



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Solução de compensação reativa em um sistema
elétrico de potência de uma usina siderúrgica**

Carlos Eduardo Apolonio de Lima Matos

João Monlevade, MG
2023

Carlos Eduardo Apolonio de Lima Matos

Solução de compensação reativa em um sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira De Resende Barbosa

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M433s Matos, Carlos Eduardo Apolonio de Lima.

Solução de compensação reativa em um sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica. [manuscrito] / Carlos Eduardo Apolonio de Lima Matos. - 2023.
86 f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Capacitores. 2. Energia elétrica. 3. Fator de potência. 4. Siderurgia. 5. Simulação. 6. Sistemas de energia elétrica. I. Barbosa, Carlos Henrique Nogueira de Resende. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Eduardo Apolônio de Lima Matos

Solução de Compensação Reativa em um Sistema Elétrico de Potência de uma Usina Siderúrgica

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 14 de março de 2023.

Membros da banca

Doutor - Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Juan Carlos Galvis Manso - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Felipe Eduardo Moreira Cota - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/04/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/04/2023, às 19:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0504373** e o código CRC **05B479C5**.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pois através dele todas as coisas são possíveis. Na sequência, dedico este trabalho a minha mãe, a senhora Vanilda Aparecida Rosa, e agradeço muitíssimo à ela, por sempre acreditar em mim e por dar todo o apoio necessário e motivação, mesmo em meio a diversas dificuldades, para seguir em frente e chegar até aqui. Gostaria de agradecer a minha família e amigos que torceram e acreditaram em mim durante a graduação. Agradeço em grande proporção ao senhor José Renato Zacarias, coordenador do meu estágio, pelo grande apoio, didática e paciência, demonstrando ser um excelente profissional e pessoa transmitindo o seu vasto conhecimento em diversos temas da Engenharia Elétrica, tanto práticos quanto teóricos, o que tem me ajudado a chegar até aqui, possibilitando um crescimento profissional e acadêmico para mim. Agradeço a equipe da Gerência da Área de Utilidades (GAUTI) da ArcelorMittal Brasil pelo apoio e companheirismo em proporcionar um estágio com excelentes profissionais e pessoas que fazem parte do meu crescimento profissional de forma dinâmica. Agradeço a equipe Alta Tensão Manserv por elucidar diversas questões operacionais e práticas em campo, as quais me trouxeram um conhecimento prático em campo, proporcionando novos horizontes. Agradeço ao professor Carlos Henrique Nogueira De Resende Barbosa pela paciência e pelos ensinamentos não só neste trabalho, mas também nas disciplinas lecionadas por ele, que me ajudaram no meu desenvolvimento durante meu estágio na ArcelorMittal Brasil, mostrando que o conhecimentos adquiridos na Universidade Federal de Ouro Preto, fazem um diferencial significativo na vida acadêmica e profissional dos alunos.

"Entrega o teu caminho ao SENHOR; confia nele, e ele o fará. (Salmos 37, 5)"
– *Bíblia Sagrada*

Resumo

Os métodos de compensação permitem a melhoria dos níveis de tensão em um sistema elétrico de um processo siderúrgico que possa estar trabalhando de forma ineficiente por motivos de quedas de tensão. Sabe-se que há diversos equipamentos que executam tais funções de compensação reativa com o intuito de melhorar os níveis de tensão em sistemas elétricos presentes em processos industriais siderúrgicos. Através da compensação de reativos é possível controlar e melhorar também o fator de potência, o qual indica o índice de potência real que é consumida ou a porcentagem de potência que é gerada e que realizará trabalho. Dessa forma, objetivo deste trabalho é apresentar uma solução para compensação reativa de um sistema elétrico de uma usina siderúrgica local. Este trabalho apresenta os métodos de compensação reativa dentro de um sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica utilizando o software PowerWorld. Como metodologia, será realizada a simulação do sistema citado anteriormente juntamente com a análise dos resultados da instalação de equipamentos que possibilitem melhorar os níveis de tensão dos barramentos de um sistema elétrico de potência de um laminador. Por fim, conclui-se que a instalação de equipamentos como banco de capacitores e compensadores síncronos, pode ser necessária para o controle dos níveis de tensão em sistemas elétricos empregados em indústrias siderúrgicas.

Palavras-chave: Compensação Reativa, Processo siderúrgico, Nível de Tensão, Simulação, PowerWorld, banco de capacitores, compensadores síncronos.

Abstract

Compensation methods allow the improvement of voltage levels in an electrical system of a steelmaking process that may be working inefficiently due to voltage drops. It is known that there are several devices that perform such reactive compensation functions in order to improve the voltage levels in electrical systems present in steel industrial processes. Through reactive compensation it is possible to control and also improve the power factor, which indicates the real power index that is consumed or the percentage of power that is generated and that will perform work. Thus, the objective of this work is to present a solution for reactive compensation of an electrical system of a local steel plant. This work presents the methods of reactive compensation within an electrical power system of a steel plant using the PowerWorld software. As a methodology, the simulation of the previously mentioned system will be carried out together with the analysis of the results of the installation of equipment that make it possible to improve the voltage levels of the buses of an electrical power system of a rolling mill. Finally, it is concluded that the installation of equipment such as a capacitor bank and synchronous compensators may be necessary to control voltage levels in electrical systems used in steel industries.

Keywords: Reactive Compensation, Steel Process, Voltage Level, Simulation, PowerWorld, capacitor bank, synchronous compensators.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Potência ativa [W]	13
Figura 2 – Potência reativa [VAr]	13
Figura 3 – Capacitores em um SEP de uma usina siderúrgica	22
Figura 4 – Compensador Estático de Reativos conectado em delta	24
Figura 5 – Reator controlado a tiristor em uma subestação	24
Figura 6 – Conjunto de filtros harmônicos em uma usina siderúrgica	25
Figura 7 – Gerador síncrono sendo utilizado como método de compensação	26
Figura 8 – Compensador dinâmico de potência reativa	27
Figura 9 – Compensador dinâmico de potência reativa - esquema de conexão elétrica	27
Figura 10 – Princípios de compensação shunt em um sistema radial ac. (a) Sem compensação reativa. (b) Compensação shunt com uma fonte de corrente	28
Figura 11 – Princípios de compensação em série. a) O mesmo sistema da Fig. 10 (a) sem compensação. b) Compensação em série com uma fonte de tensão.	30
Figura 12 – SEP de uma usina siderúrgica no PowerWorld	31
Figura 13 – Subestação SE230 representada no PowerWorld	32
Figura 14 – Subestação SE69kV representada no PowerWorld	32
Figura 15 – Subestação SE Norte representada no PowerWorld	33
Figura 16 – Barramento do Quadro Geral Norte representado no PowerWorld	34
Figura 17 – Subestação derivação 1 (SED 01) representada no PowerWorld	34
Figura 18 – Subestação derivação 1 representada no PowerWorld	35
Figura 19 – Subestação derivação 2 representada no PowerWorld	36
Figura 20 – Quadro Geral Central	36
Figura 21 – Pequena Central Hidroelétrica representada no PowerWorld	37
Figura 22 – Unidade Geradora da PCH	38
Figura 23 – Diagrama fasorial do gerador sobreexcitado que atua no sistema de elétrico da laminação	39
Figura 24 – Laminador 1 - Teste 1	43
Figura 25 – PCH - Teste 1	43
Figura 26 – Banco de Transformadores da SE SUL - Teste 1	44
Figura 27 – Laminador 1 - Teste 2	45
Figura 28 – PCH - Teste 2	45
Figura 29 – Laminador 1 - Teste 3	46
Figura 30 – PCH - Teste 3	46
Figura 31 – Laminador 1 - Teste 4	47
Figura 32 – PCH - Teste 4	47
Figura 33 – Laminador 1 - Teste 5	48

Figura 34 – PCH - Teste 5	48
Figura 35 – Banco de capacitores instalado na barra da sala elétrica 2 do Laminador 01	49
Figura 36 – Compensador síncrono instalado na barra da sala elétrica 2 do Laminador 01	49
Figura 37 – Sistema de coleta de variáveis - PIMS do Trem de laminação 01	50
Figura 38 – Grandezas elétricas de cada barramento do Trem de Laminação 01 no PIMS	51
Figura 39 – SEP atualizado e simulado no PowerWorld	53
Figura 40 – Barras 09 e 10 da SESUL	54
Figura 41 – Barra 11 (Sala Elétrica 2)	54
Figura 42 – Barra 12 (Sala Elétrica 1)	55
Figura 43 – Barra 35 (PCH)	55
Figura 44 – SEP simulado no PowerWorld	57
Figura 45 – SEP simulado no PowerWorld	58
Figura 46 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 1 nas topologias 1 a 5	60
Figura 47 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 2 nas topologias 1 a 5	60
Figura 48 – Porcentagem de carregamento do Banco de transformadores da SE SUL nas topologias 1 a 5	61
Figura 49 – Demanda de potência reativa da rede CEMIG para o Laminador 01 nas topologias 1 a 5	62
Figura 50 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 1 nas topologias 6 a 10	63
Figura 51 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 2 nas topologias 6 a 10	64
Figura 52 – Porcentagem de carregamento do Banco de transformadores da SE SUL nas topologias 6 a 10	64
Figura 53 – Demanda de potência reativa da rede CEMIG para o Laminador 01 nas topologias 6 a 10	66
Figura 54 – Carregamento registrado nas situações atuais e presentes na primeira simulação	66
Figura 55 – Carregamento registrado após a inserção do banco de capacitores de 16 MVar para compensação	67
Figura 56 – Curvas em que mostram uma demanda maior de potência reativa nos barramentos do processo do Laminador 01	68
Figura 57 – Curvas da demanda do potência reativa no SEP do processo do Laminador 01 após a inserção do banco de capacitores de 16 MVar para compensação no barramento da sala elétrica 2	68
Figura 58 – Software PowerWorld - Tela inicial	73
Figura 59 – Criação do Primeiro Caso	74
Figura 60 – Software PowerWorld - Primeiro Caso	74

Figura 61 – Menu de informações do caso criado	75
Figura 62 – Menu de desenho dos componentes de um SEP	75
Figura 63 – Menu de acompanhamento da enquanto o programa está sendo executado	75
Figura 64 – Menu de ferramentas	75
Figura 65 – Menu de opções	75
Figura 66 – Menu de observação dos fluxos de potência e curvas de carga nas barras	76
Figura 67 – Menu de janelas	76
Figura 68 – Software PowerWorld	77
Figura 69 – Example1_1	78
Figura 70 – Example1_1 em execução no PowerWorld	79
Figura 71 – Simulação de apagão no sistema após isolar a carga do gerador	80
Figura 72 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP	80
Figura 73 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP após dobrar o valor da carga	81
Figura 74 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP após triplicar o valor da carga	81
Figura 75 – Fluxos de potência ativa e reativa após acréscimo de uma nova LT no SEP	82
Figura 76 – Novo SEP com 3 barras	82
Figura 77 – Novo SEP com 3 barras após desligamento do disjuntor da linha 1-3 . .	83
Figura 78 – Novo SEP linha 1-2 fora dos limites de operação	83
Figura 79 – Pirâmide da Automação industrial	84
Figura 80 – SAP - Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados	85
Figura 81 – SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia)	86

Lista de Siglas

QEE	Qualidade da Energia Elétrica
CR	Compensação Reativa
SEP	Sistema Elétrico de Potência
CT	Controle de Tensão
MIRB	Máquina de Indução de Rotor Bobinado
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SEE	Sistema de Energia Elétrica
CER	Compensador Estático de Reativo
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
LT	Linha de Transmissão
SIN	Sistema Integrado Nacional
TP	Transformadores de Potencial
TC	Transformadores de Corrente
OMI	Óleo Mineral Interno
IP	Índice de Proteção
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
QGC	Quadro Geral Central
QGN	Quadro Geral Norte
SE SUL	Subestação Sul
SE NORTE	Subestação Norte
SED 01	Subestação Subestação derivação 01
SED 02	Subestação Subestação derivação 02

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivos específicos	15
1.4	Organização do texto	15
2	REVISÃO TEÓRICA	16
2.1	Revisão Bibliográfica	16
2.2	A relevância da localização dos compensadores de potência reativa	17
2.3	Emprego das técnicas de compensação	18
2.3.1	Compensação estática	19
2.3.1.1	Banco de Capacitores	20
2.3.1.2	Static VAr Compensator - SVC	23
2.3.1.3	Filtros Harmônicos	25
2.3.2	Compensação Dinâmica	25
2.3.2.1	Gerador síncrono	25
2.3.2.2	Compensador dinâmico de potência	26
2.3.3	Topologias para equipamentos de compensação que podem ser empregadas em um SEP	28
2.3.3.1	Compensação paralela(shunt)	28
2.3.3.2	Compensação série	29
3	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DA USINA SIDERÚRGICA LOCAL	31
3.1	SEP da usina siderúrgica local no PowerWorld	31
3.1.1	Subestação 230 kV - SE230	32
3.1.2	Subestação 69 kV	32
3.1.3	Subestação Norte	33
3.1.4	Subestação derivação 1	34
3.1.5	Subestação derivação 2	35
3.1.6	Quadro Geral Central (QGC)	36
3.1.7	Pequena Central Hidroelétrica - PCH	37
3.2	Problemas com Quedas de Tensão	38
3.3	Manobras de interligação do barramento da PCH com o SEP	38
3.4	Banco de capacitores atuando em um processo siderúrgico	40

4	METODOLOGIA	42
4.1	Topologia dos testes 1 e 6: Situação do atual funcionamento	43
4.2	Topologia do testes 2 e 7: As 3 geradoras em paralelo	44
4.3	Topologia do testes 3 e 8: Sem a PCH	46
4.4	Topologia do testes 4 e 9: Sem a interligação do QGC	47
4.5	Topologia do testes 5 e 10: Laminador 1 alimentado pelo barramento do QGN (Quadro Geral Norte)	48
4.6	Equipamentos a serem instalados	49
4.7	Coleta e análise de dados	50
4.7.1	Coleta de Dados	50
4.7.2	Trem de Laminação 01 em funcionamento	51
4.8	Pontos de monitoramento	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1	Sistema elétrico simulado no PowerWorld	56
5.1.1	Banco de Capacitores	59
5.1.2	Compensador síncrono	63
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71
7	APÊNDICE A	73
7.1	Apêndice A	73
7.1.1	Ambiente de trabalho	73
8	APÊNDICE B	77
8.1	Ferramenta PowerWorld	77
8.1.1	Utilizando um sistema de 2 barras de exemplo	78
9	ANEXO A	84
9.1	Softwares utilizados para monitoramento e gerenciamento de atividades no SEP	84
9.1.1	PIMS	84
9.1.2	SAP - Systemanalysis Programmentwicklung	84
9.1.3	SAGE - Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia	85

1 Introdução

O controle dos níveis de tensão nas indústrias siderúrgicas é uma tarefa rotineira devido aos equipamentos utilizados e a topologia de seus sistemas elétricos. Uma indústria que possui um perfil de tensão adequado, obtém benefícios tanto para a distribuidora de energia quanto para seus consumidores em seus processos de produção, pois com isso, as ocorrências de quedas ou variações de tensão reduzem, os equipamentos operam de forma correta e as penalidades que a concessionária de energia aplica devido ao consumo de potência reativa podem ser evitadas.

O fato de ainda acontecer quedas de tensão em sistemas elétricos não compensados, influencia nas sobrecargas de transformadores em subestações bem como em linhas de distribuição e transmissão. Indústrias podem ser afetadas devido à instabilidade no sistema elétrico como por exemplo uma usina siderúrgica, resultando em paradas de processos importantes, entre outros inconvenientes a demais consumidores.

O ajuste dos equipamentos industriais como fornos elétricos, laminadores, turbo-compressores, a alocação de banco de capacitores e compensadores síncronos, assim como a substituição de condutores são algumas ações práticas que garantem que os níveis de tensão estejam adequados.

Relacionado ao controle de tensão em sistemas elétricos de indústrias siderúrgicas, tem-se uma exigência da melhor utilização dos recursos de compensação reativa existentes (SILVA, 2007).

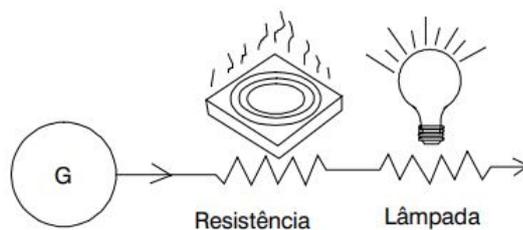
Dentre os equipamentos que podem ser utilizados no controle de tensão e potência reativa, tem-se os bancos de capacitores, os compensadores síncronos que são apresentados neste trabalho. Será apresentada uma proposta para a utilização de equipamentos capazes de realizar uma compensação reativa. Essa proposta de compensação, proporcionará o controle dos níveis de tensão em processos siderúrgicos tais como os laminadores de fio máquina.

Compreende-se que a potência ativa é aquela consumida pela carga durante a realização de trabalho. Esta grandeza indica qual é a capacidade do equipamento em converter energia elétrica em outra forma de energia, como energia mecânica ou térmica, o que pode ser observado na Figura 1. A potência reativa não produz nenhuma forma de trabalho e circula entre a carga e a fonte, ocupando um determinado espaço no sistema elétrico de potência. Esta energia é utilizada para excitar os campos eletromagnéticos dos motores para que estes possam realizar trabalho como mostra a Figura 2.

Neste trabalho será implementada uma simulação no software PowerWorld de um sistema elétrico de potência instalado em uma usina siderúrgica local do tipo integrada (que possui todas as etapas de processo da fabricação do aço), com o objetivo de encontrar uma solução de compensação reativa para o processo de um de seus laminadores (Lami-

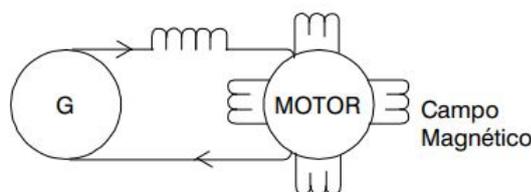
nador 01) para melhorar o nível de tensão dos barramentos do processo citado, visto que, sofre com ocorrências de quedas de tensão causando paradas não programadas e perda de produção de fio-máquina.

Figura 1 – Potência ativa [W]



Fonte:(FERGÜTZ, 2016)

Figura 2 – Potência reativa [VAr]



Fonte:(FERGÜTZ, 2016)

1.1 Motivação

Atualmente tem-se a necessidade de obter níveis maiores de eficiência dos sistemas elétricos de potência das indústrias siderúrgicas, tornando-os assim mais confiáveis e tendo em vista obter soluções que tragam maior eficiência e redução do número de quedas de tensão que possam parar quaisquer processos siderúrgicos em uma empresa.

O problema de estabilidade de tensão tem sido uma grande preocupação em estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos. A maioria das interrupções do fornecimento de energia em processos siderúrgicos são causados por quedas de tensão que mostram a importância desse fenômeno e a necessidade de controle dos níveis de tensão perante à esses eventos. Os sistemas elétricos de potência presentes em algumas indústrias operam aproximadamente próximos aos limites máximos de sua capacidade, tornando assim, muito mais susceptíveis às quedas de tensão, podendo causar em perdas na produtividade por paradas extraordinárias nas linhas de produção. A disponibilidade de potência reativa, está relacionada ao problema anteriormente citado, e também à forma em que as fontes reativas conectadas nas barras de um sistema de potência. As restrições da geração e transmissão de potência reativa causam um déficit da mesma ao longo

do tempo de acordo com a mudança dos perfis das cargas e a não correção apropriada do sistema elétrico dentro de uma indústria siderúrgica. Logo, tem-se um aspecto significativo no planejamento destes sistemas, o qual é garantir que haja compensação de potência reativa de modo adequado (MANTOVANI; SANZ et al., 2014). O objetivo principal da realização de tal planejamento é possibilitar uma expansão de fontes reativas levando em conta a capacidade de potência entregue, tipo e localização da instalação dos equipamentos, visando manter a operação segura e confiável.

1.2 Justificativa

Um dos temas mais importantes envolve o equacionamento da demanda de reativos na rede elétrica, classicamente abordado através da correção do fator de potência em instalações, e os aspectos relacionados aos fenômenos de qualidade de energia. Se por um lado a adoção de filtros passivos e ou ativos permite a compensação da demanda de potência reativa da rede e de uma instalação dentro de usinas siderúrgicas, por outro lado, este também deve ser adotado com cuidado em virtude dos potenciais efeitos negativos advindos das ressonâncias harmônicas. Estas, dependendo da configuração da rede e da instalação, podem aparecer na adoção de soluções simples como a instalação de um banco de capacitores não chaveado, ou complexas como a instalação de filtros ativos, para a compensação de potência reativa no sistema de potência dentro de uma usina (RESENDE; PAULILLO, 2013). A compensação reativa (CR) como alternativa de expansão dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem sido foco de pesquisas realizadas por alguns autores como (MANTOVANI; SANZ et al., 2014) e (DIXON et al., 2005) e tal interesse, é motivado pelos vários benefícios trazidos para o sistema pela compensação reativa shunt capacitiva tais como melhor utilização da rede, diminuição das perdas, ajuste do fator de potência. *Além de possibilitar estes benefícios, a compensação reativa, aliada ao controle de tensão (CT), é uma das alternativas mais atrativas sob o ponto de vista econômico* (VALE et al., 2005). Outra forma de compensação seria a utilização de um compensador síncrono.

1.3 Objetivos

Elaborar uma proposta de compensação reativa em um sistema elétrico de potência instalado em uma usina siderúrgica local estudando alternativas de compensação, avaliando-as por meio de simulação no software PowerWorld.

1.3.1 Objetivos específicos

- Elaborar uma solução que venha mitigar o problema das quedas de tensão pela compensação reativa deste sistema visando um controle mais eficiente dos níveis de tensão dos barramentos principais dos processos (sinterização, aciaria e laminação) que contenham as maiores cargas (fornos elétricos, cadeiras de laminação, turbo-compressores).
- Utilizar o software PowerWorld para realizar a construção do modelo do sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica.
- Realizar um estudo de técnicas de compensação reativa (compensação estática e compensação dinâmica).

1.4 Organização do texto

Neste primeiro capítulo foi realizada a introdução, a motivação e a justificativa para a realização deste trabalho, visando abordar soluções para quedas de tensão de uma usina siderúrgica local utilizando métodos de compensação reativa em um sistema elétrico de potência (SEP) e a sua importância.

No segundo capítulo a descrição da revisão bibliográfica utilizada neste trabalho é realizada juntamente com as técnicas de compensação reativa existentes para a solução do problema em questão.

No terceiro capítulo será introduzida a descrição e constituição do sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica local para distribuir energia elétrica a todos os processos de produção que resultarão na fabricação de fio-máquina.

O quarto capítulo trata da metodologia na qual esse trabalho é baseada e também, os testes que serão realizados conforme cada um de seus arranjos no SEP na usina siderúrgica local. Ainda neste capítulo são listados os equipamentos de compensação a serem instalados e os pontos que serão monitorados.

Por meio do quinto capítulo será realizada a descrição dos testes via simulação no software PowerWorld em conjunto às técnicas implementadas para compensação de reativos nos barramentos do Laminador 01 demonstrando os resultados obtidos.

No sexto capítulo será elaborada a conclusão dos testes realizados por meio do software e as atividades propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão teórica

As referências apresentadas a seguir utilizadas neste trabalho serão organizadas conforme o critério de ordem cronológica.

2.1 Revisão Bibliográfica

Em (DECKMANN, 1987) nota-se a importância da compensação de potência reativa, e das melhorias que são realizadas para aumentar o desempenho de um sistema elétrico, juntamente com os avanços na tecnologia relacionada à eletrônica de potência para que um controle eficiente seja executado.

Em (SOUZA, 2003) é relatada a aplicação da máquina de indução de rotor bobinado (MIRB) como compensador síncrono de velocidade variável, assim como também, são mostrados os principais distúrbios que afetam o fornecimento de energia elétrica e uma diversa gama de soluções que estão disponíveis para consumidores ou operação do sistema de distribuição de energia elétrica.

Em (VALE et al., 2005), os autores apresentam os benefícios da compensação reativa, em conjunto com o controle de tensão como alternativa economicamente viáveis como medidas de melhoria em um SEP.

Em (DIXON et al., 2005) mostra-se que a compensação de potência reativa em sistemas de transmissão de energia elétrica, melhora a estabilidade do sistema CA, aumentando a potência ativa máxima que pode ser transmitida. Somado a isso tem-se um auxílio na estabilização do perfil da tensão de modo substancial.

Em (SILVA, 2007) são apresentadas as tarefas de controle dos níveis de tensão das barras de um sistema. O controle citado, é incluído devido a inserção de fontes de potência reativa com o objetivo de manter o módulo da tensão em uma faixa recomendada. Para que tal controle possa ser efetivo, são utilizados equipamentos de compensação como bancos shunt capacitivos.

Por meio de (RESENDE; PAULILLO, 2013) é abordado o contexto da qualidade da energia elétrica que é um dos temas mais importantes envolvendo o equacionamento da demanda de reativos em um sistema elétrico. Em consonância ao assunto abordado tem-se a correção do fator de potência em instalações, e os aspectos que se relacionam aos fenômenos de qualidade de energia, principalmente sobre filtro de harmônicos e a alocação de bancos de capacitores.

Em (QUIZHPI, 2014) o problema de planejamento ótimo de reativos é formulado e resolvido como um problema de otimização convexo multi-período estocástico para sistemas elétricos de potência. O modelo clássico de planejamento de reativos não linear

inteiro misto é reestruturado como um novo modelo levando em consideração os taps dos transformadores com controle de taps.

Em (LAZO, 2015) propõe-se uma resolução para a alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radiais. O objetivo é diminuir os custos levando em conta as perdas de energia, sujeitas a limitações operacionais do sistema elétrico.

2.2 A relevância da localização dos compensadores de potência reativa

A organização dos locais em que são instalados compensadores potência reativa é baseada no perfil de tensão do sistema elétrico de potência, com a finalidade de mantê-lo dentro dos limites preestabelecidos, contribuindo assim para melhor confiabilidade e a segurança na operação SEP (QUIZHPI, 2014). As diversas técnicas utilizadas no planejamento de reativos descritas em várias referências bibliográficas sugerem a alocação dos compensadores potência reativa tais como banco de capacitores e compensadores síncronos considerando os parâmetros do sistema de potência instalado (MANTOVANI; SANZ et al., 2014)

O sistema de energia elétrica é planejado considerando certas condições de carga e topologia e com a disponibilidade das reservas reativas necessárias para operar atendendo as restrições de segurança e operação. Com o decorrer do tempo, o sistema originalmente planejado sofre alterações topológicas e de crescimento de cargas, podendo não mais atender tais restrições. Fundamentado nos aspectos citados anteriormente, as principais situações ou condições que exigem um planejamento de reativos são as seguintes:

- Crescimento de cargas em barras de baixa tensão distantes das unidades geradoras, causando dificuldades com a qualidade de serviço para os consumidores, problemas de instabilidade de tensão e perdas excessivas no sistema de transmissão;
- Necessidades de uma estratégia adequada de planejamento de reativos/operação do sistema de geração/transmissão, visando manter o suporte necessário para operação segura e manutenção de reservas das fontes de potência reativa de resposta rápida (compensadores síncronos e estáticos), para serem usadas em condições transitórias do sistema;
- Crescimento do sistema elétrico instalado com a adição de novas linhas para atender novas cargas dentro dos processos siderúrgicos já existentes (laminação, aciaria, sinterização, alto-forno);
- Necessidade de substituir as fontes de potência reativa de uma área do sistema de energia elétrica por motivos técnicos e/ou econômicos, problemas com os equipa-

mentos de compensação velhos, alteração do nível de tensão de um setor do sistema de energia elétrica.

2.3 Emprego das técnicas de compensação

A Compensação Reativa (CR), aliada ao Controle de Tensão (CT), é uma das alternativas de expansão que se apresentam aos planejadores do Sistema de Energia Elétrica (SEE). Esta se mostra como uma das mais atrativas, sob o ponto de vista econômico, além de trazer inúmeros benefícios para as redes elétricas. Com relação ao controle de tensão, no contexto atual do setor elétrico, exige-se a melhor utilização dos recursos existentes no SEE, onde deve ser tratado dentro de um contexto de controle de fluxo de potência reativa injetado no sistema elétrico de potência instalado (VALE et al., 2005).

O papel cada vez mais importante que a compensação reativa está assumindo é consequência do conhecimento das potenciais melhorias que o controle da injeção e do fluxo de potência reativa podem introduzir na operação do sistema elétrico, aumentando seu desempenho estático e dinâmico, assim como os avanços tecnológicos alcançados, principalmente nas áreas de eletrônica de potência e controle de processos, que resultaram em soluções para viabilizar o controle efetivo da potência reativa (DECKMANN, 1987).

No que se refere a potência reativa, pode-se afirmar que a mesma é produzida e consumida pelos componentes do sistema de potência e tem um impacto importante no perfil de tensão do sistema. Como consequência, o controle de potência reativa é usado nos sistemas elétricos para manter o perfil de tensão dos barramentos que atendam a processos de usinas siderúrgicas, principalmente no emprego de fornos elétricos a arco e laminadores (QUIZHPI, 2014). A potência reativa tem importância técnica e econômica, pois, em função do balanço de reativos em um sistema elétrico, exige-se o investimento na instalação de fontes reativas adicionais.

As técnicas de compensação se dividem em compensação do tipo estática e dinâmica de acordo com o funcionamento. De acordo com a instalação dos equipamentos nos barramentos e em relação ao fluxo de potência as técnicas de compensação podem ser divididas em compensação série ou paralela. A seguir serão listadas algumas delas com o objetivo de solucionar a compensação dos níveis de tensão em um SEP de uma usina siderúrgica ou quaisquer sistemas industriais, tais como:

- Emprego de banco de capacitores;
- Emprego de compensador em paralelo;
- Emprego de compensador em série;
- Emprego de máquinas síncronas;
- Emprego de reguladores de tensão.

2.3.1 Compensação estática

Dentre os meios de compensação estática, os capacitores e os reatores são bastante utilizados na compensação de potência reativa, principalmente pelo baixo custo e relativa facilidade na instalação e operação. O equipamento de compensação estática é usualmente instalado em lugares próximos dos consumidores, para que desta forma possa também realizar a correção do fator de potência. Para este tipo de equipamentos, o controle de tensão e o balanço de potência reativa mais elementar realiza-se mediante a conexão/desconexão de módulos integrados por bancos de capacitores e reatores (QUIZHPI, 2014).

A compensação reativa é definida como o gerenciamento de energia reativa para melhorar o desempenho dos sistemas de energia CA. O conceito de compensação reativa abrange um campo amplo e diversificado de problemas do sistema e do cliente, especialmente relacionados com questões de qualidade de energia, uma vez que a maioria dos problemas de qualidade de energia podem ser atenuados ou resolvidos com um controle adequado da potência reativa. Em geral, o problema da compensação de potência reativa é visto sob dois aspectos: compensação de carga e suporte de tensão. Na compensação de carga, os objetivos são aumentar o valor do fator de potência do sistema, equilibrar a potência real retirada da fonte CA, compensar a regulação da tensão e eliminar os componentes harmônicos de corrente produzidos por grandes cargas industriais não lineares flutuantes. O suporte de tensão geralmente é necessário para reduzir a flutuação de tensão em um determinado terminal de uma linha de transmissão. *A compensação de potência reativa em sistemas de transmissão também melhora a estabilidade do sistema CA, aumentando a potência ativa máxima que pode ser transmitida (DIXON et al., 2005).*

Hoje em dia grande parte dos *problemas enfrentados pelas empresas do setor elétrico e que são causados pela operação das chamadas cargas especiais podem ser resolvidos através da compensação reativa e também utilizando os recursos hoje disponíveis por meio da eletrônica de potência e do processamento de controle digitais (SANTIAGO, 2016).* Atualmente também são encontrados problemas através da operação do sistema elétrico de potência relacionados a operação de variações das cargas no decorrer de um certo período como em fornos elétricos para aquecimento de barras de aço, fornos-panela para o processamento de sucata junto ao ferro gusa e laminadores por meio de cadeiras controladas por inversores. Dentre os equipamentos siderúrgicos citados anteriormente podem-se listar os seguintes problemas:

- Aumento do nível de distorção da onda de tensão na rede, conseqüente do nível de harmônicos gerados pelas correntes dessas cargas não-lineares;
- Aumento do nível de desequilíbrio de fases, devido, por exemplo, à operação independente das fases dos transformadores alimentadores de fornos a arco e sistemas de tração monofásica;

- Flutuação da tensão devido à variação irregular da corrente da carga comum em laminadores, podendo provocar efeito de cintilação luminosa em toda região vizinha;
- Sobretensões e sobrecorrentes em pontos susceptíveis a ressonâncias série e paralelas para correntes harmônicas (LAZO, 2015);
- Atuação errônea do sistema de proteção em consequência da distorção harmônica e flutuações de tensão e corrente;
- Aumento de perdas nos sistemas de transmissão, transformadores e redes de distribuição, tanto pela presença de correntes harmônicas como pelo aumento de fluxo de reativos para a carga;
- Redução da margem de estabilidade do sistema de geração e transmissão, possibilitando o aparecimento de oscilações que podem levar ao colapso do sistema interligado afetando processos adjacentes parando a produção de aço no início ainda na aciaria ou mesmo no processo final na conformação das bobinas.

2.3.1.1 Banco de Capacitores

Os capacitores apresentados na Figura 3 são equipamentos que injetam potência reativa capacitiva nos sistemas elétricos onde são instalados, reduzindo perdas, elevando o nível de tensão e evitando, no caso de instalações comerciais e industriais, que os consumidores sejam penalizados pelo consumo excedente de potência reativa proveniente da rede elétrica da concessionária de energia. *Os capacitores normalmente são reunidos em bancos com capacidade necessária para atender a determinados requisitos de potência do sistema elétrico. Em geral, são fabricados para suprir as necessidades de injeção de potência reativa nos sistemas de baixa, média e alta tensões. Na maioria dos casos, as células capacitivas não ultrapassam a tensão de 25 kV e a sua potência capacitiva fica limitada a 500 kVar* (MAMEDE; FILHO, 2013). Os bancos de capacitores podem operar de forma fixa ou manobrável, conforme as necessidades do projeto:

- Banco de capacitores fixos: *É aquele conectado permanentemente ao sistema elétrico, fornecendo continuamente potência reativa capacitiva, independente das necessidades da carga. Em períodos de baixo consumo, quando a capacitância do sistema elétrico é superior à potência reativa indutiva, os bancos de capacitores fixos contribuem de forma negativa fornecendo mais energia reativa capacitiva, provocando sobretensões. É o tipo de aplicação mais simples e de menor custo* (MAMEDE; FILHO, 2013).
- Banco de capacitores manobráveis: *É aquele que se conecta ao sistema elétrico por meio de chaves interruptoras comandadas por um sistema de controle previamente ajustado para as condições que se fizerem necessárias. Isso significa que ele atua*

somente quando for necessária a injeção de potência reativa capacitiva para manter o fator de potência corrigido ou a tensão do sistema em valores predefinidos. Os bancos de capacitores manobráveis têm custo muito elevado em comparação com os bancos de capacitores fixos (MAMEDE; FILHO, 2013).

Nos sistemas de distribuição, bem como nos sistemas industriais é comum a instalação de bancos fixos ao lado de bancos manobráveis. *Para compensar as potências reativas indutivas excedentes, determina-se a potência de um banco de capacitores com vários capacitores que podem ser manobrados individualmente ou em bloco, de forma a compensar as necessidades que o sistema* (MAMEDE; FILHO, 2013). Devido a esses tipos de compensação, os banco de capacitores podem ser encontrados dentro de indústrias. Esses equipamentos são conectados aos sistemas elétricos de processos contidos nas indústrias siderúrgicas, quer seja do tipo integrada ou não.

Nos sistemas de baixa tensão, os bancos de capacitores, na maioria dos casos, são instalados no interior das subestações ou muito próximo a elas, conectados ao Quadro Geral de Força. Esta tem sido a solução mais econômica nas aplicações normais. Em determinadas situações os bancos de capacitores podem ser instalados nos Centros de Controle de Motores, quando se trata de instalações industriais.

Nos sistemas de distribuição de média tensão os bancos de capacitores são instalados tanto no interior das subestações de potência quanto ao longo dos alimentadores urbanos e rurais. A grande vantagem de sua instalação no barramento de média tensão das subestações de potência reside na centralização do controle da potência reativa necessária à avaliação dos níveis de tensão, e além disso, reduz o investimento inicial e os custos operacionais. Quando instalados ao longo das redes de distribuição, os bancos de capacitores apresentam grandes vantagens quanto à regulação de tensão dos alimentadores e à redução das perdas elétricas nos alimentadores. No entanto, algumas restrições práticas têm reduzido a aplicação de banco de capacitores na rede de distribuição tais como:

- Sempre que há alteração na configuração dos alimentadores, é necessário realizar estudos para determinar se as novas condições de funcionamento do banco de capacitores estão tecnicamente adequadas.
- As manobras dos bancos de capacitores podem provocar perturbações na tensão degradando a qualidade da energia distribuída.
- A queima da proteção fusível ou de uma ou mais células do banco de capacitores normalmente não é percebida pelas áreas de operação e manutenção do sistema, ficando inativo por muito tempo sem prestar os serviços necessários à rede elétrica.

Figura 3 – Capacitores em um SEP de uma usina siderúrgica

Fonte: Próprio Autor

Nos sistemas de distribuição, a alocação de capacitores fixos e manobráveis deve ser acompanhada de um estudo técnico-econômico para efeito de comparação com a instalação de reguladores de tensão. Os bancos de capacitores são geralmente parte integrante dos compensadores estáticos, operando coordenados com bancos de reatores, fornecendo potência reativa indutiva e capacitiva de acordo com as necessidades do sistema elétrico.

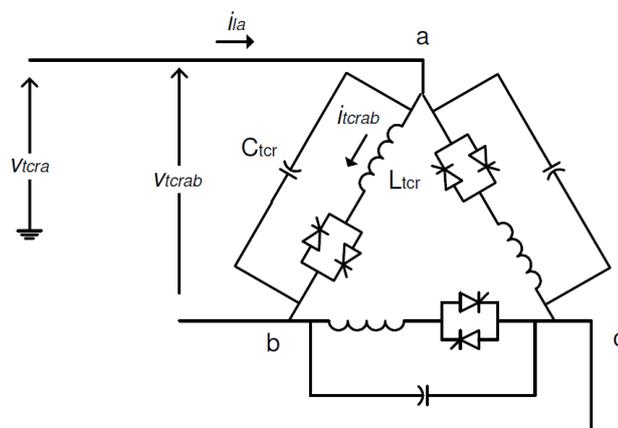
2.3.1.2 Static VAR Compensator - SVC

O Compensador Estático de Reativo (CER), em inglês Static VAR Compensator (SVC), é um dispositivo de eletrônica de potência constituído pelos seguintes elementos básicos: Reator Controlado a Tiristor (TCR – Thyristor Controlled Reactor) associado com um banco de capacitores fixos ou chaveado como pode ser observado nas Figuras 4 e 5. Sobre este equipamento podem-se listar as vantagens e desvantagens da utilização do mesmo como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de um SVC

Vantagens	Desvantagens
Aumento da capacidade de transferência de potência através do aumento da margem de estabilidade.	Ineficiente no controle da potência ativa transmitida em uma linha com magnitudes das tensões terminais definidas.
Melhora as características de transmissão em regime permanente bem como a tensão.	Cada banco de capacitor deve possuir um grupo bidirecional de tiristores o que torna sua implantação não atrativa economicamente.
Eficiente na manutenção de um perfil de tensão ao longo de linhas de transmissão.	A capacidade de isolamento do semicondutor deve ser o dobro da tensão de pico da rede, garantindo assim a integridade do circuito de chaveamento.
Fornecer suporte de tensão no final de linhas de transmissão radiais diante do aumento da demanda de potência.	
Melhoria da qualidade de energia.	
Promove o prolongamento da vida útil dos equipamentos, regulação de tensão do sistema, aumento do fator de potência e compensação de potência reativa dinâmica.	

Figura 4 – Compensador Estático de Reativos conectado em delta



Fonte: (CEPEL, 2021)

O SVC é utilizado para regulação de tensão no meio (ou em algum ponto intermediário) da linha de transmissão e no final da mesma para evitar instabilidade de tensão, bem como, para controle dinâmico da tensão aumentando a margem de estabilidade transitória e amortecendo as oscilações de potência (CEPEL, 2021). Através da figura 5 pode-se observar de um modelo real de SVC instalado em uma subestação. Em sistemas elétricos industriais tais como em usinas siderúrgicas, no caso deste trabalho, onde há a presença de fornos a arco CA, geralmente apresentam grandes demandas de potência reativa, alta geração de harmônicos e grandes correntes de sequência negativa, o sistema SVC, além de fornecer potência reativa para a planta industrial, elimina os harmônicos gerados por retificadores e impede a flutuação de tensão (CEPEL, 2021).

Figura 5 – Reator controlado a tiristor em uma subestação



Fonte:(PACHECO et al., 2007)

2.3.1.3 Filtros Harmônicos

Os filtros de harmônicos são elementos shunt usados em sistemas de potência para diminuir a distorção de tensão e para corrigir o fator de potência. Elementos não lineares, como conversores eletrônicos de potência, geram correntes harmônicas ou tensões harmônicas, que são injetadas no sistema de potência. As correntes distorcidas resultantes fluindo através da impedância do sistema produzem distorção de tensão harmônica. Os filtros harmônicos reduzem a distorção desviando as correntes harmônicas em caminhos de baixa impedância. Os filtros harmônicos são capacitivos na frequência fundamental, portanto, também são usados para produzir a potência reativa exigida pelos conversores e para a correção do fator de potência. Na Figura 6, pode ser observado um exemplo de filtro instalado em um sistema real.

Figura 6 – Conjunto de filtros harmônicos em uma usina siderúrgica



Fonte: Próprio Autor

2.3.2 Compensação Dinâmica

2.3.2.1 Gerador síncrono

Geradores síncronos são máquinas elétricas rotativas usadas para converter potência mecânica em potência elétrica e geram boa parte da energia consumida pelas indústrias e muitas cargas grandes são acionadas por geradores síncronos. Algumas vezes os compensadores síncronos são usados como um meio de fornecer compensação de potência reativa e controlar a tensão (KUNDUR; MALIK, 2022).

Condensadores síncronos basicamente são geradores síncronos acionados sem um atuador mecânico primário. A geração e/ou consumo de potência reativa é obtida pela regulação da corrente de excitação. Este dispositivo fornece regulação e estabilidade de tensão, gerando ou absorvendo continuamente potência reativa e estabilidade de frequência. Seu objetivo não é converter energia elétrica em mecânica ou vice-versa, mas fazer uso das capacidades de controle de potência reativa da máquina e da inércia síncrona. Esta é uma solução alternativa e interessante mediante bancos de capacitores no sistema de potência devido à capacidade de ajustar continuamente a quantidade de potência reativa. Em ambientes industriais onde alguns sistemas elétricos instalados necessitam de algum método de compensação, estes equipamentos podem ser empregados como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Gerador síncrono sendo utilizado como método de compensação

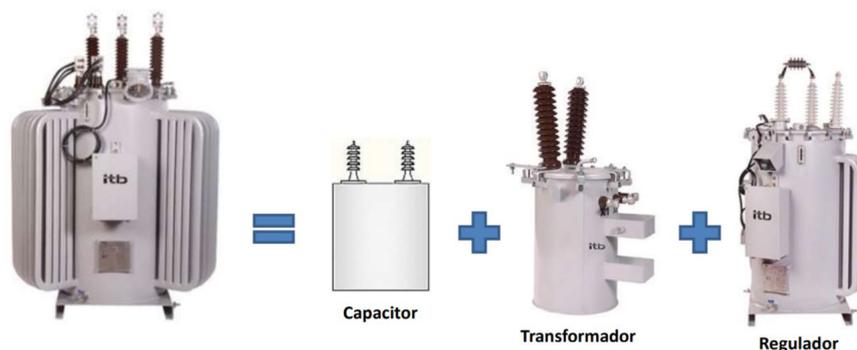


Fonte: (ABB, 2023)

2.3.2.2 Compensador dinâmico de potência

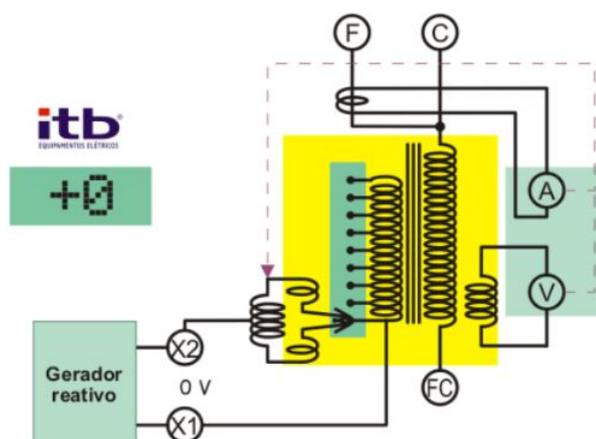
Os compensadores dinâmicos de potência reativa unem três equipamentos em um: um capacitor, um transformador e um regulador de tensão conforme as Figuras 8 e 9. Os modelos de compensadores do fabricante ITB são dispositivos capazes de medir a potência reativa consumida na fase em que está instalado e fornece gradualmente a energia reativa necessária, de zero ao máximo capacitivo e/ou de zero ao indutivo máximo. Eles podem ser usados em sistemas monofásicos ou trifásicos, em subestações, ao longo das linhas de distribuição ou na entrada de um consumidor específico. (FUTURE, 2019)

Este equipamento foi projetado com o objetivo de fazer correção de fator de potência em sistemas de distribuição e ou correção de tensão e desempenha a correção por meio da variação da tensão em relação a um elemento reativo, capacitor, indutor ou capacitor

Figura 8 – Compensador dinâmico de potência reativa

Fonte:(FUTURE, 2019) Manual ITB

e indutor, usando um transformador monofásico de acoplamento com 17 derivações comutadas mediante a carga do elemento reativo viabilizando 17 níveis diversos de tensão, em 16 níveis iguais de tensão, aplicando 17 níveis diferentes de carga reativa à rede que podem variar de 0 VAr à potência nominal reativa, indutiva ou capacitiva, do equipamento (ITB, 2021). Sensores de tensão e sensores de corrente instalados proporcionam dados para o controle digital ITB modelo CTX-1 determinar qual é a correção exigida e sua interface com o comutador de derivações permite que este seja comutado e inspecionado para conseguir a correção solicitada. As medidas e análises dos valores da linha são feitas e mostradas por um dispositivo de controle eletrônico modelo CTX-1, dotado de microcontrolador, que, operando em modo automático, comanda o comutador no sentido de ajustar a potência reativa do compensador à demanda medida na fase em que se encontra instalado, considerando o monitoramento em tempo real da rede e os parâmetros de compensação nele programado e, ainda, acumula funções de registrador e indicador de posição do comutador (FUTURE, 2019).

Figura 9 – Compensador dinâmico de potência reativa - esquema de conexão elétrica

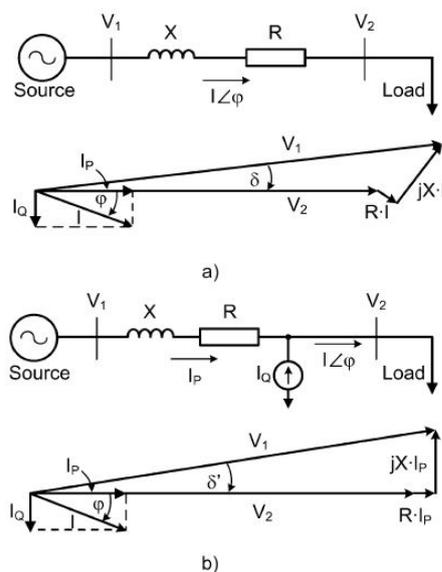
Fonte:(FUTURE, 2019) Manual ITB

2.3.3 Topologias para equipamentos de compensação que podem ser empregadas em um SEP

2.3.3.1 Compensação paralela(shunt)

Os elementos shunt são basicamente capacitores e indutores conectados em paralelo com o sistema elétrico. Esses elementos podem ser fixos ou variáveis. As variações podem ocorrer através de chaveamentos manuais ou automáticos (através de reguladores que monitoram certas variáveis: por exemplo, a magnitude da tensão de uma barra). Os Compensadores Estáticos de Reativo (CER), são dispositivos cujas características de operação tentam reproduzir as de um compensador síncrono, da mesma forma que os compensadores síncronos podem funcionar capacitiva ou indutivamente (diferentes combinações de capacitores e indutores podem ser chaveadas eletronicamente). *Dentro de uma certa faixa de operação, esses dispositivos servem para estabilizar o sistema fora dessa faixa, entretanto, podem contribuir para a sua instabilidade (o que, nesse sentido, os faz inferiores aos compensadores síncronos)*(MONTICELLI; GARCIA, 1999). Na Figura 10 pode ser observado um exemplo de elemento shunt conectado à um SEP.

Figura 10 – Princípios de compensação shunt em um sistema radial ac. (a) Sem compensação reativa. (b) Compensação shunt com uma fonte de corrente



Fonte:(DIXON et al., 2005)

Na Figura 10 são observados os princípios e efeitos da compensação de potência reativa shunt em um SEP que contém uma fonte V_1 , uma linha de transmissão e uma carga indutiva. A Figura 10 (a) apresenta o sistema sem compensação e seu diagrama fasorial. Através do diagrama fasorial, nota-se que o ângulo de fase da corrente foi relacionado ao lado da carga, mostrando que a corrente ativa I_P está em fase com a tensão de carga V_2 . Figura 10 (b), tem-se uma fonte de corrente que está sendo utilizada para compensar o componente reativo da corrente de carga I_Q . Como resultado, a regulação de tensão do sistema é melhorada e o componente de corrente reativa da fonte é quase eliminado.

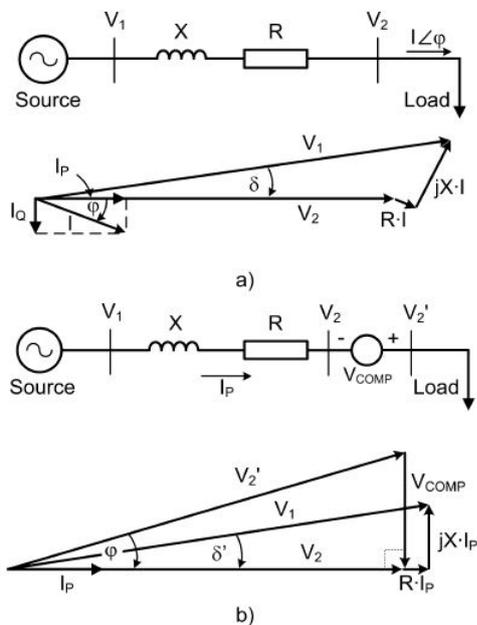
2.3.3.2 Compensação série

A compensação série modifica os parâmetros do sistema de transmissão ou distribuição, enquanto a compensação shunt altera a impedância equivalente da carga. Em ambos os casos, a energia reativa que flui através do sistema pode ser controlada de forma eficaz, melhorando o desempenho de todo o sistema de energia CA (DIXON et al., 2005). Os sistemas de compensação série típicos também podem usar capacitores para diminuir a reatância equivalente de uma linha de alimentação na frequência nominal. A conexão de um capacitor em série gera potência reativa que, de forma autorregulada, equilibra uma fração da reatância de transferência da linha. Os resultados dessa autorregulação são os seguintes:

- aumento da estabilidade angular;
- melhoria da estabilidade da tensão;
- balanceamento do fluxo de potência pelo sistema e redundâncias.

Assim como a compensação shunt, a compensação em série também pode ser implementada com dispositivos de fonte de corrente ou tensão, como mostrado na Figura 11. A Figura 11 (a) mostra o mesmo sistema de energia da Figura 10 (a), também com o ângulo de referência. Na Figura 11 (b) são mostrados os resultados obtidos com a compensação em série através de uma fonte de tensão, que foi ajustada para ter operação com fator de potência unitário.

Figura 11 – Princípios de compensação em série. a) O mesmo sistema da Fig. 10 (a) sem compensação. b) Compensação em série com uma fonte de tensão.



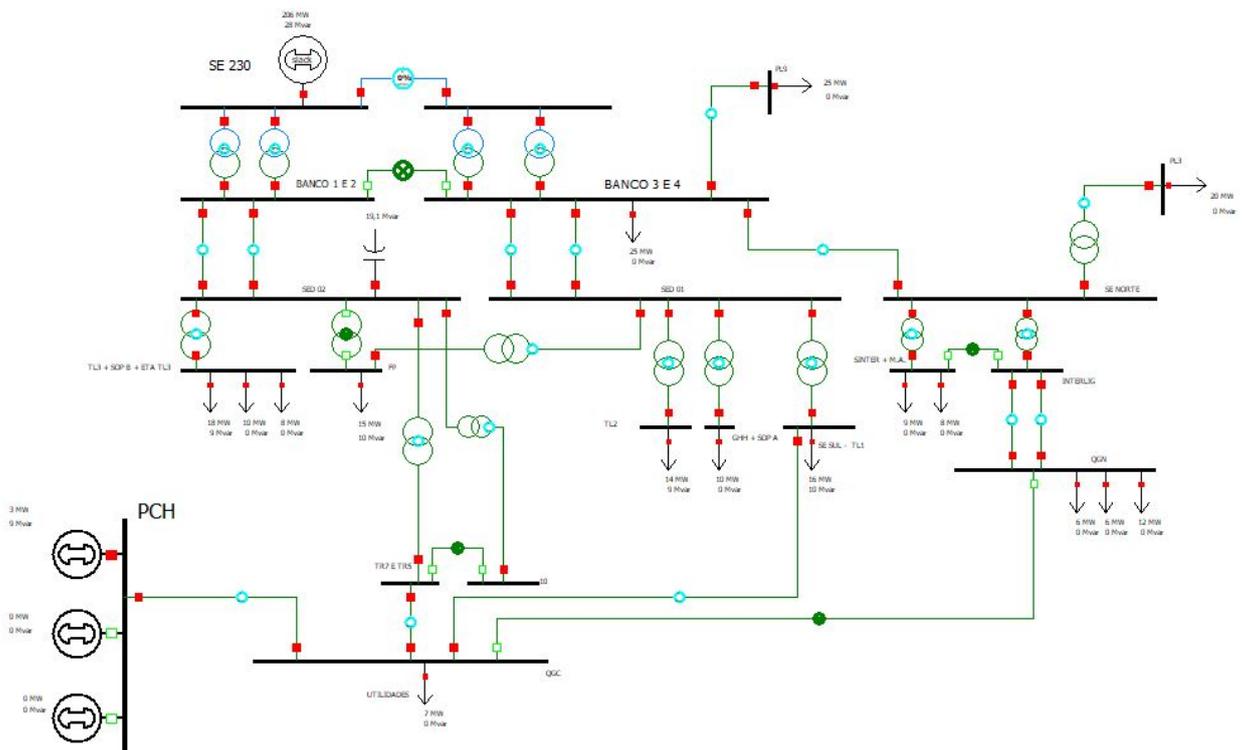
Fonte:(DIXON et al., 2005)

3 Sistema Elétrico de Potência da Usina Siderúrgica local

3.1 SEP da usina siderúrgica local no PowerWorld

O sistema elétrico à seguir, trata-se do sistema de uma usina siderúrgica local produtora de aços longos, cuja unidade está situada na cidade João Monlevade no estado de Minas Gerais. Este SEP possui como principal fornecedor de energia elétrica a Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais S.A.) que é uma das principais concessionárias de energia elétrica do Brasil. A Figura 12 mostra como construiu-se no software PowerWorld um sistema elétrico de potência de uma usina siderúrgica local do tipo integrada.

Figura 12 – SEP de uma usina siderúrgica no PowerWorld



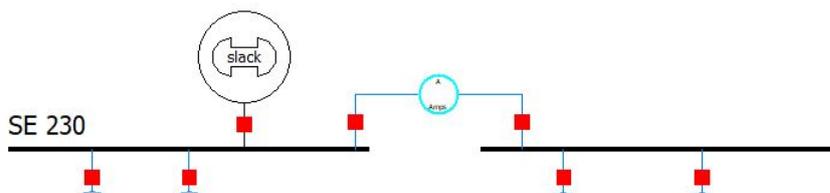
Fonte: Próprio autor

No sistema mostrado na Figura 12, todos os processos da usina estão contidos no diagrama desta simulação, desde o processamento de matérias-primas na área da Sinterização até o produto final nos Trens de Laminação, que geralmente são chamados de Laminadores.

3.1.1 Subestação 230 kV - SE230

A subestação denominada de SE230 que é apresentada na Figura 13, é o local de chegada da alimentação deste sistema proveniente da concessionária de energia com valores de tensão aproximadamente de 230 kV. Esta por sua vez, fornece assim a tensão necessária para os alimentadores, suprindo a demanda energética de toda a usina.

Figura 13 – Subestação SE230 representada no PowerWorld

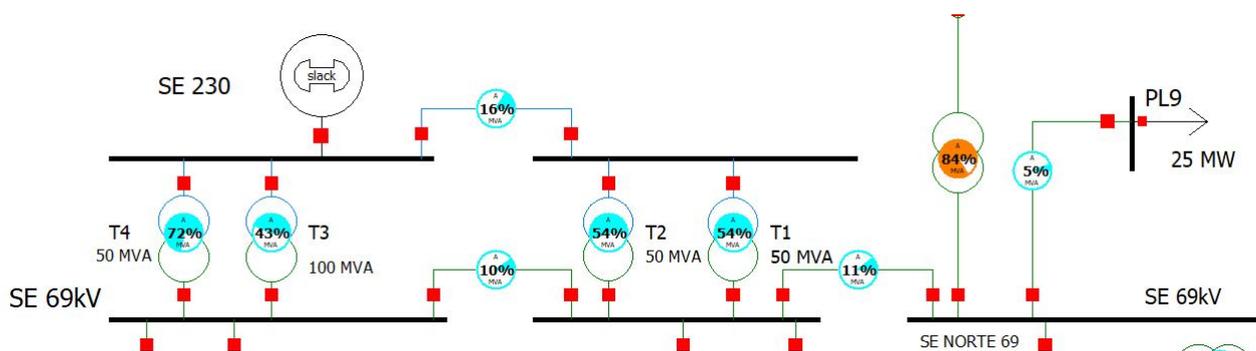


Fonte: Próprio autor

3.1.2 Subestação 69 kV

Seguindo pela simulação do SEP, a partir do barramento de 230kV, tem-se quatro bancos de transformadores cujas potências aparentes estão entre 50 MVA e 100 MVA, realizando a transformação do nível de tensão, abaixando a mesma de 230 para 69kV, como mostra a Figura 14. Por sua vez conectado ao barramento de 69kV, comumente denominado de SE69, está a carga referente a PL9, planta que possui consumo de potência ativa por volta de 25 MW.

Figura 14 – Subestação SE69kV representada no PowerWorld



Fonte: Próprio autor

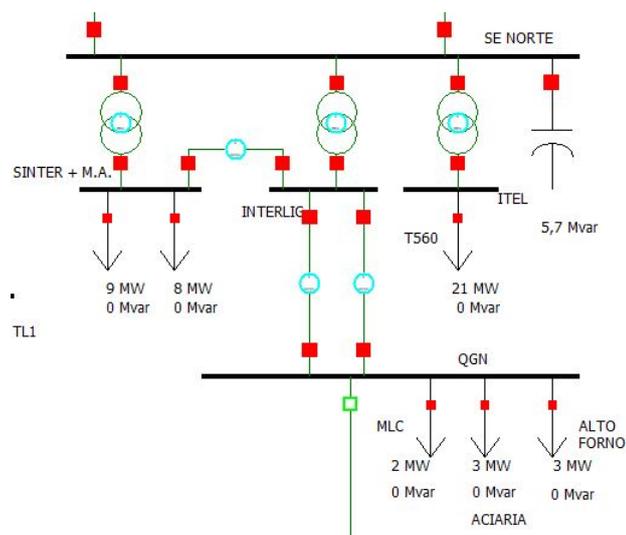
A partir do barramento da SE69kV, derivam três subestações:

- SE Norte : Subestação Norte.
- SED 01: Subestação derivação 1;
- SED 02: Subestação derivação 2;

3.1.3 Subestação Norte

Esta subestação é responsável por fornecer alimentação para alguns processos como: PL3, Mina do Andrade - M.A; (um dos principais locais onde há a extração de matérias-primas), Sinterização (onde ocorre o processamento de matérias-primas que são levadas ao Alto-forno) e ao Quadro Geral Norte (QGN). Os barramentos da Subestação Norte é apresentado na Figura 15.

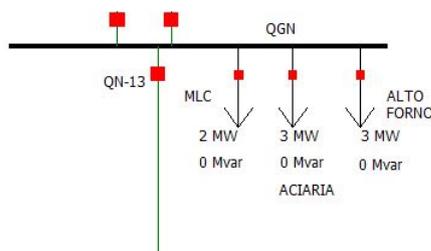
Figura 15 – Subestação SE Norte representada no PowerWorld



Fonte: Próprio autor

Na Figura 16, tem-se o barramento do Quadro Geral Norte (QGN), onde estão conectadas as cargas referentes aos processos de Alto-forno, Aciaria e Máquina de lingotamento contínuo (MLC). Observa-se uma LT saindo do Quadro Geral Norte. Esta por sua vez, é interligada no Quadro Geral Central.

Figura 16 – Barramento do Quadro Geral Norte representado no PowerWorld

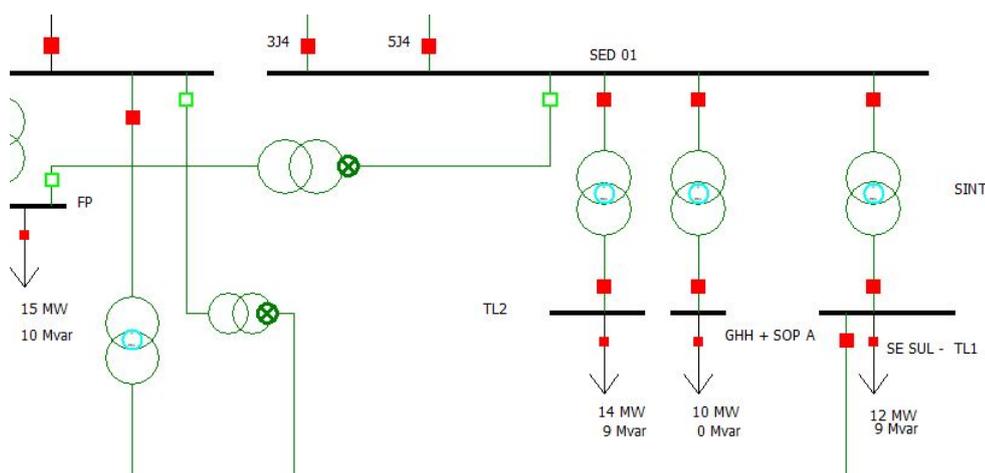


Fonte: Próprio autor

3.1.4 Subestação derivação 1

Seguindo pelas subestações, temos a Subestação derivação 1 (SED 01) apresentada na Figura 17, que fornece a alimentação do Forno Panela. Nesta subestação, está alocado o transformador responsável pelo fornecimento de energia em caso de emergência, pois o transformador principal do processo citado anteriormente, encontra-se na Subestação derivação 2 (SED 02). Seguindo pela SED 01 observa-se também o Soprador A, o Trem de Laminação 01 por meio da Subestação Sul (SE SUL) cuja derivação pertence a SED 01 e por fim tem-se o transformador do Trem de Laminação 02 (TL2) também conectados ao barramento desta subestação.

Figura 17 – Subestação derivação 1 (SED 01) representada no PowerWorld

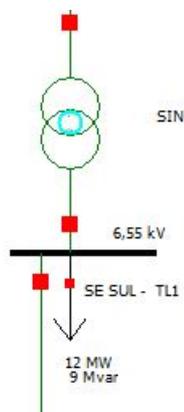


Fonte: Próprio autor

Como citado anteriormente sobre a Subestação Sul, mostrada na Figura 18, esta por sua vez, possui alimentação proveniente de uma LT direta da SED 01, fornecendo energia para um dos principais processos da obtenção do produto final da fabricação do aço, o Trem de Laminação 01, presente desde 1943 quando inaugurado, alimentado por

um banco de três transformadores monofásicos. Nota-se que existe uma interligação com o barramento do Quadro Geral Central.

Figura 18 – Subestação derivação 1 representada no PowerWorld



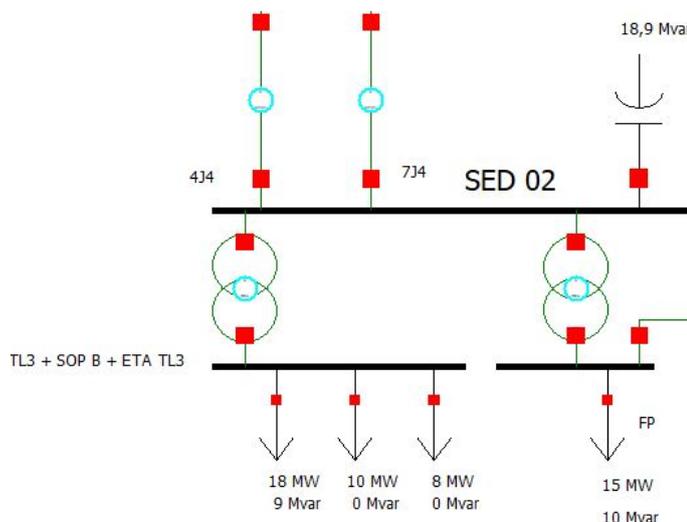
Fonte: Próprio autor

3.1.5 Subestação derivação 2

Em relação à Subestação derivação 2 (SED 02), a mesma está interligada à Subestação derivação 1 através da LT que possui a chave seccionadora 89-16, possibilitando assim, uma certa flexibilidade em planos de manobra, o que garante a confiabilidade na alimentação de processos industriais para que não sejam interrompidos sem um planejamento e programação de atividade de modo prévio. Observa-se também a chegada de duas LT's denominadas 4J4 e 7J4 respectivamente, vindas da SE 230kV, como pode ser observado na Figura 19.

Conectados ao barramento da SED 02, estão os processos do Trem de laminação 03, o Soprador B do Alto-forno, o Forno Painela e as Estações de Tratamento de Água dos três laminadores.

Figura 19 – Subestação derivação 2 representada no PowerWorld



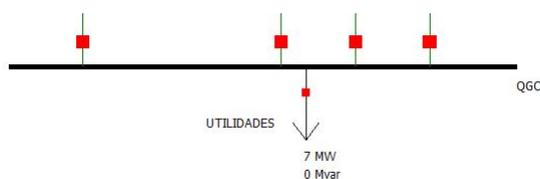
Fonte: Próprio autor

3.1.6 Quadro Geral Central (QGC)

O Quadro Geral Central é o local onde ocorre o controle das operações do Sistema Elétrico, com o auxílio do monitoramento de uma IHM para supervisão do sistema Micro Scada. SCADA é a sigla em inglês para Supervisory Control And Data Acquisition que na tradução para o português significa Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados.

Este sistema é responsável por realizar o controle dos dados dos equipamentos industriais em tempo real. A partir dos dados armazenados, os sistemas supervisórios SCADA podem gerar desde relatórios estatísticos até relatórios gerenciais para controle de qualidade. A automação industrial, através do sistema SCADA, veio para otimizar e facilitar a produção. No caso do monitoramento em tempo real, a tela do computador com o sistema SCADA pode funcionar em substituição ou em paralelo a uma IHM (interface homem máquina). Este computador é conectado aos equipamentos através de módulos de comunicação. Na Figura 20 é apresentada a barra referente ao QGC.

Figura 20 – Quadro Geral Central

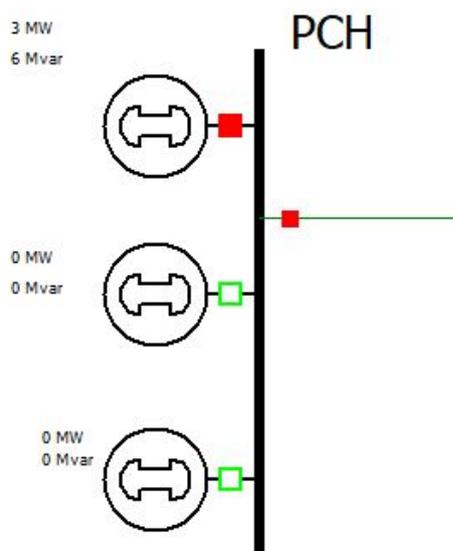


Fonte: Próprio autor

3.1.7 Pequena Central Hidroelétrica - PCH

A Pequena Central Hidroelétrica é uma unidade de geração de energia elétrica instalada no Rio Piracicaba. Como a quantidade de energia gerada depende de principalmente de dois fatores (vazão e queda d'água), a energia hidrelétrica de pequena escala pode ser implementada em qualquer sistema onde esses fatores sejam favoráveis. Tem-se três máquinas geradoras para a geração que são conectadas em paralelo com o barramento da CEMIG, porém apenas uma é utilizada na compensação do nível de tensão do barramento do Trem de Laminação 01. As demais unidades de geração são reservadas para atendimento a emergências como mostra a Figura 21. Na Figura 22 pode ser observada uma das unidades geradoras que se encontra no local.

Figura 21 – Pequena Central Hidroelétrica representada no PowerWorld



Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Unidade Geradora da PCH

Fonte: Próprio autor

3.2 Problemas com Quedas de Tensão

As desvantagens de tensões abaixo da nominal em qualquer sistema elétrico são bastante conhecidas. A melhoria da tensão deve ser considerada como um benefício adicional dos capacitores. A tensão em qualquer ponto de um circuito elétrico é igual a da fonte geradora menos a queda de tensão até aquele ponto. Assim, se a tensão da fonte geradora e as diversas quedas de tensão forem conhecidas, a tensão em qualquer ponto pode ser determinada. Como a tensão na fonte é conhecida, o problema consiste apenas na determinação das quedas de tensão.

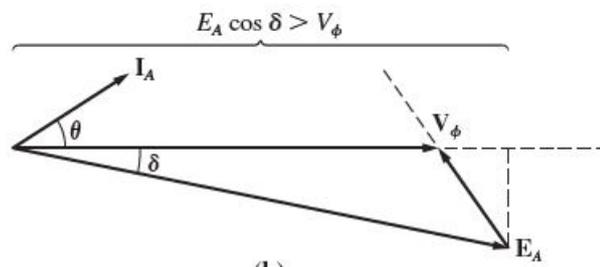
3.3 Manobras de interligação do barramento da PCH com o SEP

O fator queda de tensão é o principal causador de parada e interrupções na usina siderúrgica local, uma vez que o carregamento do barramento referente à Subestação Sul (SE-SUL) se encontra acima dos 90%. Atualmente a corrente entregue pelo banco de transformadores que se encontram na subestação previamente citada é aproximadamente

1400 ampères. Porém, este processo siderúrgico devido a quantidades de motores presentes em suas linhas de produção e as diferentes funções dos mesmos com a finalidade de conformação do aço para a produção do fio máquina tem sua corrente quando em plena carga, próximo a 1300 ampères. Com a finalidade de melhorar os níveis de tensão no barramento principal do Trem de Laminação 01, é realizada a conexão em paralelo de uma das geradoras da Pequena Central Hidroelétrica. Deste modo quando é iniciado o processo de laminação a corrente de partida dos equipamentos não ocasiona sérios ao circuito.

A geradora da PCH conectada no QGC, para melhorar os níveis de tensão do TL1, atua como um compensador síncrono para o sistema da laminação. Esta máquina é sobre-excitada. *Quando a projeção de E_A sobre V_ϕ é maior do que o próprio V_ϕ , uma máquina síncrona tem uma corrente adiantada e fornece potência reativa ao sistema de potência. Como a corrente de campo é grande nessa situação, diz-se que a máquina está sobre-excitada* (CHAPMAN, 2013). Na Figura 23 pode ser observado diagrama fasorial de uma máquina síncrona que está sobre-excitada.

Figura 23 – Diagrama fasorial do gerador sobreexcitado que atua no sistema de elétrico da laminação



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

A operação de uma máquina síncrona como um compensador de potência reativa corresponde ao caso intermediário entre as operações como gerador e como motor. Nessa situação a potência ativa gerada (consumida) é nula.

3.4 Banco de capacitores atuando em um processo siderúrgico

A instalação de capacitores em derivação/shunt tem sido a solução mais empregada nos sistemas elétricos das indústrias, pois possui custo reduzido. Com a finalidade de corrigir o FP, é possível utilizar bancos de capacitores fixos ou chaveados, sendo este último modelo e conforme a variação do FP da indústria os controladores utilizados que permitem o chaveamento automático dos bancos.

A forma obtida para compensar o nível de potência reativa que é gerada por cargas indutivas é por meio da instalação de bancos de capacitores na rede de energia, alterando assim a característica da carga, elevando o fator de potência e reduzindo a energia reativa que circula no SEP.

Os bancos de capacitores fixos são mais utilizados quando a indústria possui uma carga que não varia ao longo da curva de carga diária. Também podem ser empregados como uma fonte de potência capacitiva baseada na demanda mínima do sistema elétrico. Para corrigir o FP, a potência capacitiva necessária pode ser calculada do seguinte modo.

- Determinando a potência complexa entregue à carga temos:

$$S = P_0 + jQ_0 \quad (3.1)$$

- Ao determinar o fator de potência (FP) em que deseja-se atingir para fazer a correção ($\cos\varphi_1$) e fazendo a potência ativa depois da correção igual à potência ativa antes da correção ($P_0 = P_1$), é possível determinar o valor da potência reativa necessária para fazer a correção (Q_1). Logo, temos:

$$Q_1 = S \sin\varphi_1 = \frac{P_1}{\cos\varphi_1} * \sin\varphi_1 = P_1 * \tan\varphi_1 \quad (3.2)$$

- Para encontrar o valor do capacitor ou banco de capacitores para que correção do FP seja realizada, a potência reativa necessária será:

$$Q_{capacitor} = Q_0 - Q_1 = P * (\tan\varphi_0 - \tan\varphi_1) \quad (3.3)$$

$$C = \frac{Q_{capacitor}}{2 * \pi * f * V_n^2} \quad (3.4)$$

Levando em consideração um sistema trifásico, podemos adotar o mesmo procedimento. Logo, temos:

$$Q_{novo3\varphi} = S_{novo3\varphi} * \sin\varphi_1 = \frac{P_{3\varphi}}{\cos\varphi_1} * \sin\varphi_1 = P_{3\varphi} * \tan\varphi_1 \quad (3.5)$$

$$Q_{capacitor3\varphi} = Q_{03\varphi} - Q_{13\varphi} \quad (3.6)$$

$$C = \frac{Q_{capacitor3\phi}}{3 * 2 * \pi * f * V_n^2} [F] \quad (3.7)$$

Observando os tipos de ligação existentes, o valor do banco de capacitores a ser utilizado para realizar a compensação é:

- Estrela:

$$C_Y = \frac{Q_{capacitor3\phi}}{3 * 2 * \pi * f * \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (3.8)$$

- Delta:

$$C_{\Delta} = \frac{Q_{capacitor3\phi}}{3 * 2 * \pi * f * V_L^2} [F] \quad (3.9)$$

Logo, para uma correção do FP em um sistema trifásico é economicamente mais viável utilizar um banco em delta pois quanto maior o valor da capacitância, maior é a potência reativa capacitiva disponibilizada, portanto, maior será o custo do banco.

4 Metodologia

Foram realizados 10 testes com diferentes arranjos do SEP instalado na usina, utilizando dois equipamentos (5 testes para cada equipamento de compensação) para realizar a compensação reativa, com o objetivo de observar o comportamento do nível de tensão dos barramentos pertencentes à salas elétricas 1 e 2 (barramentos pertencentes ao Laminador 01), SESUL (69 kV e 6,6 kV) e PCH. Os equipamentos nas simulações deste trabalho utilizarão a técnica de compensação estática. Os testes realizados serão os seguintes:

- Topologia do testes 1 e 6: Situação do atual funcionamento
- Topologia do testes 2 e 7: As 3 geradoras em paralelo
- Topologia do testes 3 e 8: Sem a PCH
- Topologia do testes 4 e 9: Sem a interligação do QGC
- Topologia do testes 5 e 10: Laminador 1 alimentado pelo QGN

Os barramentos citados foram escolhidos devido a interferência que os mesmos possam causar no processo do Laminador 01 devido à mudança do fluxo de potência, contingência e manobras que venham ser realizadas para estes fins.

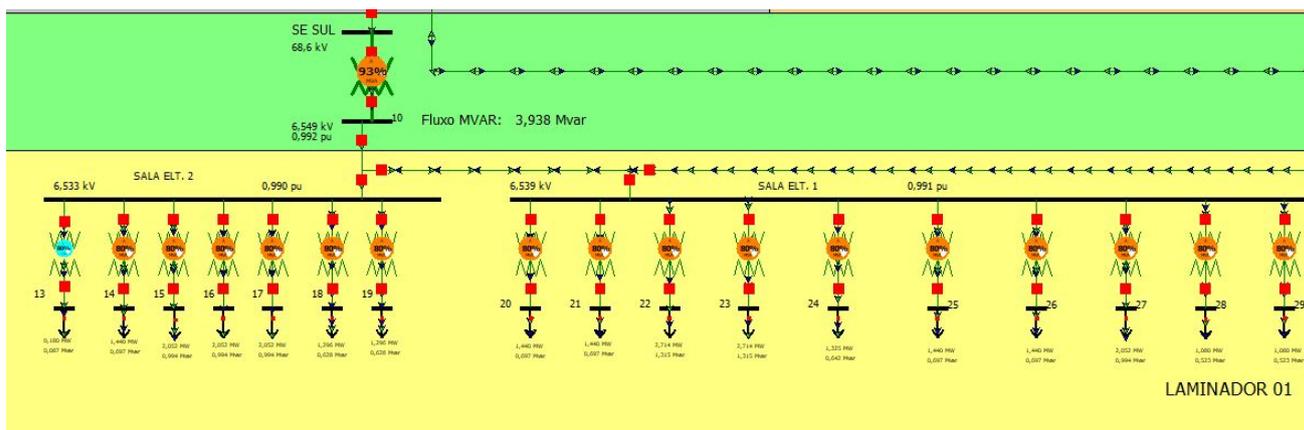
Durante os testes com os dois equipamentos de compensação que serão instalados no barramento da sala elétrica 2 do Laminador 01, serão avaliados os seguintes indicadores nos barramentos da SE SUL (barramentos 09 e 10) e nos barramentos do Laminador 01 (salas elétricas 1 e 2):

- Nível de tensão acima de 6,55 kV nos barramento 10, 11 e 12;
- Potência reativa demandada da rede CEMIG para os barramentos do Laminador 01;
- Porcentagem de carregamento do banco de transformadores da SE SUL menor que 80% de sua capacidade.

4.1 Topologia dos testes 1 e 6: Situação do atual funcionamento

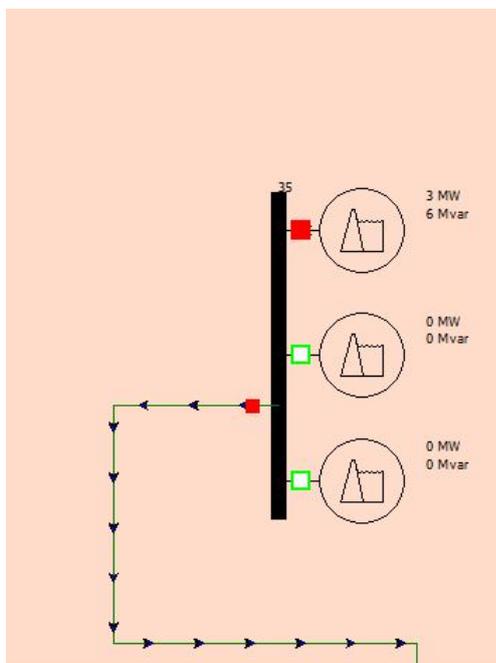
As Figuras 24 e 25 apresentam as condições atuais do SEP nas condições de funcionamento, segundo a topologia das salas elétricas do Laminador 01 e da PCH.. A alimentação principal dos barramentos do Laminador 01 é proveniente da Subestação Sul (em verde - SE SUL). Na Figura 25 observa-se o barramento da PCH com apenas uma geradora conectada ao circuito.

Figura 24 – Laminador 1 - Teste 1



Fonte: Próprio autor

Figura 25 – PCH - Teste 1



Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Banco de Transformadores da SE SUL - Teste 1

	Near Bus	Far Bus	Circuit
Number	9	10	1
Name	SE SUL	10	
Nom kV	69,0000	6,6000	
Substation			
Labels			
MVA Rating	20,000	Percent	92,7
Size	4,0		
<input type="checkbox"/> Ignore Dynamic Sizing		<input checked="" type="checkbox"/> Always Show Value (Percent)	
<input type="checkbox"/> Ignore Dynamic Open Sizing		<input checked="" type="checkbox"/> Anchored	
Style			
<input checked="" type="radio"/> * Use Oneline Options		<input type="radio"/> Line Amp, Transf. MVA	
<input type="radio"/> Total power (MVA)		<input type="radio"/> Max % Load Cont.	
<input type="radio"/> Real power (MW)		<input type="radio"/> PTDF	
<input type="radio"/> Reactive power (Mvar)			
* recommended setting			
View Pie Chart Display Options			
<input checked="" type="button"/> OK	<input type="button"/> Cancel	<input type="button"/> Help	

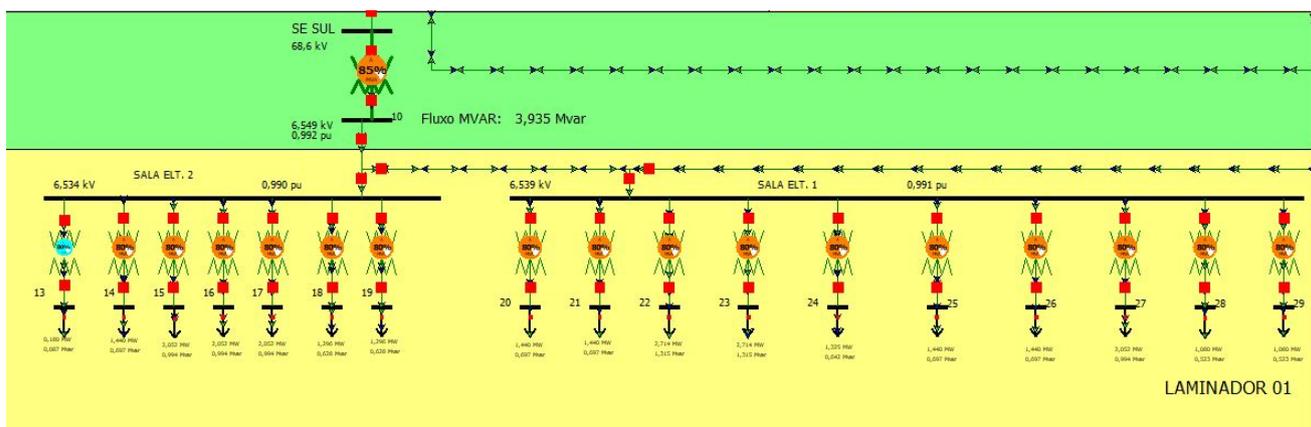
Fonte: Próprio autor

Pode ser observado na Figura 26 que a potência nominal do banco de transformadores da SESUL é de 20 MVA. O carregamento na situação atual de funcionamento é de 92,7%.

4.2 Topologia do testes 2 e 7: As 3 geradoras em paralelo

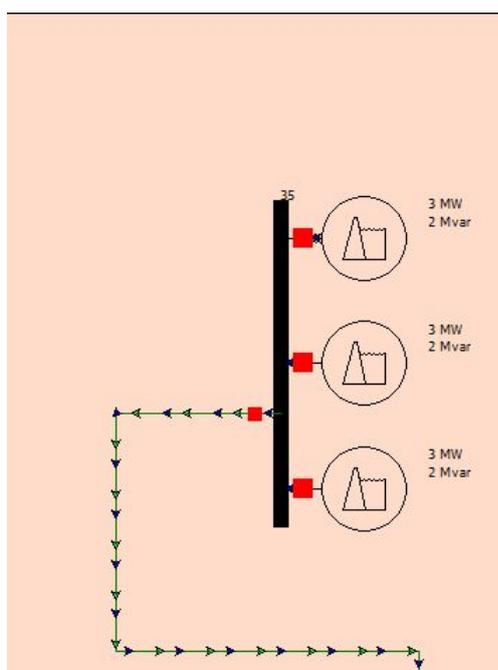
Nas Figuras 27 e 28 são observadas as condições do SEP do processo quando as 3 geradoras estão em paralelo conectadas ao circuito. Seguindo estas configurações, assim seguirão os avaliações para o teste 2.

Figura 27 – Laminador 1 - Teste 2



Fonte: Próprio autor

Figura 28 – PCH - Teste 2

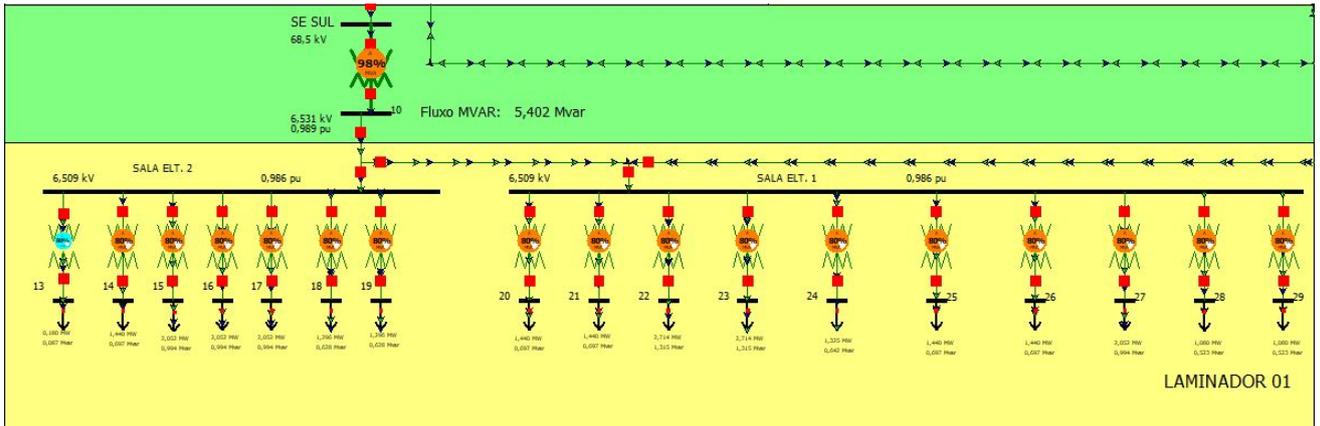


Fonte: Próprio autor

4.3 Topologia do testes 3 e 8: Sem a PCH

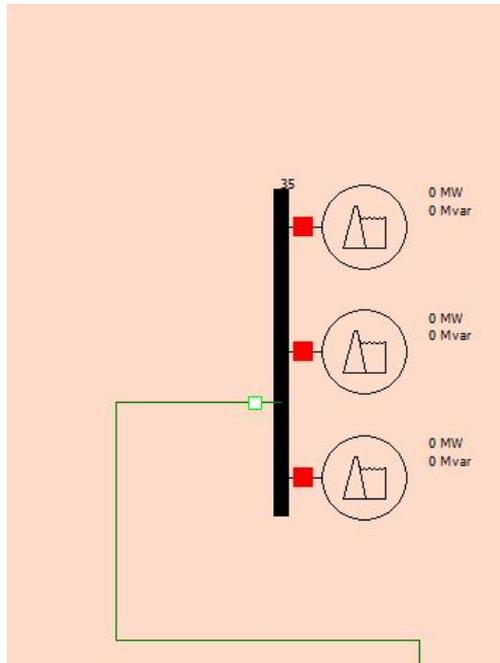
As Figuras 29 e 30 apresentam a o SEP do processo do Laminador 01 juntamente com a barra da PCH desconectada do circuito. Esta será a configuração do SEP avaliado para o teste 3.

Figura 29 – Laminador 1 - Teste 3



Fonte: Próprio autor

Figura 30 – PCH - Teste 3

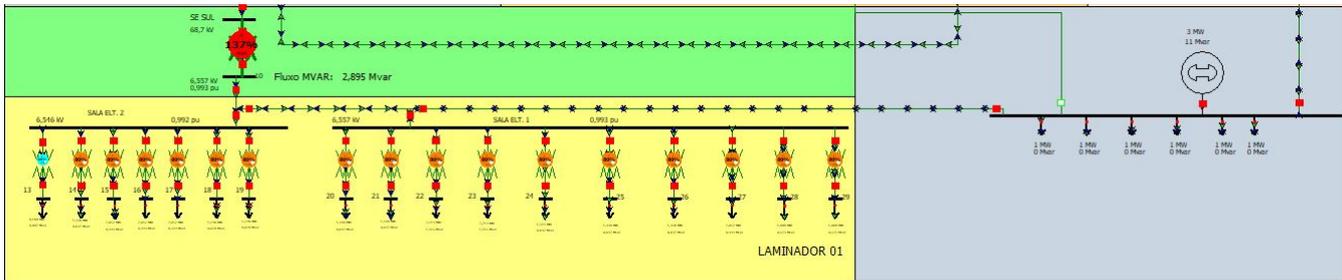


Fonte: Próprio autor

4.5 Topologia do testes 5 e 10: Laminador 1 alimentado pelo barramento do QGN (Quadro Geral Norte)

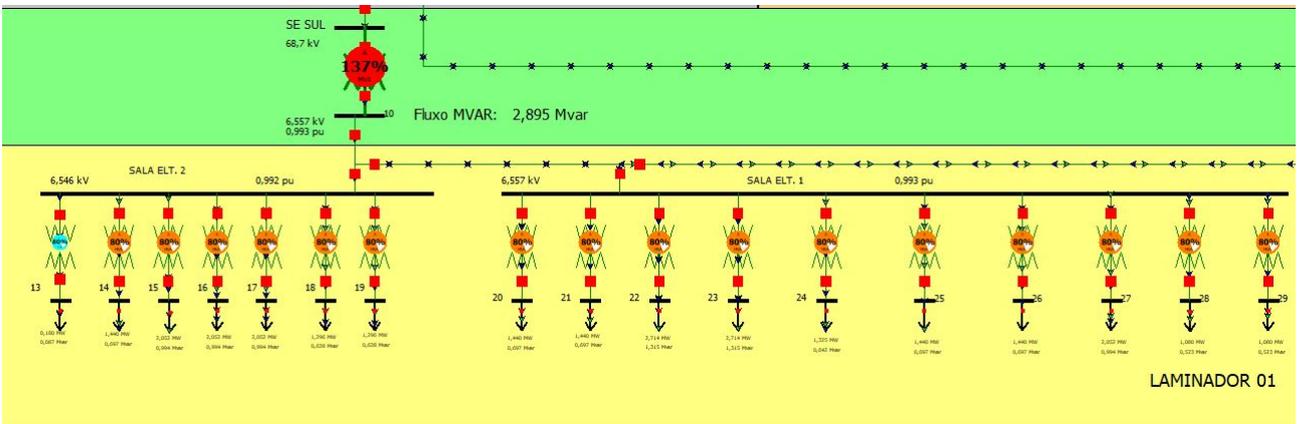
As Figuras 33 e 34 apresentam as condições e manobras consideradas para este teste. Foi interrompida a alimentação da barra do QGC(Quadro Geral Central) proveniente da SED 02 (Subestação Derivação 02) e colocada em ação a fonte que representa o QGN (Quadro Geral Norte) para atuar como contingência para o Laminador 01.

Figura 33 – Laminador 1 - Teste 5



Fonte: Próprio autor

Figura 34 – PCH - Teste 5



Fonte: Próprio autor

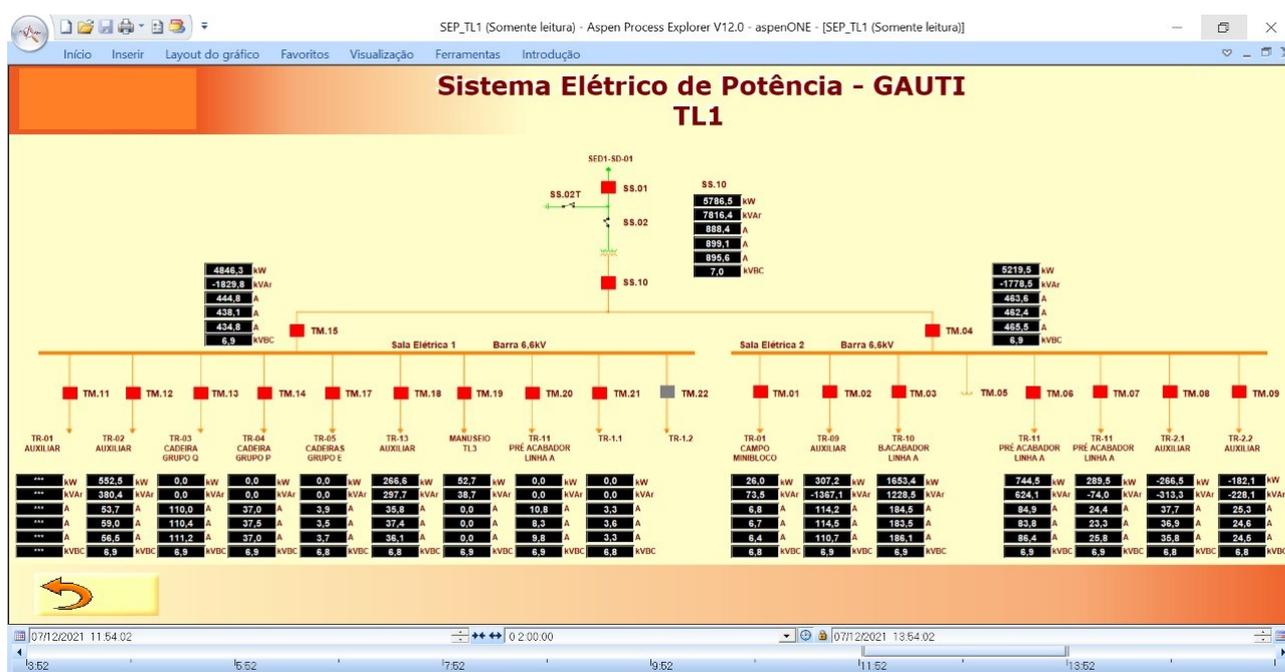
Este processo apresenta problemas relacionados ao nível de tensão, pois em 6,55 kV o processo não consegue ter seu funcionamento normal, e em algumas situações mesmo em 6,6 kV, há o risco de novas cargas serem alimentadas, diminuindo nível de tensão e causando paradas não programadas que afetam o processo do Laminador 01.

4.7 Coleta e análise de dados

4.7.1 Coleta de Dados

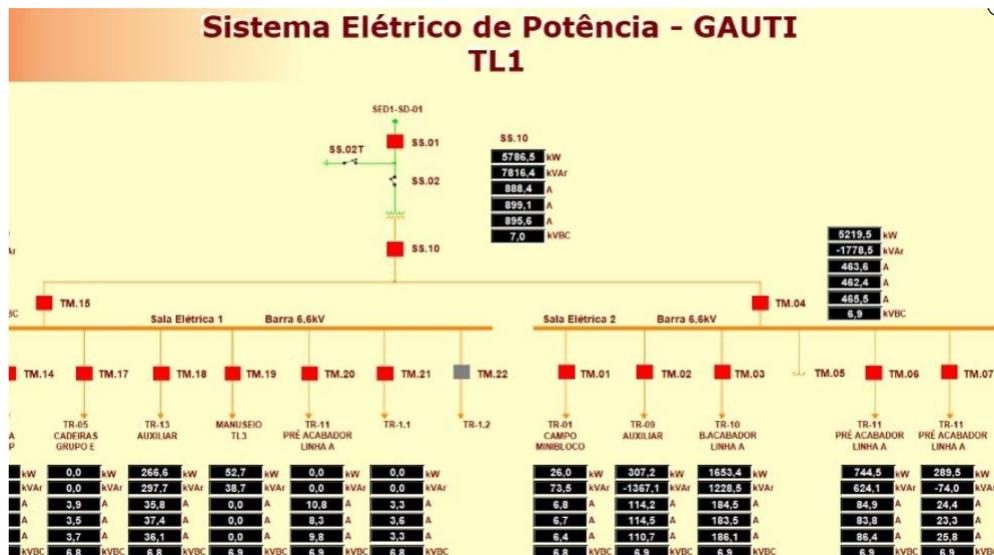
Os dados provenientes das barras alimentadoras dos processos de laminação 01 e 02 foram coletados dentro da usina siderúrgica a partir dos supervisórios no qual contém o sistema PIMS onde são armazenadas as variáveis do SEP, conforme as Figuras 37 e 38.

Figura 37 – Sistema de coleta de variáveis - PIMS do Trem de laminação 01



Fonte: Próprio autor

Figura 38 – Grandezas elétricas de cada barramento do Trem de Laminação 01 no PIMS



Fonte: Próprio autor

O sistema PIMS (Plant Information Management System - Sistema de Gerenciamento de Informação de Planta) é um software robusto e versátil permitindo assim uma gestão completa das informações e variáveis contidas na planta. Além disso, ainda realiza um cruzamento de informações de diferentes áreas da indústria.

4.7.2 Trem de Laminação 01 em funcionamento

No modelo físico, o Laminador 01 não funciona com eficiência sem que a geradora 3 da Pequena Central Hidroelétrica esteja conectada no barramento do Quadro Geral Central após realizar o sincronismo com a rede da Cemig. Em casos de uma parada programada com mais de 12 horas a geradora em questão fornece potência para atividades emergenciais e de iluminação e tomadas durante paradas grandes para manutenção do TL01.

4.8 Pontos de monitoramento

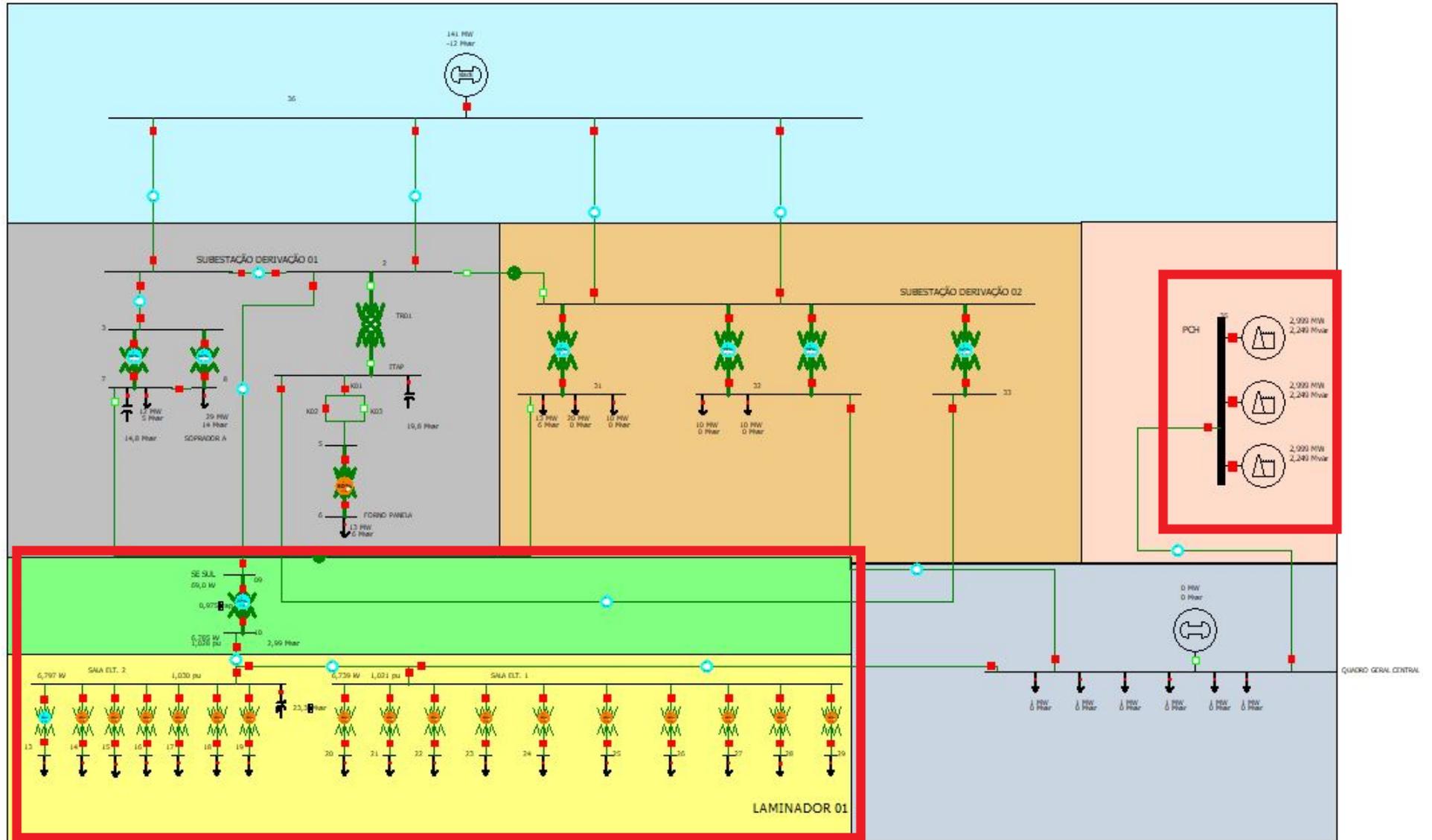
Após a definição das configurações dos testes de 1 a 5 para este trabalho, tem-se a definição dos pontos de monitoramento para que possa ser definida uma solução de compensação reativa para o processo do Laminador 01. Os pontos que serão monitorados durante os testes com os equipamentos de compensação podem ser observados nas Figuras 40, 41, 42, 43 e também são listados a seguir:

- Barra 09 (Barramento de Alta tensão na SESUL);
- Barra 10 (Barramento de Média tensão na SESUL);

- Barra 11 (Barramento da Sala Elétrica 2 do Laminador 01);
- Barra 12 (Barramento da Sala Elétrica 1 do Laminador 01);
- Barra 35 (PCH).

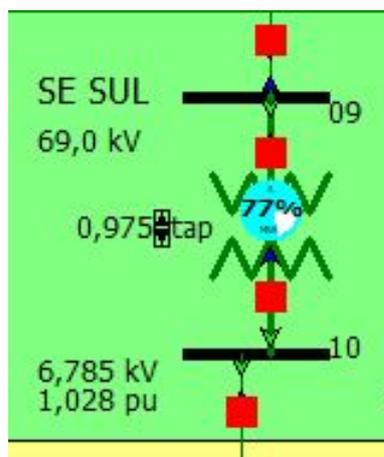
As barras listadas anteriormente são destacadas na Figura 39 nos quadros vermelhos.

Figura 39 – SEP atualizado e simulado no PowerWorld



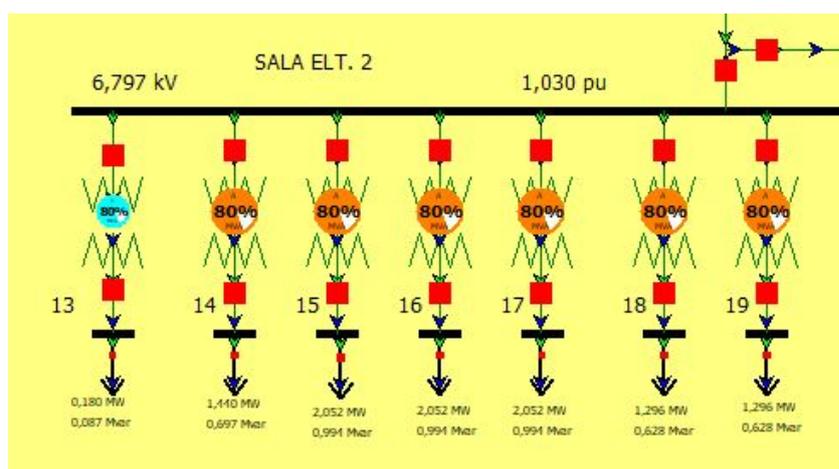
Fonte: Próprio autor

Figura 40 – Barras 09 e 10 da SESUL



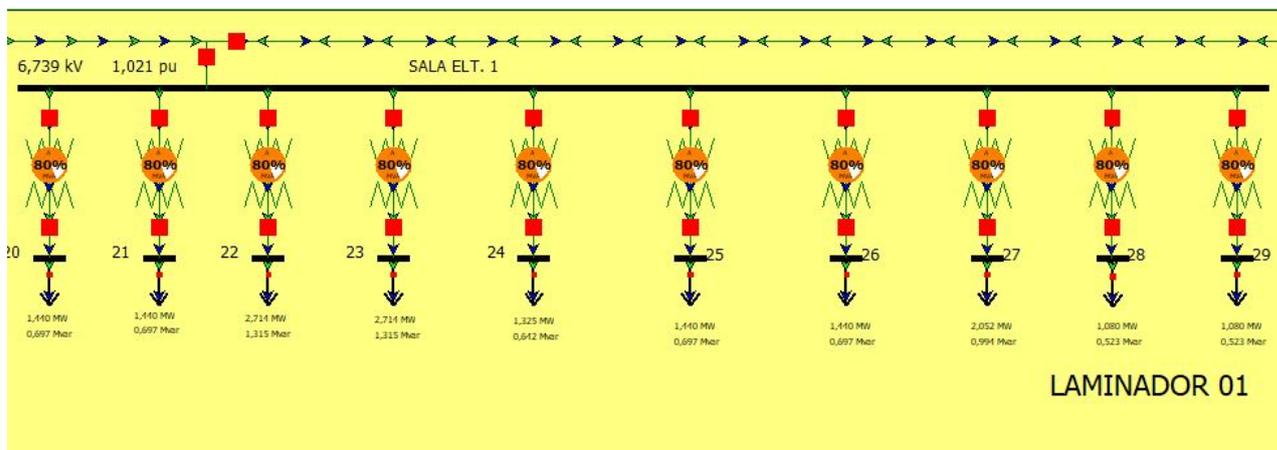
Fonte: Próprio autor

Figura 41 – Barra 11 (Sala Elétrica 2)



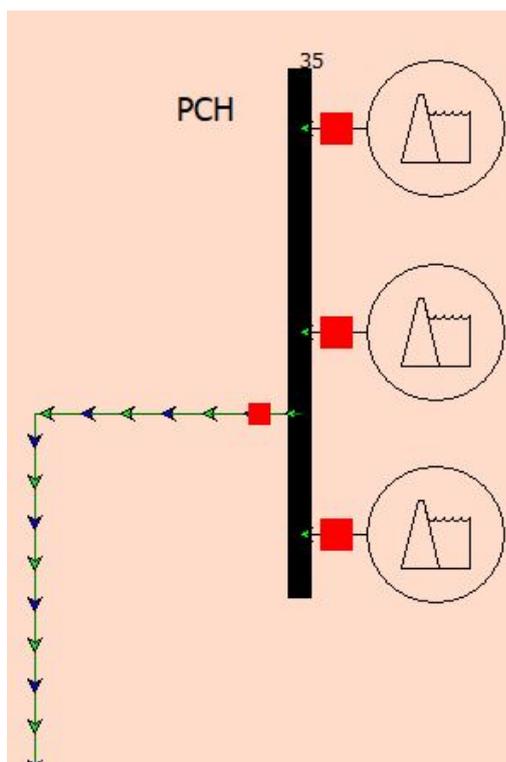
Fonte: Próprio autor

Figura 42 – Barra 12 (Sala Elétrica 1)



Fonte: Próprio autor

Figura 43 – Barra 35 (PCH)



Fonte: Próprio autor

5 Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados os dados coletados do SEP de uma usina siderúrgica local. O comportamento do sistema será avaliado de acordo com a situação atual e também com possíveis sugestões de compensação reativa com o intuito de melhorar as condições do nível de tensão da barra do Laminador 01. Destacam-se aqui, os barramentos do Laminador 01, onde ocorre uma necessidade de compensação de reativos para aumentar os níveis de tensão para que não haja paradas não programadas quando a tensão atingir 6,55 kV ou abaixo. Na Tabela 2 são listados os testes realizados conforme a topologia do SEP e quais os equipamentos que foram utilizados em cada um deles.

Tabela 2 – Tabela de topologia dos testes

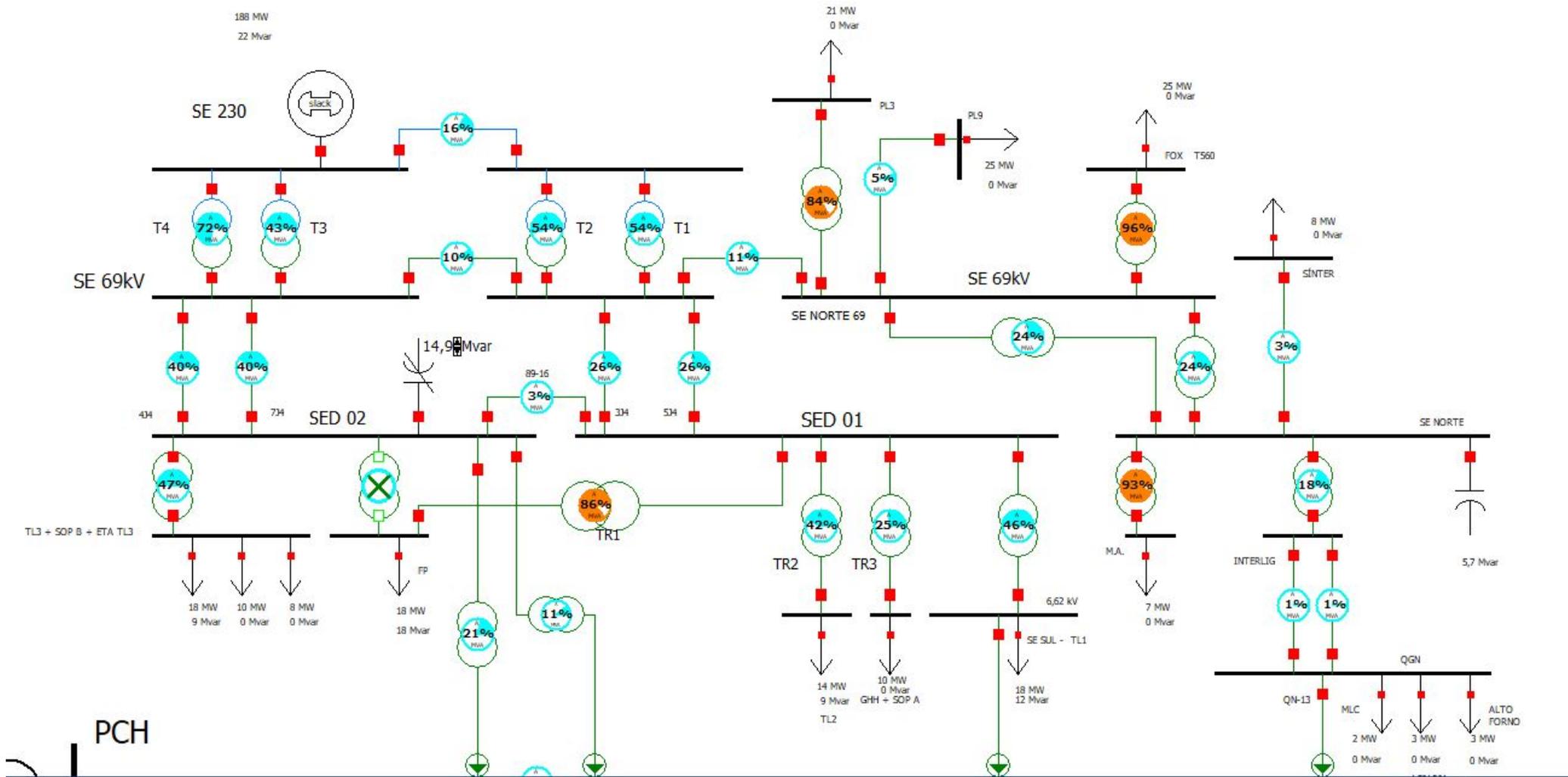
Topologia	Testes	Equipamento utilizado
1	SEP na situação atual	Banco de capacitores
2	SEP com as 3 geradoras em paralelo	Banco de capacitores
3	SEP sem interligação com a barra da PCH	Banco de capacitores
4	SEP sem a interligação da barra da sala elétrica 2 com o QGC	Banco de capacitores
5	SEP com o QGN alimentando o QGC e interligação com a barra da sala elétrica 2	Banco de capacitores
6	SEP na situação atual	Compensador síncrono
7	SEP com as 3 geradoras em paralelo	Compensador síncrono
8	SEP sem interligação com a barra da PCH	Compensador síncrono
9	SEP sem a interligação da barra da sala elétrica 2	Compensador síncrono
10	com o QGC	Compensador síncrono

O propósito de cada um destes testes realizados é encontrar uma solução viável para melhorar os níveis de tensão das barras do Laminador 01.

5.1 Sistema elétrico simulado no PowerWorld

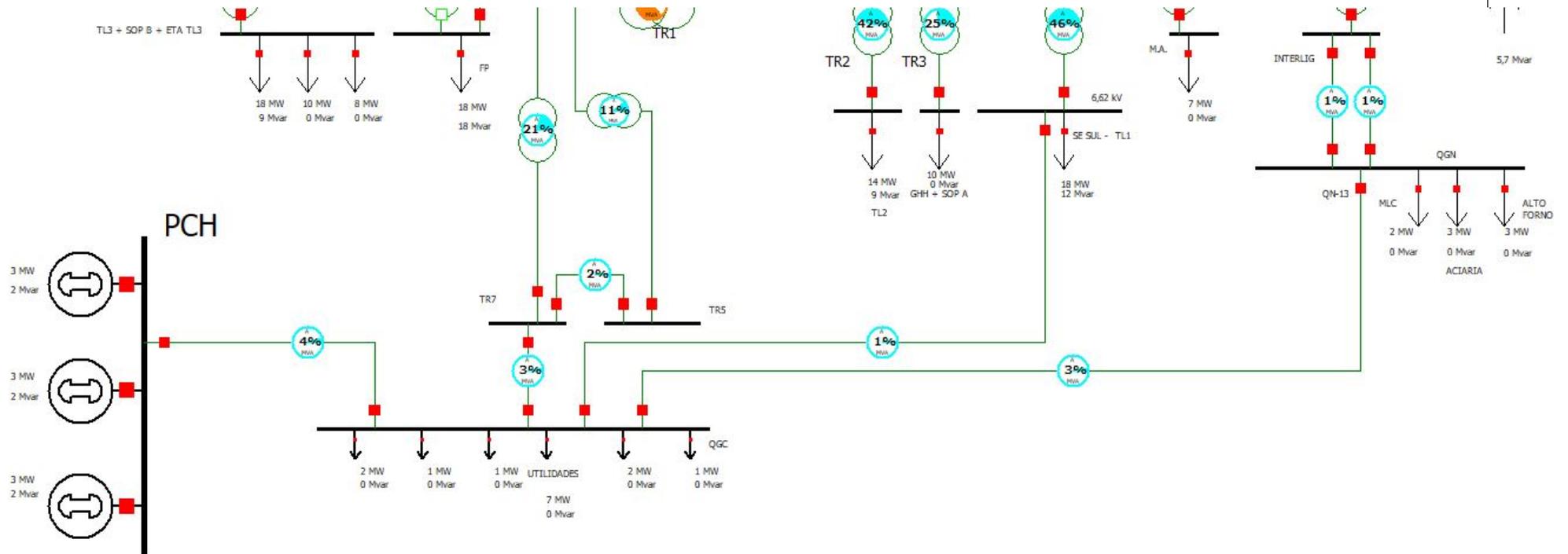
Nas Figuras 44 e 45 são apresentados os diagramas utilizados na primeira simulação do SEP da usina siderúrgica local no software PowerWorld.

Figura 44 – SEP simulado no PowerWorld



Fonte: Próprio autor

Figura 45 – SEP simulado no PowerWorld



Fonte: Próprio autor

Foi notado que como no modelo real da subestação o carregamento do banco de transformadores da subestação alimentadora do processo de laminação apresentou valores acima de 92% da sua capacidade. Para melhor visualização e divisão do SEP, foi construída uma nova simulação com o intuito de ter mais foco no processo do Laminador 01 (vide página 52). Nesta nova simulação, tem-se uma visão mais aproximada das cargas e dos barramentos do processo conforme a Figura 39. As divisões seguiram alguns padrões de cores que são listados a seguir:

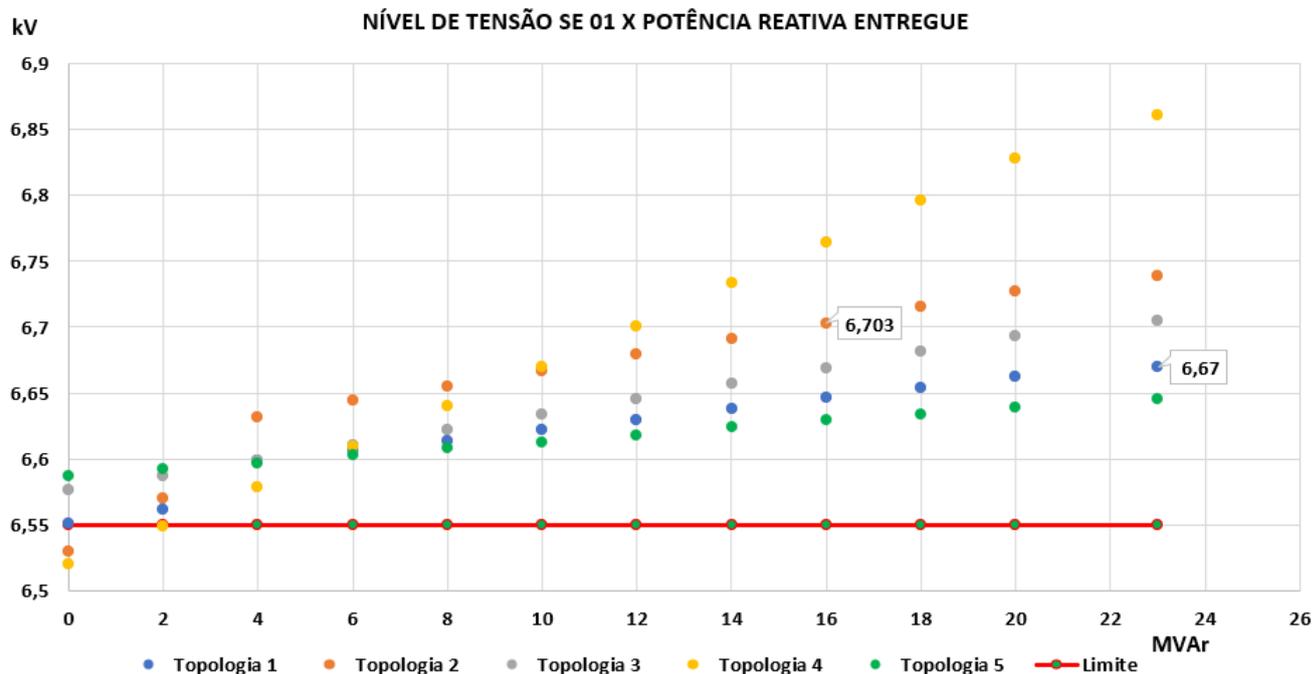
- Azul: Barramento de 69 kV da Subestação 230;
- Cinza no canto esquerdo: Subestação derivação 01 (SED 01);
- Marrom: Subestação derivação 02 (SED 02);
- Verde: Subestação Sul (SESUL);
- Amarelo: Laminador 01;
- Cinza claro no canto direito: Quadro Geral Central;
- Rosa: Pequena Central Hidroelétrica (PCH).

5.1.1 Banco de Capacitores

Com o objetivo de elaborar uma solução utilizando um dos métodos de compensação para realizar a melhoria e controle dos níveis de tensão das barras do Trem de Laminação 01, alocadas nas salas elétricas 1 e 2, conforme a simulação no PowerWorld, foi inserido o primeiro equipamento capaz de fornecer potência reativa para o SEP do processo em questão para realizar a compensação necessária. Os testes foram realizados de forma gradativa para que o comportamento das grandezas elétricas dos barramentos presentes no processo viessem a ser analisados e os valores obtidos foram anotados em Tabelas. Para a melhor visualização e comparação geraram-se gráficos para que fosse possível tomar a decisão mais plausível de compensação conforme a potência e o nível de tensão presente. Os testes a seguir são referentes às condições em que o Trem de Laminação 01 esteja produzindo normalmente, levando em consideração manobras de interligação e alimentação do processo.

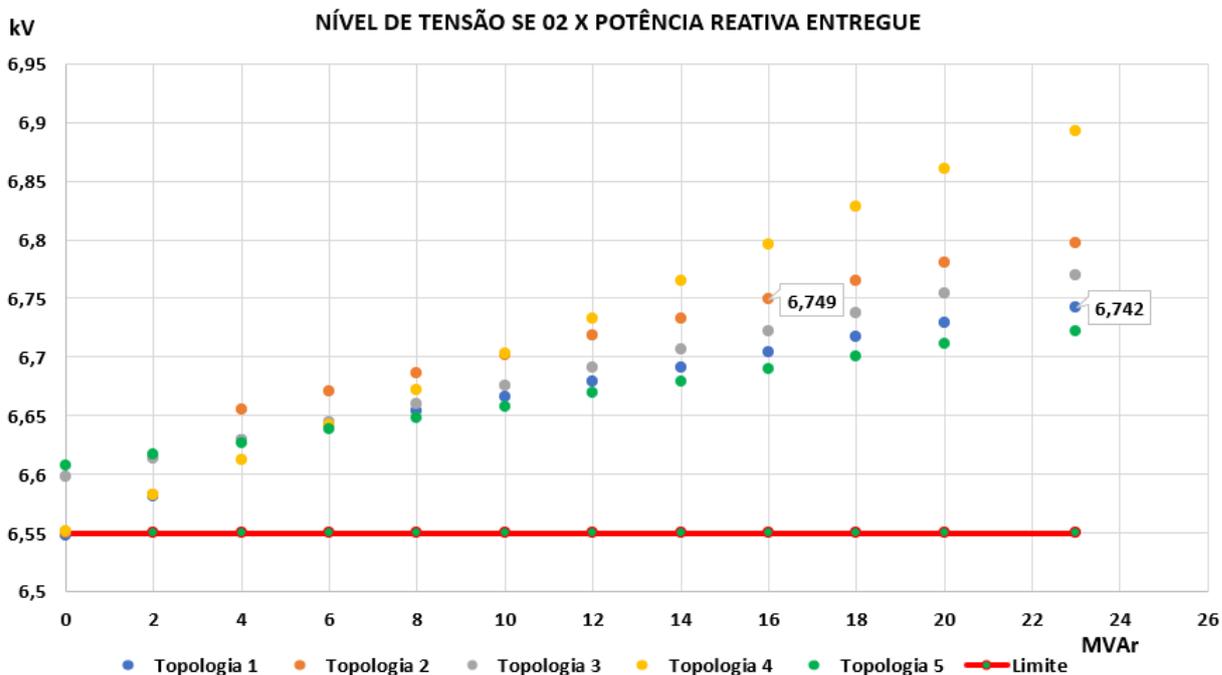
Conforme foram realizados os testes, as amostras foram agrupadas nos gráficos das Figuras 46, 47, 48 e 49. São destacados nos gráficos a seguir, os valores encontrados com a utilização das melhores topologias (topologias 1 e 2) em que o banco de capacitores foi instalado no SEP do Laminador 01.

Figura 46 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 1 nas topologias 1 a 5



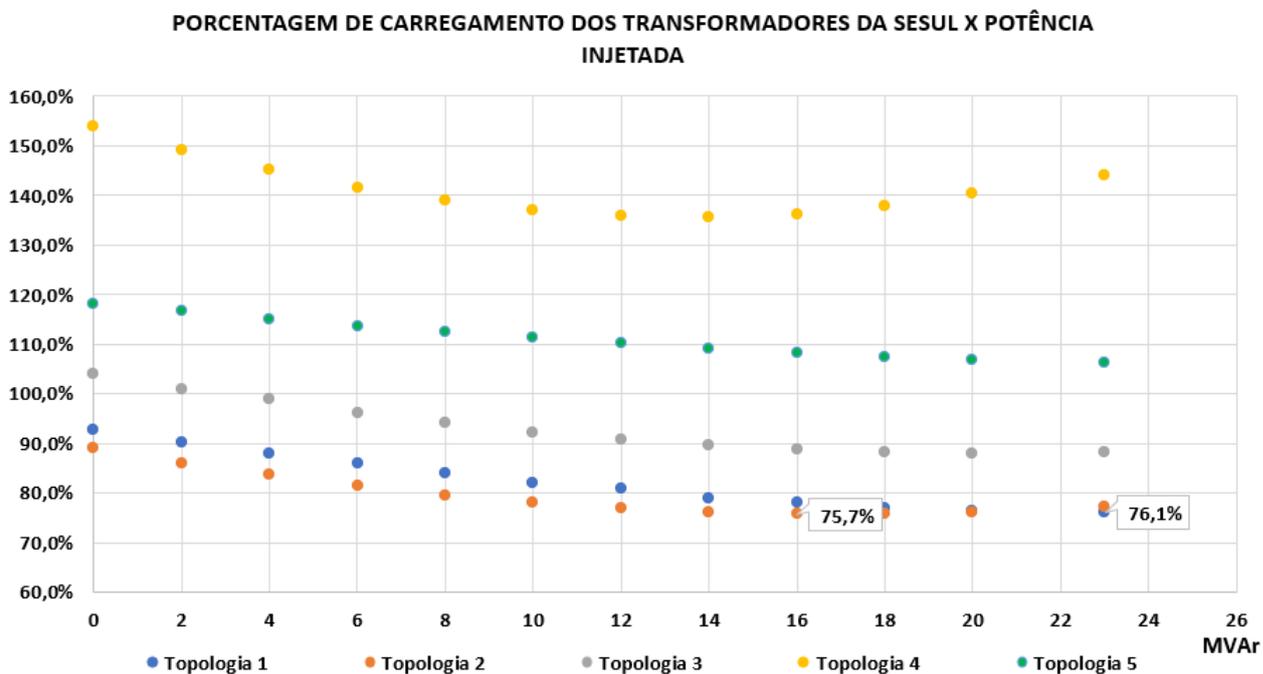
Fonte: Próprio autor

Figura 47 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 2 nas topologias 1 a 5



Fonte: Próprio autor

Figura 48 – Porcentagem de carregamento do Banco de transformadores da SE SUL nas topologias 1 a 5

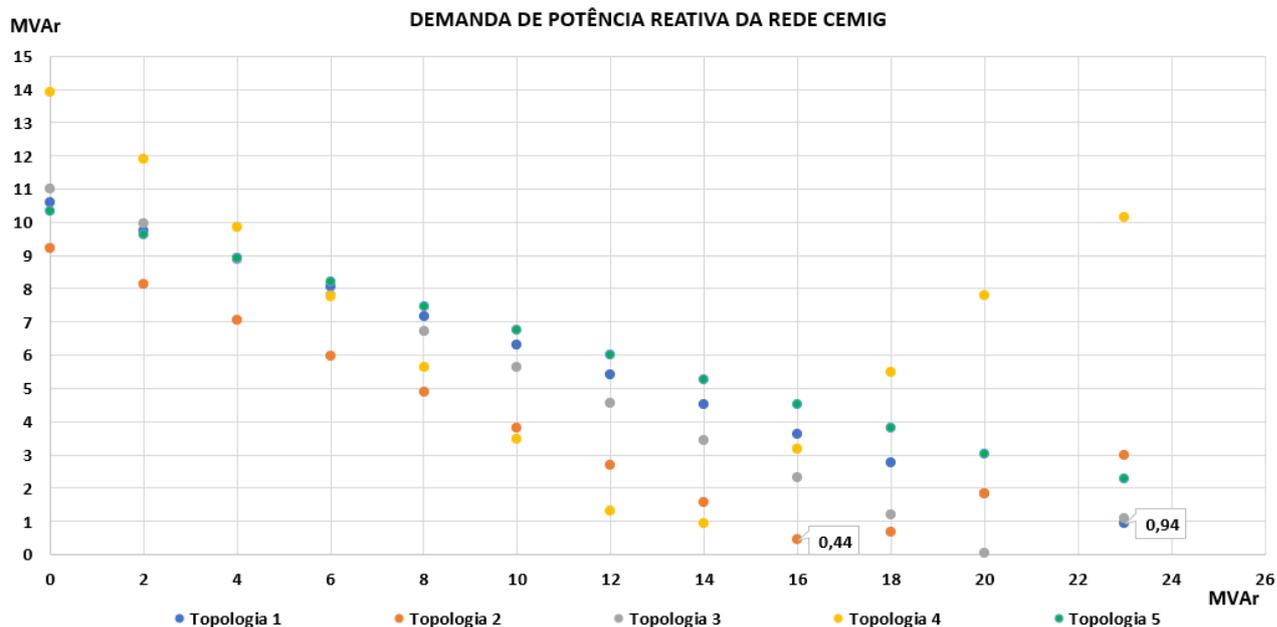


Fonte: Próprio autor

As topologias 1, 2, 6 e 7 apresentaram os melhores resultados de compensação. Os níveis de tensão das barras do Laminador 01 aumentaram, o carregamento do banco de transformadores apresentou uma porcentagem abaixo de 80% e a demanda de potência reativa da rede CEMIG também diminuiu. Após realizar as simulações no PowerWorld conforme o aumento gradual das potências do banco de capacitores. Obteve-se uma condição em que as tensões do barramento da sala elétrica 1 chegasse a 6,67 kV e sala elétrica 2, 6,742 kV durante o teste 1 segundo as Figuras 46 e 47. Essas condições de valores são aceitáveis e suficientes para que o processo de laminação trabalhe normalmente e sem eventuais paradas. A melhor solução observada e apresentada segundo a topologia mostrada neste teste 1 foi, a alocação de um banco de capacitores capaz de fornecer 23 MVar, reduzindo o carregamento dos transformadores da SESUL para 76,1%.

No teste 2, a topologia do SEP da usina foi alterado de modo que as três geradoras da PCH alocada no Rio Piracicaba estivessem em paralelo com o Quadro Geral Central. De acordo com a instalação do banco de capacitores neste teste, pode-se obter uma condição em que as tensões do barramento da sala elétrica 1 alcançou 6,703 kV e sala elétrica 2 e 6,749 kV. A melhor solução observada segundo a topologia mostrada no teste 2 foi a alocação de um banco de capacitores capaz de fornecer 16 MVar, reduzindo o carregamento dos transformadores da SESUL para 75,7%. As porcentagens de carregamento do banco de transformadores obtida durante as simulações são apresentadas na Figura 48.

Figura 49 – Demanda de potência reativa da rede CEMIG para o Laminador 01 nas topologias 1 a 5



Fonte: Próprio autor

Também foi notado que com o aumento gradativo da potência fornecida pelo banco de capacitores, permitiu-se que houvesse a diminuição do nível de potência reativa demandada da rede da concessionária CEMIG para apenas 0,44 MVar no momento em que a potência fornecida pelo banco de capacitores era 16 MVar, como pode ser visto na Figura 49.

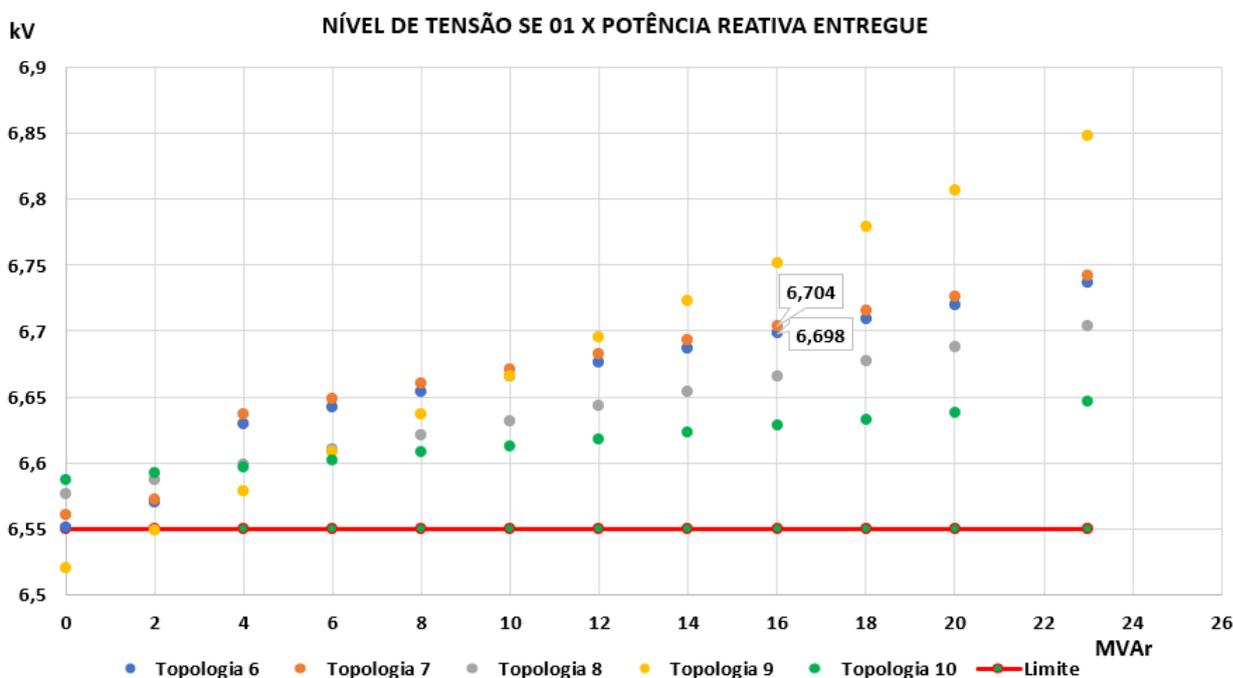
Na topologia utilizada no teste 3, após realizar as simulações verificou-se que sem a PCH conectada ao sistema, o banco de transformadores da SESUL encontra-se sobrecarregado com 104% da sua capacidade de entregar potência ao Laminador. Conforme o aumento gradativo da potência do banco de capacitores que foram instalados na simulação, o melhor dos casos neste teste foi a alocação de um banco de capacitores com capacidade de entregar 20 MVar, porém, exigindo 87,9% do banco de transformadores da SE SUL. Anteriormente o primeiro índice de porcentagem encontrado foi de 92,7%. Por fim esta configuração de topologia apresentada neste teste não é viável pois, apresentou uma porcentagem de carregamento do banco de transformadores da SE SUL, próximo de 90% de sua capacidade.

As demais topologias apresentadas nos testes 4 e 5, não se apresentaram como opções viáveis, uma vez que, a porcentagem de carregamento do banco de transformadores da SE SUL indicou sobrecarregamento. Os valores encontrados estão entre 100,6% a 154%. A demanda de potências reativas nos dois testes citados foi maior do que os demais testes, indicando assim a sua inviabilidade como opção de compensação.

5.1.2 Compensador síncrono

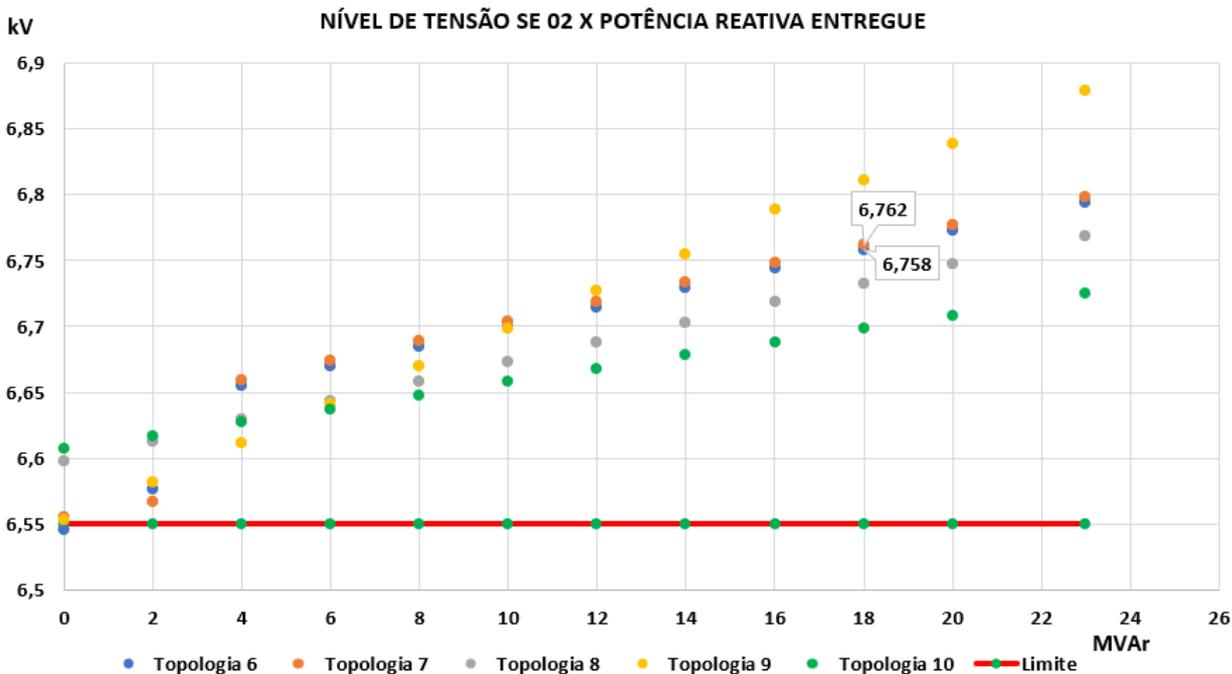
Nesta seção, será utilizado um compensador síncrono no lugar do banco de capacitores como uma segunda opção para realizar a compensação reativa nas barras das salas elétricas do Laminador 01 por meio da simulação no PowerWorld. O compensador síncrono utilizado foi uma máquina síncrona que é conectada a uma rede elétrica do SEP para ajudar na manutenção da tensão do sistema. Assim como nos primeiros testes realizados com o banco de capacitores alocado no sistema elétrico, os testes a seguir com a inserção do compensador síncrono também seguirá o mesmo padrão. Para facilitar a visualização dos testes, serão apresentadas Tabelas e gráficos com as amostras obtidas das grandezas elétricas. As condições a seguir serão de forma que o Trem de Laminação esteja produzindo de modo normal. Novamente, as manobras realizadas nos testes anteriores serão realizadas com o objetivo de realizar a comparação entre os equipamentos instalados. Após a realização dos testes, as amostras foram agrupadas nos gráficos das Figuras 50, 51, 52 e 53. Nos gráficos a seguir foram destacados os valores obtidos com as melhores topologias aplicadas (topologias 6 e 7) utilizando um compensador síncrono instalado.

Figura 50 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 1 nas topologias 6 a 10



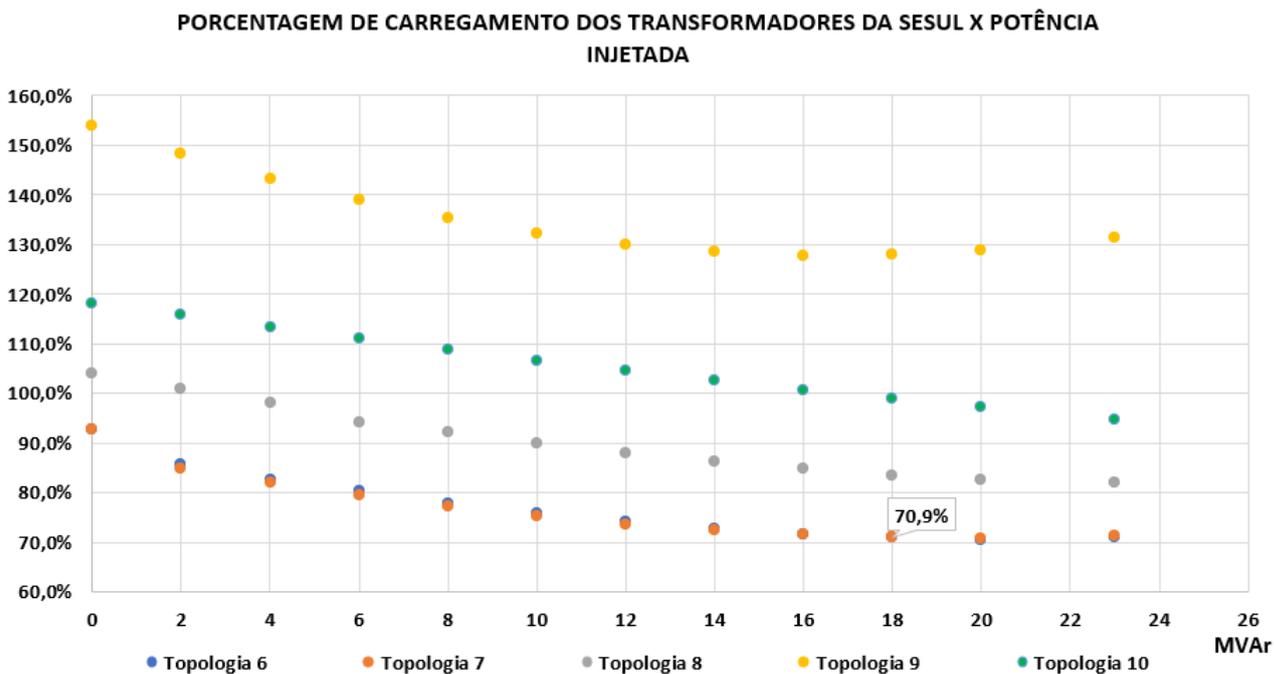
Fonte: Próprio autor

Figura 51 – Níveis de tensão da barra da sala elétrica 2 nas topologias 6 a 10



Fonte: Próprio autor

Figura 52 – Porcentagem de carregamento do Banco de transformadores da SE SUL nas topologias 6 a 10



Fonte: Próprio autor

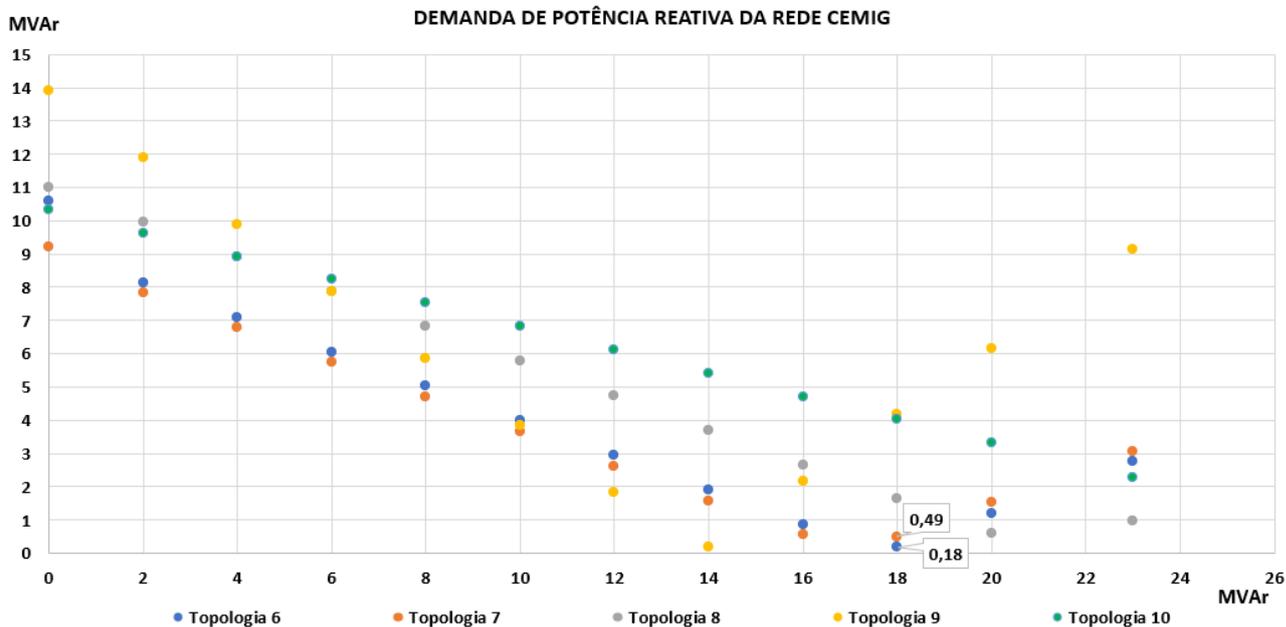
Com a instalação deste equipamento obteve-se uma condição em que as tensões do barramento da sala elétrica 1 chegasse a 6,698 kV e sala elétrica 2; 6,758 kV conforme as Figuras 50 e 51. Essas condições de valores são aceitáveis para que o processo de laminação trabalhe normalmente e sem eventuais paradas.

A porcentagem do banco de transformadores da SESUL chegou a 70,9%. Por meio deste teste, destaca-se que a melhor opção encontrada foi o momento que o compensador síncrono entrega 18 MVAR ao SEP, havendo uma demanda de potência reativa da rede da concessionária de energia de 0,18 MVAR. Logo podemos perceber que os resultados apresentados pelo teste 1 com o compensador síncrono instalado no sistema elétrico do processo do laminador 1 foram aceitáveis solução de compensação para o sistema elétrico do Laminador 01, elevando o nível de tensão de modo que a operação do mesmo esteja normalizada.

No teste 2 com o compensador síncrono, observa-se uma quantidade maior de situações onde o banco de transformadores da SESUL apresenta uma porcentagem carregamento aceitável para utilização, o que pode prolongar a vida útil do equipamento. Na situação onde o compensador síncrono entrega 6 MVAR foi a primeira das situações aceitáveis conforme citado anteriormente. Neste teste a melhor situação encontrada, foi no momento que o compensador síncrono conseguiu entregar ao sistema 18 MVAR, possibilitando com que o barramento demandasse 0,49 MVAR de potência reativa da concessionária de energia. Através da alocação do compensador no sistema simulado no PowerWorld, foi possível atingir 6,704 kV no barramento da sala elétrica 1 e 6,762 no barramento da sala elétrica 2. Destaca-se a amostra em que o compensador síncrono entrega 18 MVAR ao sistema elétrico, onde houve o menor consumo de potência ativa da concessionária de energia. Logo, conclui-se que para o teste 2, um compensador síncrono com capacidade de entregar 18 MVAR de potência o melhor caso e mais adequado, permitindo com que o processo do Laminador 01 viesse a ser compensado e os níveis de tensão melhorados.

As topologia utilizadas nos testes seguintes que utilizaram a 8, 9 e 10, apresentaram elevação dos níveis de tensão cumprindo com o propósito e objetivo da instalação do equipamento. No entanto, a porcentagem de carregamento do banco de transformadores da SESUL indicou níveis de sobrecarregamento, como é apresentado na Figura 52, prejudicando os equipamentos da subestação alimentadora e juntamente com os equipamentos do processo de laminação.

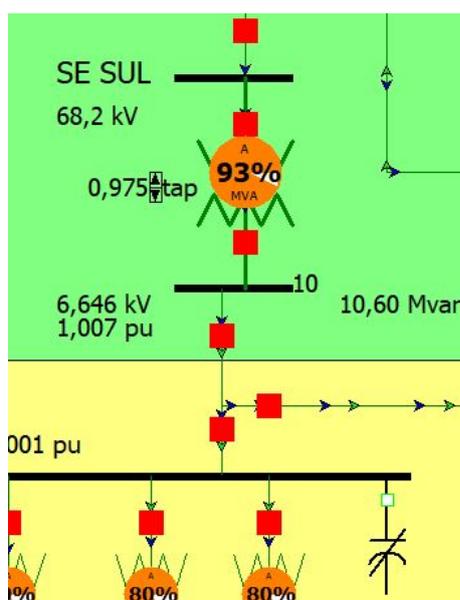
Figura 53 – Demanda de potência reativa da rede CEMIG para o Laminador 01 nas topologias 6 a 10



Fonte: Próprio autor

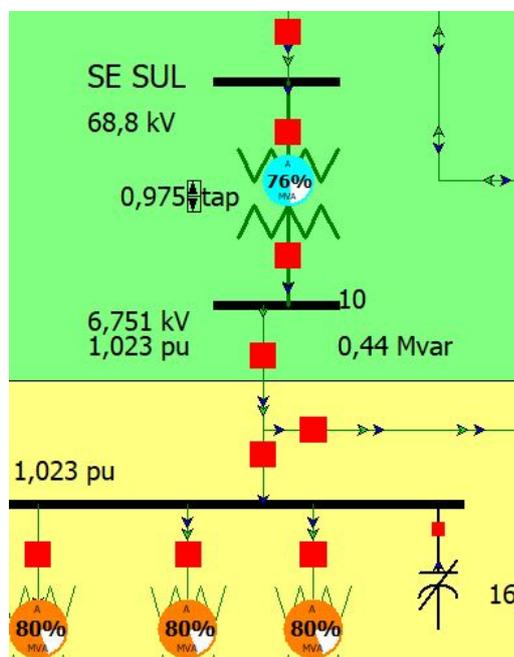
Através das figuras a seguir pode ser notada a diferença entre o carregamento final, Figura 55 e inicial, Figura 54, do banco de transformadores da SESUL que alimenta os barramentos do processo de laminação. Nota-se aqui que o carregamento diminuiu de forma considerável.

Figura 54 – Carregamento registrado nas situações atuais e presentes na primeira simulação



Fonte: Próprio autor

Figura 55 – Carregamento registrado após a inserção do banco de capacitores de 16 MVar para compensação

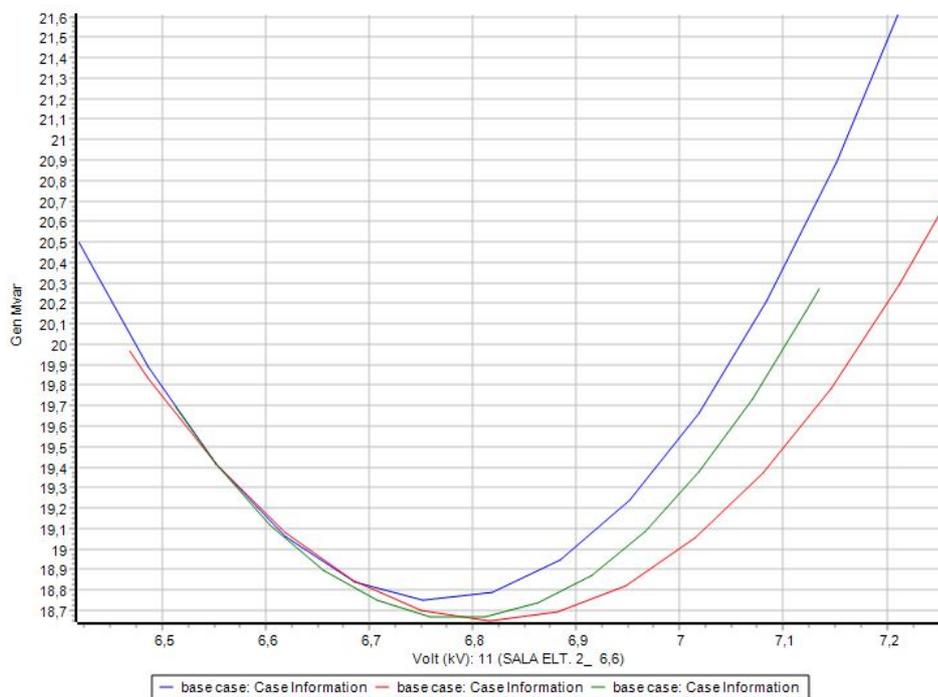


Fonte: Próprio autor

O gráfico da Figura 56 mostra uma situação em que não há fluxo de reativos suficiente pois a curva nunca cruza o eixo x. Nota-se que há uma diferença entre a parte inferior da curva e o eixo x que é a quantidade de potência reativa necessária para obter um caso solucionável e sair do colapso. Neste caso mostra-se a necessidade da injeção de 18,7 MVar aproximadamente. Estes gráficos foram gerados pelo software Powerworld, e as cores destacadas são referentes a 3 barramentos: Azul (Barramento 10 de 6,6 kV da SESUL), verde (Barramento 11, Sala Elétrica 2) e vermelho (Sala Elétrica 1).

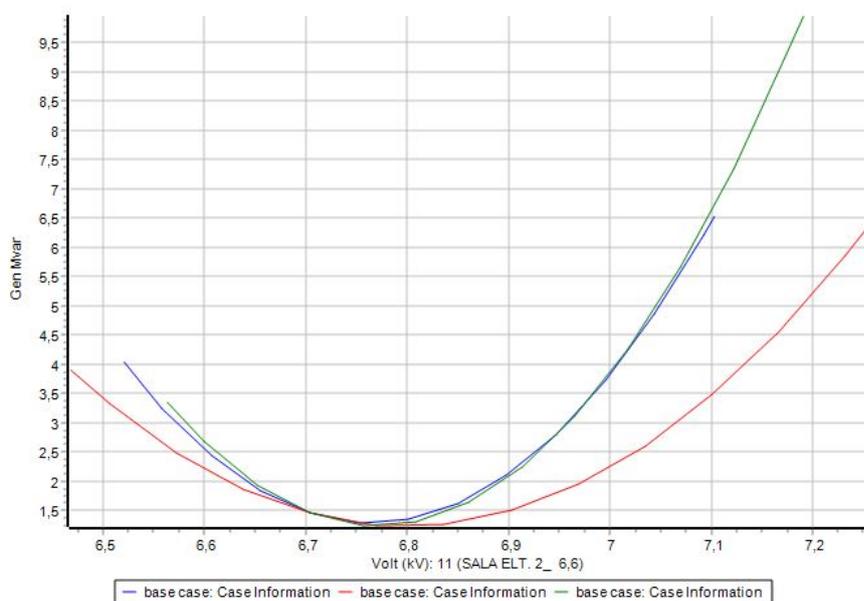
Após a inserção do equipamento para realizar a compensação reativa, foi gerado o gráfico da Figura 57 onde é possível notar que a diferença mostrada a Figura 56 diminuiu, de modo que a base quase toca o eixo x, aproximando-se de uma situação onde o caso seja solucionável.

Figura 56 – Curvas em que mostram uma demanda maior de potência reativa nos barramentos do processo do Laminador 01



Fonte: Próprio autor

Figura 57 – Curvas da demanda do potência reativa no SEP do processo do Laminador 01 após a inserção do banco de capacitores de 16 MVAR para compensação no barramento da sala elétrica 2



Fonte: Próprio autor

Através da Tabela 3 são apresentados os todos os testes realizados e a viabilidade de cada um. Foram destacados como viáveis as topologias 1, 2, 6 e 7. Nas topologias 1 e 2 foi utilizado o banco de capacitores como equipamento de compensação. Nas topologias 6 e 7 foi utilizado o compensador síncrono como equipamento de compensação.

Tabela 3 – Tabela de viabilidade dos testes realizados

Topologia	Viabilidade	Equipamento	Potência entregue
1	Viável	Banco de capacitores	23 MVar
2	Viável	Banco de capacitores	16 MVar
3	Não viável	Banco de capacitores	-
4	Não viável	Banco de capacitores	-
5	Não viável	Banco de capacitores	-
6	Viável	Compensador síncrono	18 MVar
7	Viável	Compensador síncrono	18 MVar
8	Não viável	Compensador síncrono	-
9	Não viável	Compensador síncrono	-
10	Não viável	Compensador síncrono	-

6 Conclusão

Dentre as opções destacadas, a opção ideal levantada é a instalação de um banco de capacitores que forneça 16 MVar de potência na barra do Laminador 01 no teste 2, onde há a necessidade de colocar as 3 geradoras da PCH em paralelo, visto que, apresentou uma melhor compensação, elevando os níveis de tensão (6,703 kV no barramento da Sala Elétrica 1 e 6,749 kV no barramento da Sala Elétrica 2), de modo que ao laminar, o processo não sofra com variações de tensão.

Porém a melhor opção para ser aplicada no modelo real é a topologia do teste 1, utilizando um banco de capacitores capaz de entregar 23 MVar. A topologia neste teste apresenta a utilização de duas das geradoras do barramento da PCH em *stand-by* como contingência. Os níveis de tensão (6,670 kV no barramento da Sala Elétrica 1 e 6,742 kV no barramento da Sala Elétrica 2), de modo que ao laminar, o processo não sofra com variações de tensão.

Foi observado também que o consumo de potência reativa proveniente da rede CEMIG diminuiu de 10,6 MVar para 0,94 MVar o que pode reduzir os custos com a demanda de potência reativa proveniente da concessionária de energia como é destacado na Figura 49. O carregamento do banco de transformadores da SESUL, no teste 1 com o banco de capacitores instalado, também apresentou redução considerável conforme a Figura 48, que pode promover uma melhora na vida útil dos equipamentos e resfriamento de cabos de ligação dentro do processo, além de ser economicamente mais viável do que a instalação de um gerador síncrono.

Por fim, deixo como sugestão a utilização do software Powerworld para análise de sistemas elétricos reais, industriais, comerciais e também de sistemas de distribuição com objetivo de avaliar e auxiliar na elaboração de sugestões de melhoria, rearranjo, instalações de equipamentos, planejamento e execução de manobras para trabalhos futuros .

Referências

- ABB. *Synchronous condenser packages: Solving the challenges of renewable energy integration*. 2023. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A2466&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. (Accessed on 01/08/2023).
- AUTOMALOGICA. *Desenvolvimento e testes de sistemas SCADA - Automalógica*. 2021. <<https://automalogica.com.br/desenvolvimento-e-testes-scada>>. (Accessed on 11/16/2021).
- CEPEL. *dre.cepel.br*. 2021. <<https://dre.cepel.br/manual/anatem/equipamentos/estaticos.html>>. (Accessed on 12/30/2021).
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.: s.n.], 2013.
- DECKMANN, S. M. Compensação estática de reativos. *SBA: Controle & Automação*, v. 1, n. 4, p. 313–321, 1987.
- DIXON, J. et al. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 93, n. 12, p. 2144–2164, 2005.
- FERGÜTZ, M. *Slide 1*. 2016. <https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/9731/corre_a__do_fp_5_16_15641510000793_9731.pdf>. (Accessed on 08/08/2022).
- FLECK, C. C. A. G. M. et al. The use of powerworld to conduct load flow analysis and power factor correction on stevenson's 5 bus system. 2005.
- FUTURE, F. S. *Novos Materiais e Novas Tecnologias no Setor Elétrico*. <http://www.tec.abinee.org.br/2019/arquivos/g5171.pdf>, 2019.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. *Power system analysis & design, SI version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.
- ITB. *Compensadores dinâmicos de potência reativa | ITB*. 2021. <<https://itb.ind.br/produtos/compensadores-dinamicos-de-potencia-reativa/>>. (Accessed on 12/30/2021).
- KUNDUR, P. S.; MALIK, O. P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2022.
- LAZO, R. E. V. Heurística especializada aplicada na alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radial. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2015.
- MAMEDE, J. P. d. S. E.; FILHO, P. d. S. E. J. de potência. *Ltc. Rio de Janeiro:[sn]*, p. 42, 2013.
- MANTOVANI, J. R. S.; SANZ, J. C. et al. Planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência multi-área através de modelos estocásticos. <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/23-04-2015/000825243.pdf>, 2014. Disponível em: <<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/23-04-2015/000825243.pdf>>.

- MATA, D. d. *O que é PIMS?. A importância da coleta dos dados na...* / by Diogo Alves da Mata / Medium. 2021. <<https://medium.com/@diegoadmata/o-que-%C3%A9-pims-3e30cd7a15b3>>. (Accessed on 10/06/2022).
- MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. [S.l.]: Ed Unicamp, 1999.
- PACHECO, J. et al. Projeto e análise desempenho de um reator saturado de 570 kvar e 13,8 kv para regulação de tensão. In: SN. *VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica-CBQEE, Santos-SP, Brasil*. [S.l.], 2007. p. 17.
- QUIZHPI, J. C. L. Planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência multi-área através de modelos estocásticos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- RESENDE, F.; PAULILLO, G. Capítulo viii compensação reativa e qualidade da energia elétrica. 2013.
- SANTIAGO, P. M. A utilização de compensadores estáticos de reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica. [sn], 2016.
- SILVA, W. A. Utilização de recursos de compensação reativa de indústrias no controle de tensão de sistemas elétricos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- SOUZA, L. M. de. *Compensador síncrono de velocidade variável*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2003.
- TESTING, S. *SAP Logon: Introduction To SAP GUI And Navigation Tips & Tricks*. 2021. <<https://www.softwaretestinghelp.com/introduction-to-sap-gui-and-navigation-tips-tricks/>>. (Accessed on 09/29/2021).
- VALE, M. et al. Compensação reativa e controle de tensão—avaliação técnica de alternativas de expansão nos aspectos de estabilidade de tensão. *XI ERIAC, Hernandieriaz-Paraguai*, 2005.

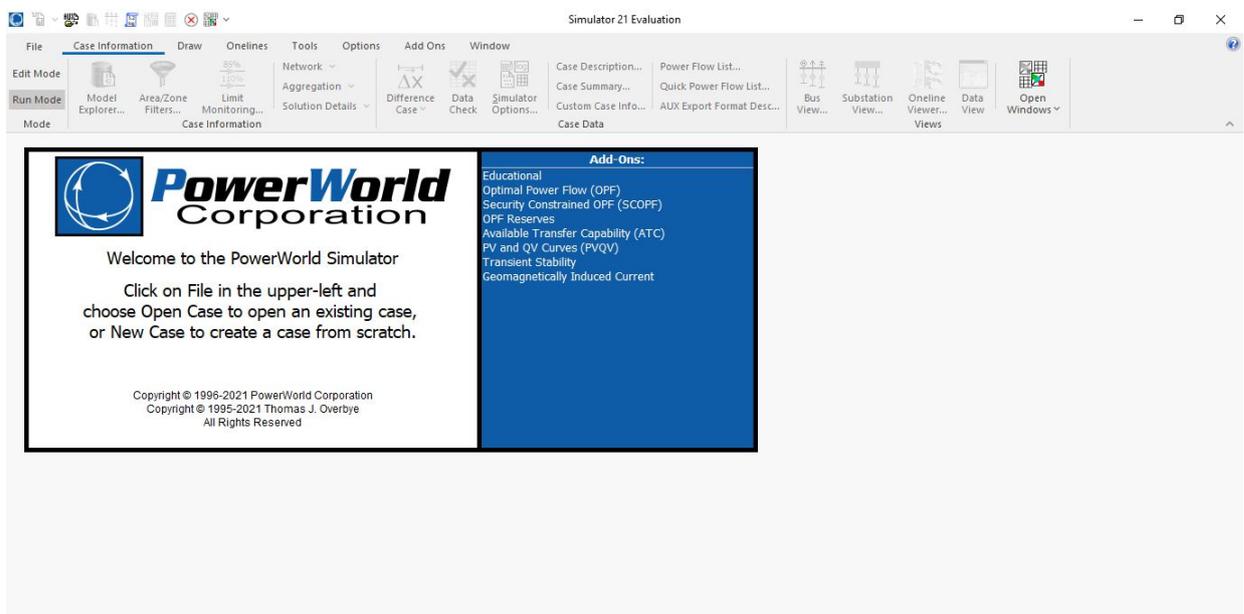
7 Apêndice A

7.1 Apêndice A

7.1.1 Ambiente de trabalho

Após a instalação do software PowerWorld e ao realizar a abertura do mesmo para ser executado, tem-se as primeiras impressões a respeito do mesmo como é destacado na figura 58:

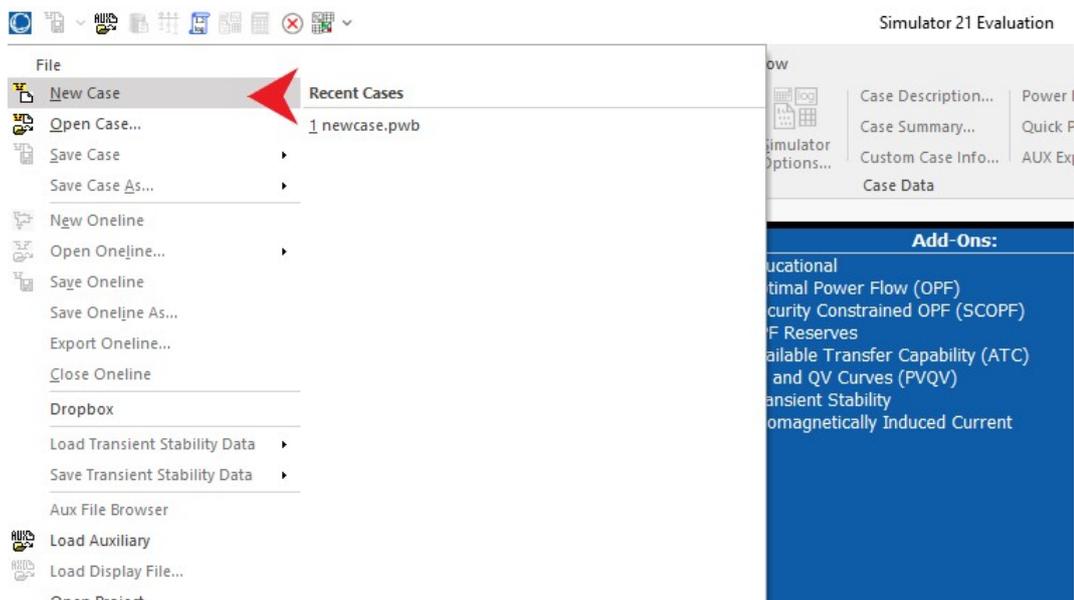
Figura 58 – Software PowerWorld - Tela inicial



Fonte: Próprio autor

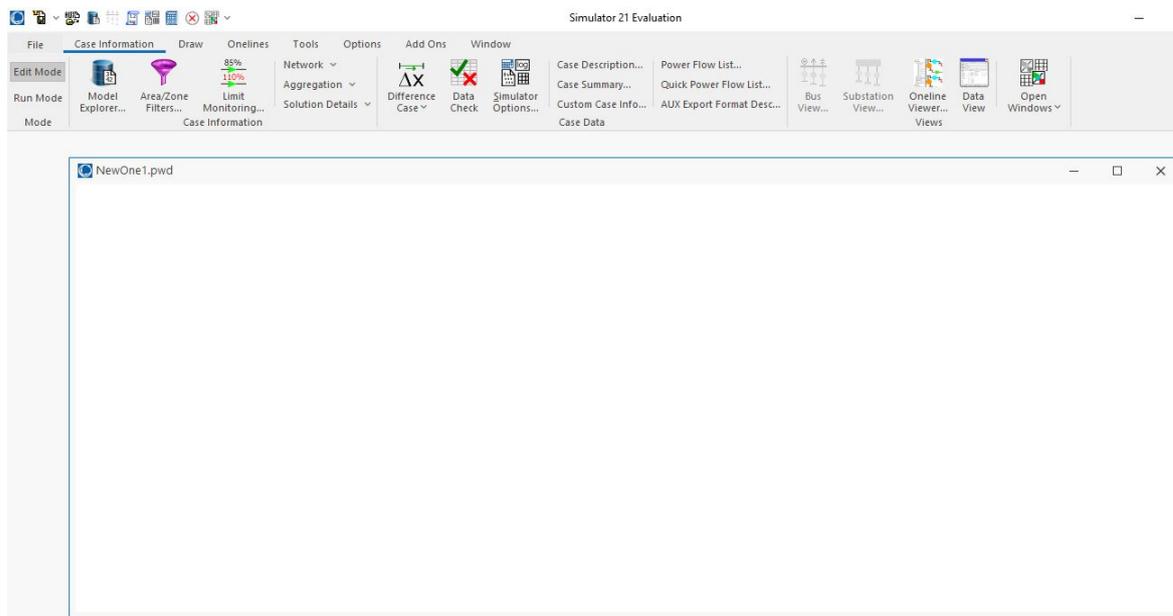
Com o PowerWorld aberto, clicando no menu File e em seguida em New Case é possível dar início ao primeiro caso e montar o Sistema Elétrico de Potência a ser analisado de acordo com as figuras 59 e 60.

Figura 59 – Criação do Primeiro Caso



Fonte: Próprio autor

Figura 60 – Software PowerWorld - Primeiro Caso



Fonte: Próprio autor

Com o objetivo de simplificar execução do programa para o usuário do software, o PowerWorld possui uma interface de sua área de trabalho de modo simplificado, com locais e menus para edição e simulação de sistemas como pode ser observado através das figuras 61, 62, 63, 64, 65, 66 e 67 a seguir:

Figura 61 – Menu de informações do caso criado



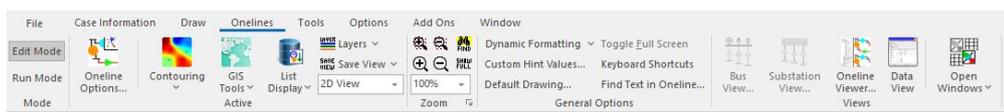
Fonte: Próprio autor

Figura 62 – Menu de desenho dos componentes de um SEP



Fonte: Próprio autor

Figura 63 – Menu de acompanhamento da enquanto o programa está sendo executado



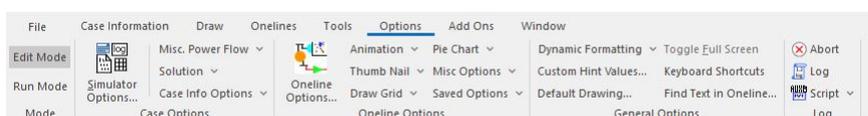
Fonte: Próprio autor

Figura 64 – Menu de ferramentas



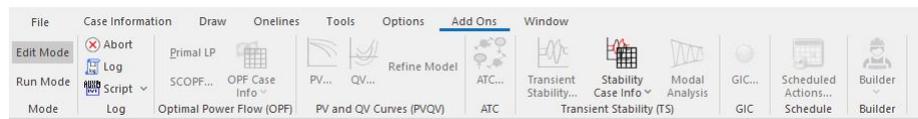
Fonte: Próprio autor

Figura 65 – Menu de opções



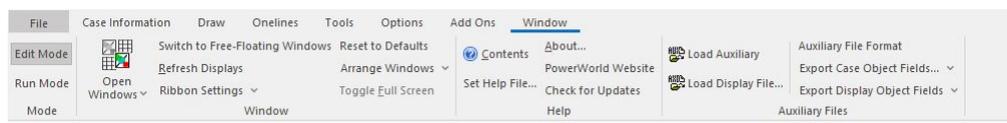
Fonte: Próprio autor

Figura 66 – Menu de observação dos fluxos de potência e curvas de carga nas barras



Fonte: Próprio autor

Figura 67 – Menu de janelas



Fonte: Próprio autor

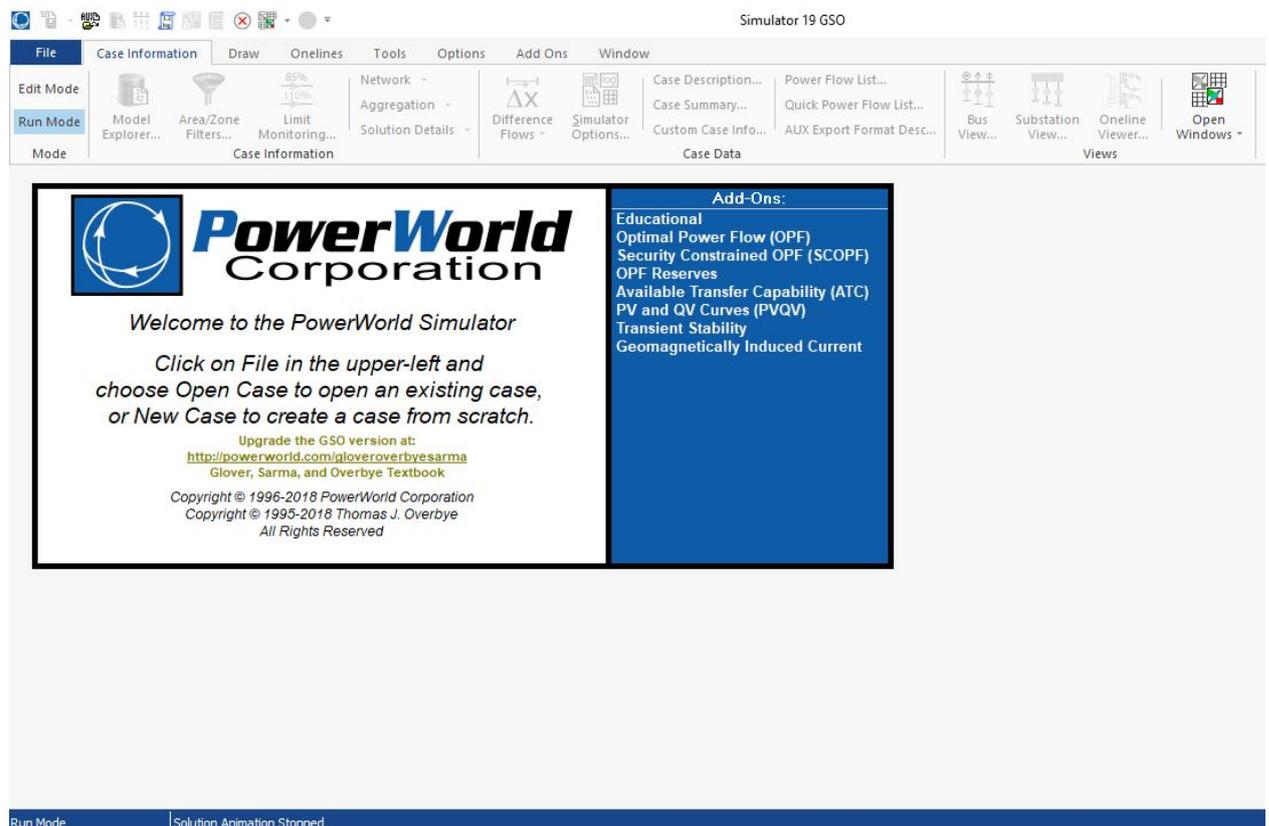
8 Apêndice B

Neste apêndice será apresentado o software Powerworld, com o objetivo de familiarizar com o ambiente da ferramenta aqui apresentada na figura 68, e que será utilizada neste trabalho para a realização da simulação do sistema elétrico de uma usina siderúrgica local em seções posteriores.

8.1 Ferramenta PowerWorld

Os Sistemas Elétricos de Potência podem ser explicados como os conjuntos de equipamentos físicos e ou elementos de circuitos elétricos conectados atuando de modo coordenado, com a finalidade de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores. Tendo em vista a importância dos sistemas elétricos alguns softwares foram criados para facilitar e ajudar com simulações que possam prever ou até mesmo ser possível mostrar ocasiões em que o sistema não consiga executar suas funções em perfeito estado, sendo assim nesta seção serão abordados alguns aspectos sob o uso do Software PowerWorld. Atualmente o simulador se encontra na sua versão 22.(FLECK et al., 2005)

Figura 68 – Software PowerWorld



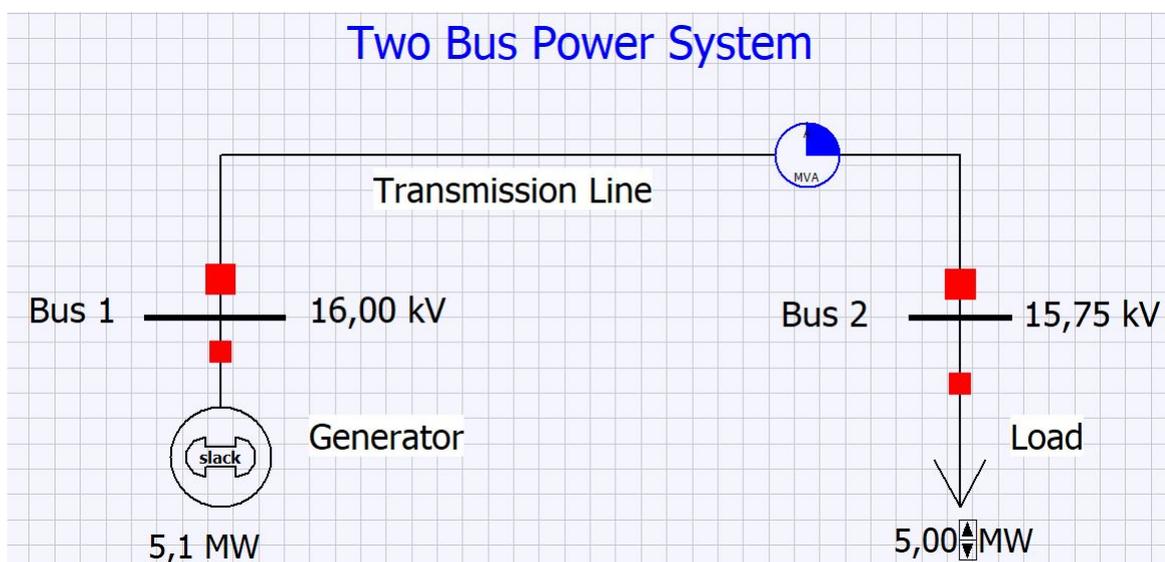
Fonte:Próprio Autor

8.1.1 Utilizando um sistema de 2 barras de exemplo

Como exemplo para demonstrar o conjunto de simulações do software PowerWorld (PW) nesta subseção será utilizado o arquivo Example 1_1 presente na biblioteca de simulações do software conforme a figura 69.

Por início, serão realizadas algumas análises no circuito de 2 barras anteriormente citado que também se encontra em (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2012). O objetivo desta simulação é mostrar a versatilidade do software para estudos de sistema de potência, de modo a incentivar alunos e demais usuários a utilizarem o PW para melhor compreender um SEP.

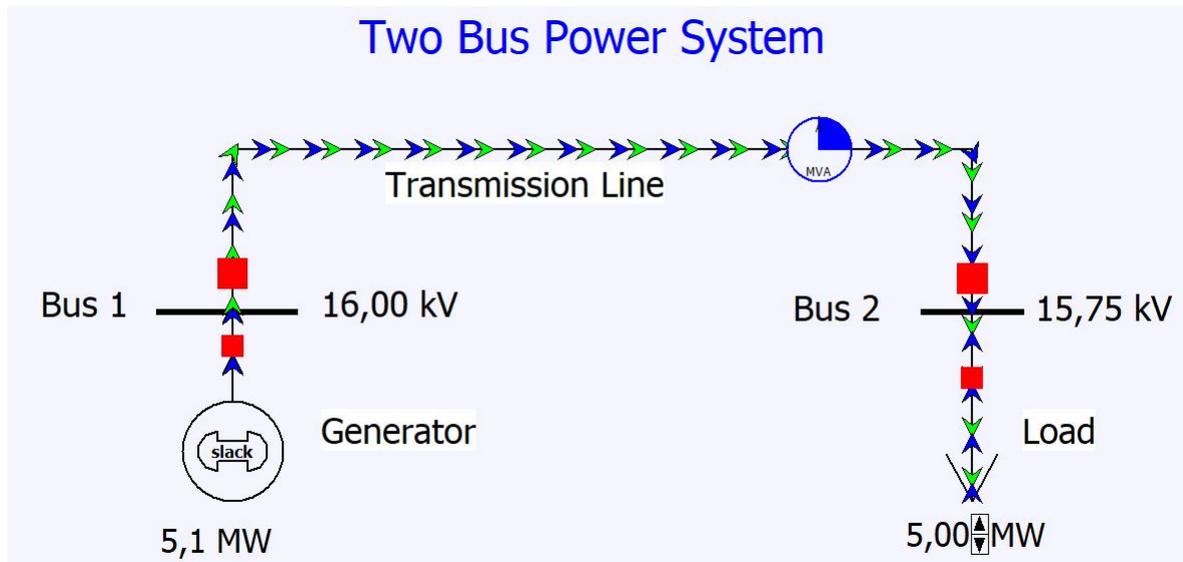
Figura 69 – Example1_1



Fonte:Próprio Autor

Com o intuito da realização da simulação deve-se alterar o modo de execução de *Edit Mode* para o *Run mode*. Ao clicar no menu *Tools* e no ícone de *Play*, será iniciada a simulação do sistema. O resultado é exibido na figura 70.

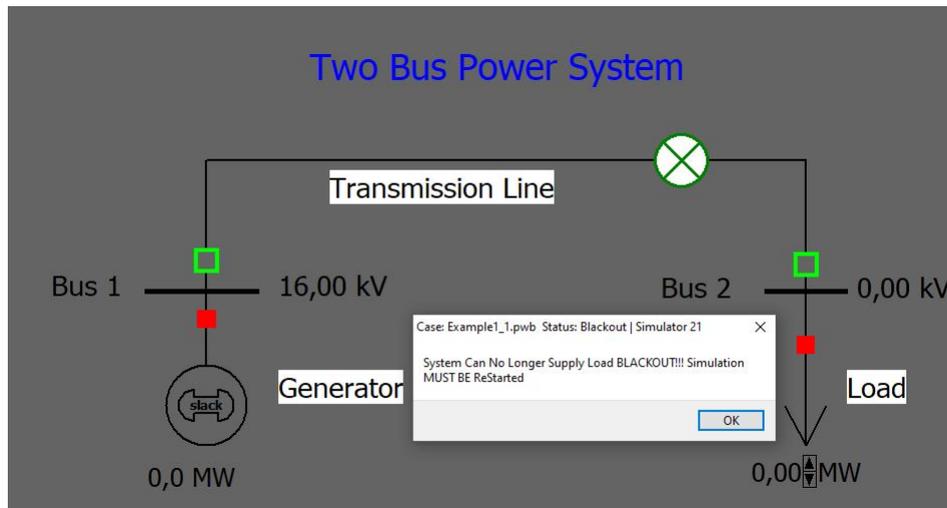
Figura 70 – Example1_1 em execução no PowerWorld



Fonte:Próprio Autor

A figura 70 ilustra como os principais componentes do sistema de energia são representados no PowerWorld. Os geradores são mostrados como um círculo com um "osso de cachorro" (o rotor), as setas grandes representam cargas e as linhas de transmissão são simplesmente desenhadas como linhas. Na terminologia do sistema de potência, os nós nos quais dois ou mais dispositivos se juntam são chamados de barramentos. No PowerWorld, linhas mais grossas costumam representá-los com o nome *Bus*. As tensões do barramento são mostradas em quilovolts (kV) nos campos imediatamente à direita dos barramentos. Além das tensões, os engenheiros eletricitistas também estão preocupados com a forma como a potência flui através do sistema. No PowerWorld, fluxos de potência podem ser visualizados com setas sobrepostas nos geradores, cargas e linhas de transmissão. O tamanho e a velocidade das setas indicam a direção do fluxo. Um dos aspectos únicos do PowerWorld é sua capacidade de simular sistemas de energia. A figura 70 representa um sistema de energia simples no qual um gerador está fornecendo energia para uma carga por meio de um alimentador em um sistema de distribuição de 16 kV. Os blocos vermelhos sólidos na linha e na carga representam disjuntores, para abrir quaisquer um deles, basta clicar em um disjuntor. Pode-se observar que a carga é conectada em série com o gerador e clicando em qualquer um dos disjuntores isola-se a carga do gerador, resultando em um apagão como pode ser observado na figura 71. Para restaurar o sistema, é necessário clicar novamente no disjuntor para fechá-lo e uma vez mais selecione o botão na faixa de opções *Tools*. Para variar a carga, basta clicar nas setas para cima ou para baixo entre o valor de carga e o campo "MW". Nota-se que por causa da impedância da linha, a tensão da carga cai conforme seu valor é aumentado.

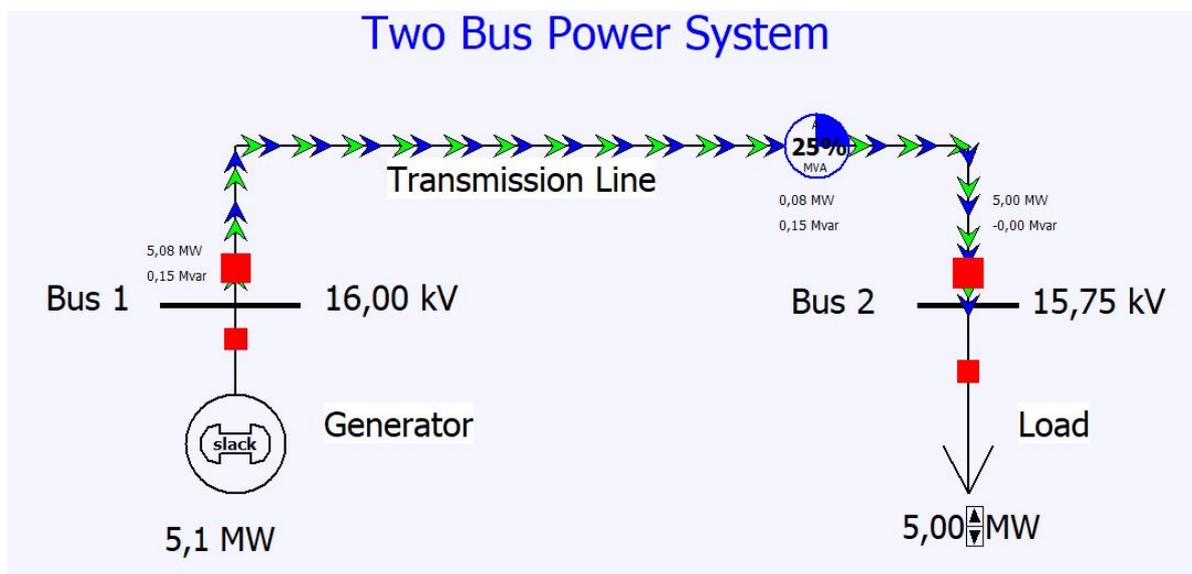
Figura 71 – Simulação de apagão no sistema após isolar a carga do gerador



Fonte:Próprio Autor

Ao realizar a simulação, é possível notar que na barra 2 houve uma queda no nível de tensão para 15,75 kV, se comparada com a barra 1 que possui 16,00 kV. Consegue-se perceber que é exibido o nível de carregamento da linha de transmissão (LT) e as perdas de potência ativa e reativa de acordo com a figura 72. As setas verdes indicam o fluxo de potência ativa, enquanto que as setas na cor azul indicam o fluxo de potência reativa, de acordo com configurações ajustadas.

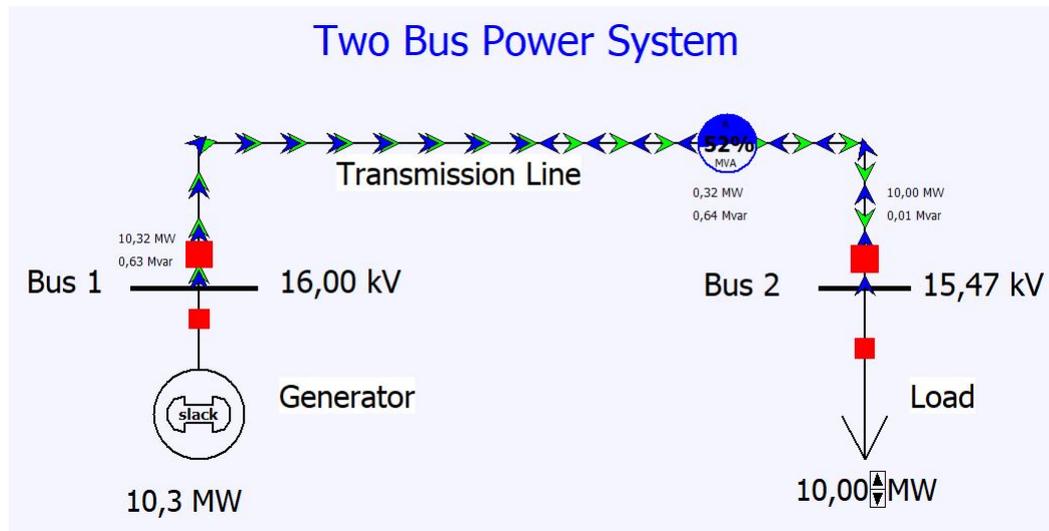
Figura 72 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP



Fonte:Próprio Autor

Modificando o valor da carga presente no sistema, dobrando a demanda observa-se as consequências sobre o fluxo de potência do SEP.

Figura 73 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP após dobrar o valor da carga

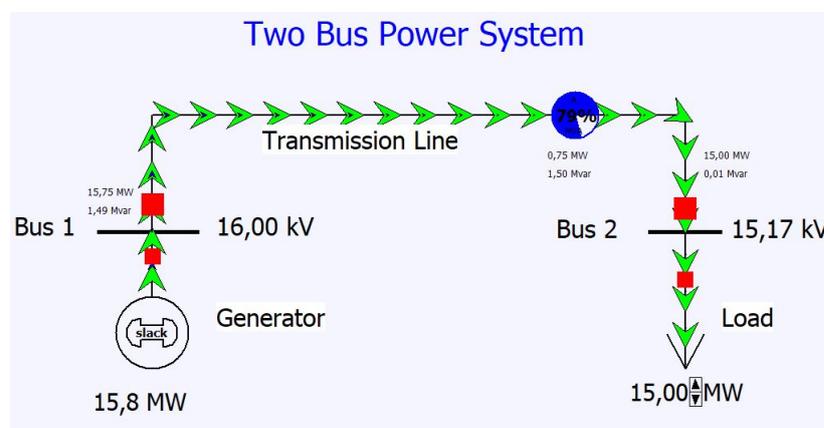


Fonte:Próprio Autor

Ao aumentar a demanda da carga novamente, dobrando o valor inicial (de 5 MW para 10 MW), é observado um aumento no carregamento da LT, resultando em um acréscimo nas perdas ativas e reativas na linha. Pode-se notar também que a queda do nível de tensão da barra 2, de 15,75 kV passou a ser 15,47 kV neste novo cenário mostrado pela figura anterior.

Realizando uma nova modificação no valor da carga presente no sistema, triplicando a demanda observa-se as consequências sobre o fluxo de potência do SEP. Este novo aumento resultou, como esperado, um acréscimo no nível de carregamento da LT (agora em 79% da sua capacidade) e nas perdas do sistema, assim como, na queda no nível de tensão na barra 2

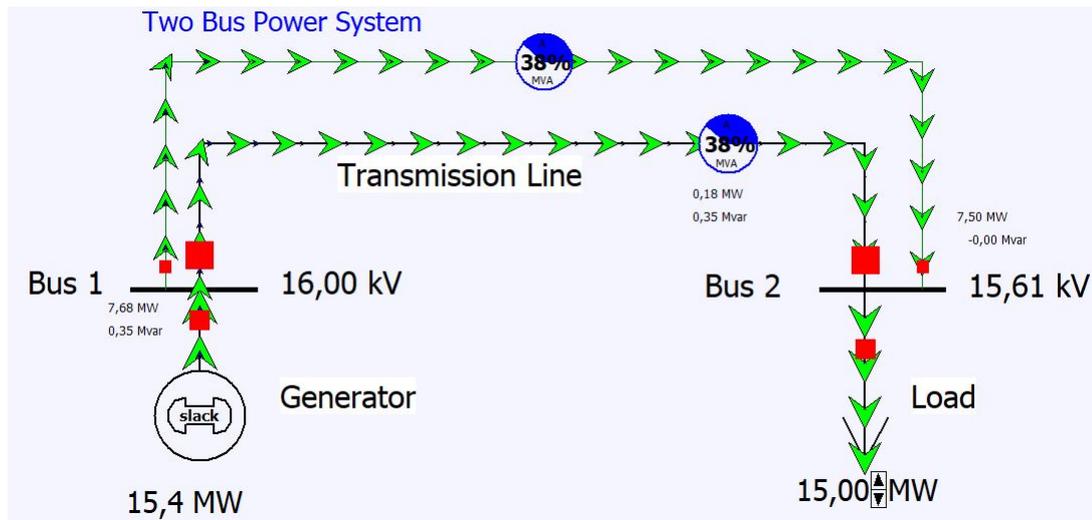
Figura 74 – Fluxos de potência ativa e reativa no SEP após triplicar o valor da carga



Fonte:Próprio Autor

Adicionando uma nova linha de transmissão fora notado uma diminuição no nível de carregamento da primeira linha inserida anteriormente no SEP, que resultou na diminuição das perdas totais em aproximadamente 50%, e no aumento do nível de tensão na barra 2 maior do que no cenário em que a demanda da carga foi dobrada de 15,47 kV para 15,61 kV conforme a figura 75.

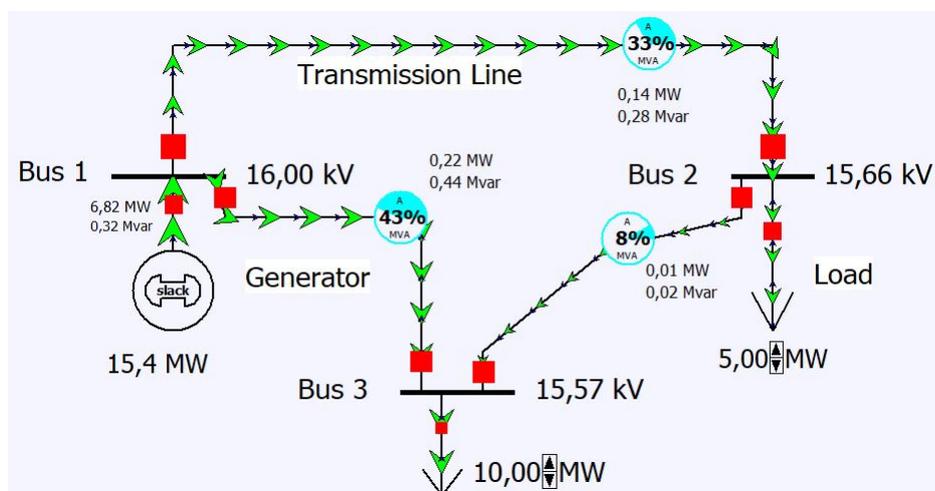
Figura 75 – Fluxos de potência ativa e reativa após acréscimo de uma nova LT no SEP



Fonte: Próprio autor

No próximo cenário a ser apresentado na figura 76, serão adicionados mais uma LT, um barramento (Bus 3) e uma nova carga conectada no à nova barra.

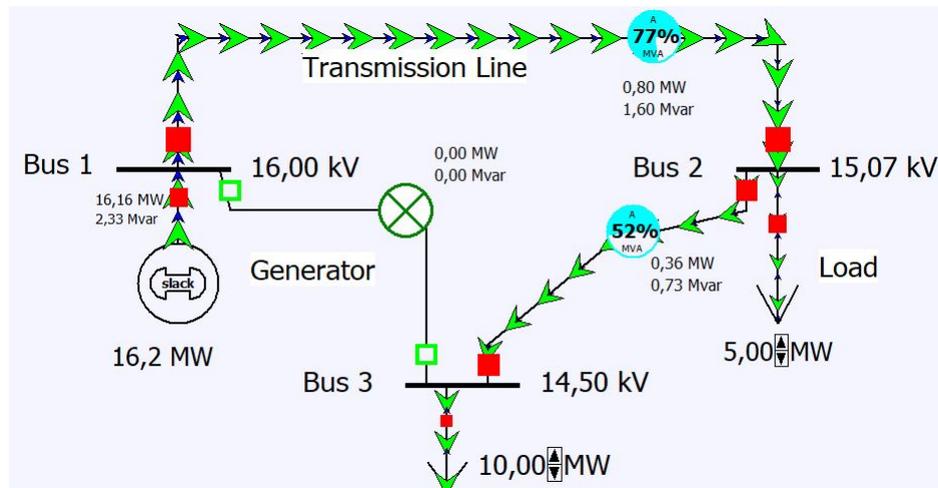
Figura 76 – Novo SEP com 3 barras



Fonte: Próprio autor

Retirando a linha de transmissão presente entre as barras 1 e 3, observou-se qual foi o efeito produzido no fluxo de potência do sistema como mostra a figura 77.

Figura 77 – Novo SEP com 3 barras após desligamento do disjuntor da linha 1-3

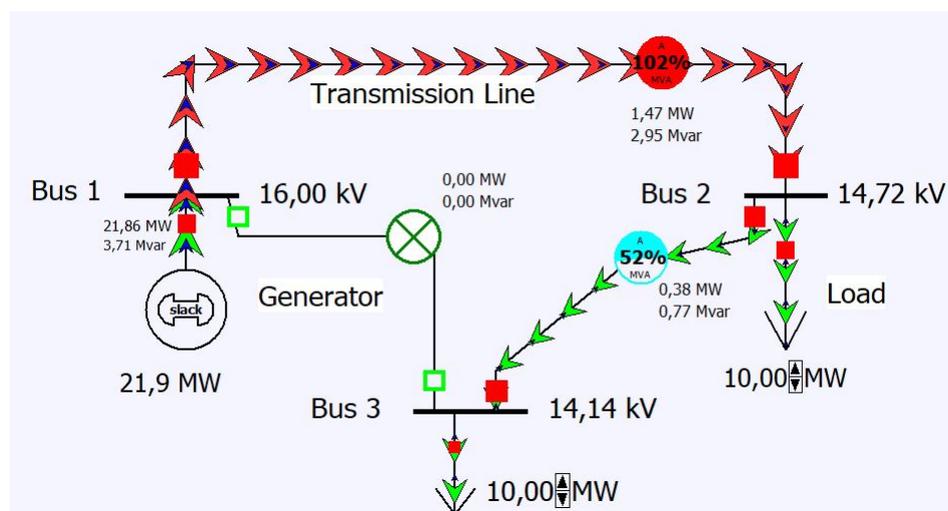


Fonte: Próprio autor

A retirada da linha 1-3 ocasionou no aumento do carregamento das outras LT's, não só mas também, no aumento das perdas nestas linhas e na queda do nível de tensão nas barras 2 e 3 do sistema.

Caso ocorra um aumento do valor de demanda da carga do sistema, este evento pode resultar em uma operação das linhas fora do limite de MVA como pode ser visto na figura 78, onde neste caso, fora dobrado o valor da carga conectada à barra 2 provocando colapso no fluxo de potência na linha entre as barras 1 e 2 além do limite de operação.

Figura 78 – Novo SEP linha 1-2 fora dos limites de operação



Fonte: Próprio autor

9 Anexo A

9.1 Softwares utilizados para monitoramento e gerenciamento de atividades no SEP

9.1.1 PIMS

Na Pirâmide da Automação o sistema PIMS se encontra dentro dos EPS — Enterprise Production Systems juntamente com o MES cumprindo o seu papel na interface entre os níveis estratégicos e operacionais de uma empresa.

Figura 79 – Pirâmide da Automação industrial



Fonte: (MATA, 2021)

A principal função de um sistema PIMS é concentrar os dados de diversas fontes, transformá-los em informação e essa informação em conhecimento. A aquisição de dados de diversas fontes como PLCs, SCADA, SDCDs, geralmente é a partir da interface OPC DA/OPC UA.

9.1.2 SAP - Systemanalysis Programmentwicklung

SAP é a abreviação da expressão em alemão "Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung", e que foi traduzido para nós como "Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados".

O SAP é um sistema de Gestão Empresarial (ERP) que traz as melhores práticas do mercado para empresas de diferentes seguimentos, com a intenção de melhorar a eficiência do controle e gerenciamento das informações e dados das companhias.

A solução se adapta às necessidades de cada cliente devido aos diferentes módulos que incorporam o sistema SAP, auxiliando a organização como um todo. Esses módulos correspondem a cada departamento da empresa, como vendas, estoque, entre outros.

Ou seja, cada empresa terá seu sistema SAP implementado de acordo com as necessidades do seu negócio. Além disso, os módulos disponibilizados irão oferecer eficiência, organização e melhoria na gestão. Pois, apesar de separados, eles unem todas as frentes da organização em uma só ferramenta. No caso de um setor de manutenção e coordenação de SEP de uma usina siderúrgica de grande porte, o SAP pode ser utilizado para a elaboração, controle e coordenação de ordens de serviço, para a execução de atividades programadas.

Figura 80 – SAP - Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados



Fonte: (TESTING, 2021)

9.1.3 SAGE - Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia

O SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) tem como objetivo a supervisão, controle e gestão de sistemas elétricos. É utilizado por concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, além do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

O sistema possibilita a aquisição, o armazenamento e a análise, em tempo real, de todas as informações necessárias para operação de um sistema elétrico, seja a partir de um centro local, regional ou nacional. Atualmente, o SAGE é utilizado por mais de 200 empresas controlando mais de 1.200 instalações em todo o Brasil.

O SAGE é baseado em uma arquitetura distribuída e redundante, na qual vários servidores são conectados através de uma rede local, garantindo a consistência da base de dados e a expansibilidade dos recursos computacionais. Os diversos processos que compõem o sistema são organizados em torno de uma base de dados distribuída de alto desempenho, sobre a qual trocam informações e mensagens que permitem sua exe-

ção coordenada. Processos adicionais monitoram o estado do sistema em tempo real e controlam a alta disponibilidade de cada função crítica.

O sistema agrega ainda ferramentas de simulação e de análise de redes em tempo real capazes de apresentar informação depurada do estado do sistema elétrico supervisionado. Com base nestas informações, outra camada de software é utilizada para antecipar problemas e de aconselhar o operador para uma situação ótima. Anos de experiência e vanguarda do Cepel no desenvolvimento de aplicativos de simulação e análise de redes garantem o estado da arte em algoritmos EMS para o SAGE.

O SAGE SCADA/EMS (Supervisory Control and Data Acquisition/Energy Management System) atende aos requisitos mais estritos dos centros de operação, assegurando alto desempenho, por meio de um esquema sofisticado para distribuição de tarefas entre servidores. A confiabilidade é garantida por servidores redundantes para funções críticas, enquanto a conectividade é obtida por ampla e crescente biblioteca de protocolos, todos nativos.

O sistema é atualizado continuamente, mantendo-se em sintonia com os avanços tecnológicos e tendo novas funcionalidades agregadas regularmente. Esta característica, conhecida como evergreen, permite que sistemas de supervisão e controle baseados no SAGE não sofram com a obsolescência e com curtos ciclos de vida.

Figura 81 – SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia)



Fonte:(AUTOMALOGICA, 2021)