UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Hiago Vicente Brugger

Compensação de Potência Reativa com utilização de Banco de Capacitores em um Sistema Elétrico Industrial

Juiz de Fora

2024

Hiago Vicente Brugger

Compensação de Potência Reativa com utilização de Banco de Capacitores em um Sistema Elétrico Industrial

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Modalidade: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Igor Delgado de Melo,

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Vicente Brugger, Hiago.
Compensação de Potência Reativa com utilização de Banco de Capacitores
em um Sistema Elétrico Industrial / Hiago Vicente Brugger. – 2024.
45 p. : il.

Orientador: Igor Delgado de Melo
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica, 2024.

1. Banco de Capacitores. 2. Fluxo de Potência. 3. Pandapower. I. Delgado de Melo, Igor, orient. II. Título.

Hiago Vicente Brugger

Compensação de Potência Reativa com utilização de Banco de Capacitores em um Sistema Elétrico Industrial

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Modalidade: Energia.

Aprovada em 12 de Agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Igor Delgado de Melo, - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande,
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof. Dra. Letícia Lacerda Santos de Sousa,
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

"Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados."

(Mahatma Gandhi)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a oportunidade de cursar a faculdade de Engenharia Elétrica, me abençoando e auxiliando até nos dias mais difíceis dessa caminhada.

Aos meus pais Paulo e Terezinha por zelar por mim durante toda a vida, através de inúmeros incentivos e conselhos. Até mesmo seus ensinamentos mais simples foram responsáveis por construir a pessoa que sou hoje e que me tornarei amanhã.

Agradeço aos meus familiares por cada palavra de incentivo que foram em muitos momentos, fonte de espiração. Em especial meus irmãos Igor e Italo, que foram grandes amigos durante toda a vida, e me apoiaram durante os momentos mais fáceis e os mais conturbados deixando a minha jornada mais simples, obrigado pela confiança.

Agradeço aos alunos da UFJF que passaram em minha vida, aos quais pude dividir minhas alegrias e também compartilhar os momentos difíceis. Em especial aos amigos do curso de Engenharia Elétrica, Lauro Luiz e Iuri Tanin, que enriqueceram cada momento do curso através de trocas de conhecimentos técnicos e experiências, me auxiliando até mesmo nos semestres mais difíceis.

Ao meu querido orientador Igor, que me proporcionou muita aprendizagem em suas aulas, que foram ministradas sempre com grande profissionalismo e dedicação e agora como orientado percebo grande força de vontade e simpatia durante essa etapa da minha graduação.

A Universidade Federal de Juiz de Fora, em especial o departamento de Energia Elétrica que me proporcionou ensino de alta qualidade através de professores e orientadores muito bem capacitados e dispostos a apresentar conceitos fundamentais para compreensão das disciplinas e para construção de conhecimento solido.

"As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos".
(Paulo Beleki).

RESUMO

Ao analisar qualquer tipo de sistema elétrico de potência, existem diversas grandezas que devemos discutir, exemplo disso são: níveis de tensão (se existe sobretensão ou subtensão), corrente elétrica que passa pelos condutores, estabilidade, condições de operação, geração, proteção entre tantos outros aspectos da rede elétrica. Pensando nisso a motivação para este trabalho é auxiliar na análise de sistemas elétricos industriais que são os que possuem uma menor variedade de estudos e ferramentas desenvolvidas para esta área. Este estudo contém uma solida base teórica sobre os capacitores, que inicia nos princípios básicos e suas características e contempla até aplicações específicas do banco de capacitores como aplicações industriais e sua instalação em alguns tipos de carga. Além disso, temos como metodologia para o cálculo do fluxo de potência com a utilização do pandapower que é uma ferramenta que utiliza de uma licença Berkeley Software Distribution (BSD) e pode ser compilado facilmente no Google Colab, o documento passa pela estruturação da rede, de mais a mais está presente na pesquisa a estruturação básica do código e até a criação de uma rede elétrica industrial simples, logo é explicado como fazer a instalação das bibliotecas do pandapower e a criação dos elementos, posteriormente é demonstrado a rede sem a utilização do elemento shunt e depois com os capacitores, por fim é mostrado todos os resultados colhidos de cada uma das simulações, que permite concluir as reais influências da instalação do banco de capacitores nos níveis de tensão e deduzir constatações acerca da potência ativa e da potência reativa de maneira confiável.

Palavras-chave: Berkeley Software Distribution (BSD). Níveis de tensão. Elemento shunt. Potência Ativa. Potência Reativa.

ABSTRACT

When analyzing any type of electrical power system, there are several variables that we must discuss, such as: voltage levels (whether there is overvoltage or undervoltage), electrical current that passes through the conductors, stability, operating conditions, generation, protection, among many other aspects of the electrical grid. With this in mind, the motivation for this work is to assist in the analysis of industrial electrical systems, which are those with the smallest variety of studies and tools developed for this area. This study contains a solid theoretical basis on capacitors, which begins with the basic principles and their characteristics and even includes specific applications of the capacitor bank, such as industrial applications and their installation in some types of load. Furthermore, we use the methodology for calculating power flow using pandapower, a tool that uses a Berkeley Software Distribution (BSD) license and can be easily compiled in Google Colab. The document covers the structuring of the network, and the basic structuring of the code and even the creation of a simple industrial electrical network. It then explains how to install the pandapower libraries and create the elements. The network is then demonstrated without the use of the shunt element and then with the capacitors. Finally, all the results collected from each of the simulations are shown, which allows us to conclude the real influences of the installation of the capacitor bank on the voltage levels and to reliably deduce findings about active power and reactive power.

Keywords: Berkeley Software Distribution (BSD). Voltage levels. Shunt element. Active Power. Reactive Power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva: corrente(A) x tempo(s). 19
Figura 2 – Curva: tensão(V) x tempo(s). 20
Figura 3 – Planta Industrial do 1º cenário. 31
Figura 4 – Planta Industrial do 2º e 3º cenários. 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores). 34
Tabela 2 – Correntes nas linhas do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores). 35
Tabela 3 – Carregamento das Linhas do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores). 36
Tabela 4 – Resultados do 2º cenário (q = -520 Kvar). 37
Tabela 5 – Correntes nas linhas do 2º cenário (q = -520 Kvar). 37
Tabela 6 – Carregamento das Linhas do 2º cenário (q = -520 Kvar). 37
Tabela 7 – Resultado do 3º cenário (q = -1000 Kvar). 38
Tabela 8 – Correntes nas linhas do 3º cenário (q = -1000 Kvar). 39
Tabela 9 – Carregamento das Linhas do 3º cenário (q = -1000 Kvar). . . . 39
Tabela 10 – Comparação das Tensões (pu) dos 3 cenários. 40
Tabela 11 – Comparação das Correntes (A) dos 3 cenários. 41
Tabela 12 – Comparação do Carregamento dos 3 cenários. 41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Continua
CA	Corrente Alternada
Q	Potência Reativa
P	Potência Ativa
FP	Fator de Potência
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEP	Sistema Elétrico de Potência
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Fn	Frequência Nominal
BSD	Berkeley Software Distribution
pu	por unidade
QGF	Quadro Geral de Força
QDL	Quadro de Distribuição de Luz
CCM	Centro de Controle de Motores

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**13**
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	MOTIVAÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.4	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	15
2	**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**	**17**
2.1	CAPACITORES	17
2.1.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS CAPACITORES	17
2.1.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CAPACITORES	18
2.1.3	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CAPACITORES	21
2.2	APLICAÇÃO DO CAPACITOR NAS INDÚSTRIAS	21
2.2.1	GANHOS DAS APLICAÇÕES ESPECÍFICAS DO CAPACITOR	22
2.3	EXEMPLOS DE ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES NOS TERMINAIS DE CARGAS ESPECÍFICAS	23
2.3.1	MOTORES ELÉTRICOS	23
2.3.2	MÁQUINAS DE SOLDA A TRANSFORMADOR E COM TRANSFORMADOR RETIFICADOR	24
2.4	ESTADO DA ARTE	24
3	**METODOLOGIA PROPOSTA**	**26**
3.1	FUNCIONAMENTO DO PANDAPOWER	26
3.1.1	ESTRUTURAÇÃO DO PANDAPOWER	26
3.1.2	ESTRUTURAÇÃO BÁSICA DO CÓDIGO	27
3.1.3	CRIAÇÃO DA REDE	28
4	**PLANTA INDUSTRIAL E RESULTADOS**	**31**
4.1	DEFINIÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL	31
4.2	PRIMEIRO CENÁRIO	34
4.2.1	SIMULAÇÕES DO PRIMEIRO CENÁRIO	34
4.3	SEGUNDO CENÁRIO	36
4.3.1	SIMULAÇÕES DO SEGUNDO CENÁRIO	36
4.4	TERCEIRO CENÁRIO	38
4.4.1	SIMULAÇÕES DO TERCEIRO CENÁRIO	38
4.5	COMPARAÇÃO DE TENSÃO, CORRENTE E CARREGAMENTO ENTRE OS CENÁRIOS	40
5	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	**42**

5.1 CONCLUSÕES GERAIS 42
5.2 DIRETRIZES PARA TRABALHOS FUTUROS 43
REFERÊNCIAS 44
APÊNDICE A – Implementações Computacionais 45

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda de maneira sucinta o contexto referente a este trabalho. Nele contém a motivação, objetivos e o cenário no qual o trabalho se encontra, além disso, está presente a apresentação de conceitos fixados em trabalhos relacionados, além disso, contém uma visão parcial da estruturação nesse trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

No sistema elétrico brasileiro e mundial, existe uma ampla gama de equipamentos e periféricos como: fiação, tubulação, transformadores, capacitores, motores síncronos ou geradores para compensação de reativos, entre outros. Ao analisar o cenário industrial, máquinas que são constantemente encontradas são os motores elétricos, para que esses motores absorvam certa quantidade de energia ativa que posteriormente será transformado em trabalho, é necessário fornecer Potência Reativa (Q) que será responsável pela magnetização da máquina, isto é, a energia utilizada para ativar o campo indutor do equipamento.

Sendo assim, existem diversas maneiras de solucionar esse problema, uma delas é a compensação de reativos com a utilização de diversos componentes como: motores síncronos ou geradores para compensação de reativos, além da instalação de bancos de capacitores que será estudado nesse documento.

Um dos primeiros relatos que temos sobre os capacitores, foi durante a segunda metade do século XVIII com a Garrafa de Leyden, que consistia numa garrafa com água dentro e um fio condutor submerso, um estudioso da época, chamado Pieter ao tocar essa garrafa sofreu um grande choque, esse fato ficou conhecido como "Leyden Jarr" (OKA, 2000).

O surgimento de capacitores eletrolíticos que são chamados de supercapacitores permitiu a progressão da eletrônica, esse tipo de capacitor consegue armazenar mais cargas elétricas em um volume muito menor, com isso eles substituem as baterias, eles podem funcionar como geradores de grande porte, compor veículos elétricos, no emprego de sistemas de alta potência, ou até mesmo em sistemas industriais. Porém, um fator que devemos nos atentar ao trabalhar com esse tipo de componente é a presença de polaridade, que torna um pouco complicado sua utilização. Ao longo dos anos esses capacitores tiveram diferentes constituintes como o carbono em 1957, o oxido de rutênio com altos valores de capacitância, e o alumínio com melhor custo (MEHL, 2000).

Os capacitores que utilizamos hoje, são normalmente formados por duas placas condutoras separadas por um isolante (ou dielétrico), eles podem ser associados em série ou em paralelo, quando isso ocorre eles são chamados de banco de capacitores, eles são projetados para armazenar e modelar o fluxo de energia elétrica. Uma unidade de

capacitor, é um elemento passivo projetado para armazenar energia em seu campo elétrico, juntamente com os resistores os capacitores são os componentes mais comuns no estudo de circuitos elétricos, sendo largamente utilizados na eletrônica, comunicação, sistemas de potência como os industriais, além da sua utilização em sistemas computadorizados (SADIKU, 2013).

1.2 MOTIVAÇÃO

Ao analisar a viabilidade da instalação de um banco de capacitores, um dos critérios utilizados é a alteração do valor do Fator de Potência (FP), que é a relação entre Potência Ativa (P) e Potência Reativa (Q), ou seja, a energia que pode ser convertida em trabalho e a energia para manter os campos magnéticos das máquinas em condição de operação. Esse fator é adimensional e deve se adequar a, resolução normativa nº 1000 de 7/12/2021, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por padronizar todo o consumo de energia elétrica, nela está definido que o FP deve ter no mínimo 0,92. Ademais uma instalação com FP, menor que o estimado pela norma sofrerá aplicação de multa, tornando o processo produtivo cada vez mais caro e menos eficiente ao analisá-lo economicamente, justificando com isto a instalação de bancos de capacitores em plantas elétricas industriais.

No sistema industrial existe dois tipos de energia reativa: a Potência Reativa (Q) indutiva que é consumida por aparelhos que possuem bobinas, tais como motores de indução, reatores e transformadores ou máquinas que operam com formação de arco elétrico como os fornos a arco. Já a segunda forma de Q é a capacitiva que geralmente é gerada por bancos de capacitores ou motores síncronos superexcitados (MAMEDE, 2017). Logo para acionar um motor, por exemplo, que está muito presente no cenário industrial é necessário fornecer Q indutiva, porém, tal energia ocupa espaço nos condutores o que acaba gerando sobrecarga no mesmo, para solucionar este problema basta que façamos uma compensação de reativos com a instalação de um banco de capacitor nas proximidades da carga, ele será responsável por fornecer Q capacitiva a carga, ajudando no balanceamento de reativos e permitindo uma passagem quantitativa maior de energia ativa no condutor, acarretando um sistema elétrico mais eficiente.

Para o bom funcionamento de qualquer máquina elétrica é essencial fornecer tensão a níveis adequados, para permitir a atuação da mesma sem que haja falhas, oscilações ou até mesmo defeitos, sendo assim, os bancos de capacitores exercem a importante função de regular a tensão em sistemas elétricos, reduzindo as variações e quedas de tensão, assegurando uma oferta de energia mais estável e confiável para equipamentos e processos industriais, isso ocorre ao realizar a regulação de tensão elétrica proporcionada pelo controle da Q. É importante que a Q indutiva e capacitiva estejam balanceadas no Sistema Elétrico de Potência (SEP), porque o excesso de Q indutiva resulta em subtensão,

enquanto o excesso Q capacitiva provoca sobretensão no SEP (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002).

Ao analisar o contexto geral da instalação dos bancos de capacitores, chegamos a um cenário de redução de perdas de energia no SEP, porque ao corrigir o FP e compensar Q, colhemos como resultado um maior fluxo de potência ativa que é responsável por gerar trabalho e consequentemente riqueza, logo na indústria para um mesmo valor monetário pago na conta de energia, logo existirá maior ganho e com isso mais eficiência energética.

1.3 OBJETIVOS

O propósito central deste documento é a implementação de um banco de capacitor em uma planta industrial fictícia definida e posteriormente uma análise detalhada de seu efeito no SEP. O objetivo principal deste trabalho é modelar o sistema industrial no Pandapower que é uma ferramenta de análise de sistemas de energia baseada em Python e licenciada por BSD, que vai possibilitar alcançar conclusões acerca de resultados da instalação do banco de capacitor, principalmente na tensão e corrente da indústria.

Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos foram estabelecidos:

- Modelar um sistema industrial de pequeno porte utilizando o Pandapower;
- Inserir um banco de capacitores para fazer analises com utilização do fluxo de potência;
- Analisar o comportamento da tensão, ou seja, se ocorreu sobretensão ou subtensão;
- Analisar se a corrente elétrica está respeitando os níveis adequados de projeto;
- Realizar comparações entre os cenários propostos.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esse documento está dividido em 5 capítulos. O primeiro contém uma introdução ao tema abordado, nele também é realizado uma contextualização, é apresentado as motivações, ademais é explanado os objetivos pretendidos com o presente estudo.

No capítulo 2, é apresentado as principais referências bibliográficas utilizadas, permitindo a contextualização dos bancos de capacitores em sistemas industriais, além disso, é apresentado uma revisão de conceitos fundamentais dos capacitores, levando em consideração livros e estudos escritos por importantes autores da área, neste capítulo existe uma seção dedicada ao estado da arte do tema.

No capítulo 3, será apresentado o Pandapower que é a ferramenta destinada aos cálculos.

No capítulo 4, será apresentado as simulações realizadas tomando como base a planta elétrica industrial previamente determinada neste mesmo capítulo. Ademais será apresentado os resultados obtidos utilizando o Pandapower, existirá uma parte destinada à comparação dos resultados colhidos que serão originados nos cenários simulados.

No capítulo 5, são expostas às conclusões obtidas neste estudo, acompanhadas de possíveis sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão introduzidos conceitos que desempenham um papel fundamental na compreensão abrangente do presente trabalho. Tais conceitos são referentes aos capacitores e aos bancos de capacitores, que servirão como fundamentação teórica essencial para a análise e discussão dos temas abordados no cenário industrial, possibilitando uma visão mais profunda e fundamentada das questões exploradas neste trabalho.

2.1 CAPACITORES

Os capacitores são elementos capazes de acumular eletricidade e são construídos por duas placas condutoras em paralelo, denominadas de eletrodos e separados por meio de um isolante que é denominado dielétrico, que pode ser até mesmo o ar. Para suas placas é fornecida tensão, que gera um campo eletrostático no espaço preenchido pelas placas(MAMEDE, 2017).

2.1.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS CAPACITORES

Ao analisar um certo período de tempo, tem-se que a energia que um capacitor pode descarregar é a mesma que está armazenada entre suas placas e essa carga é denominada Coulomb. Ao tomar o período de tempo igual a 1 s, com um corrente igual a 1 A, é sabido que 6,25x10^{18} elétrons são transportados de uma placa até a outra. Ao respeitar essa corrente elétrica e o tempo estabelecido, a descarga desse capacitor é de 1 Coulomb (MAMEDE, 2017).

Conforme a Equação 2.1, é possível observar que a densidade de carga D, é uma certa quantidade de carga Q que é transportada de uma placa até a outra de área S.

$$D = \frac{Q}{S}(C/m^2) \tag{2.1}$$

onde,

D - é a densidade de carga, medida em C/m^2;

Q - é a quantidade de carga elétrica (A . s), medida em C;

S - é a área, medida em m^2;

Ao aplicar uma tensão nos eletrodos do capacitor, que estão separados por uma distância D, tem-se a intensidade do campo elétrico demostrado na Equação 2.2.

$$E = \frac{V}{D}(V/m) \tag{2.2}$$

onde,

E - é a intensidade de campo elétrico, medido em V/m;

V - é a tensão aplicada nas placas do capacitor, medida em V;

D - é a distância entre as placas, medida em m;

2.1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CAPACITORES

Ao avaliar um capacitor é comum utilizar a capacidade que é a quantidade de carga elétrica que ele pode armazenar em seu campo, ela depende da tensão aplicada nas placas do capacitor e de Q, que é a quantidade de carga transportada entre os eletrodos, como é mostrado na Equação 2.3.

$$\mathrm{Q} = \mathrm{C} \ . \ \mathrm{V} \ (Coulombs) \tag{2.3}$$

onde,

C - é a capacidade de um Capacitor, que é medida em F;

Ao analisar um componente do SEP, o conceito de energia é sempre analisado. Logo ao submeter o capacitor a uma tensão em seus terminais, passa a circular uma corrente de carga, fazendo com que determinada quantidade de energia se acumule no seu campo elétrico, essa energia respeita a formulação matemática da equação 2.4, a tensão é utilizada com seu valor de pico, além de estudar apenas 1/4 de ciclo (MAMEDE, 2017).

$$E = \frac{1}{2} \ . \ C \ . \ {V_m}^2 (J) \tag{2.4}$$

onde,

V_m é a tensão aplicada no seu valor de pico, medida em V;

A corrente que flui através de um capacitor varia conforme a tensão aplicada nos eletrodos. Ao aumentar a tensão, a carga armazenada também aumenta, resultando em uma elevação proporcional na corrente, como pode ser observado na equação 2.5, que é dependente das variações de tensão e de tempo.

$$I = C \ . \ \frac{\Delta V}{\Delta t} (A) \tag{2.5}$$

onde,

ΔV é a variação de tensão em V;

Δt é a variação de tempo, no período que existiu a variação de tensão;

Quando um capacitor é energizado por uma fonte de corrente contínua, estando inicialmente descarregado, a corrente de carregamento é muito alta, neste caso o capacitor atua como um curto-circuito, onde a corrente é apenas limitada pela impedância do circuito de alimentação. Com o passar do tempo, a corrente diminui até atingir o zero (MAMEDE, 2017).

$$\mathrm{I}_c = I \ . \ e^{-t/C_t} \ (\mathrm{A}) \tag{2.6}$$

onde,

I é a corrente no instante inicial, que ocorre a energização do capacitor, medida em A;

C_t é a constante de tempo, medida em s;

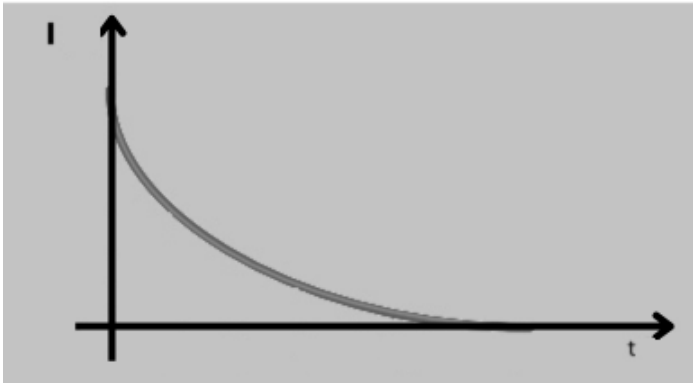
t é o tempo em qualquer instante;

I_c é a corrente presente no capacitor em qualquer instante t;

A partir da Equação 2.6, podemos definir os dois instantes citados abaixo, além disso, eles podem ser observados na Figura 2:

- $t = 0$, no instante de energização do capacitor, temos que a corrente presente é máxima.
  $I_c = I\mathrm{x}e^{-0/C_t} = I_c = I\mathrm{x}1 = I$;
- $t >> C_t$, não flui mais corrente pelo capacitor, logo, ele está a plena carga.
  $I_c = I\mathrm{x}e^{\infty} = 0$;

Figura 1 – Curva: corrente(A) x tempo(s).



Fonte: Elaboração Própria.

Em complemento do estudo da corrente no capacitor o comportamento da tensão está fixado na Equação 2.7.

(2.7)

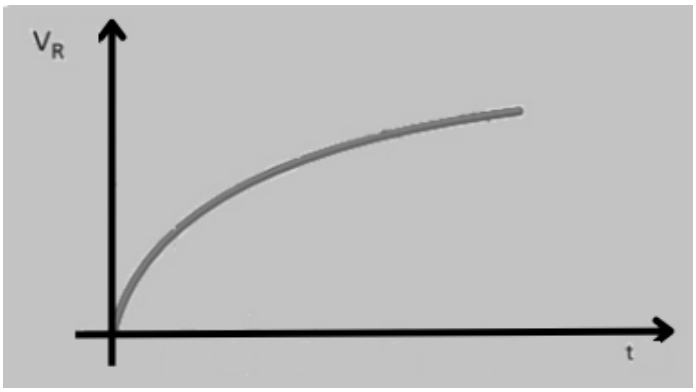
onde,

V é a tensão do capacitor a plena carga, medida em V;

V_c é a tensão no capacitor para qualquer instante t, medida em s;

- $t = 0$,
  $V_c = V \ . \ (1 - e^{0/C_t}) = V \ . \ (1 - 1) = 0$;
- $t >> C_t$,
  $V_c = V \ . \ (1 - e^{\infty/C_t}) = V$;

Figura 2 – Curva: tensão(V) x tempo(s).



Fonte: Elaboração Própria.

Como a maioria dos componentes elétricos, existem duas formas de associação: em série ou em paralelo.

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_n} (F) \tag{2.8}$$

Baseando-se na Equação 2.8, que representa uma associação em série, e afirmar que a capacidade equivalente de um circuito com vários capacitores é menor que a capacidade do capacitor de menor valor presente na associação.

$$\mathrm{C}_e = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n \ (\mathrm{F}) \tag{2.9}$$

A partir da Equação 2.9, que é referente a uma associação em paralelo, é possível observar que a capacitância equivalente de um circuito com vários capacitores é igual à soma das capacitâncias individuais de cada capacitor.

2.1.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS CAPACITORES

Ao trabalhar em um cenário industrial, os capacitores são comumente encontrados, para cada instalação existe um capacitor específico distinto, e para especificá-lo é utilizado a potência nominal reativa que é medida por Volt Ampere Reativo (var), porém, antes de defini-la é importante citar alguns conceitos que serão utilizados na formulação matemática da potência.

- Frequência nominal: denotada por Fn, normalmente ela é igual a 60 Hz;
- Tensão nominal: denotada por Vn, o capacitor é tipicamente produzido com a tensão nominal do sistema entre fases ou entre fase e neutro, variando apenas quando são para unidades trifásicas ou monofásicas, sua unidade é V;

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ela é a energia absorvida pelo sistema quando ele está sujeito a uma tensão e a Frequência Nominal (Fn), em uma temperatura ambiente que não ultrapasse 20 ºC, como é mostrado na Equação 2.10 (MAMEDE, 2017).

$$P_c = \frac{2 \,.\, \pi \,.\, F_n \,.\, Vn^2 \,.\, C}{1000} \tag{2.10}$$

2.2 APLICAÇÃO DO CAPACITOR NAS INDÚSTRIAS

Em instalações industriais, os bancos de capacitores são normalmente empregados para corrigir o fator de potência, que muitas vezes ultrapassam os limites estabelecidos pela legislação. Além disso, outra utilização dos bancos de capacitores são nos sistemas de distribuição das concessionárias e nas subestações de potência para reduzir as perdas e aumentar a tensão do sistema.

Ao analisar a instalação de um capacitor em uma planta industrial, normalmente é escolhido a instalação próximo às cargas consumidoras, porém, dependendo das características da indústria, existem vantagens econômicas e práticas do alojamento desse elemento em outra localização.

- No sistema primário: o banco de capacitores deverá estar localizado após a medição respeitando o sentido que vai da fonte até a carga, tem como principal vantagem a

economia ao comparar com a instalação do banco de capacitores em sistemas secundários, porém, não permite a liberação de carga do transformador ou dos circuitos secundários da instalação consumidora, logo sua utilização é majoritariamente para correção do FP;

- No secundário do transformador de potência: normalmente está localizado no barramento do Quadro Geral de Força (QGF), e sua instalação nesse ponto reduz o custo final de instalação, além disso, tem a vantagem de liberar potência dos transformadores;

- Nos terminais de conexão de cargas especificas: normalmente é instalado quando uma carga especifica apresenta baixo FP.

2.2.1 GANHOS DAS APLICAÇÕES ESPECÍFICAS DO CAPACITOR

Abaixo é factível observar os principais efeitos da instalação de um banco de capacitores nas instalações, e como sua instauração afeta de maneira direta as características elétricas das plantas industriais, justificando sua instalação e provocando na rede algumas melhorias, tais como:

- Liberação da potência instalada em transformação: em vez de investir elevados valores para aumentar a potência da subestação, é possível instalar um banco de capacitores. Isso ajudaria a reduzir a potência reativa fornecida pela subestação, aliviando a carga dos transformadores correspondentes, porque a instalação do banco de capacitores em tensão inferior libera potência em kVA das unidades transformadoras;

- Liberação de capacidade de carga de circuitos terminais e de distribuição: num Centro de Controle de Motores (CCM), a seção do condutor do circuito de distribuição que conecta o QGF ao CCM, pode ser menor que a necessária para a carga, necessitando adequar a seção nominal do condutor, que estão mal dimensionados, seja por erro de projeto, ou até mesmo aumento de carga, logo a introdução de capacitores no barramento do CCM pode "liberar espaço" para circulação da potência desejada (MAMEDE, 2017);

- Redução de perdas: a alocação de capacitores é uma técnica que visa identificar a quantidade, localização e tipo dos bancos de capacitores que serão alocados no sistema com o intuito de minimizar as perdas, levando em consideração custos de implantação e operação. Para isso, alguns métodos computacionais são utilizados para definir a melhor configuração dos bancos de capacitores, o objetivo é a atenuação das perdas técnicas do sistema de distribuição (GONZÁLEZ, 2003);

- Melhoria do nível de tensão: a adição de capacitores na planta, resulta no aumento do nível de tensão devido à diminuição da corrente de carga e à redução efetiva

da queda de tensão nos circuitos terminais e nos de distribuição, porém, não é economicamente viável instalar os bancos de capacitores para elevar a tensão, pois, quê apenas a regulação do tap de um transformador já é o bastante, por conta disso a melhoria do nível de tensão deve ser encarada como uma consequência natural não como objetivo primário;

2.3 EXEMPLOS DE ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES NOS TERMINAIS DE CARGAS ESPECÍFICAS

Como o presente trabalho será realizado com a instalação dos bancos de capacitores em cargas especificas em uma planta industrial definida, será elencado nessa seção algumas das cargas mais utilizadas no cenário industrial brasileiro a fim de fornecer embasamento teórico para resolver questões cotidianas que envolvem esse tema.

2.3.1 MOTORES ELÉTRICOS

Quando uma carga como um motor, tem um FP baixo, é necessário instalar nos terminais de alimentação dessa carga um banco de capacitores para realizar a correção. Uma máquina muito presente são os motores de indução, que são um tipo de motor elétrico, ele é uma máquina equipada apenas com um conjunto contínuo de enrolamentos amortecedores, denominado assim, porque a tensão induzida nos enrolamentos do rotor é responsável pela geração da corrente e campo magnético no rotor, ao invés de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios (CHAPMAN, 2013).

Em plantas elétricas industriais é comum utilizarmos esse tipo de motor, porém, a potência do banco de capacitores deve ser limitada à 90% da potência absorvida pela operação a vazio do motor. Essa potência pode ser determinada com base na corrente em vazio, que normalmente está entre 20% até 30% da corrente nominal para motores de quatro polos e velocidade síncrona de 1.800 rpm (MAMEDE, 2017).

Dependendo do tipo de acionamento na indústria o motor deve seguir algumas recomendações:

- Motores acionados diretamente da rede e motores acionados por meio de chaves estrela-triângulo: nesses tipos de motores o capacitor deve ser conectado no circuito do motor entre o contator de manobra e o relé térmico de proteção;
- Motores acionados por meio de chave compensadora: o capacitor deve ser conectado entre o contato principal e o relé térmico, ele é ativado através de um contato específico dedicado a sua operação, independente dos contatos de ativação que compõem a chave compensadora, porém, o contator de manobra do capacitor deve ser acionado ao mesmo tempo, do contator principal da chave;

- Motores acionados por meio de chave softstarter: eles utilizam um contator de manobra independente e uma softstarter que possua um contato de by-pass, que ajuda, no tratamento do conteúdo harmônico de 3º e 5º ordem, que são injetados pela softstarter e podem causar danos ao banco de capacitores;
- Motores acionados por meio de inversores de frequência: os inversores de frequência injetam grande conteúdo harmônico capaz de danificar a rede, logo para realizar a correção do FP é necessário calcular a sobretensão da ligação;

2.3.2 MÁQUINAS DE SOLDA A TRANSFORMADOR E COM TRANSFORMADOR RETIFICADOR

As máquinas de solda a transformador, tipicamente caracterizadas por um baixo fator de potência quando compensadas individualmente, devem aderir à seguinte recomendação, que determina a potência máxima do C, sendo:

$$P_c = 0{,}5 \; . \; P_{tm} \tag{2.11}$$

onde,

P_{tm} potência nominal do transformador da máquina de solda, medida em kVA;

Agora para as máquinas com transformador retificador, temos:

$$P_c = 0{,}10 \; . \; P_{tm} \tag{2.12}$$

2.4 ESTADO DA ARTE

Nesta seção, abordaremos algumas aplicações sobre os temas do seguinte trabalho a fim de enfatizar a importância do presente estudo no SEP em termos gerais, ou seja, nela está presente algumas aplicações dos bancos de capacitores não só em instalações elétricas industriais mais sim no contexto geral das prerrogativas acerca dos capacitores.

Um estudo de 2020, presente no IEEE, cujo nome "Ótima localização e dimensionamento de bancos de capacitores utilizando compensação VOLT VAR em microrredes" se baseia no método (PSO) que utiliza a otimização por enxame de partículas, foi implementado buscando a determinação de forma ótima da localização e dimensionamento de bancos de capacitores em uma microrredes de distribuição elétrica (GONZALO G E AGUILA, 2020).

Outro trabalho do mesmo ano, procura utilizar vários capacitores agrupados em série ou em paralelo para formar um banco que atende aos requisitos de capacitância e

tensão especificados, buscando um modelo para banco de capacitores híbridos que consiste em capacitor eletrolíticos e capacitor de filme, a fim de solucionar a dependência dos bancos de capacitores comerciais conhecidos popularmente como "elementos de prateleira", nele está presente um estudo de caso do projeto de banco de capacitores do link CC para um inversor. (WANG HAORAN E LI, 2020)

Nos últimos anos a questão dos serviços independentes de energia reativa, incluindo a colocação ótima de condensadores na rede devido à reestruturação da indústria elétrica e à criação de um mercado elétrico competitivo, tem recebido atenção de empresas relacionadas. Logo no artigo (SOMA, 2021) é proposto um algoritmo genético para planejamento ótimo de bancos de capacitores.

Temos também o trabalho (LEGHARI ZOHAIB HUSSAIN E KUMAR, 2022), que revisa as estratégias de otimização para a alocação simultânea ideal de geração distribuída (GD) e banco de capacitores shunt (SCBs) em redes de distribuição elétrica. Contém estratégias que buscam identificar o tamanho, a localização e a combinação ótima de GDs e SCBs para formar um sistema técnico e economicamente viável, que atenda às restrições e à demanda de energia da carga.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia proposta para o cálculo do fluxo de potência, cujo enfoque está na apresentação do Pandapower, que utiliza o fluxo de potência Pypower como base para desenvolver um programa de cálculo de rede intuitivo, projetado especificamente para automatizar análises e otimizações em sistemas de energia, por ser uma ferramenta acessível e gratuita, ela permite preencher algumas lacunas entre as ferramentas comerciais e as ferramentas de código aberto no SEP, exemplo disso é a carência de bibliotecas de modelos detalhadas no caso das de código aberto.

Publicado sob uma licença Berkeley Software Distribution (BSD), ele tem livre utilização, logo modificar e compartilhar se torna uma atividade fácil e acessível, por ser baseado em Python ele pode ser compilado até mesmo no Colab, que é um serviço do Jupyter Notebook hospedado que não requer configuração para uso e oferece acesso gratuito a recursos de computação, incluindo GPUs e TPUs, resultando em uma implementação facilitada.

3.1 FUNCIONAMENTO DO PANDAPOWER

Neste trabalho será solucionado o fluxo de potência em uma instalação elétrica industrial, logo com Pandapower possibilitará utilizar de maneira rápida e facilitada o método de Newton-Raphson otimizado com compilação just-in-time, aprimorando a robustez, tempo de execução e usabilidade, essas atualizações possibilitaram modelar cargas de Corrente Continua (CC), e solucionar cenários com muitos nós (THURNER LEON E SCHEIDLER, 2018).

Ele utiliza a biblioteca Python Pandas para definir redes, o que facilita a entrada e saída de parâmetros, sendo as redes do Pandapower fundamentada em elementos como: linhas, transformadores de dois e três enrolamentos. Com essa facilidade de acesso e a praticidade de implementação ele tem sido muito utilizado para fins educacionais, exemplo disso é sua utilização para cálculos automatizados de séries temporais (THURNER LEON E SCHEIDLER, 2018).

3.1.1 ESTRUTURAÇÃO DO PANDAPOWER

O Pandapower é uma ferramenta de cálculo de rede, baseada em uma ampla variedade de componentes elétricos, com foco em analisar de maneira estática os sistemas trifásicos de energia, exemplo desses sistemas são: sistemas de distribuição trifásicos comumente encontrados na Europa, além dos sistemas de transmissão e subtransmissão, que normalmente são operados de maneira simétrica.

Ao explorar a estrutura de dados que é tubular baseada na biblioteca Python Pandas, o que permiti-rá armazenar para cada componente elétrico, variáveis de qualquer

tipo, com isso existirá a possibilidade de guardar de maneira conjunta parâmetros elétricos, variáveis de estado e metadados, ademais esses dados são armazenados em forma de tabela para cada elemento, a parir dela a utilização de qualquer método panda para ler esses dados e analisar as redes será possível (THURNER LEON E SCHEIDLER, 2018).

O Pandapower vem com uma biblioteca integrada de tipos padrão de dados, facilitando a criação de linhas e transformadores utilizando parâmetros já definidos, porém é possível definir os próprios tipos, até mesmo aproveitar os dados já disponíveis nele, para criar novas redes (THURNER LEON E SCHEIDLER, 2018).

Suas funcionalidades abrangem a resolução de:

- Fluxo de energia;
- Fluxo de energia ideal, por meio da interface Pypower ou PowerModels.jl, com isso podemos calcular tanto em Corrente Alternada (CA), quanto em Corrente Continua (CC);
- Estimativa de estado, que é resolvida com um método de mínimos quadrados ponderados;
- Cálculo de curto-circuito conforme a norma IEC 60909, calculando correntes de falha para curto-circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos;
- Pesquisas de gráficos e topologias, com a utilização da biblioteca Python NetworkX;

Além do método de Newton-Raphson padrão, é possível utilizar os métodos do fluxo de potência de desacoplamento rápido e Gauss-Seidel através do Pypower, porém cargas ZIP e impedâncias assimétricas, só funcionem com os solucionadores Pandapower.

3.1.2 ESTRUTURAÇÃO BÁSICA DO CÓDIGO

Com o funcionamento da ferramenta sedimentada, será fácil iniciar a criação da rede, porém existe algumas etapas de instalação, importação e finalização que devem ser feitas antes e após modelar qualquer planta.

- Para iniciar a criação do código no ambiente, basta instalar o Pandapower através do pip.

```
pip install pandapower
```

- O próximo passo é importar o pacote Pandapower, e para facilitar a utilização renomeamos para pp.

```
import pandapower as pp
```

- Posteriormente é necessário importar a função estimate do módulo pandapower.estimation, ela é usada para realizar a estimativa do estado da rede elétrica. A estimativa de estados é basicamente o cálculo de condições elétricas da rede com base em dados observados ou medidos, exemplo disso são as tensões e os ângulos de fase.

```
from pandapower.estimation import estimate
```

- Além disso é essencial importar o módulo pyplot do pacote matplotlib, e por facilidade na sua utilização, basta renomeá-lo para plt. O matplotlib é uma biblioteca em Python usada para criar visualizações estáticas, como gráficos e plots.

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

- O último passo antes de criar a rede é, importar o pacote numpy e renomeá-lo para np. Essa biblioteca é amplamente utilizada para computação numérica, e para realização de operações matemáticas.

```
import numpy as np
```

- Após modelar toda a rede, basta utilizar a função que executa o fluxo de potência em uma rede elétrica.

```
pp.runpp(net)
```

- Por fim, após modelar a rede e executar o fluxo de potência, basta demonstrar os resultados das barras e linhas.

```
print(net.res_bus)
print(net.res_line)
```

3.1.3 CRIAÇÃO DA REDE

Agora basta iniciar a criação da rede com todas as instalações feitas, para isso será demostrado como criar alguns elementos elétricos e conexões, como: a própria rede elétrica, as barras, a conexão com a rede externa, as cargas, os transformadores, as linhas que conectam as barras, e o banco de capacitores.

- Inicialmente é importante criar a rede, para isso basta utilizar o seguinte comando:

```
pandapower.criar.create_empty_network(nome = 'net', ...
f_hz = 50,sn_mva=1,add_stdtypes=True)
```

As entradas: "f_hz" que é a frequência do sistema de energia em hertz, "nome" que é o nome da rede, "sn_mva" que é a potência aparente de referência para o sistema em por unidade (pu), e "add_stdtypes" que é uma absorção de padrões de rede são

opcionais nessa etapa. Logo no código utilizado nesse documento, será utilizado para criar a rede, o seguinte comando:

```
net = pp.create_empty_network()
```

- Outros elementos que serão muito utilizados no código, são as barras, e para introduzi-las basta utilizar o comando:

```
b1 = pp.create_bus(net, vn_kv=20,name="b1")
```

As entradas: "net" é a rede que a barra será criada, "vn_Kv" é a tensão base de cada barra, "nome" é o nome de cada barra.

- A linha de código abaixo, cria uma conexão da rede externa no barramento, nesse exemplo a magnitude de tensão é de 1,05 pu, significando 105% da tensão nominal.

```
pp.create_ext_grid(net, b1, vm_pu=1.05, ...
name="Grid connection")
```

As entradas: "net" é a rede à qual deseja-se adicionar a conexão da rede externa, já "b1" representa o barramento que a conexão com a rede externa será adicionada, "vm_pu" é a magnitude da tensão da rede externa em pu, enquanto "name" é um parâmetro para dar um nome à conexão da rede externa, nesse exemplo damos o nome de "Grid connection".

- Para criar a rede basta definir cargas que estarão conectadas a cada um dos barramentos, para isso basta utilizar a seguinte linha de código:

```
pp.create_load(net, b4, p_mw=0.0500, ...
q_mvar=0.0300,name="C1")
```

As entradas: "net" é a rede à qual deseja-se adicionar a conexão da carga, já "b4" representa o barramento que a carga será adicionada, "p_mw" é a potência ativa da carga fornecida em pu, "q_mvar" é a potência reativa da carga fornecida em pu, enquanto "name" é um parâmetro para dar um nome à carga.

- Agora para criar um transformador na simulação, basta utilizar a seguinte linha:

```
tid = pp.create_transformer(net, hv_bus=b1, ...
lv_bus=b2,std_type="0.4 MVA 20/0.4 kV",name="trafo")
```

As entradas: "net" representa a rede de energia, "hv_bus" especifica o barramento (b1) de alta tensão, "lv_bus" especifica o barramento (b2) de baixa tensão, que são conectados pelo transformador. Ademais, "std_type" é um parâmetro que especifica o tipo padrão do transformador, que neste exemplo é “0,4 MVA e 20/0,4 kV”, indicando um transformador de potência nominal de 0,4 MVA e relação de 20 kV no

lado de alta tensão para 0,4 kV no lado de baixa tensão, enquanto "name" é o nome atribuído ao transformador.

- Outro componente muito importante para projetar a planta industrial, são as linhas utilizadas para interligar as barras na topologia do circuito, que podem ser inseridas pela seguinte linha de código:

```
pp.create_line(net, from_bus=b2, to_bus=b3, ...
length_km=0.01, name="line1",std_type="NAYY 4x50 SE")
```

  As entradas: "net" representa a rede de energia, "from_bus" é a barra que a linha começa, "to_bus" é a barra que a linha termina, "length_km" é o comprimento da linha fornecida em quilômetros, "name" é o nome criado para a linha, "std_type" é o tipo padrão da linha que normalmente define suas propriedades elétricas.

- Agora para inserir um banco de capacitores basta inserir:

```
pp.create_shunt(net, b3, q_mvar=-0.04)
```

  As entradas: "net" representa a rede de energia que o banco de capacitores será criado, "b3" é a barra que o banco de capacitores ou reator serão inseridos para compensação de potência reativa capacitiva, "q_mvar" é o parâmetros que quantifica a injeção de energia reativa de -0,04 MVAR, indicando que é um elemento shunt capacitivo.

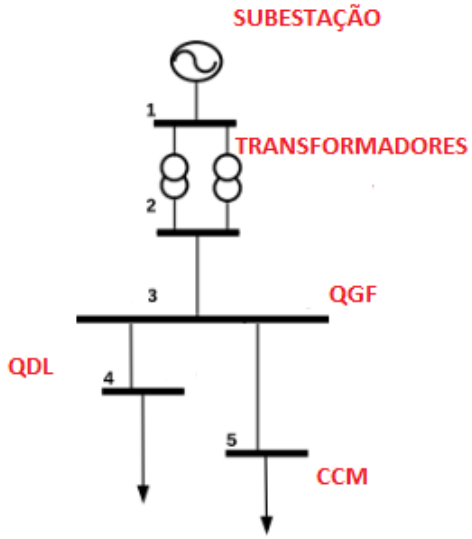
4 PLANTA INDUSTRIAL E RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a planta industrial, a partir dela será baseada toda análise e desenvolvimento das linhas de código do Pandapower, logo a estruturação da rede elétrica será feita para retornar de maneira correta e fiel os resultados do sistema real que a planta representa.

4.1 DEFINIÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL

Na Figura 5, está representada a planta industrial utilizada nos testes computacionais. A topologia da indústria fictícia é composta basicamente por cinco barras, um gerador, dois transformadores abaixadores de tensão, três linhas que interligam as barras e duas cargas.

Figura 3 – Planta Industrial do 1º cenário.



Fonte: Elaboração Própria.

É importante salientar que a criação da rede foi feita seguindo alguns critérios e valores pré estabelecidos, sendo que os principais serão expostos para facilitar a compreensão.

O primeiro fato é que o gerador é de 20 kV, ele está conectado na barra 1, além disso, temos que os transformadores são abaixadores de tensão de 20 kV para 440 V com potência de 0.4 MVA e estão localizados entre as barras 1 e 2 da rede. Como argumento nas linhas de código do algorítimo para este elemento basta utilizar transformadores do tipo: "0.4 MVA 20/0.4 kV" que são definidos em sua estrutura de dados como transformadores defasadores com ângulo de defasagem de 150º, esse transformador tem as características adequadas em sua construção para indústria em questão. Ademais foi instalado um par de

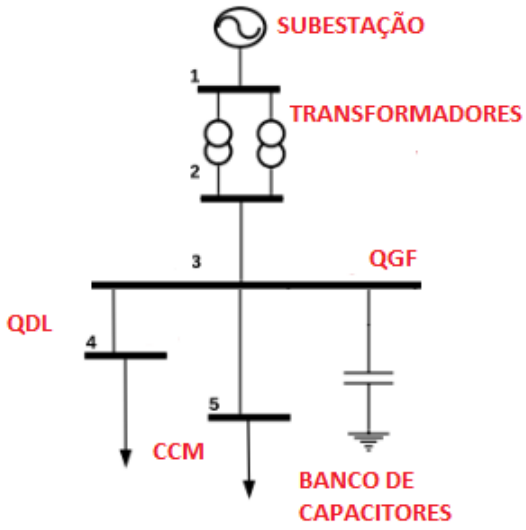
transformadores para que o sistema apresente um maior grau de confiabilidade para caso ocorra contingência, isto é, para que ele opere no aumento dos níveis de confiabilidade dificultando a ocorrência de falhas.

Outro fato importante para uma boa modelagem do sistema é a distância entre as barras, ela é utilizada como argumento na criação das várias linhas que interligam as barras. Neste exemplo de planta industrial, foi utilizado as seguintes distâncias: entre a subestação e a barra 3 que é o Quadro Geral de Força (QGF), existe comprimento de 10 metros, outra distância é entre o QGF e a barra 4 que é o Quadro de Distribuição de Luz (QDL), essa extensão é de 50 metros, e a distância do QGF até a barra 5 que é Centro de Controle de Motores (CCM) é de 90 metros, sendo que temos que fornecer os comprimentos em quilômetros no Pandapower. Essas informações são importantes para determinar cada linha que interliga as barras, que estão presentes na topologia do diagrama que reproduz a indústria.

Outro elemento que requer atenção são os cabos, para esse estudo eles apresentam resistência de 0.208 Ohms/km, reatância de 0.08 Ohms/km. Além disso, para possibilitar uma análise adequada dos cenários ele deve suportar uma corrente de até 270 A, sendo que para atender essas especificações propostas nesse estudo, foi utilizado o cabo "NAYY 4x150 SE" cujos parâmetros auxiliam em uma boa modelagem das linhas, pois, esse cabo apresenta valores de corrente que suporta a maior corrente presente no projeto.

Outros componentes presentes no SEP são as barras, elas são elementos que necessitam de poucos detalhes para serem criadas corretamente, sendo os valores de tensão o único que requer atenção para criação do elemento. Após criar todas as barras, basta introduzir as cargas para modelar a rede, sendo que nesse exemplo de planta industrial elas são o CCM e o QDL. Para simular as plantas industriais dos 2 cenários corretamente, é necessário fornecer os valores de potência ativa e reativa separadamente, para cada uma das cargas. Para essa rede fictícia, foi adotado que: o QDL representado pela carga 1 conectada na barra 4, tem 300 kW e 100 kvar, já o CCM representado pela carga 2 conectada na barra 5, tem 1000 kW e 400 kvar, esses valores foram utilizados para facilitar a compreensão dos resultados das simulações de cada cenário.

Figura 4 – Planta Industrial do 2º e 3º cenários.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 6, contém a representação do mesmo sistema industrial, porém, nesse caso existe a instalação de um elemento shunt no QGF, isto é, a instalação de um banco de capacitores, responsável pela compensação de potência reativa capacitiva. Ao realizar a instalação do banco de capacitores será possível explorar os valores de tensão, verificar se existe a ocorrência de sobretensão ou subtensão, analisar o nível de carregamento da corrente elétrica nas linhas, dessa maneira para cada cenário será possível explorar alterações nos valores, o que possibilitará uma análise da influência dos capacitores em cada barra e linha do SEP fictício proposto.

4.2 PRIMEIRO CENÁRIO

O primeiro cenário é baseado na Figura 5, ele respeita todos os critérios e valores estabelecidos anteriormente, enfatizando que neste primeiro caso não existe elemento shunt, ou seja, não há banco de capacitores fazendo a compensação de reativos na planta industrial, logo esta simulação é feita para representar originalmente a indústria em questão.

4.2.1 SIMULAÇÕES DO PRIMEIRO CENÁRIO

Na Tabela 1 está fixado os valores de tensão, potência ativa e reativa, e as aberturas angulares, que foram obtidos com a simulação do 1º cenário que não contempla o elemento shunt.

Tabela 1 – Resultados do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores).

Barra	**|V| (pu)**	$\theta(^o)$	**P (MW)**	**Q (Mvar)**
1	**1,0000**	**0,0000**	**-0,134796**	**-0,052166**
2	**0,9938**	**-150,5069**	**0,0000**	**0,0000**
3	**0,9919**	**-150,5069**	**0,0000**	**0,0000**
4	**0,9896**	**-150,5128**	**0,0300**	**0,0100**
5	**0,9781**	**-150,4963**	**0,1000**	**0,0400**

Na Tabela 1, está fixado os valores colhidos na simulação sem a utilização de capacitores, responsáveis pela compensação de potência reativa, ao observa-la detalhadamente, existe tensão de 1 pu na barra 1 como foi fixado no algoritmo, ademais existe afundamento de tensão nas barras seguintes. Essa subtensão ocorre devido à resistência presente nas barras e linhas, que ocasiona perdas por aquecimento, sendo assim quanto mais distantes está o ponto de análise em comparação com o gerador, maiores serão as quedas de tensão que o sistema elétrico estará sujeito.

Ao analisar as barras 4 e 5 fixadas na Tabela 1, existem diferenças nos valores de tensão fixados na 2º coluna, sendo que ambas estão conectadas na barra 3 que neste caso é o QGF. Essa diferença nos valores de tensão ocorre de maneira proporcional a distância que elas estão da barra em comum, para a barra mais distante existe quedas de tensão mais acentuadas que pode ser observada no CCM que está a 90 metros do QGF, enquanto a barra 4 tem sua subtensão menos acentuada, devido à distância para o QGF ser de apenas 50 metros, outro fato é que as barras 2 e 3 apresentam baixa diferença de tensão, isto ocorre porque o comprimento dos fios entre as barras são de apenas 10 metros.

É importante realizar o controle de tensão para amenizar os efeitos negativos sobre o sistema, pois, que ela pode ocasionar o mau funcionamento dos aparelhos, além de proporcionar consumo excessivo de energia elétrica, ademais outro reflexo pode ser a redução na vida útil e o aumento nos custos de manutenção, isto ocorre simplesmente

pela tensão estar abaixo do valor nominal. Outra característica do fluxo de potência observado na coluna 2 são as aberturas angulares do sistema, que devem ser pequenas como é mostrado na literatura.

Outro fator que pode ser observado ao analisar a Tabela 1, é o somatório de potência ativa e reativa fixados nas duas últimas colunas da matriz, para realizar uma análise adequada acerca do fluxo de potência, é correto que a potência gerada na barra 1 seja igual à potência consumida pelo CCM e pelo QGF, nesse caso isso acontece com pequenas alterações nas casas decimais, esse fato é justificado pela perda de potência nos fios que é uma característica dos sistemas reais.

Tabela 2 – Correntes nas linhas do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores).

Linha	**Corrente (A)**
2-3	**204,998**
3-4	**46,120**
3-5	**158,940**

A partir da Tabela 2, que fornece os valores das correntes nas linhas do SEP, é possível analisar os valores das correntes máximas que fluem por cada uma das linhas que interligam as barras, observa-se que todas elas respeitam os valores máximos do condutor "NAYY 4x150 SE" utilizado na construção da rede, que é de 270 A. Ao utilizar o recurso da análise nodal, é sabido que a corrente que passa pela linha 2-3, deve ser igual à soma das correntes que passa pelas linhas 3-4 e 3-5.

Tabela 3 – Carregamento das Linhas do 1º cenário (Sem Banco de Capacitores).

Linha	**Carregamento (%)**
2-3	**75,92**
3-4	**17,08**
3-5	**58,86**

Na Tabela 3 está presente o carregamento percentual da corrente, para o cenário que não contempla a utilização do banco de capacitores, os valores colhidos demostram que os condutores estão em um intervalo de valores adequado, ao comparar com a capacidade máxima do condutor que é de 270 A, logo o condutor foi bem dimensionado, porque ele atende as cargas sem que existam correntes com módulo maior ao suportado.

$$Cos\ \theta = \frac{P}{S} = \frac{0{,}134796}{0{,}1445566338} = 0{,}93248\ Indutivo \tag{4.1}$$

Na Equação 4.1, está fixado o cálculo do FP sem a utilização do elemento shunt, ele retorna um valor de 0,93248 Indutivo, sendo que na literatura é defendido que os valores ótimos são os mais próximos de 1, isso significa que toda a energia elétrica está sendo convertida em trabalho útil. Por outro lado, valores menores que 1 para o fator de potência, indica que parte da energia não está gerando riqueza, isto é, está sendo desperdiçada em forma de potência reativa. Portanto, para valores abaixo do valor unitário, significa que existem perdas no sistema, sendo que elas poderiam ser convertidas em trabalho. Outras perdas envolvem o pagamento de multas para as concessionarias, devido ao excesso de Q que não gera riqueza, ou seja, se o valor de Q ultrapassar um limite mínimo aceitável, o valor do FP será cada vez menor o que resultara no pagamento de multas realizado pelas empresas, sendo que cada região apresenta um valor mínimo para o FP.

4.3 SEGUNDO CENÁRIO

Com os valores do primeiro cenário já simulados basta instalar um banco de capacitores para realizar a compensação de reativos, ou seja, a partir dos valores do sistema real é possível simular o comportamento da planta industrial com a presença do elemento shunt. Para o segundo cenário será instalado um banco de capacitores com q = - 520 kvar, que será introduzido na barra 3 (QGF) do sistema.

4.3.1 SIMULAÇÕES DO SEGUNDO CENÁRIO

Na Tabela 4, está fixado os valores obtidos na simulação para o 2º cenário, com a inserção do elemento shunt com q = - 520 kvar.

Tabela 4 – Resultados do 2º cenário (q = -520 Kvar).

Barra	**|V| (pu)**	$\theta(^o)$	**P (MW)**	**Q (Mvar)**
1	**1,0000**	**0,0000**	**-0,13471**	**-0,000369**
2	**0,9976**	**-150,5576**	**0,0000**	**0,0000**
3	**0,9959**	**-150,5963**	**0,0000**	**-0,0516**
4	**0,9937**	**-150,6021**	**0,0300**	**0,0100**
5	**0,9822**	**-150,5857**	**0,1000**	**0,0400**

Na Tabela 4, estão fixados os resultados da simulação do 2º cenário, a partir deles é explicito que a introdução do banco de capacitores na barra 3 da indústria, resultou em uma diminuição considerável nas quedas de tensão do SEP estudado, sendo que nas barras 2, 3, 4 e 5 a queda de tensão existiu com valores menores aos do 1º cenário, logo ao introduzir o elemento shunt no sistema os problemas que envolvem subtensão foram amenizados consideravelmente, justificando sua implementação para estabilização dos níveis de tensão do sistema em questão.

Tabela 5 – Correntes nas linhas do 2º cenário (q = -520 Kvar).

Linha	**Corrente (A)**
2-3	**190,545**
3-4	**45,932**
3-5	**158,275**

A Tabela 5 permite raciocinar acerca da influência positiva do banco de capacitores nos níveis de corrente, sendo que sua inserção permite verificar que na linha 2-3 passa toda a corrente que flui para as linhas 3-4 e 3-5, esse fato é embasado pela primeira Lei de Kirchhoff que é chamada de lei dos Nós. Com auxílio das Tabelas 3 e 5 obtemos um valor percentual do carregamento da corrente na linha que é de aproximadamente 5% de melhora, isto é cerca de 10 A, o que resulta em uma melhora significativa na eficiência da linha, devido a menores perdas por aquecimento.

Tabela 6 – Carregamento das Linhas do 2º cenário (q = -520 Kvar).

Linha	**Carregamento (%)**
2-3	**70,57**
3-4	**17,01**
3-5	**58,62**

Na Tabela 6, é demonstrado que o carregamento de cada uma das linhas diminuiu consideravelmente, de mais a mais houve redução de carregamento da linha 2-3 em 5%, ou seja, a potência que posteriormente vai para o CCM e o QDL foi reduzido consideravelmente, isto representa uma diminuição significativa de potência reativa que passa por esse trecho da rede, e posteriormente é encaminhada para as cargas, portanto, com a instalação do

elemento shunt ocorre liberação de espaço para o fluxo de potência ativa, que é responsável pela geração de riqueza econômica para o sistema estudado.

$$Cos\ \theta = \frac{P}{S} = \frac{0{,}13471}{0{,}134710505} = 0{,}999996251 = 1 \tag{4.2}$$

A Equação 4.2, representa o FP com a instalação do elemento shunt de q = -520 Kvar, ocorre um aumento significativo do FP sendo que ele se torna praticamente unitário, com isso as perdas são amenizadas de maneira acentuada, ou seja, existe uma melhora na eficiência energética caracterizada por uma atenuação nas perdas provenientes do excesso de reativos, de mais a mais existe também a extinção de qualquer possibilidade das empresas de fornecimento de energia cobrar tarifas adicionais devido ao baixo valor do FP.

4.4 TERCEIRO CENÁRIO

Com os valores dos dois primeiros cenários, a procura por outros valores para o elemento shunt pode ser feita a fim de otimiza-lo. Para o terceiro cenário será instalado um banco de capacitores com q = - 1000 kvar na barra 3 (QGF) do sistema.

4.4.1 SIMULAÇÕES DO TERCEIRO CENÁRIO

Na Tabela 7 fixada abaixo, é exposto os valores obtidos na simulação para o 3º cenário.

Tabela 7 – Resultado do 3º cenário (q = -1000 Kvar).

Barra	**|V| (pu)**	$\theta(^o)$	**P (MW)**	**Q (Mvar)**
1	**1,0000**	**0,0000**	**-0,134779**	**0,047817**
2	**1,0011**	**-150,6051**	**0,0000**	**0,0000**
3	**0,9997**	**-150,6794**	**0,0000**	**-0,0999**
4	**0,9974**	**-150,6852**	**0,0300**	**0,0100**
5	**0,9860**	**-150,6689**	**0,1000**	**0,0400**

Na Tabela 7, está exposto os valores com a instalação do banco de capacitores de q = -1000 Kvar na barra 3, com isso os resultados revelaram aumento significativo na tensão apresentada nas barras 2, 3, 4, e 5, sendo que até mesmo nas barras que estão mais distantes existe uma diminuição na queda de tensão, ou seja, a tensão presente nas barras estão mais próximas de 1 pu, porém, na barra 2 ocorre sobretensão, que é um fato que requer atenção ao analisar qualquer SEP, por danificar componentes eletrônicos e placas de circuitos dentre outros danos.

Apesar disso, a potência reativa foi influenciada negativamente como pode ser visto na última coluna da Tabela 7, isso ocorre porque o fluxo de potência se torna reverso para

barra 1, isso afeta a estabilidade dinâmica e estática do sistema elétrico, logo em termos de tensão e frequência causa desequilíbrio entre geração e carga. Além disso, a potência reversa pode criar condições adversas para os equipamentos de proteção do SEP como os relés de proteção, que normalmente são projetados para operar em condições normais de fluxo de potência, podendo não se comportar bem em condições de fluxo bidirecional.

Outro problema que o fluxo de potência reverso pode gerar afeta a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, como as distorções na forma de onda. Ademais pode apresentar dificuldades na coordenação e controle, porque a gestão do fluxo de potência reverso demanda uma coordenação adequada entre diferentes componentes do sistema elétrico, como os geradores, os consumidores e os operadores de rede. Isso pode prejudicar a segurança operacional, porque pode criar situações inseguras no sistema elétrico, como sobretensões ou subcorrentes em áreas específicas da rede.

Tabela 8 – Correntes nas linhas do 3º cenário (q = -1000 Kvar).

Linha	**Corrente (A)**
2-3	**202,753**
3-4	**45,758**
3-5	**157,662**

Como nos outros cenários os valores da corrente elétrica se apresentou de maneira adequada, como pode ser visto na Tabela 8, pois, que ela não ultrapassou o limite do condutor que é de 270 A, sendo assim os condutores presentes nas linhas 1, 2 e 3 não sofrerão nenhum tipo de perda por aquecimento, consequentemente ao instalar no QGF desse sistema um banco de capacitores de q = -1000 kvar, a corrente se comportará de maneira adequada aos limites do condutor.

Tabela 9 – Carregamento das Linhas do 3º cenário (q = -1000 Kvar).

Linha	**Carregamento (%)**
2-3	**75,09**
3-4	**16,94**
3-5	**58,39**

Ao analisar a Tabela 9 que apresenta os carregamentos de corrente nas linhas da rede estudada com a inserção do elemento shunt q = -1000 kvar, os valores de carregamento são similares ao 1º cenário que não utiliza o banco de capacitores, já ao comparar com 2º caso esse leva desvantagem, porque ao instalar capacitores com q = -520 kvar o 2º cenário apresenta melhores valores de carregamento, além disso, ele apresenta menores valores de potência reativa.

Por fim, mesmo existindo potência reversa no terceiro cenário, esse não é o motivo para o último caso ser o pior dos casos com a utilização de banco de capacitores. O

motivo para utilizar q = -520 Kvar ao invés de instalar o elemento shunt q = -1000 Kvar, é predominantemente econômico, porque é mais barato instalar banco de capacitores com menor potência reativa como no 2º cenário, do que realizar maiores compensações como é feito nesse cenário com q = -1000 Kvar, além disso, ao analisar a potência reversa observa-se que ela acontece, porém, com valores muito pequenos, deixando o FP com valor quase unitário, ou seja, ela não prejudica o funcionamento da rede.

$$Cos\ \theta = \frac{P}{S} = \frac{0{,}134779}{0{,}143009944} = 0{,}94244947\ Capacitivo \tag{4.3}$$

Na Equação 4.3 é explicito que houve uma melhora no FP ao compara-lo com o 1° cenário, porém, ao comparar com os valores colhidos na Equação 4.2 referente a compensação de q = -520 Kvar, é sabido que um fator de potência praticamente unitário como o calculado no 2° cenário, é melhor que o FP apresentado no 3º caso, pois, que existe melhoras significativas ao analisar a diminuição de perdas, o mesmo pode ser observado ao comparar com o caso original sem o banco de capacitores.

4.5 COMPARAÇÃO DE TENSÃO, CORRENTE E CARREGAMENTO ENTRE OS CENÁRIOS

Com os valores dos 3 cenários já simulados, é factível realizar comparações para saber qual é o mais interessante. Para isso será feito uma comparação detalhada da tensão, corrente e do carregamento dos casos.

- Tensão;

Tabela 10 – Comparação das Tensões (pu) dos 3 cenários.

CENÁRIOS	**1**	**2**	**3**
Barra 1	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**
Barra 2	**0,9938**	**0,9976**	**1,0011**
Barra 3	**0,9919**	**0,9959**	**0,9997**
Barra 4	**0,9896**	**0,9937**	**0,9974**
Barra 5	**0,9781**	**0,9822**	**0,9860**

Ao analisar a Tabela 10, observa-se que a barra mais distante apresenta queda de tensão de 2,19%, para o sistema inicial, já para os cenários com banco de capacitores, a subtensão está contida em um intervalo de 1.4% até 1.8%, logo ao utilizar o elemento shunt, tem-se uma melhora significativa na queda. No Brasil existem normas específicas que estabelecem limites mais rigorosos, como a norma NBR 5410, que recomenda valores limites de queda de tensão de 4% para circuitos finais de iluminação e 5% para circuitos de tomadas, logo mesmo na rede inicial que

não contempla o banco de capacitores, ocorre o cumprimento da norma, porém, é importante salientar que essa rede é básica, com apenas 2 cargas que estão localizadas próximas dos quadros de distribuição e da geração, o que para um sistema real é quase impossível.

Logo para os 2 cenários com elemento shunt, existe uma melhora na subtensão, já que se trata de uma indústria fictícia simples. Para essa industria proposta, existe uma melhora significativa de tensão no 3° cenário, porém, com sobretensão na barra 2 que se apresenta com um valor baixo, contudo, os valores podem agravar-se ao utilizar maiores cargas e distâncias. Portanto, os níveis de tensão no 2° caso, são os melhores por não apresentar sobretensão, além disso, os valores apresentam melhoras significativas para os níveis de tensão, pois, que a queda na barra mais distante é de apenas 1,78%.

- Corrente e Carregamento;

Tabela 11 – Comparação das Correntes (A) dos 3 cenários.

CENÁRIOS	**1**	**2**	**3**
Linha 2-3	**204,998**	**190,545**	**202,753**
Linha 3-4	**46,120**	**45,932**	**45,758**
Linha 3-5	**158,940**	**158,275**	**157,662**

Tabela 12 – Comparação do Carregamento dos 3 cenários.

CENÁRIOS	**1**	**2**	**3**
Linha 2-3	**75,92%**	**70,57%**	**75,09%**
Linha 3-4	**17,08%**	**17,01%**	**16,94%**
Linha 3-5	**58,86%**	**58,62%**	**58,39%**

Ao analisar a corrente na Tabela 11, e o carregamento da corrente fornecido em (%) na Tabela 12, é possível concluir que nos três cenários, o limite estipulado pelo condutor que é de 270 A é obedecido.

O 2° cenário tem vantagem em relação ao 3°, porque ele apresentar menores correntes. Para q = -520 Kvar existe menor corrente o que diminui perdas por aquecimento e permite um maior fluxo de corrente, logo no 2° caso é possível passar mais corrente sem alterar o condutor, o que permite uma futura expansão na rede e consequentemente aumento de carga.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo é destinado a apresentar as conclusões fundamentais deste trabalho, consolidando os resultados obtidos nas simulações do pandapower em sistemas industriais.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho apresenta uma contribuição significativa para realizar análise de tensão em redes industriais, além disso, fundamenta de maneira teórica, conceitos sobre os bancos de capacitores, desde sua formulação básica até suas aplicação em redes industriais. É abordando características conceituais do componente, e contempla suas utilizações específicas na indústria. Além de tudo, o documento mostra no capítulo 3 como estruturar e simular uma grande variedade de redes elétricas no pandapower, desde redes industriais até mesmo redes de distribuição ou transmissão.

A estruturação de uma rede de pequeno porte utilizando o pandapower, pode ser feita com a construção de cada componente respeitando as características adequadas em cada projeto, com isso a finalidade de cada linha utilizada no algoritmo para construção da rede pode ser observada, proporcionando o entendimento de cada entrada de parâmetro, resultando em um amplo entendimento sobre a ferramenta de código aberto.

Como proposto nos objetivos, a inserção do banco de capacitores foi realizada de maneira fácil, e sem demandar esforço computacional excessivo, viabilizando uma análise bem detalhada do fluxo de potência, além disso, é possível observar em cada um dos 3 cenários apresentados o perfil de tensão, e como o elemento shunt influencia a rede em questão, logo a partir dos valores simulados e da estruturação da rede, que são intermediadas pelo pandapower, é viável analisar se ocorreu sobretensão e subtensão, se o carregamento de cada linha ultrapassou 100%, e se a corrente ultrapassou o módulo suportado pelos condutores da indústria.

- O 1° cenário é o que representa a indústria fictícia sem o banco de capacitores, ou seja, esse caso origina os dados que busca-se melhorar, avaliando os valores de tensão e corrente com a instalação do elemento shunt.
- O 2° cenário que contempla um banco de capacitores de q = - 520 Kvar, é o melhor dos 3 casos, nele existe melhora significativa nos níveis de tensão, sendo que é factível observar a diminuição na queda de tensão nas barras mais distantes da geração, além disso, ocorre diminuição nas correntes que fluem em cada uma das 3 linhas, o que significa uma diminuição de cerca de 5% no carregamento, ademais observa-se que a corrente em todas as linhas estão abaixo de 270 A, respeitando o limite do condutor "NAYY 4x150 SE" que foi utilizado.

Outro fator interessante é o econômico, pois, ao utilizar um banco de capacitores de q = -520 Kvar, existe melhoras nas condições de operação, sendo que ele é capaz de atingir as expectativas com um valor menor de capacitância, ao comparar com o 3° caso que é instalado um elemento shunt para compensação de reativo com q = -1000 Kvar, sendo que para maiores compensações é necessário gastos maiores com os componentes. Ademais existe uma melhora muito significativa ao analisar o fator de potência que tem o valor unitário.

- O 3° cenário contempla um banco de capacitores de q = - 1000 Kvar, ao utiliza-lo existe uma melhora na subtensão, porém, na barra 2 ocorre sobretensão que não é desejável, pois, pode ocasionar problemas como, danos a equipamentos, falhas e perdas, mesmo assim os valores são pequenos, assim esse fator não é decisivo para a exclusão desse elemento shunt.

  Outro fator que é determinante para não utilização desse elemento na planta industrial, é o surgimento de potência reversa que nesse caso também está com valores baixos.

  O fator mais importante que é levado em consideração, é o preço do banco de capacitores, porque para realizar a compensação de q = - 1000 Kvar é mais caro do que realizar a compensação de q = - 520 Kvar.

  Ao analisar o valor do FP, observa-se que ele foi aumentado em relação ao cenário sem o elemento shunt, porém, esse aumento percentual fica abaixo do apresentado pelo banco de capacitores de q = -520 Kvar.

  Logo ao analisar o conjunto de benefícios dos casos com capacitores, é possível concluir que o 2° cenário é o mais indicado para melhoria da indústria representada pela Figura 5.

5.2 DIRETRIZES PARA TRABALHOS FUTUROS

Destaca-se como possíveis temas para trabalhos futuros, pesquisas ou artigos:

- Avaliar a inserção de um banco de capacitores em redes que apresentam outras topologias;
- Avaliar um sistema industrial real;
- Propor uma nova ferramenta como o ANAREDE-CEPEL, para comparar os resultados com os valores encontrados nesse documento;

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, V. O. *et al.* Controle coordenado de tensão e potência reativa. Universidade Federal de Itajubá, 2002.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 9st. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2013.

GONZÁLEZ, J. F. V. Redução de perdas em redes primárias de distribuição de energia elétrica por instalação e controle de capacitores. **UNICAMP, agosto**, 2003.

GONZALO G E AGUILA, A. e. G. D. e. O. L. **Localização e dimensionamento ideal de bancos de capacitores usando compensação VOLT VAR em microrredes**. [S.l.]: IEEE, 2020. 465 - 472 p.

LEGHARI ZOHAIB HUSSAIN E KUMAR, M. e. S. P. H. e. K. L. e. T. Q. T. **Uma revisão crítica das estratégias de otimização para integração simultânea de geração distribuída e bancos de capacitores em redes de distribuição de energia**. [S.l.]: MDPI, 2022. 1 - 40 p.

MAMEDE, J. M. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 5st. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2017.

MEHL, E. L. Capacitores eletrolíticos de alumínio: Alguns cuidados e considerações práticas. **Internal publication of Federal University of Paraná**, p. 1–5, 2000.

OKA, M. M. História da eletricidade. **História da Eletricidade**, v. 1, p. 1–6, 2000.

SADIKU, C. K. A. e M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5st. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2013.

SOMA, G. G. **Dimensionamento e colocação ideal de bancos de capacitores em redes de distribuição usando um algoritmo genético**. [S.l.]: MDPI, 2021. 186 - 204 p.

THURNER LEON E SCHEIDLER, A. e. S. F. e. M. J.-H. e. D. J. e. M. F. e. M. S. e. B. M. **pandapower — uma ferramenta Python de código aberto para modelagem, análise e otimização convenientes de sistemas de energia elétrica**. [S.l.]: IEEE, 2018. 6510–6521 p.

WANG HAORAN E LI, C. e. Z. G. e. L. Y. e. W. H. **Projeto baseado em modelo e otimização de bancos de capacitores de link CC híbridos**. [S.l.]: IEEE, 2020. 8910 - 8925 p.

APÊNDICE A – Implementações Computacionais

A seguir, é disponibilizado o link que contém todos os códigos computacionais implementados em *Python* durante a execução deste estudo.

Cenário 1 disponível em :

https://colab.research.google.com/drive/1kQp097vKmJq97xqQNcpOtcFd-74IpIi9?usp=sharing

Cenário 2 disponível em :

https://colab.research.google.com/drive/1WVolmSA9YvYojruFeUGgaoz3_TF8EU_w?usp=sharing

Cenário 3 disponível em :

https://colab.research.google.com/drive/1IRW1P82t5VsWi0kMDxh8oyR2j4v4OzT4?usp=sharing