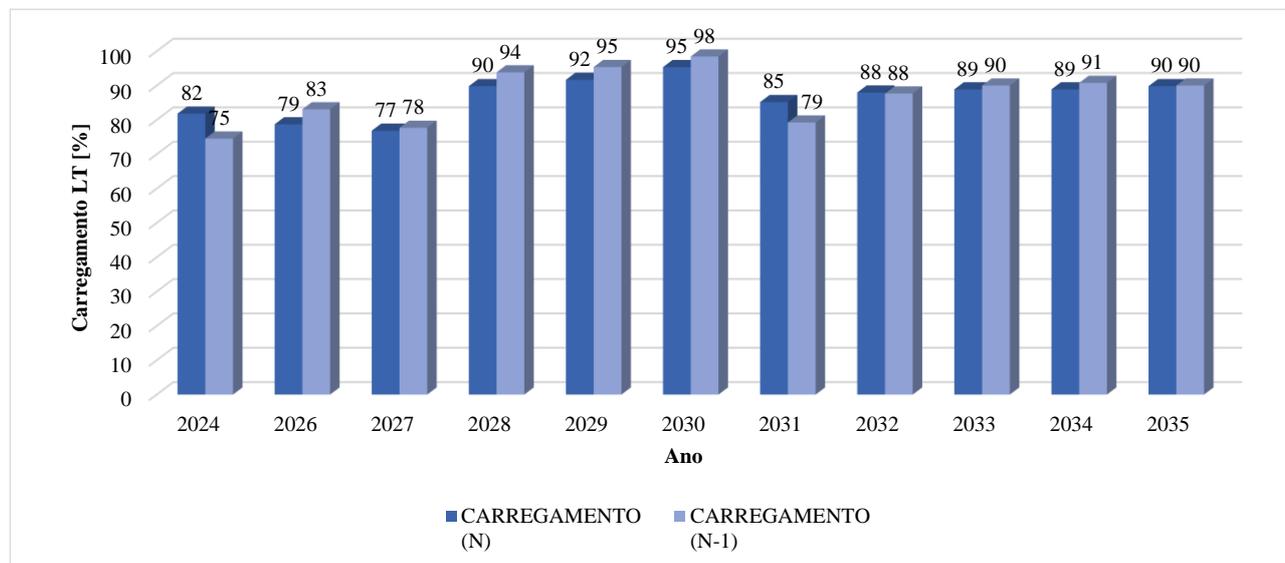


Fig. 6 – Carregamentos da LT 138 kV Ribeirão Preto – Porto Ferreira para Alternativa 2.

Nota-se que o desempenho da Alternativa 2 é satisfatório ao longo de todo o horizonte de análise (2024 à 2035), uma vez que não são observadas sobrecargas na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 durante todo este período, tanto para a condição N quanto N-1.

Os resultados da Fig. 6 refletem o escalonamento da Alternativa 2 exposto na TABELA II. Ou seja, desde o início do horizonte de análise até 2030, a implantação de apenas 1 M-SSSC/fase na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 é o suficiente para eliminar todas as sobrecargas verificadas anteriormente na referida LT. Já a partir de 2031, são necessárias 2 M-SSSCs/fase na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 para resolver este problema, sendo que até 2035 tal configuração permanece apresentando desempenho satisfatório.

O ano de 2025 não foi incluído nesse estudo, uma vez que a base de dados disponibilizada pelo ONS não contemplava um cenário alternativo para este ano, conforme detalhado na TABELA I.

Por fim, na Fig. 6 é possível notar que o carregamento da LT 138 kV RPR – POF C1/C2 não cresce linearmente ao longo do intervalo analisado. Além da adição de 1 M-SSSC/fase na referida LT no ano de 2031, isso também é motivado pelo fato de que os M-SSSCs foram ajustadas com injeções de tensões distintas, limitadas a 5,66 kV fase-terra, por equipamento.

8 ANÁLISE ECONÔMICA

Nessa seção são apresentadas as análises econômicas contemplando as 2 alternativas desse estudo, a saber:

- **Alternativa 1:** Reconstrução da LT 138 kV RPR – POF C1/C2 e adequação dos terminais associados.
- **Alternativa 2:** Implantação de M-SSSCs na SE Ribeirão Preto, nos módulos de entrada de linha associados aos circuitos Porto Ferreira C1/C2 e Euclides da Cunha C1/C2.

Os resultados dessas análises são expostos na TABELA III.

TABELA III – ANÁLISE ECONÔMICA DAS ALTERNATIVAS

Alternativas		Valor Presente (R\$ x 1000)	Diferença (%)
Nº	Escopo		
1	Reconstrução da LT 138 kV RPR - POF C1/C2	137.997,26	114,9
2	Instalação de M-SSSCs na SE Ribeirão Preto	120.148,30	100,0

9 CONCLUSÕES

Em 2021, o ONS identificou que a LT 138 kV RPR – POF C1/C2 já apresentava risco imediato de sobrecarga, em regime normal de operação (N) [1].

A solução estrutural definida pelo planejamento setorial para este problema foi a reconstrução da referida LT (Alternativa 1). Contudo, tal reforço demanda um prazo de 48 meses para entrada em operação comercial.

Desse modo, os autores desse artigo conduziram estudos de fluxo de potência e análises econômicas para avaliar o desempenho de uma alternativa inovadora, composta por M-SSSCs (Alternativa 2). Tal alternativa tem como característica o curto prazo para implantação, ou seja, aproximadamente 15 meses após a ordem de compra.

A Alternativa 2 considerou a alocação de M-SSSCs na SE Ribeirão Preto, em série com os módulos de entrada de linha da LT 138 kV RPR – POF C1/C2 e da LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1/C2.

As simulações de fluxo de potência identificaram que a Alternativa 2, descrita na TABELA II, é capaz de eliminar as sobrecargas inadmissíveis verificadas, em regime normal de operação (N) e emergência (N-1), na LT 138 kV RPR – POF C1/C2 e não agravar as sobrecargas verificadas na LT 138 kV Ribeirão Preto – Euclides da Cunha C1/C2, em todos os anos do horizonte de análise (2024 a 2035).

Adicionalmente, também foi realizada uma análise econômica simplificada comparando a alternativa composta pelos M-SSSCs e a alternativa de reconstrução da LT 138 kV RPR – POF C1/C2, exposta na TABELA III.

Vale ressaltar que o valor presente da Alternativa 2 foi calculado a partir de uma proposta comercial orientativa do fabricante. Desse modo, os custos dos M-SSSCs são preliminares e ainda estão sujeitos à alterações.

As avaliações executadas evidenciam que a alternativa composta pelos M-SSSCs apresenta o benefício da implantação escalonada, permitindo a postergação de parte dos investimentos e um menor custo para a sociedade, em relação à alternativa tradicional.

Diante do exposto, conclui-se que a Alternativa 2 apresenta desempenho satisfatório ao longo de todo o horizonte de análise (2024 a 2035) e apresenta um valor presente menor que a Alternativa 1. Além disso, a solução com M-SSSCs também apresenta benefícios adicionais, de caráter qualitativo, em relação à solução tradicional, a saber:

- Menor impacto ambiental: solução depende da implantação de equipamentos apenas dentro dos terrenos de uma subestação existente (SE Ribeirão Preto);
- Menor tempo de obra: solução reduz o período em que o sistema ficará exposto à uma condição de indisponibilidade de um circuito, ou seja, uma configuração de rede de menor confiabilidade; e
- Modularidade e mobilidade: no futuro, caso necessário, tais equipamentos poderão ser remanejados para outros pontos do sistema que apresentem as mesmas características elétricas do ponto de conexão inicial.

10 REFERÊNCIAS

- [1] Operador Nacional do Sistema. *Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN – Ciclo 2022-2026, Volume I, Tomo 1 – Classificação das Obras do SIN*. Rio de Janeiro, RJ: ONS, 2021.
- [2] J. Jardim, et. al., “Desempenho em regime permanente e transitório eletromecânico de sssc no organon e suas vantagens para operadores de sistemas”, in *XIX Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré*, Foz do Iguaçu, Mai. 2023.
- [3] Operador Nacional do Sistema. *Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3: Premissas, Critérios e Metodologia para Estudos Elétricos*. Rio de Janeiro, RJ: ONS, 2022.
- [4] Operador Nacional do Sistema. *Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN – Ciclo 2022-2026, Volume III, Tomo 5 – São Paulo*. Rio de Janeiro, RJ: ONS, 2021.