



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO ARAÚJO SANCHO RIOS  
VICTOR ANDERSON DANTAS FERREIRA

**DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES  
PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO  
TRIFÁSICO**

MACAPÁ - AP

2019

RODRIGO ARAÚJO SANCHO RIOS  
VICTOR ANDERSON DANTAS FERREIRA

**DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES  
PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO  
TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Amapá, para obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Felipe Monteiro.

MACAPÁ - AP

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá  
Elaborada por Orinete Costa Souza – CRB-2/1709

---

Rios, Rodrigo Araújo Sancho.

Dimensionamento de bancada didática com banco de capacitores para correção do fator de potência de um motor elétrico trifásico / Rodrigo Araújo Sancho Rios, Victor Anderson Dantas Ferreira ; orientador, Felipe Monteiro. – Macapá, 2019.

94 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

1. Banca experimental. 2. Fator de potência. 3. Capacitores elétricos. 4. Máquinas CA. I. Ferreira, Victor Anderson Dantas. II. Monteiro, Felipe, orientador. III. Fundação Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

621.313 R586d  
CDD: 22. ed.

---



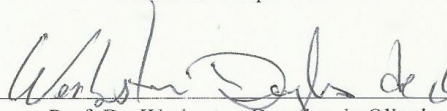
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

### ATA DE DEFESA DE TCC

Às 18:00 horas do dia 10 de julho de 2019, nas dependências da Universidade Federal do Amapá, reuniu-se a Banca Examinadora para defesa de TCC 2 intitulado "DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO" de autoria dos alunos RODRIGO ARAÚJO SANCHO RIOS e VICTOR ANDERSON DANTAS FERREIRA regularmente matriculados no Curso de Engenharia Elétrica desta universidade. A banca Examinadora foi assim constituída: Prof. Me. Felipe Monteiro, Presidente da Banca e Orientador, Prof. Dr. Werbeston Douglas de Oliveira e Prof. Me. Raphael Diego Comesanha e Silva, como examinadores. Concluída a defesa foram realizadas as arguições e comentários. Em seguida procedeu-se o julgamento pelos membros da Banca Examinadora, tendo o projeto sido APROVADO, com NOTA 8,9. E, para constar, eu, Felipe Monteiro, presidente da Banca Examinadora, lavrei a presente ata que, após lida e achada conforme, foi assinada por mim e demais membros da Banca Examinadora.

Macapá(AP), 10 de JULHO de 2019

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. Felipe Monteiro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Werbeston Douglas de Oliveira

Werboston Douglas de Oliveira  
Professor do Magistério Superior  
SIAPE: 2389020 - UNIFAP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Me. Raphael Diego Comesanha e Silva

Raphael Diego Comesanha e Silva  
Professor do Magistério Superior  
SIAPE: 2093645 - UNIFAP

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por me permitir alcançar essa conquista e importante etapa da minha vida.

A minha família, principalmente aos meus pais Lúcia Rios e Edgar Rios, que não mediram esforços para me proporcionar uma educação de qualidade.

A minha namorada Juliana Lima, por estar sempre me apoiando e incentivando.

Ao meu amigo Victor Ferreira, pela parceria no desenvolvimento desse projeto, pela amizade que construímos durante essa jornada e pelo conhecimento compartilhado.

Aos professores da Unifap pelo conhecimento passado durante o curso.

Rodrigo Rios.

Agradeço primeiramente a Deus por me dá forças para chegar até aqui.

A minha mãe, Dona Maria, que sempre me apoiou e me incentivou.

A minha namorada e futura Engenheira Eletricista, Tainá Mira.

Um agradecimento especial ao meu sogro Alexandre Amoras e Conceição Mira.

E aos meus amigos, que estiveram ao meu lado e me apoiaram durante este processo de graduação: Ricardo Peçanha, Thiago Braga e Pablo Melo (amigo e primo).

E claro, ao meu companheiro de curso, amigo do peito e contribuinte deste trabalho de conclusão, Rodrigo Rios. Grato pela paciência, pelas conversas oportunas e sonhos como este que está se realizando.

Victor Ferreira.

## RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso aborda o estudo, análise e projeto de uma bancada experimental para estudo da correção do fator de potência de um motor elétrico trifásico de 1 CV conectado a uma rede isolada, através da técnica de uso de banco de capacitores. Durante os experimentos o motor elétrico trifásico foi submetido a três testes com os três tipos de banco de capacitores que compõem a bancada didática onde foi possível observar a melhora do fator de potência contribuindo assim para a melhora do seu rendimento. O protótipo será utilizado no Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas da UNIFAP para as aulas práticas, sendo divididas em três experimentos, onde a ideia principal é visualizar o efeito provocado por um baixo fator de potência e podê-lo corrigir, dando aos alunos do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amapá a oportunidade de trabalharem na prática este método de correção do fator de potência e auxiliar no processo de ensino-aprendizagem. Também é realizado um estudo sobre as máquinas CA, em especial os motores CA síncronos e assíncronos.

**Palavras-Chaves:** Bancada experimental, Correção do fator de potência, Fator de potência, Banco de capacitores, Máquinas CA.

## **ABSTRACT**

The present study deals with the study, analysis and design of an experimental bench to study the power factor correction of a three-phase electric motor of 1 CV connected to an isolated network using the capacitor bank technique. During the experiments the three-phase electric motor was submitted to three tests with the three types of capacitor banks that make up the didactic bench where it was possible to observe the improvement of the power factor, thus contributing to the improvement of its efficiency. The prototype will be used in the Laboratory of Conversion and Electric Machines of the UNIFAP for the practical classes, being divided in three experiments, where the main idea is to visualize the effect caused by a low power factor and to be able to correct it, giving the students of the course of Electrical Engineering of the Federal University of Amapá the opportunity to work in practice this method of power factor correction and help in the teaching-learning process. A study on AC machines is also carried out, in particular synchronous and asynchronous AC motors.

**Keywords:** Experimental bench, Power factor correction, Power factor, Capacitors bank, Machines AC.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experimento do motor de Faraday.....	17
Figura 2 - Evolução do motor elétrico.....	17
Figura 3 - Rotor de polos lisos.....	24
Figura 4 - Rotor de polos salientes.....	24
Figura 5 - Estator trifásico .....	25
Figura 6 - Face polar com um conjunto de enrolamentos amortecedores .....	25
Figura 7 - Diagrama de fluxo de potência de um motor síncrono.....	28
Figura 8 - Estator de um motor de indução trifásico.....	30
Figura 9 - Estrutura de um rotor tipo gaiola de esquilo.....	31
Figura 10 - Estrutura de um rotor tipo bobinado.....	32
Figura 11 - Motor de indução trifásico .....	33
Figura 12 - Triângulo de potência.....	36
Figura 13 - Diagrama elétrico de um SVC.....	39
Figura 14 - Diagrama elétrico de um STATCOM.....	40
Figura 15 - Diagrama fasorial de um motor síncrono sobre-excitado.....	41
Figura 16 - Triângulo de Potências .....	43
Figura 17 - Multímetro digital EM 6000 .....	46
Figura 18 - Tacômetro TDR - 100 .....	46
Figura 19 - Conversor CA-CC .....	47
Figura 20 - Reostato.....	47
Figura 21 - Motor assíncrono .....	48
Figura 22 - Gerador síncrono .....	49
Figura 23 - Módulo de sincronismo .....	50
Figura 24 - Motor de indução trifásico de gaiola.....	51
Figura 25 - Analisador de qualidade de energia Fluke 43B.....	52
Figura 26 - Vista frontal (A) e vista lateral da bancada didática (B).....	53
Figura 27 - Bancada didática com banco de capacitores para correção do fator de potência de um motor trifásico .....	54
Figura 28 - Capacitores de 10 $\mu$ F, 7 $\mu$ F, 5 $\mu$ F, respectivamente .....	55
Figura 29 - Disjuntor tripolar .....	56
Figura 30 - Disjuntor motor tripolar.....	57

Figura 31 - Borne vermelho/preto.....	58
Figura 32 - Conexão banco 1 .....	60
Figura 33 - Conexão banco 2 .....	61
Figura 34 - Conexão banco 3 .....	62
Figura 35 - Circuito.....	63
Figura 36 - Fechamento em Delta.....	79
Figura 37 - Reostato.....	80
Figura 38 - Fechamento em Estrela .....	80
Figura 39 - Conversor CA-CC .....	81
Figura 40 - Fechamento capacitores em Delta.....	82
Figura 41 - Fechamento motor em Delta.....	83
Figura 42 - Esquema de ligação à rede .....	84
Figura 43 - Fechamento em Delta.....	85
Figura 44 - Reostato.....	86
Figura 45 - Fechamento em Estrela .....	86
Figura 46 - Conversor CA-CC .....	87
Figura 47 - Fechamento capacitores em Delta.....	88
Figura 48 - Fechamento motor em Delta.....	89
Figura 49 - Esquema de ligação à rede .....	90
Figura 50 - Fechamento em Delta.....	91
Figura 51 - Reostato.....	92
Figura 52 - Fechamento em Estrela .....	92
Figura 53 - Conversor CA-CC .....	93
Figura 54 - Fechamento capacitores em Delta.....	94
Figura 55 - Fechamento motor em Delta.....	95
Figura 56 - Esquema de ligação à rede .....	96

## LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Correção do Fator de Potência.....	67
Gráfico 2 - Valores de corrente .....	67
Gráfico 3 - Potência ativa .....	68
Gráfico 4 - Potência reativa .....	69
Gráfico 5 - Potência aparente.....	69
Gráfico 6 - Redução das perdas.....	70

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens dos Motores Síncronos.....	27
Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens dos Motores de Indução .....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da placa da máquina assíncrona .....	48
Tabela 2 - Dados da placa do gerador síncrono .....	49
Tabela 3 – Dados da placa do motor de indução trifásico de gaiola .....	50
Tabela 4 - Quantitativo dos equipamentos .....	55
Tabela 5 - Características dos capacitores .....	56
Tabela 6 - Características nominais do disjuntor tripolar.....	57
Tabela 7 - Características nominais do disjuntor motor tripolar.....	58
Tabela 8 - Características do borne .....	58
Tabela 9 - Medições.....	63
Tabela 10 - Atividade (Banco 1) .....	84
Tabela 11 - Atividade (Banco 2) .....	90
Tabela 12 - Atividade (Banco 3) .....	96

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>16</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICO.....	18
1.3	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	19
1.4	ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	21
<b>2</b>	<b>MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA</b> .....	<b>22</b>
2.1	MOTORES SÍNCRONOS.....	22
2.2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA.. ..	23
2.1.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	26
2.1.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	27
2.1.4	CLASSES DOS MOTORES.....	27
2.1.5	FATOR DE SERVIÇO .....	28
2.1.6	RENDIMENTO.....	28
2.2	MOTORES ASSÍNCRONOS.....	29
2.2.1	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA .....	29
2.2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	33
2.2.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	34
2.3	PROBLEMAS OCASIONAIS EM MOTORES CA.....	34
<b>3</b>	<b>COMPENSAÇÃO DE REATIVOS</b> .....	<b>36</b>
3.1	ENERGIA REATIVA.....	37
3.2	DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS.....	38
3.2.1	FACTS.....	38
3.2.2	COMPENSADOR SÍNCRONO.....	40
3.2.3	BANCO DE CAPACITORES.....	41
3.3	CÁLCULO DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	42

<b>4</b>	<b>BANCADA DIDÁTICA: DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO .....</b>	<b>45</b>
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	45
4.1.1	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES ELÉTRICOS USADOS NA BANCADA DIDÁTICA.....	54
4.2	RESULTADOS.....	59
4.2.1	ESPECIFICAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES.....	64
4.2.2	REDUÇÃO DAS PERDAS .....	65
4.2.3	PRECAUÇÕES .....	65
4.2.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	66
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	72
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE 1 – ATIVIDADES SUGERIDAS .....</b>	<b>78</b>
1.	REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 1.....	79
2.	REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 2.....	85
3.	REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 3.....	91

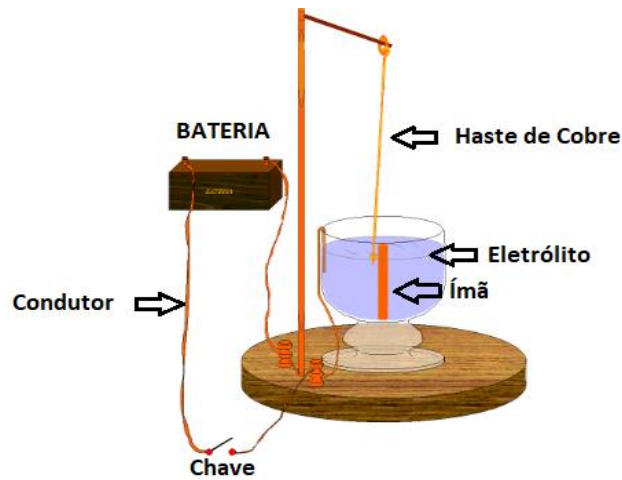
## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Imaginar o mundo em que vivemos sem os motores elétricos é praticamente impossível. Pode-se dizer de forma figurativa que eles são responsáveis por fazerem o mundo girar. Eles estão presentes desde o mais simples carrinho de controle remoto até o mais avançado meio de transporte. Só para se ter uma ideia de quão a população é dependente dos motores elétricos, segundo Praxedes (2011), estima-se que cerca de 85% da energia elétrica gerada em todo o Brasil seja consumida pelos motores elétricos que estão dentro das indústrias.

O professor de física, Hans Christian Oersted, mostrou em um de seus experimentos que um fio percorrido por corrente elétrica que se encontra próximo de uma bússola, provocava um deslocamento na agulha da bússola. E foi através dessa descoberta que Michael Faraday inventou os motores elétricos. Físico-químico e um dos maiores cientistas, o inglês Faraday ao estudar o experimento de Oersted relatado anteriormente se fez a seguinte pergunta: o que acontece se um ímã for colocado nas proximidades de um material condutor? Descobrimos assim os efeitos da indução magnética (fenômeno relacionado à passagem de corrente elétrica em um condutor que se encontra imerso em um campo magnético variável). Tal princípio foi fundamental para dar vida aos motores elétricos em geral (ALBRECH, 2013). A Figura 1 logo abaixo ilustra o experimento realizado por Faraday para demonstrar o princípio de um motor elétrico. Tal experimento funciona da seguinte forma: Ao fechar a chave uma corrente elétrica começa a circular pelo fio condutor que tem uma de suas extremidades mergulhada no eletrólito. O campo magnético produzido pelo ímã faz com que as cargas elétricas presentes na corrente se movimentem, conseqüentemente uma força (força de Lorentz) surge perpendicularmente às cargas e ao campo magnético. É esta força que faz com que a haste de cobre gire como se fosse o rotor de um motor elétrico, realizando a transformação de energia elétrica em energia mecânica.



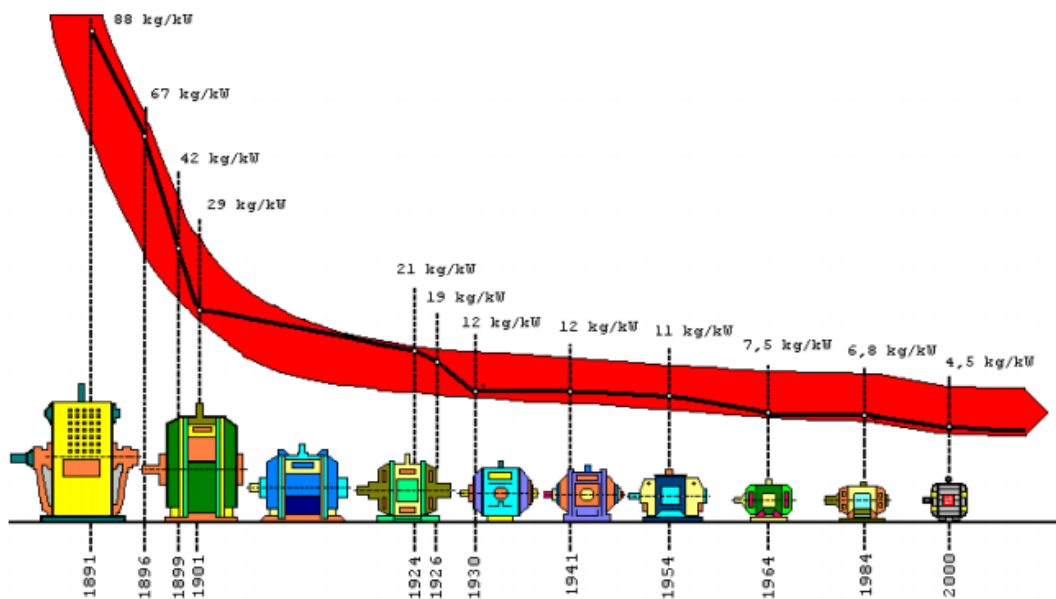
Figura 1 - Experimento do motor de Faraday



Fonte: Simões (2017)

A redução da relação peso *versus* potência dos motores elétricos foi progredindo cada vez mais durante os séculos graças ao avanço tecnológico que proporcionou o desenvolvimento de materiais que pudessem deixar os motores mais robustos, tais como: condutores esmaltados, papéis isolantes sintéticos, chapas magnéticas, ligas de alumínio e materiais plásticos (WEG, 2015). Essa progressão pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Evolução do motor elétrico



Fonte: WEG (2015)

Os motores elétricos são divididos em dois grupos, que são: os motores CC (corrente contínua) e os CA (corrente alternada). Os motores CC subdividem em: de excitação separada, excitação em derivação, a imã permanente, serie e composto. Já os motores CA subdividem em: síncronos e assíncronos. Apenas os motores assíncronos possuem sistema de partida, que são: partida direta, partida estrela-triângulo, chave compensadora e soft-starter. Para o controle de velocidade são usados os inversores de frequência, pois, são os únicos que garantem alto desempenho em relação à potência *versus* frequência.

Como os motores elétricos são responsáveis por maior parte do consumo de energia no Brasil, algumas soluções podem ser muito úteis para diminuir tal consumo, que são: trocar os motores antigos por atuais, pois estes possuem um maior rendimento; não usar motores superdimensionados, realizar manutenções periódicas nos motores e usar inversores de frequência para realizar o controle de velocidade.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

A prioridade principal desse trabalho de conclusão de curso é realizar um estudo completo sobre correção de fator potência, elaborar uma metodologia de projeto e a construção de uma bancada experimental referente à técnica de correção do Fator de Potência (FP) através do uso de banco de capacitores. O presente trabalho tem como objetivo também explanar um pouco sobre os motores elétricos.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar estudo e medição do motor elétrico trifásico;
- Definir fator de potência a ser corrigido;
- Dimensionar banco de capacitores para atingir o fator de potência desejado da carga;
- Desenvolver a bancada didática de banco de capacitores para o estudo proposto;

- Propor roteiro experimental para disciplinas de graduação correlatas.

### 1.3 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Para os alunos que cursam engenharia elétrica não só é importante ter domínio teórico do conteúdo que lhes é apresentado como também é essencial que tenham condições de colocar em prático o máximo possível do que se aprendeu durante a graduação. Por isso esse trabalho de conclusão de curso é de extrema importância para os alunos do curso de engenharia elétrica, pois toda a parte teórica sobre compensação de reativos apresentado aqui será colocada em prática na bancada experimental. Logo, eles poderão realizar o projeto de dimensionamento do banco de capacitores e levar para executar na bancada; e é preciso deixar claro o quão é importante para a vida profissional de um futuro engenheiro eletricitista ver a relação teoria *versus* prática.

No entanto, para poder sobreviver em uma sociedade cada vez mais complexa e repleta de incertezas é preciso que as instituições de ensino não só trabalhem os conhecimentos atuais, mas criem oportunidades para que seus estudantes possam vivenciar novas experiências. Nesse sentido, é importante que os problemas e projetos que serão desenvolvidos usando algumas técnicas das inovações pedagógicas como movimento *maker* ou a *do it yourself* (DIY ou faça você mesmo), sejam oriundos das comunidades, do mundo onde esses estudantes vivem, criando-se, assim contextos reais de aprendizagem (VALENTE; FREIRE; ARANTES, 2018).

Os espaços *maker* que estão sendo implantados em comunidades e em instituições de ensino representam uma alternativa para que a educação possa acontecer em situações mais reais, além de levar o protagonismo e a inovação tecnológica para os espaços de aprendizagem (VALENTE; FREIRE; ARANTES, 2018). De acordo com o Manifesto do Movimento *Maker*

O fazer é fundamental para o que significa ser humano. Devemos fazer, criar e nos expressar para nos sentirmos inteiros. Há algo especial em fazer coisas físicas. As coisas que fazemos são como pequenos pedaços de nós e parecem incorporar porções de nossa alma (HATCH, 2003).

O aumento populacional no decorrer dos anos já é algo notável para todos e umas das consequências é o aumento da demanda de energia elétrica para suprir essa expansão demográfica. Este aumento na demanda é consequência direta da quantidade de cargas que vêm sendo inseridas no sistema elétrico, provocando uma verdadeira preocupação com a qualidade da energia elétrica. Grande parte dessas cargas é de origem não linear (relação não linear entre tensão e corrente) e quando conectadas à rede elétrica introduzem harmônicos, provocando assim um atraso considerável do fasor de corrente em relação ao fasor de tensão, ou seja, um baixo FP. Outros problemas sérios como distorções nas correntes elétricas e afundamentos nas tensões são ocasionados por esse tipo de carga, mas não serão o foco deste trabalho. Esse tipo carga se concentra principalmente nos parques industriais, tornando-os responsáveis diretos pelo aumento do fluxo de reativos nas linhas elétricas. Como o fluxo de reativos causa sérios problemas ao sistema elétrico brasileiro, como perdas elétricas, quedas de tensão, a ANEEL se viu necessário criar uma resolução que limitasse o fator potência para consumidores que puxam da rede elétrica uma quantidade considerável de reativos. Assim, segundo a ANEEL (2010), para este tipo de consumidor foi limitado um fator de potência inferior a 0,92 capacitivo no período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h 30min e 6h 30min. No período complementar ao anterior e por 6 horas consecutivas só é permitido um fator de potência inferior a 0,92 indutivo.

Muitas indústrias ou empresas que possuem cargas que necessitam de uma quantidade considerável de potência reativa acabam tendo prejuízo em suas contas de energia porque excedem os limites do FP, por isso a necessidade de realizar a compensação de reativos, pois além de diminuir nas despesas com energia, também passam a evitar perdas elétricas, sobrecargas e quedas tensão que são problemas ocasionados pelo baixo FP.

Por isso decidiu-se trabalhar esse tema nesse trabalho e levá-lo à prática com a construção da bancada experimental que servirá aos alunos do curso, possibilitando unir a teoria e prática ajudando assim numa melhor compreensão do conteúdo, dando a eles total suporte para entender todo o processo da correção de FP e poder aplicar futuramente durante a vida profissional.

## 1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

Após ser apresentado no capítulo introdutório a motivação do presente trabalho, onde foi feito um breve estudo sobre o contexto histórico dos motores elétricos, o trabalho foi desenvolvido em cinco capítulos.

O capítulo 2 foi destinado para uma análise mais detalhada dos motores síncronos e assíncronos e como eles influenciam negativamente no comportamento da rede elétrica onde estão conectados.

Já no capítulo 3 se fez um estudo detalhado do que a energia reativa, de todas as técnicas de correção de fator de potência e finalmente de como é realizado o cálculo da compensação de reativos.

O capítulo 4 foi dedicado à apresentação de todo o passo a passo no desenvolvimento da bancada experimental.

No capítulo 5 se encontra as vantagens desse trabalho para o curso, as dificuldades encontradas e recomendação de trabalhos futuros. E por fim, no apêndice, possuem alguns experimentos para serem desenvolvidos pelos alunos e professores interessados em fazerem uso da bancada didática.

## 2 MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

Segundo Chapman (2013), há duas classes principais de máquinas CA – máquinas síncronas e máquinas de indução.

Como já mencionado anteriormente, os motores de corrente alternada são divididos em dois grupos, síncrono e o assíncrono. Os motores síncronos são assim conhecidos porque a frequência elétrica está sincronizada com a velocidade mecânica do rotor. Já os motores assíncronos são assim definidos pelo simples fato de o rotor girar em uma velocidade menor que a do campo girante. Este último motor também é conhecido como motor de indução, pelo fato de a tensão no rotor ser fornecida por indução.

Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas diretamente na parte estacionária do motor através de contatos rotativos. Nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor por meio da combinação da variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

Nesse capítulo será abordada tanto a parte histórica dessas máquinas quanto os aspectos físicos e construtivos, como também as vantagens e desvantagens delas e onde são usadas.

### 2.1 MOTORES SÍNCRONOS

O nome “síncrono” se dá ao fato de o rotor girar na mesma velocidade do campo magnético girante desenvolvido no estator, ou seja, relativamente eles estão parados entre si. Essa velocidade é conhecida como “velocidade síncrona”, e apenas nela o motor consegue desenvolver seu torque. Fora dessa velocidade o torque médio é nulo.

Esse tipo de motor é usado em locais onde é necessário manter uma velocidade constante quando submetido a variações de carga; e desenvolver altos torques quando exigido (GE, 2000). Uma de suas aplicações é no meio industrial para corrigir fator de potência. Eles são sobre-excitados (passam a funcionar como

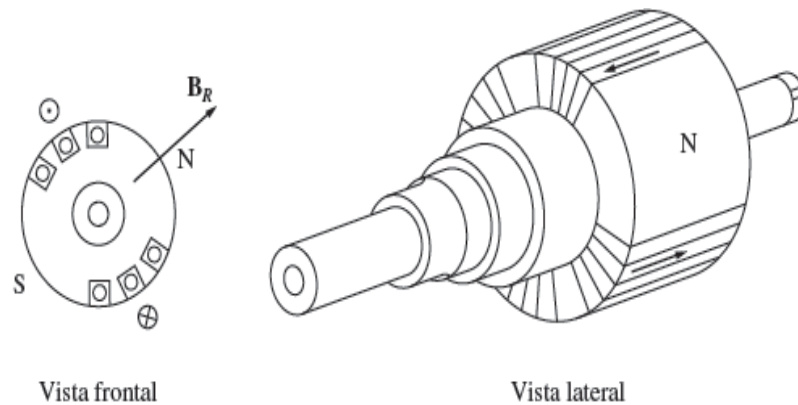
gerador, fornecendo reativos) e instalados no mesmo barramento dos motores de indução (GODWIN; GURNEY; MERRILL; EDGAR, 1970). Esse tipo de motor também é muito conhecido como motor de excitação dupla, pois é fornecido potência tanto ao estator como ao rotor.

O motor síncrono, quando a tecnologia de capacitores ainda não havia atingido o ponto satisfatório, foi muito utilizado para absorver potência reativa da rede, melhorando o fator de potência. Atualmente, é difícil encontrá-los nesse tipo de aplicação e não são muitas indústrias que o mantêm em atividade (CARVALHO, 2011).

### 2.2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA

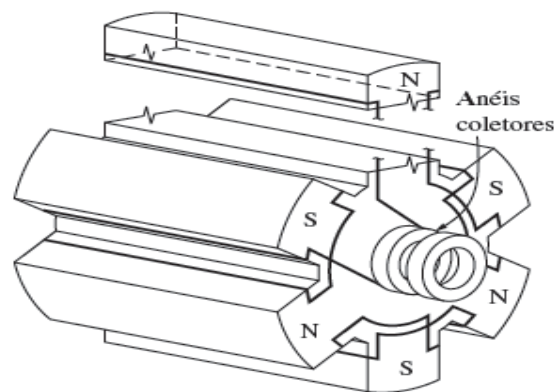
- **ROTOR:** O rotor do motor síncrono é como se fosse um grande eletroímã. Seus polos magnéticos podem ser construídos de duas maneiras: lisos (se encontram nivelados com a superfície do rotor) ou salientes (estão projetados para fora do rotor). Esses dois tipos de rotores podem ser vistos nas Figuras 3 e 4. Rotores de polos lisos são construídos apenas com 2 ou 4 polos, por isso são usados em casos que exijam alta velocidade; em contrapartida os de polos salientes são construídos com 4 ou mais polos, sendo usados para baixa velocidade. Os rotores são construídos com lâminas delgadas para diminuir as perdas por correntes parasitas que surgem por causa da influência de campos magnéticos variáveis. Para que o rotor comece a girar é necessário fornecer corrente CC em seu circuito de campo. Há duas formas de se fornecer essa corrente, que são: Usando uma fonte CC externa que irá fornecer potência por meio de escovas e anéis coletores. Ou usando uma fonte especial que é montada diretamente no eixo do motor (CHAPMAN, 2013).

**Figura 3 - Rotor de polos lisos**



Fonte: Chapman (2013)

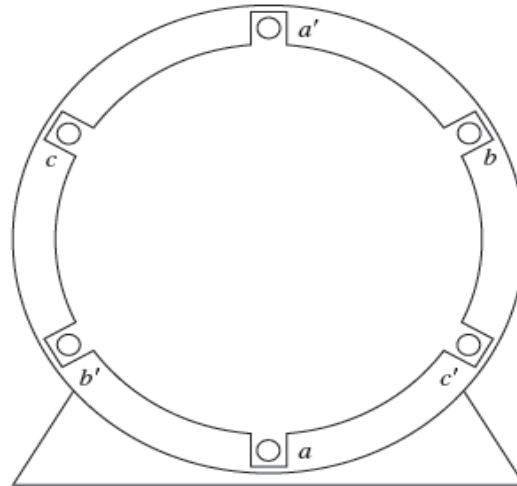
**Figura 4 - Rotor de polos salientes**



Fonte: Chapman (2013)

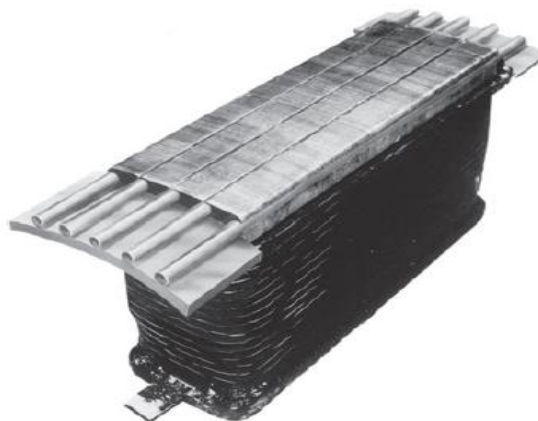
- **ESTATOR:** É onde se encontram os enrolamentos de armadura que sobre influência de um conjunto trifásico de correntes produz um campo magnético girante, esse campo gira em uma velocidade vinculada com a frequência da rede elétrica que alimenta o motor. O estator é formado por partes magnéticas estacionárias, incluindo as chapas laminadas de aço-silício que são isoladas entre si para diminuir as perdas por correntes parasitas ocasionadas pelo efeito do campo magnético variável (WEG, 2003). A Figura 5 ilustra um estator trifásico.



**Figura 5 - Estator trifásico**

Fonte: Chapman (2013)

- **ENROLAMENTOS AMORTECEDORES:** São enrolamentos usados para dar partida nesse tipo de motor. Nos motores de polos salientes, esses enrolamentos se encontram nas sapatas polares do rotor. E para os de polos lisos, os enrolamentos amortecedores estão na superfície externa do rotor. Esses enrolamentos são barras especiais que atravessam as ranhuras abertas na face do rotor e que são curto-circuitadas nas extremidades por um grande anel de curto-circuito (ARAUJO, 2011). Um exemplo dessa face polar é ilustrado na Figura 6.

**Figura 6 - Face polar com um conjunto de enrolamentos amortecedores**

Fonte: Chapman (2013)

- **EXCITATRIZ:** As excitatrizes são responsáveis por fornecer a corrente CC ao circuito de campo do rotor. Para motores de pequeno porte é conveniente trabalhar com a excitatriz do tipo estática, que é composta por anéis coletores, escovas e uma fonte de alimentação externa. Quando se trata de motores de grande porte o ideal é usar a excitatriz do tipo Brushless, nesse caso é um pequeno gerador CA com seu circuito de campo montado no estator e seu circuito de armadura montado no eixo do motor (CHAPMAN, 2013).
- **MANCAIS:** Existem dois tipos mancais: os de rolamento e os de deslizamento. Os mancais de rolamento são constituídos de enrolamento de esfera ou de rolos cilíndricos, dependendo da rotação e dos esforços axiais e radiais a que são submetidos. Já os mancais de deslizamento podem ter lubrificação natural ou forçada (ARAUJO, 2011).
- **EIXO:** Está localizado no rotor, é onde se aplica o torque mecânico (ARAUJO, 2011).

### 2.1.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Foi visto anteriormente que existem dois campos magnéticos no motor síncrono. No estator é produzido um campo girante devido ao uso de enrolamentos trifásicos que são igualmente espaçados de  $120^\circ$ , sendo esses enrolamentos alimentados por um conjunto trifásico de correntes CA balanceadas e defasadas de  $120^\circ$ . As correntes CC produzem no rotor um campo magnético de dois polos que gira só quando o rotor está girando. Logo, o campo do rotor tende a alinhar-se com o do estator como se fossem dois ímãs de polaridades contrárias. Por isso o princípio básico do motor síncrono é que o rotor sempre tenta acompanhar o campo girante estatórico, mas nunca consegue se alinhar a ele. Percebe-se então que o motor síncrono não consegue partir sozinho, sendo necessário um motor auxiliar nesse momento (ARAUJO, 2011).

### 2.1.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As vantagens e desvantagens deste motor podem ser observadas no Quadro 1.

**Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens dos Motores Síncronos**

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Mais econômico em elevadas potências e baixas velocidades.	Alto custo de aquisição.
Bom rendimento, mesmo trabalhando com carga parcial.	O enrolamento de campo no rotor necessita de corrente contínua.
Fácil controle do fator de potência por meio da excitação de campo, podendo operar com fator de potência capacitivo, unitário ou indutivo. Assim, além da potência mecânica disponibilizada no eixo, o motor síncrono pode auxiliar na correção do fator de potência.	Cuidados especiais devem ser dedicados ao enrolamento de campo na partida e na sincronização com a rede.
	Fabricação somente sob encomenda.
	Na maioria das vezes, possui elevada inércia, o que dificulta sua colocação em operação.
	Exige mais manutenção do que os motores de indução.
Menor peso (do que o seu equivalente de indução) para baixas velocidades.	Utilizado somente para grandes potências.
Rotação rigorosamente constante com a frequência de alimentação.	Utilização de anéis coletores e escovas.

Fonte: PROCEL (2009)

### 2.1.4 CLASSES DOS MOTORES

Para padronizar os limites de temperatura de isolamento das máquinas elétricas, a NEMA (National Electrical Manufacturers Association), criou classes para o sistema de isolamento. Essas classes servem para identificar a temperatura máxima que cada motor pode trabalhar sem danificá-lo. O NEMA criou três classes, uma para cada valor limite de temperatura. A classe B é para limitar a temperatura em 80°C; a F

limita em 105°C e tem a H que é para um valor limite de 125°C. Se um motor estiver trabalhando numa temperatura superior a da sua classe terá sua vida útil diminuída drasticamente (CHAPMAN, 2013).

### 2.1.5 FATOR DE SERVIÇO

O fator de serviço (FS) é um parâmetro que indica quanto de sobrecarga o motor suporta continuamente acima de sua potência nominal. Por exemplo: um FS = 1,15, significa que o motor suporta 15% de sobrecarga (FRANCHI, 2009).

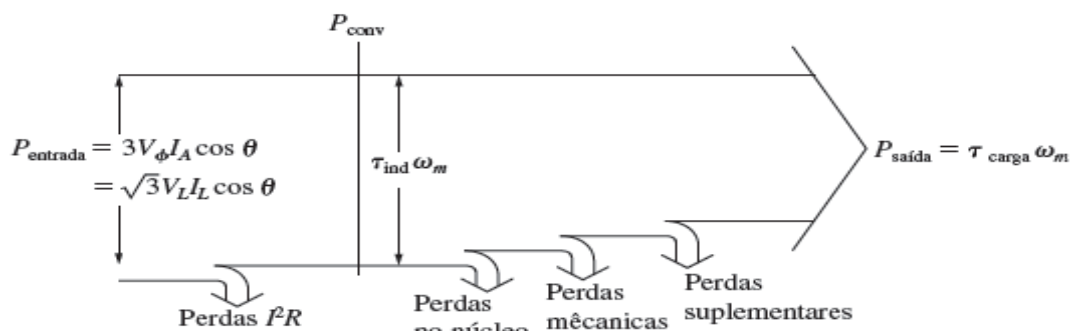
### 2.1.6 RENDIMENTO

O rendimento de um motor síncrono ou de qualquer outra máquina CA é dado pela Eq. (1.1).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (1.1)$$

Onde  $P_{perdas}$  é o somatório de todas as perdas desse motor, que são: perdas elétricas ou no cobre, perdas no núcleo, perdas mecânicas e as suplementares. O diagrama de fluxo de potência de um motor síncrono é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Diagrama de fluxo de potência de um motor síncrono



Fonte: Chapman (2013)

## 2.2 MOTORES ASSÍNCRONOS

Também conhecidos como motores de indução, estes motores giram a uma velocidade muito próxima da velocidade síncrona. Essas máquinas possuem um baixo custo quando comparadas com os motores síncronos e até mesmo os motores CC. Essa vantagem é consequência de sua construção mais simples em comparação com as mencionadas anteriormente. O baixo custo, simplicidade de manutenção e robustez são uns dos motivos que leva essa máquina a ser tão usada no setor industrial. E graças ao grande avanço da eletrônica de potência foi possível desenvolver técnicas de controle de velocidade que permite a esse motor adaptar-se às necessidades de qualquer carga mecânica.

Ao contrário do que acontece no motor síncrono, neste tipo de motor não é necessária uma fonte externa de potência CC para fazê-lo funcionar, pois as tensões são induzidas no rotor. Por isso esse motor também é conhecido como motor de excitação única, pois só o estator é alimentado. Se parar para pensar, pode-se observar que o estator dessa máquina se equivale ao primário de um transformador e o rotor ao secundário. Por isso esse motor chega a ser reconhecido algumas vezes como transformador rotativo (FITZGERALD; KINGSLEY, 2006).

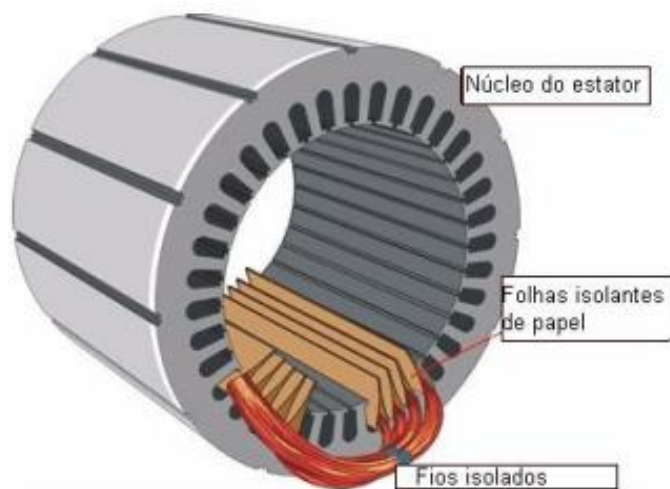
Embora seja possível usar uma máquina de indução como motor ou como gerador, ela apresenta desvantagens como gerador e, por isso, ela é usada como gerador somente em aplicações especiais. Por essa razão, as máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução (CHAPMAN, 2013).

### 2.2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA

- **ESTATOR:** O estator dessa máquina é semelhante ao da máquina estudada anteriormente. Ele é formado por um pacote de lâminas de aço ferro magnético silicioso, formando-se assim o circuito magnético estatórico. Este pacote de lâminas possui o formato de coroa circular com ranhuras em sua parte inferior; as lâminas são revestidas por um verniz isolante. Nas ranhuras encontram-se os condutores do circuito elétrico estatórico. Este circuito é formado por um enrolamento trifásico, onde as bobinas estão defasadas entre

si de  $120^\circ$  e são alimentadas por um sistema trifásico. Para evitar curto-circuito entre as bobinas, os condutores elétricos que as formam são revestidos por um esmalte isolante; estes condutores também são isolados do núcleo magnético por um material plástico isolante que está disposto sobre o interior das ranhuras (GUEDES, 1994). A representação de um estator desse motor pode ser visto na Figura 8.

**Figura 8 - Estator de um motor de indução trifásico**

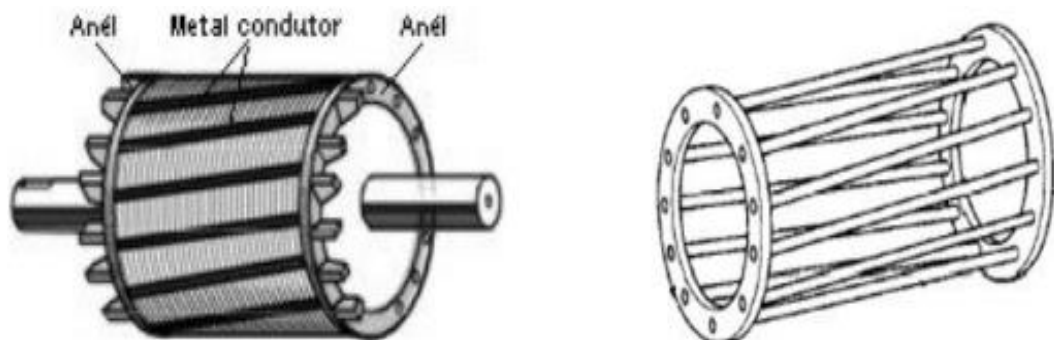


Fonte: Grenzel (2013)

- **ROTOR:** É a parte móvel do motor. Ele é constituído por um núcleo ferromagnético que também é laminado da mesma forma do núcleo estatórico. Assim como no estator, o pacote de lâminas do rotor tem a forma de uma coroa circular, porém, com ranhuras fechadas nas proximidades do seu exterior. A quantidade de ranhuras do rotor é proporcional a do estator para evitar o surgimento de ruídos quando o motor estiver em operação (GUEDES, 1994). O rotor do motor de indução pode ser construído de duas formas, rotor gaiola de esquilo e o bobinado. O rotor gaiola de esquilo é formado por barras (cobre ou alumínio) condutoras colocadas em paralelo ao eixo do rotor e encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor; essas barras são curto-circuitadas em ambas as extremidades por anéis terminais contínuos. Em algumas aplicações as barras são deslocadas de um certo

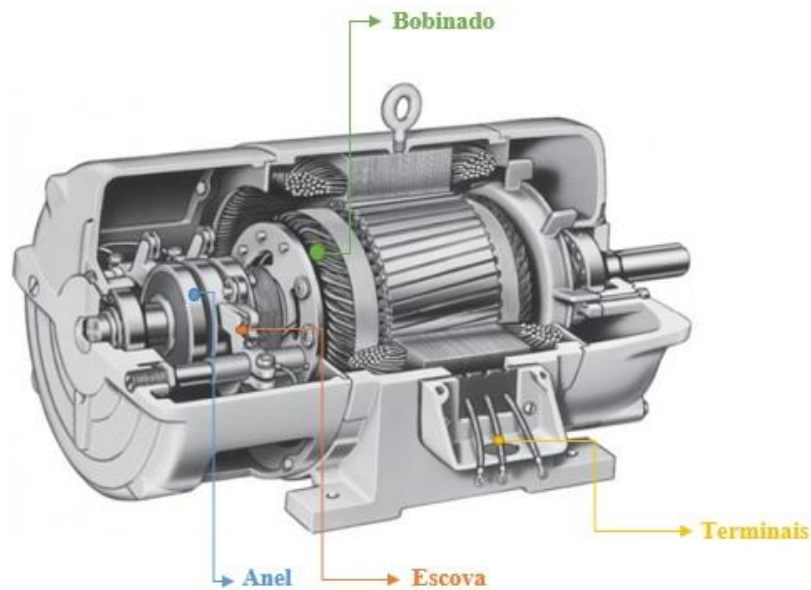
pequeno ângulo em relação ao eixo do rotor para se ter um torque mais uniforme e para reduzir o “zumbido” magnético produzido durante o funcionamento da máquina (KOSOW, 1982). O rotor ganhou esse nome por aparentar com as rodas nas quais os esquilos correm. A Figura 9 ilustra bem o formato desse rotor. O outro tipo de rotor é o rotor bobinado. Assim como no estator, esse rotor possui um conjunto de enrolamentos trifásicos, onde esse conjunto é geralmente ligado em Y e as terminações dos enrolamentos são conectadas aos anéis deslizantes no eixo do rotor. Segundo Chapman (2013), os enrolamentos são curto-circuitado através de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. Esse tipo de rotor traz como vantagem a possibilidade de se poder controlar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor. Porém, apresenta desvantagens para um motor com esse rotor, que são: encarecimento do motor, maior grau de manutenção e menor eficiência. Por isso os motores de rotor bobinado são raramente usados. Este rotor pode ser visto na Figura 10.

**Figura 9 - Estrutura de um rotor tipo gaiola de esquilo**



Fonte: Grenzel (2013)

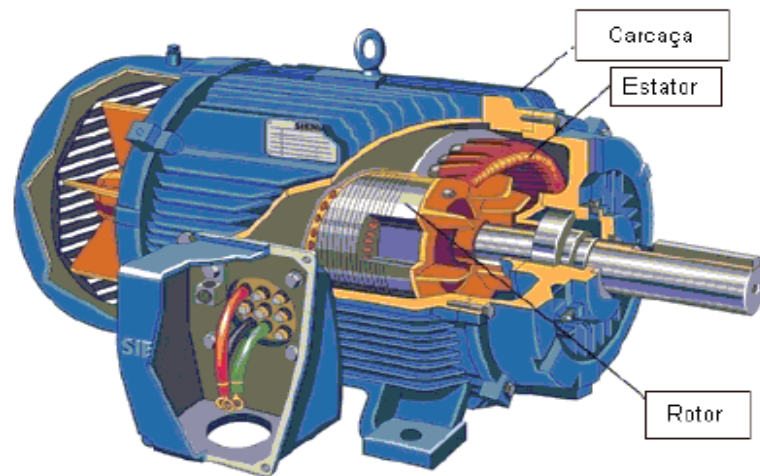
Figura 10 - Estrutura de um rotor tipo bobinado



Fonte: Chapman (2013)

- **ESTRUTURA MECÂNICA:** Na estrutura existem alguns componentes que são essenciais para que o motor opere corretamente e sem nenhum perigo para o meio onde a máquina se encontra e que ao mesmo tempo a protege das agressões ambientais. O eixo é um desses componentes; ele é fabricado em aço e é ligado ao rotor por meio de chavetas ou montagem a quente. É o eixo quem suporta o rotor. A carcaça da máquina tem a função de proteger o estator e o rotor das agressões ambientais (GUEDES, 1994). Um exemplo de carcaça pode ser visto na Figura 11 de um motor de indução trifásico.



**Figura 11 - Motor de indução trifásico**

Fonte: Costa (2011)

### 2.2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um conjunto trifásico de tensões é aplicado no circuito elétrico estatórico, que promove a circulação de um conjunto trifásico de correntes. O que resulta dessa ação é o surgimento de um campo magnético girante no estator  $B_s$ , que gira no gap de ar em sentido anti-horário e a uma velocidade de sincronismo. Esse campo  $B_s$  quando passa pelas barras do rotor induz tensão nelas. Porém, essa tensão só pode ser induzida quando há movimento relativo entre o campo  $B_s$  e o rotor. Por isso existe um limite máximo que o rotor deve girar, pois, se ele estiver girando na velocidade de sincronismo estará estacionário em relação a  $B_s$  e não haverá indução de tensão (só há tensão induzida se houver variação de fluxo magnético). Se isso acontecer o torque induzido será zero porque não existiria corrente e nem campo magnético no rotor. É por esse motivo que um motor de indução não pode ter velocidade igual à de sincronismo (CHAPMAN, 2013).

### 2.2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As vantagens e desvantagens do motor de indução podem ser vistas no Quadro 2.

**Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens dos Motores de Indução**

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Baixo custo de aquisição	Controle de velocidade difícil
Baixo custo de manutenção	Corrente de partida elevada
Torque de partida não nulo	Fator de potência baixo
Robustez	

Fonte: Augusto (2006)

### 2.3 PROBLEMAS OCASIONAIS EM MOTORES CA

Os motores de indução são um dos principais causadores de impactos negativos nos sistemas elétricos, principalmente durante a partida dos mesmos. Esses impactos tornam-se ainda mais acentuados quando esses motores são de potência elevada, pois precisam de uma quantidade considerável de reativos, causando assim, afundamentos nas tensões das redes elétricas. Esses afundamentos chegam a provocar até a queda de tensão do sistema elétrico onde esses motores estão conectados. Também são prejudiciais para os próprios motores de indução, pois, essa variação na tensão de fornecimento provoca alterações em alguns parâmetros mecânicos e elétricos dos motores, fato esse ocorre por causa da relação quadrática entre a tensão aplicada ao motor e sua característica conjugado *versus* escorregamento (DRANKA, 2012).

Ultimamente se tem tido uma preocupação particular em relação à qualidade de energia no nosso país, ainda mais no momento de partida de grandes motores. Essa preocupação é de fato motivada pelo aumento de equipamentos eletrônicos na automatização industrial, equipamentos esses que são cada vez mais sensíveis a variações de tensão (LEBORGNE, 2003).

O uso de motores sobre ou subdimensionados também é uma forma de agredir a rede elétrica, pois prejudica o fator de potência, podendo ocasionar multas nas contas de energia. Além do mais, o sobredimensionamento provoca um grande desperdício de energia e um baixo rendimento do motor. O que resulta em motores ineficientes para os padrões internacionais.

Desligar os motores que não estejam operando sob cargas é essencial para não reduzir de forma significativa o fator de potência da instalação.

### 3 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

Muitos equipamentos eletromagnéticos como transformadores, motores CA, eletroeletrônicos, lâmpadas de descargas, fornos de indução, são responsáveis por poluírem o sistema elétrico com reativos indutivos. Isso porque eles necessitam de energia reativa para magnetizar seus núcleos, energia essa que não realiza trabalho e que provoca a diminuição do fator de potência dos sistemas elétricos (O'MALLEY, 1993). De acordo com Comitê de Distribuição de Energia Elétrica (2004), enquanto a energia ativa é sempre consumida para realizar trabalho, a reativa fica circulando entre as cargas e a fonte de alimentação, ocupando um espaço nas redes elétricas que deveria ser aproveitado para transmitir mais energia ativa. Por isso que se usam bancos capacitivos ou outras técnicas para fornecer os reativos necessários a essas cargas. Pois além de proporcionar economia e redução de multas por ultrapassar os limites de FP exigidos pelas concessionárias, também otimiza o uso da energia elétrica no país.

O fator de potência é o indicativo do uso eficiente da energia elétrica, logo, um FP baixo significa um mal aproveitamento energético, enquanto que um FP elevado é sinônimo de uma alta eficiência energética. A definição matemática do FP pode ser obtida através do triângulo de potência que é apresentado na Figura 12 logo abaixo. O FP é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente, ou seja, é o cosseno do ângulo  $\theta$ . Pode-se observar na imagem abaixo que quanto menor o ângulo  $\theta$ , menor será a componente de potência reativa e mais ainda o FP se aproximará de seu valor unitário.

Figura 12 - Triângulo de potência



Fonte: Própria

### 3.1 ENERGIA REATIVA

A energia reativa, medida em kVARh, é a energia responsável por criar e manter o campo magnético, campo este que é fundamental para o funcionamento das máquinas girantes como motor de indução e transformadores. Esse campo magnético é formado quando a corrente está passando pelos enrolamentos dessas máquinas. Ao serem energizado em corrente alternada, esses equipamentos armazenam energia em forma de campo magnético que tende a se opor à variação da corrente, fazendo com que haja um atraso da corrente em relação à tensão.

Apesar de essencial para o funcionamento de alguns equipamentos, a energia reativa indutiva deve ser limitada a valores próximos de 1, pois o excesso dela exige condutores de maior seção e transformadores de maior capacidade em kVA. Essa energia também pode provocar quedas de tensão, perdas por aquecimento, sobrecargas nas subestações e nas linhas de transmissão e distribuição. Por isso é importante instalar banco de capacitores próximos as cargas que absorvem esse tipo de reativo, limitando-se assim, a circulação dos reativos indutivos aos locais onde eles são essenciais.

Desligar motores que estão trabalhando a vazio e redimensionar os que estão superdimensionados são medidas simples que podem melhorar o FP, porém quase que geralmente não são suficientes para corrigir a valores padrões; por isso se faz necessário o uso de banco de capacitores. Mas alguns cuidados se devem ter com a instalação de bancos de capacitores, como por exemplo, eles devem ser projetados para liberar o reativo em conformidade com a quantidade de motores e transformadores que estejam em funcionamento para não haver um excesso de reativo capacitivo, pois pode provocar efeitos adversos no sistema elétrico que segundo Santos (2009), são: instabilidade de tensão, perda de sincronismo de máquinas elétricas, sobreaquecimento de geradores e pernas na transmissão.

## 3.2 DISPOSITIVOS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

O uso de bancos capacitivos não é a única forma de realizar a compensação de reativos indutivos; outros métodos como o uso de motores síncronos sobre-excitados e dos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) são geralmente usados; sendo que os bancos de capacitores e os motores síncronos sobre-excitados são usados para compensar cargas locais, enquanto que os FACTS são usados em linhas de transmissão.

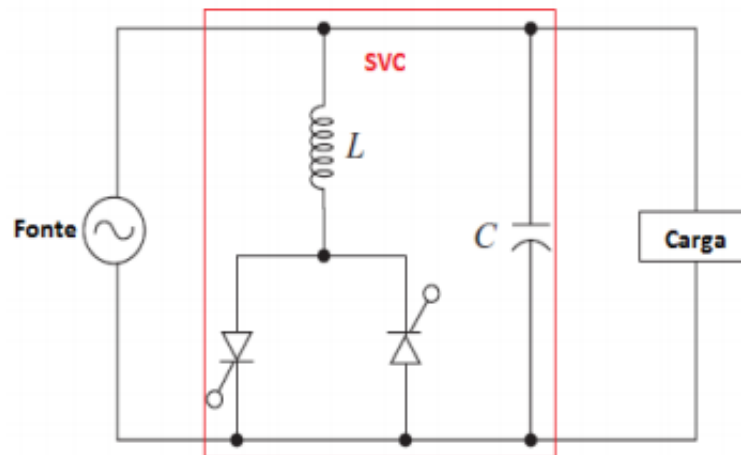
### 3.2.1 FACTS

Os FACTS são dispositivos usados nas redes de transmissão para realizar a compensação de reativos. De acordo com Erche (1992), os principais benefícios que esses dispositivos geram para a transmissão, são: ampliar a capacidade de transmissão das linhas, operar linhas em paralelo, mesmo que sejam de diferentes capacidades, ajustar de forma rápida o suporte de reativos durante a operação, estabilizar oscilações de tensão e ângulo, controlar o fluxo de potência caminhos mais eficientes e fazer a integração entre sistemas CC e CA de forma a aproveitar as vantagens de ambos. O uso da aplicação dessa tecnologia pode ser visto na interligação norte-sul traz energia da Usina Hidrelétrica de – Tucuruí para a região sudeste. Onde através da técnica de controle da reatância em série é feito o amortecimento das oscilações que ocorrem quando a geração em Tucuruí reduz (POMILIO; DECKMANN, 2009). Alguns desses dispositivos serão apresentados neste trabalho.

- **COMPENSADOR SHUNT CONTROLADO POR TIRISTOR (SVC – STATIC VOLTAGE CONTROLLER):** Este compensador é formado por uma associação entre reatores shunt com capacitores fixos ou chaveados a tiristores, onde os reatores são controlados por tiristores. A função desse dispositivo é controlar o nível de tensão e/ou o FP da carga através da injeção

de potência reativa (WATANABE, 1998). Na Figura 13 pode-se observar um diagrama elétrico contendo um SVC.

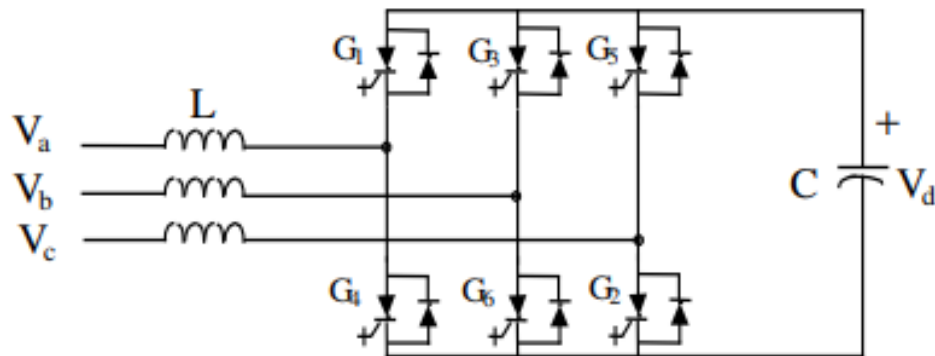
Figura 13 - Diagrama elétrico de um SVC



Fonte: Hart (2011)

- **REGULADOR DE TENSÃO COM INVERSOR DE TENSÃO (STATCOM):**  
 Esse tipo de FACT tem a mesma função do SVC, porém sua construção é a partir de interruptores eletrônicos controláveis, ou seja, usam-se os IGBT, IGCT e GTO. Os STATCOMs são conversores CC/CA cuja função é injetar reativos na rede elétrica através de capacitores para controlar o nível de tensão da mesma. A quantidade de reativos que são injetados está diretamente relacionada com a capacidade de corrente dos interruptores, enquanto que os capacitores garantem a estabilidade da tensão (PASERBA, 2007), (PASERBA, 2009) e (CHONG; HUANG; BARAN; BHATTACHARYA; LITZENBERGER, ANDERSON; JOHNSON; EDRIS, 2008). Um exemplo desse tipo de FACT é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Diagrama elétrico de um STATCOM



Fonte: Pomilio; Deckmann (2009)

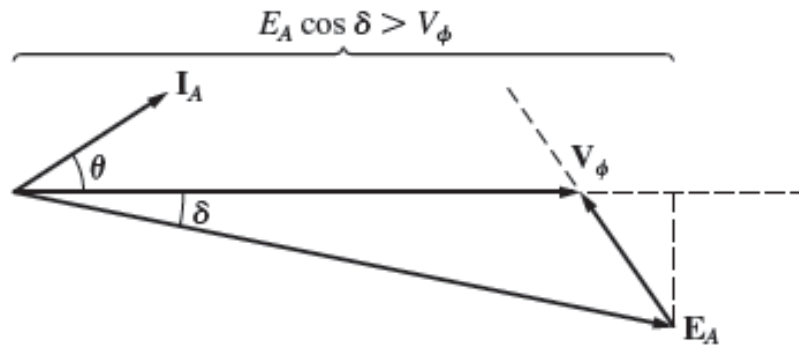
### 3.2.2 COMPENSADOR SÍNCRONO

O motor síncrono sobre-excitado é uma alternativa ao uso de bancos capacitivos na correção do fator de potência. Na indústria, cargas que aceitam um motor de velocidade constante são acionadas por esses motores já na intenção de aumentar o FP da instalação elétrica industrial. Mesmo que um motor síncrono seja mais caro que um de indução, ainda sim é vantajoso o uso do primeiro de forma superexcitado para realizar a compensação de reativos. Porém alguns cuidados se devem ter na operação de um compensador síncrono, pois ele requer uma corrente de campo e fluxo elevados, causando-se assim, um aquecimento considerável no rotor (CHAPMAN, 2013).

O motor síncrono é levado a gerar reativos capacitivos quando a projeção do fasor da tensão gerada interna  $E_A$  sobre o fasor da tensão real de fase  $V_\phi$  é maior do que o próprio  $V_\phi$ . Nesse momento a corrente de campo é bastante grande, daí o nome motor sobre-excitado (CHAPMAN, 2013). O diagrama fasorial desta representação está ilustrado na Figura 15.



Figura 15 - Diagrama fasorial de um motor síncrono sobre-excitado



Fonte: Chapman (2013)

### 3.2.3 BANCO DE CAPACITORES

Os capacitores são dispositivos que armazenam energia na forma de campo elétrico. São formados por dois materiais que estão isolados entre si por um material isolante que pode ser cerâmico, de mica, eletrolítico, de papel, vidro e de filme plástico.

Os bancos de capacitores são de baixo custo, fáceis de serem instalados e de realizar a operação deles. Existem dois tipos de bancos capacitivos, os fixos (não possuem nenhum tipo de controle, sendo assim os capacitores ficam conectados ao sistema independente das variações de reativos indutivos) e os automáticos que segundo Cena (2012), possuem um controlador digital para inserir ou retirar carga do sistema de acordo com o fator de potência.

Os bancos de capacitores são muito usados em barras de transmissão para compensação de reativos. Eles são conectados tanto em paralelo como em série. A ligação em paralelo tem como objetivo compensar as perdas da transmissão e trabalhar em níveis seguros de tensão durante o carregamento. Porém, como os reativos que são gerados por um banco capacitivo são proporcionais ao quadrado da tensão que é aplicada sobre o mesmo, logo, no momento de uma queda de tensão na transmissão, a capacidade de reativos será insuficiente, sendo essa a única desvantagem desse tipo de ligação. Já a ligação em série é usada para corrigir o FP através da compensação de reativos nas linhas de transmissão (GOMES; MOREIRA; BARBA; BEMINI; VOLKERS, 2018).

A vantagem do uso de bancos capacitivos em relação aos FACTs em sistemas de transmissão é o custo benefício, pois os primeiros são bem mais baratos. Porém, possuem como desvantagem em relação aos FACTs o fato de serem menos eficientes por não conseguirem manter o nível de tensão desejado durante uma queda de tensão (GOMES; MOREIRA; BARBA; BEMINI; VOLKERS, 2018).

### 3.3 CÁLCULO DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Segundo Duailibe (2000), a instalação de banco de capacitor é a ferramenta mais viável financeiramente e tecnicamente para se corrigir fator de potência de uma instalação.

A metodologia desse cálculo será feita com valores simultâneos e de acordo com os seguintes passos:

- 1) É feito o cálculo do fator de potência, utilizando as potências ativa e aparente do triângulo de potências da Figura 16. O cálculo é obtido através da Eq (1.2).

$$\cos\phi = FP = \frac{P}{S} \quad (1.2)$$

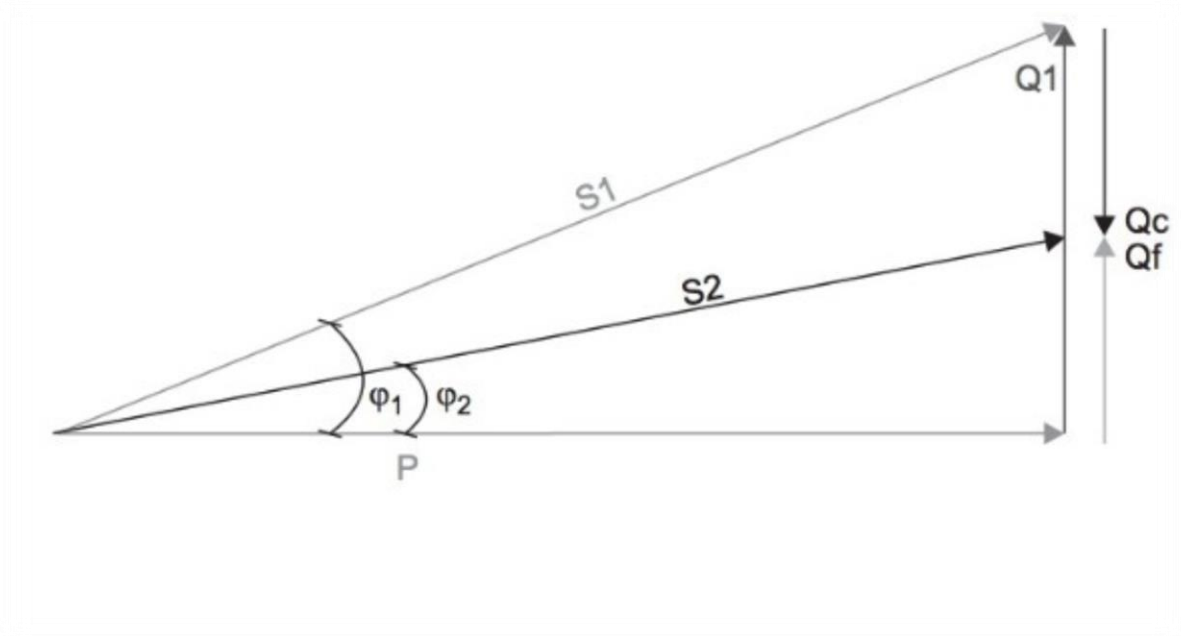
Onde:

P = Potência Ativa (KW)

S1 = Potência Aparente (KVA)

Q1 = Potência Reativa (KVAr)

Figura 16 - Triângulo de Potências



Fonte: Gedra (2014).

- 2) Calculando o fator de potência e o mesmo foi abaixo do exigido pela ANEEL de 0,92 de acordo com a RN 414/2010, art 95, calcula-se a potência reativa capacitiva usando o triângulo de potências e o seguinte equacionamento:

$$Q = P \times \operatorname{tg} \phi_1 \quad (1.3)$$

$$Q_f = P \times \operatorname{tg} \phi_2 \quad (1.4)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_f = P \times (\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2) \quad (1.5)$$

- 3) Obtendo o valor de  $Q_c$ , calcula-se um valor de  $C$ , que será a capacitância em Faraday, com fator de potência ideal de 0,92 na equação, que consequentemente trará o valor do banco:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f(V_L)^2} \quad (1.6)$$

Onde:

$C$  = Capacitância (F)

$f$  = Frequência (Hz)

$V_L$  = Tensão de linha (V)

Para deixar mais claro, será apresentado um problema proposto onde será calculado a potência do banco de capacitores que visará corrigir o fator de potência:

Um referido sistema elétrico apresentava uma potência de  $P = 470 \text{ KW}$ , um  $FP = 0,87$  e  $V_L = 220 \text{ V}$ .

Dimensionando a potência do banco com os cálculos a seguir:

- 1) Calculando a potência reativa real do banco:

$$\cos^{-1}0,87 = 29,54^\circ = \phi \quad (1.7)$$

$$\cos^{-1}0,92 = 23,07^\circ = \phi_1 \quad (1.8)$$

$$Q_c = 470 \times (tg \phi_1 - tg \phi_2) = 66,16 \quad (1.9)$$

Logo,  $Q_c = 66,16 \text{ KVAr}$ .

- 2) Agora, calculando a capacitância do banco:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V_L^2} = 3,625 \text{ mF} \quad (1.10)$$

Portanto, como foi encontrado uma potência para o banco de capacitor  $Q_c = 66,14 \text{ KVAr}$ , a instalação de um banco com capacitância de  $3,625 \text{ mF}$  atende a respectiva carga corrigindo seu  $FP$  e conseqüentemente reduzindo sua corrente elétrica trazendo melhorias para o sistema.

## 4 BANCADA DIDÁTICA: DIMENSIONAMENTO DE BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO

Inspirados na resolução citada abaixo, desenvolveu-se um projeto de estudos práticos sobre banco de capacitores como um modelo pedagógico visando unir teoria e prática durante as aulas do curso de Engenharia Elétrica.

Art. 3º O Curso de Graduação em Engenharia tem como perfil do formando egresso/profissional o engenheiro, com formação generalista, humanista, crítica e reflexiva, capacitado a absorver e desenvolver novas tecnologias, estimulando a sua atuação crítica e criativa na identificação e resolução de problemas, considerando seus aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais e culturais, com visão ética e humanística, em atendimento às demandas da sociedade (RESOLUÇÃO CNE/CES 11, DE 11 DE MARÇO DE 2002. Institui Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia).

A bancada didática servirá aos presentes e futuros alunos desta IES, com o intuito de desenvolver estudos práticos sobre o tema proposto, uma vez que o desenvolvimento de competências e habilidades e interação teoria/prática são essenciais à formação do engenheiro. Espera-se também contribuir para minimizar as dificuldades que o aluno encontra em aplicar os conceitos teóricos na prática da engenharia e inter-relacionar conteúdo das diversas disciplinas da área.

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para execução dos experimentos utilizando a bancada didática, utiliza-se os componentes elétricos citados abaixo:

- **MULTÍMETRO DIGITAL:** Para a aferição das tensões e correntes do sistema foi utilizado o multímetro digital – EM 6000 do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP. Na figura 17 é possível ver o equipamento utilizado.

Figura 17 - Multímetro digital EM 6000



Fonte: Própria

- **TACÔMETRO:** O tacômetro TDR - 100 do Laboratório de Conversão e Máquinas elétricas, da UNIFAP foi utilizado para auxiliar na verificação da frequência e rotação das máquinas, como pode ser visto na figura 18.

Figura 18 - Tacômetro TDR - 100



Fonte: Própria

- **DOIS CONVERSORES CA-CC:** O conversor CA-CC foi utilizado para controlar a variação da corrente de campo da máquina. A figura abaixo ilustra o conversor CA-CC utilizado no experimento.

**Figura 19 - Conversor CA-CC**



Fonte: Própria

- **DOIS REOSTATOS:** O reostato da linha didática Educare de  $50 \Omega$  pertencente ao Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP foi utilizado para variação da resistência do circuito. Na figura 20 pode-se observar o reostato utilizado.

**Figura 20 - Reostato**



Fonte: Própria

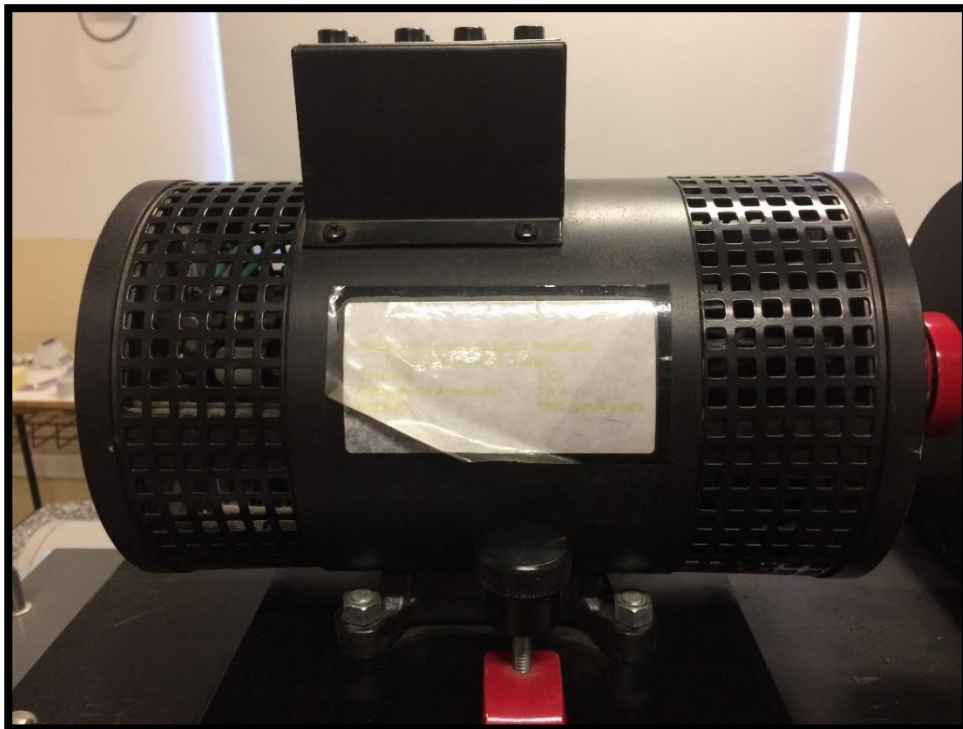
- **DOIS MOTORES ASSÍNCRONOS:** Para afins de testes realizados no laboratório, foi utilizado dois motores assíncronos do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, trabalhando como fonte de força motriz, que pode ser visto na figura 21. Os dados da máquina estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1 - Dados da placa da máquina assíncrona**

<b>POTÊNCIA</b>	<b>1 CV</b>
<b>TENSÃO (V)</b>	<b>220</b>
<b>VELOCIDADE</b>	<b>1800 rpm</b>
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>60 Hz</b>
<b>LIGAÇÃO</b>	<b>Triângulo</b>
<b>Nº POLOS</b>	<b>4</b>
<b>Nº ANÉIS</b>	<b>3</b>

Fonte: Elaboração Própria

**Figura 21 - Motor assíncrono**



Fonte: Própria



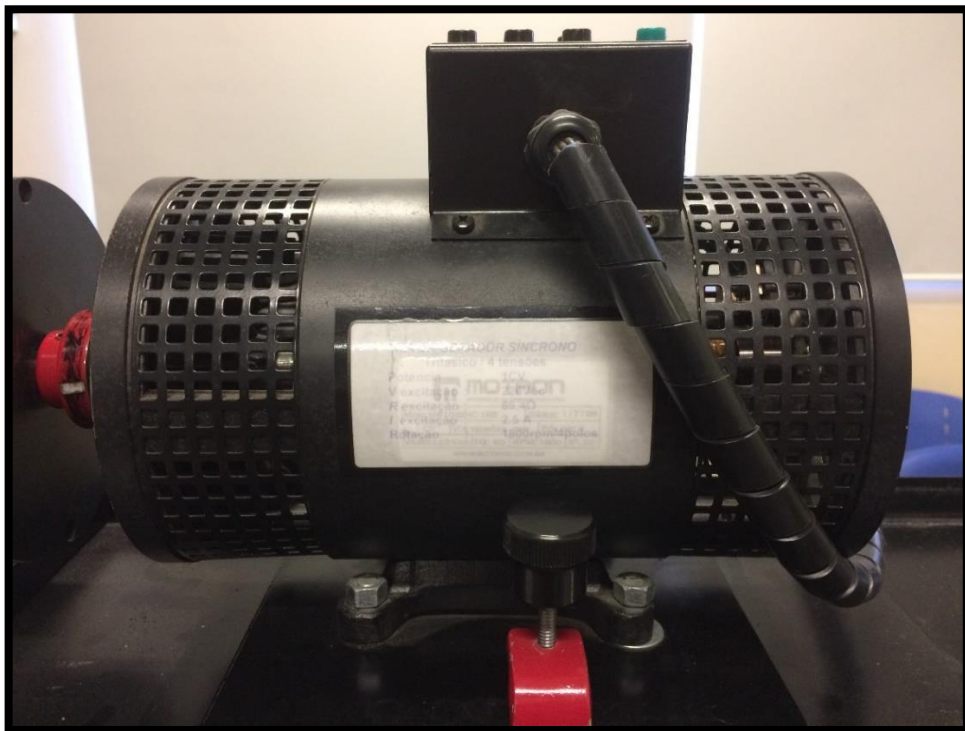
- **DOIS GERADORES SÍNCRONOS:** Para afins de testes realizados no laboratório, foi utilizado dois geradores síncronos do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, trabalhando em sincronismos para alimentar a carga, um desses geradores pode ser observado na figura 22. Os dados da máquina estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Dados da placa do gerador síncrono**

<b>POTÊNCIA</b>	<b>1 CV</b>
<b>TENSÃO (V)</b>	<b>380</b>
<b>VELOCIDADE</b>	<b>1800 rpm</b>
<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>60 Hz</b>
<b>LIGAÇÃO</b>	<b>Estrela</b>
<b>Nº POLOS</b>	<b>4</b>
<b>V DE EXCITAÇÃO</b>	<b>220 Vcc</b>
<b>R DE EXCITAÇÃO</b>	<b>86,4 Ω</b>
<b>I DE EXCITAÇÃO</b>	<b>2,5 A</b>

Fonte: Elaboração Própria

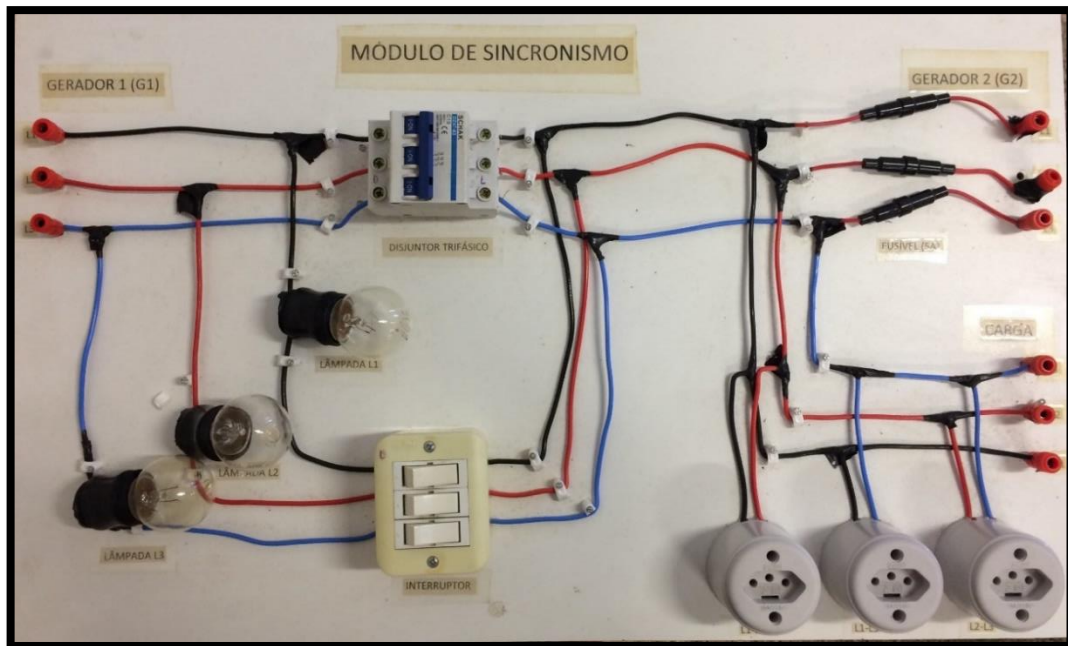
**Figura 22 - Gerador síncrono**



Fonte: Própria

- **MÓDULO DE SINCRONISMO:** Para realizar o sincronismo entre os dois geradores, foi utilizado o módulo de sincronismo do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP. A figura abaixo mostra o módulo de sincronismo utilizado.

Figura 23 - Módulo de sincronismo



Fonte: Própria

- **MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO DE GAIOLA:** Para afins de testes realizados no laboratório, foi utilizado um motor elétrico de indução trifásico de gaiola do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, trabalhando como carga do sistema. Os dados do motor de indução estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados da placa do motor de indução trifásico de gaiola

POTÊNCIA	1 CV
TENSÃO (V)	220
VELOCIDADE	3460 rpm
FREQUÊNCIA	60 Hz
LIGAÇÃO	Triângulo
COS $\phi$	0,86
RENDIMENTO	73,5 %

Fonte: Elaboração Própria

Na figura abaixo pode ser visto o motor de indução trifásico de gaiola usado na execução do experimento.

**Figura 24 - Motor de indução trifásico de gaiola**



Fonte: Própria

- **FLUKE 43B:** Para realizar as medições, foi utilizado um analisador de qualidade de energia Fluke 43B, do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP. A figura 25 ilustra o equipamento empregado.

**Figura 25 - Analisador de qualidade de energia Fluke 43B**

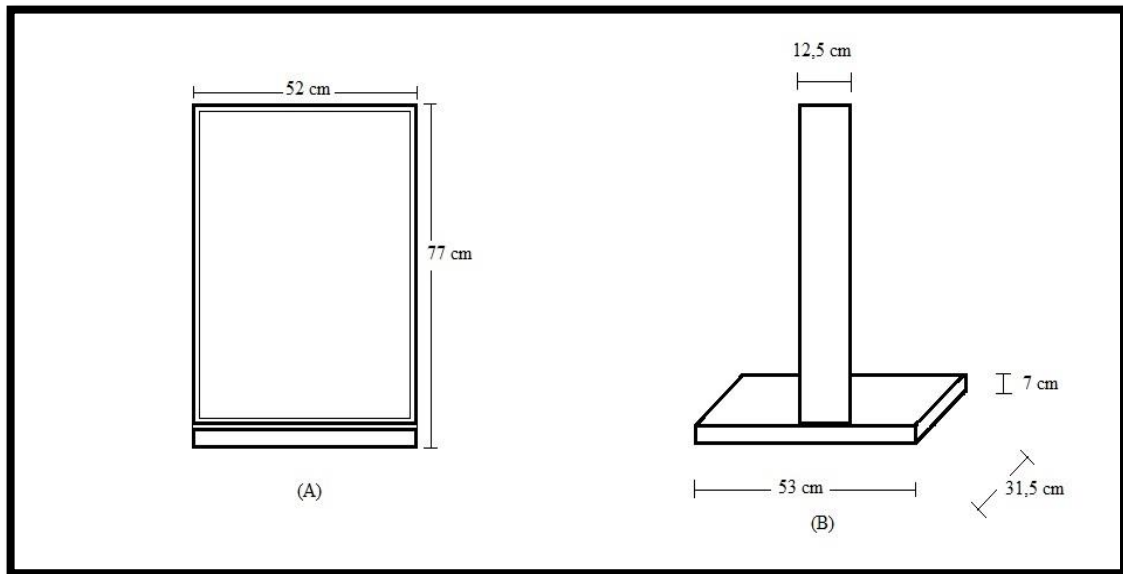


Fonte: Própria

➤ **BANCADA DIDÁTICA COM BANCO DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE UM MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO:**

A bancada didática é formada por uma estrutura de madeira no formato retangular e uma tampa de acrílico, possuindo 70 cm de altura x 52 cm de comprimento x 12,5 cm de largura e uma base de 7 cm de altura x 53 cm de comprimento x 31,5 cm de largura, como ilustra a Figura 26. O material escolhido para a confecção é leve e compacto, facilitando o seu manuseio e assim contribuindo consideravelmente para sua operacionalização.

Figura 26 - Vista frontal (A) e vista lateral da bancada didática (B)



Fonte: Própria

Para a fixação dos dois disjuntores foi utilizado dois trilhos DIN de 35 mm e para a fixação dos nove capacitores foi utilizado nove abraçadeiras tipo D com cunha de 1.1/4" como é mostrado na figura 27.

**Figura 27 - Bancada didática com banco de capacitores para correção do fator de potência de um motor trifásico**



Fonte: Própria

Observa-se que a bancada oferece a capacidade de manusear os três bancos de capacitores livremente, visto que as configurações do circuito elétrico estão em aberto, podendo ser alteradas conforme os experimentos preestabelecidos.

#### **4.1.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES ELÉTRICOS USADOS NA BANCADA DIDÁTICA**

Esses componentes fazem parte da estrutura da bancada. A Tabela 4 mostra o quantitativo dos principais dispositivos utilizados na confecção da bancada didática.

Tabela 4 - Quantitativo dos equipamentos

PRODUTO	QUANTIDADE
Disjuntor tripolar SCHAK DZ47-63	1
Disjuntor motor tripolar SCHNEIDER GV2ME08	1
Capacitor EOS 10 $\mu$ F CBB65	3
Capacitor EOS 7 $\mu$ F CBB65	3
Capacitor EOS 5 $\mu$ F CBB65	3
Borne vermelho	15
Borne preto	15

Fonte: Elaboração Própria

Após a apresentação dos principais componentes que compõem a bancada didática, a seguir será feita a descrição detalhada dos mesmos.

- **CAPACITORES:** Os capacitores são equipamentos capazes de acumular eletricidade. São constituídos basicamente de duas placas condutoras postas frontalmente em paralelo e separadas por um meio qualquer isolante, que pode ser o ar, papel, plástico etc. Nas faces externas dessas placas liga-se uma fonte de tensão que gera um campo eletrostático no espaço compreendido entre as duas placas (MAMEDE, 2007). A figura 28 mostra os capacitores que foram utilizados na bancada didática.

Figura 28 - Capacitores de 10  $\mu$ F, 7 $\mu$ F, 5 $\mu$ F, respectivamente



Fonte: Própria

Na tabela 5 possuem as características dos capacitores EOS utilizados no experimento.

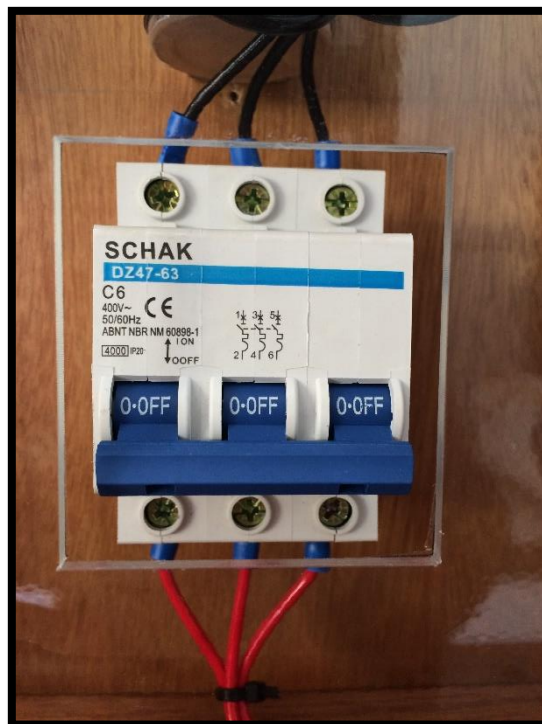
**Tabela 5 - Características dos capacitores**

CAPACITOR EOS	
Capacitância	10 $\mu\text{F}$ , 7 $\mu\text{F}$ , 5 $\mu\text{F}$
Tensão	380 V
Frequência	50/60 Hz

Fonte: Elaboração Própria

- **DISJUNTOR TRIPOLAR:** O disjuntor é um dispositivo de segurança para os circuitos elétricos, contra sobrecargas ou curtos-circuitos, também tem a função de interromper a passagem da corrente elétrica e serve como dispositivo de manobra. Na figura 29, temos em destaque o disjuntor utilizado na bancada didática.

**Figura 29 - Disjuntor tripolar**



Fonte: Própria



Abaixo temos a tabela 6 com as características nominais do disjuntor tripolar SCHARK DZ47-63.

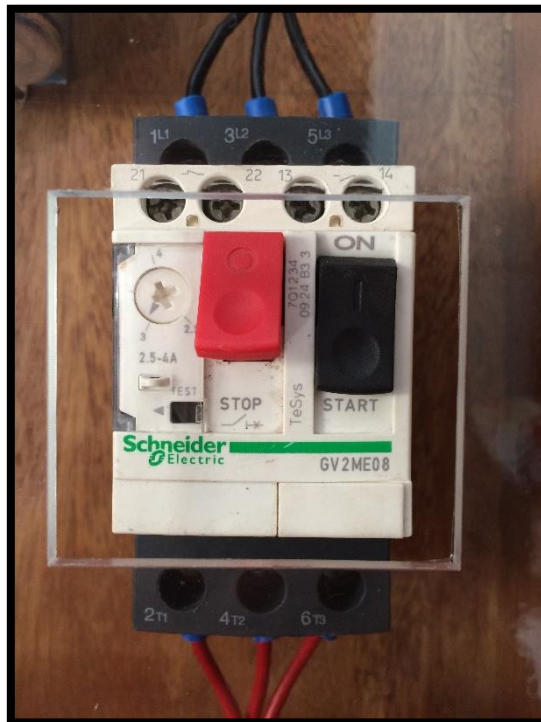
**Tabela 6 - Características nominais do disjuntor tripolar**

Disjuntor tripolar SCHAK DZ47-63	
Corrente	6 A
Tensão de trabalho	400 V
Frequência	50/60 Hz
Tecnologia de disparo	Termomagnético

Fonte: Elaboração Própria

- **DISJUNTOR MOTOR TRIPOLAR:** São dispositivos muito utilizados em projetos elétricos de máquinas e acionamentos industriais. O disjuntor motor disponibiliza o ajuste de corrente, possibilitando uma regulação termomagnética mais precisa para a proteção do motor. A figura 30 ilustra o modelo do disjuntor motor utilizado.

**Figura 30 - Disjuntor motor tripolar**



Fonte: Própria

Logo abaixo, tem-se a tabela 7 com as características nominais do disjuntor motor tripolar.

**Tabela 7 - Características nominais do disjuntor motor tripolar**

<b>Disjuntor motor tripolar SCHNEIDER GV2ME08</b>	
<b>Corrente</b>	<b>2.5 - 4 A</b>
<b>Tensão de trabalho</b>	<b>400 V</b>
<b>Frequência</b>	<b>50/60 Hz</b>
<b>Tecnologia de disparo</b>	<b>Termomagnético</b>

Fonte: Elaboração Própria

- **BORNE:** Peça metálica do circuito elétrico a qual se liga a um fio para estabelecer ligação com o circuito externo. A figura 31 apresenta um borne.

**Figura 31 - Borne vermelho/preto**



Fonte: Própria

Na tabela 8 possui algumas das suas características.

**Tabela 8 - Características do borne**

<b>Borne</b>	
<b>Corrente</b>	<b>25 A</b>
<b>Tamanho</b>	<b>4 mm</b>
<b>Resistência de isolamento</b>	<b>&gt; 300.000 M ohm a 500 Vcc</b>

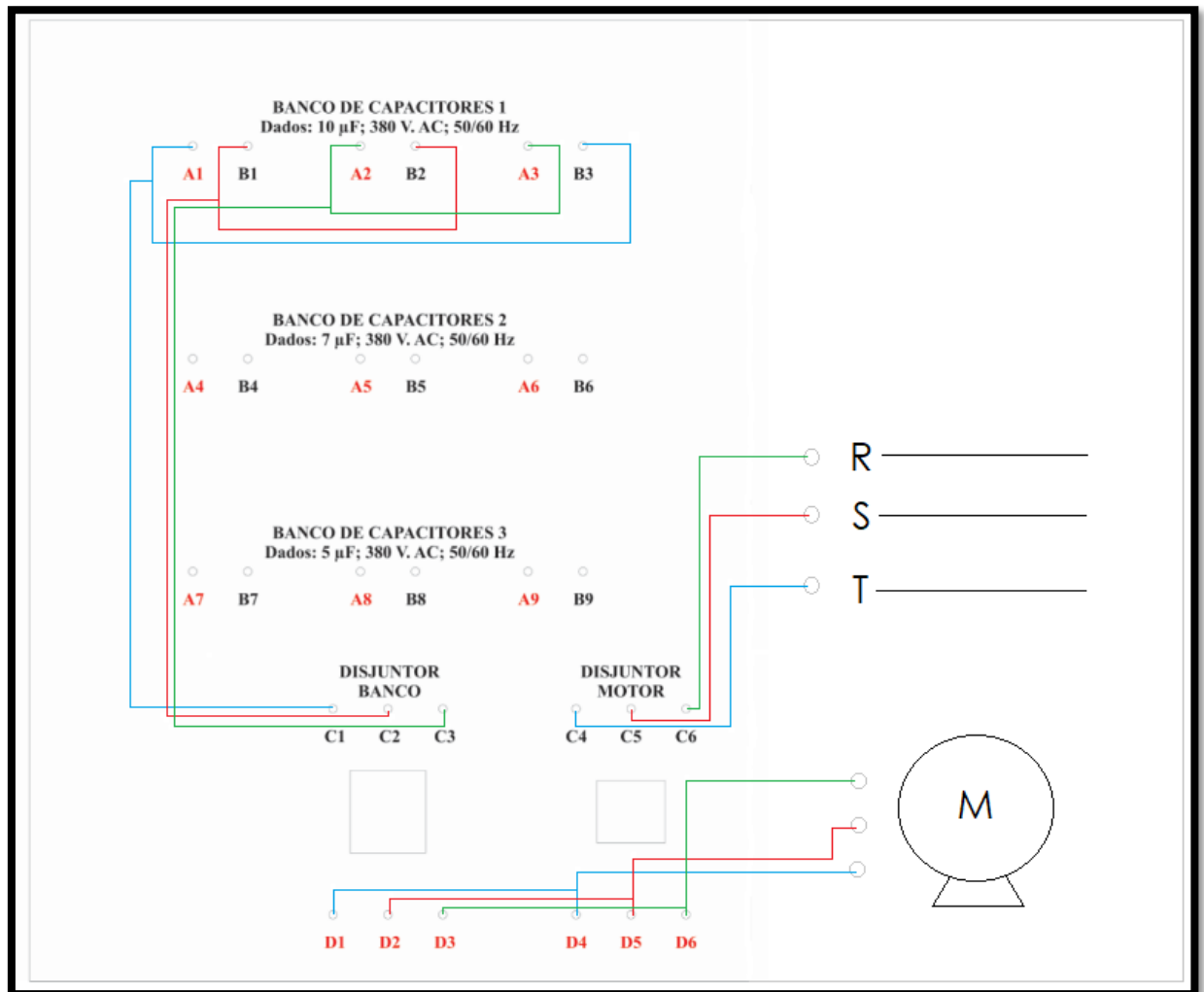
Fonte: Elaboração Própria

## 4.2 RESULTADOS

Confeccionada a banca, iniciou-se os experimentos. Para a alimentação do motor elétrico trifásico de 1,0 CV de 220V, utilizou-se os 2 geradores síncronos com seu fechamento em estrela, fornecendo uma tensão máxima de até 380 V, porém para o experimento a tensão utilizada foi de 220 V para ter um melhor controle das máquinas, visto que toda essa regulação foi feita manualmente utilizando o conversor CA-CC variando a corrente de campo da máquina. Os geradores foram acoplados aos outros 2 motores assíncronos de 220 V, onde foram utilizados como fonte de força motriz do sistema, os mesmos estavam ligados em delta, a uma rotação de 1650 RPM fornecendo ao sistema uma frequência de 55 Hz, essa frequência era ajustada com o auxílio do reostato. Para a sincronização dos dois grupos geradores, foi utilizado o modulo de sincronismo. Após estarem sincronizados, foi inserido a carga no sistema com seu fechamento em Delta. A partir de então foram feitos os testes com os três bancos de capacitores que compõem a bancada didática conectados em paralelo com a carga. Os testes eram realizados um por vez, quando a carga era inserida no sistema havia uma queda na tensão e frequência, daí todos os ajustes eram feitos para manter a tensão em 220 V e a frequência em 55 Hz. Esses parâmetros foram escolhidos pelo fato de se está trabalhando com uma margem de segurança para os equipamentos e também por serem os valores que mais se enquadraram no decorrer do trabalho, haja vista que toda regulação era feita manualmente.

Para o banco de capacitores da bancada didática foram utilizados 9 capacitores com seus fechamentos em Delta, divididos em três bancos, o primeiro teste foi realizado com o banco de capacitores 1, que possui 3 capacitores de  $10\mu F$  e o seu fechamento foi realizado conforme a figura abaixo.

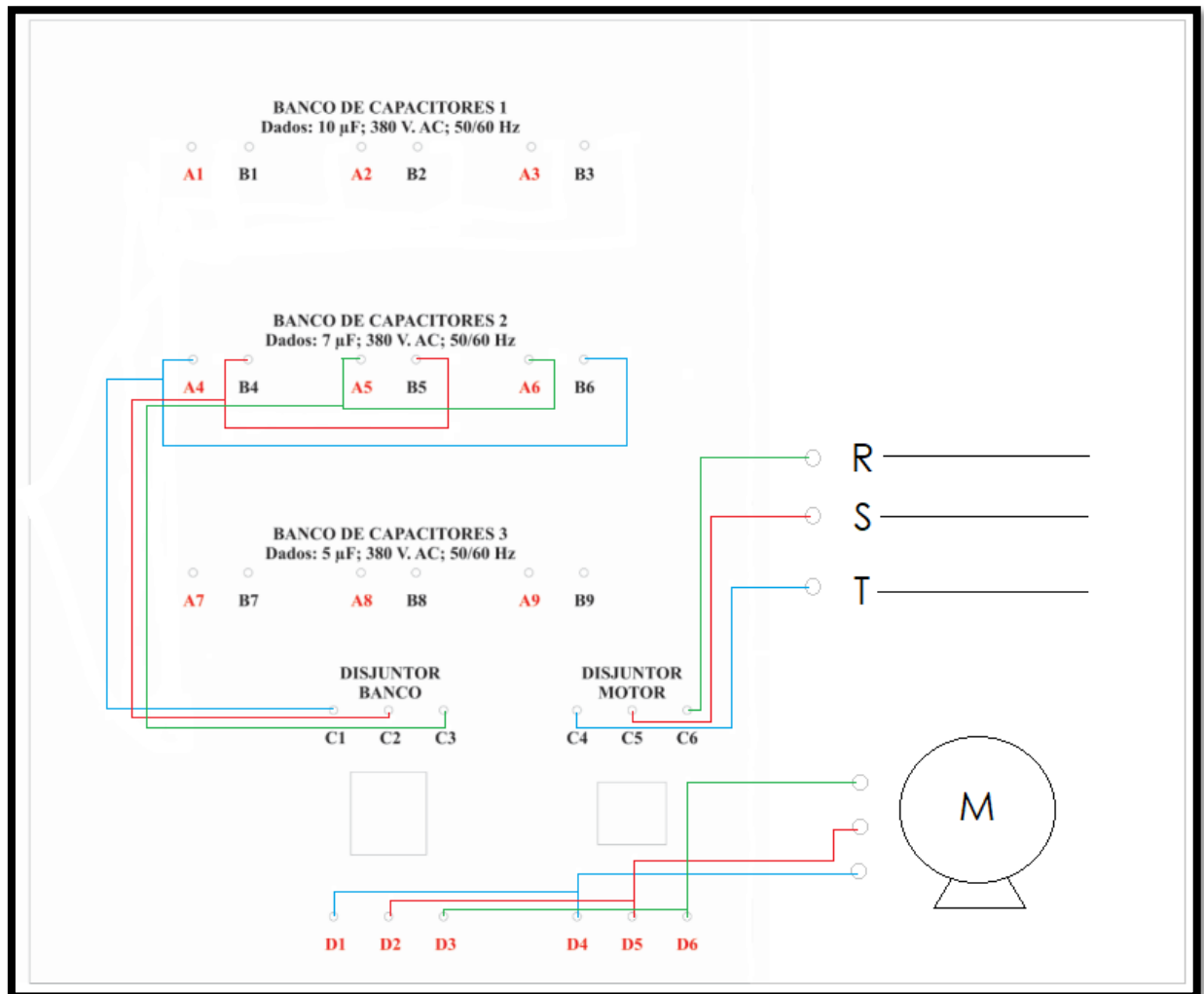
Figura 32 - Conexão banco 1



Fonte: Própria

O segundo teste foi realizado com o banco de capacitores 2, que possui 3 capacitores de 7  $\mu\text{F}$ , a figura 33 indica como foi feita a ligação.

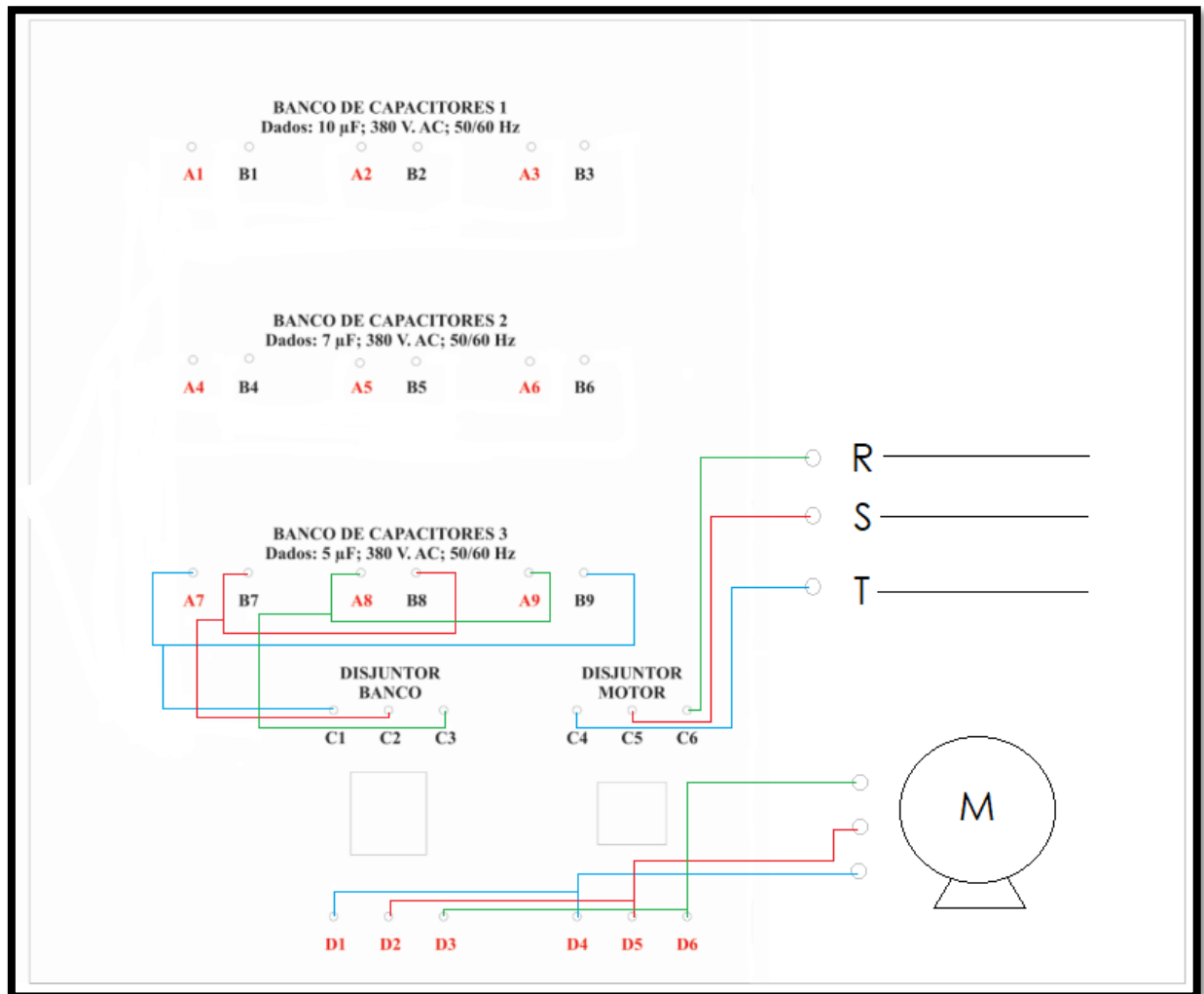
Figura 33 - Conexão banco 2



Fonte: Própria

E o terceiro experimento foi realizado com o banco de capacitores 3, que possui 3 capacitores de  $5 \mu\text{F}$  e a figura 34 ilustra como foi realizado o esquema de ligação para a realização do teste.

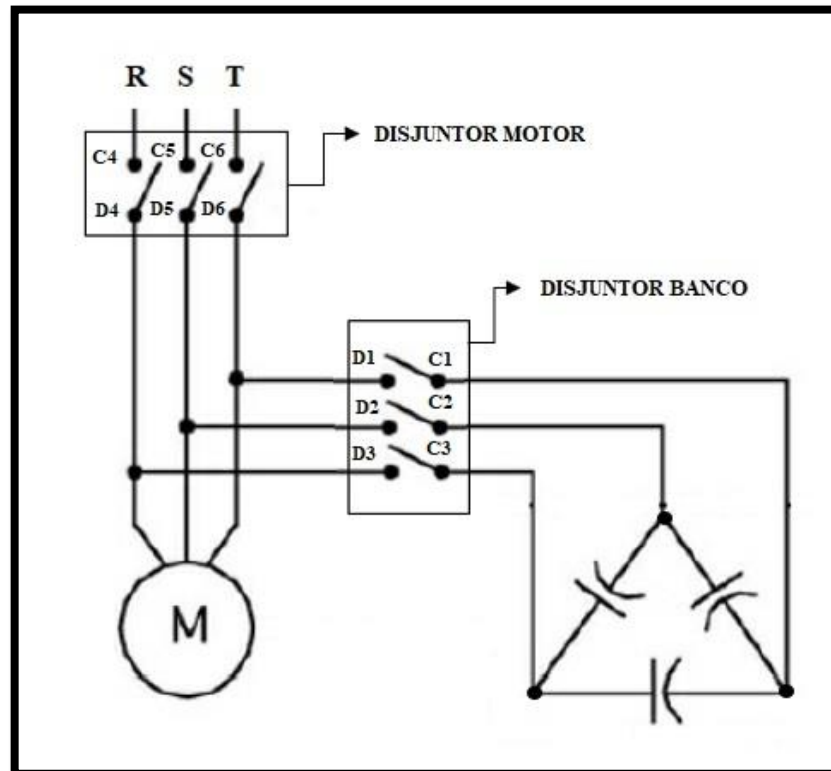
Figura 34 - Conexão banco 3



Fonte: Própria

Para a proteção do motor, foi utilizado um disjuntor motor de 3 pólos termomagnético. E para os bancos, um disjuntor termomagnético de 3 pólos. Os disjuntores também foram utilizados como chave de manobra para acionar tanto o motor quanto os bancos de capacitores. A estrutura da bancada é toda em madeira, com uma placa de acrílico isolando os capacitores. Na figura abaixo, é possível ver de maneira geral todo o circuito para a montagem do experimento.

Figura 35 - Circuito



Fonte: Própria

Para realizar as medições foi utilizado um analisador de qualidade de energia Fluke 43B (Figura 25), os bancos de capacitores foram ligados em triângulo (Delta) e colocados em paralelo com a carga. Esse tipo de arranjo geralmente é utilizado em bancos de capacitores ligados a rede secundária. Na tabela abaixo, pode-se observar os resultados obtidos nas medições.

Tabela 9 - Medições

MEDIÇÕES REALIZADAS COM ANALISADOR DE QUALIDADE FLUKE 43B				
GRANDEZAS	SEM BANCO	BANCO 1: 30 $\mu$ F	BANCO 2: 21 $\mu$ F	BANCO 3: 15 $\mu$ F
Corrente (A)	2,458	1,041	1,629	1,759
P. Ativa (W)	353	187	265	271
P. Reativa (Var)	397	133	251	264
P. Aparente (VA)	531	229	369	378

Tensão (V)	223,2	219,7	221,5	222,6
FP (%)	0,67	0,86	0,74	0,72
RP (%)	NA	39%	18%	13%
Frequência (Hz)	55	55,2	55	55
<b>LEGENDA</b>				
NA: Não se aplica.				
FP: Fator de potência.				
RP: Redução de Perdas.				

Fonte: Elaboração Própria

Analisando os dados obtidos, pode-se considerar que os resultados foram bem significativos.

#### 4.2.1 ESPECIFICAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Para a especificação dos bancos de capacitores, foram utilizadas as equações do capítulo 3.3 e os dados medidos com o analisador de qualidade Fluke 43 B, com o motor elétrico trifásico em funcionamento, com seu fechamento em DELTA e sem os bancos de capacitores.

O motor elétrico trifásico para a simulação da bancada apresenta uma potência de  $P = 353 \text{ W}$ , um  $FP = 0,67$  e  $V_L = 223,2 \text{ V}$ .

Dimensionando a potência do banco com os cálculos a seguir:

- 1) Calculando a potência reativa real do banco:

$$\cos^{-1}0,67 = 47,93^\circ = \phi_1 \quad (1.7)$$

$$\cos^{-1}0,92 = 23,07^\circ = \phi_2 \quad (1.8)$$

$$Q_c = 353 \times (tg \phi_1 - tg \phi_2) = 240,73 \quad (1.9)$$

Logo,  $Q_c = 240,73 \text{ VAr}$ .

- 2) Agora, calculando a capacitância do banco:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V_L^2} = 14,39 \mu F \quad (1.10)$$



Portanto, como encontramos uma potência para o banco de capacitor  $Q_c = 240,73 \text{ Var}$ , a instalação de um banco com capacitância de  $5 \mu\text{F}$  atende a respectiva carga corrigindo seu FP e conseqüentemente reduzindo sua corrente elétrica trazendo melhorias para o sistema, como se confirma analisando a Tabela 9.

#### 4.2.2 REDUÇÃO DAS PERDAS

A redução de perdas pode ser calculada percentualmente para uma determinada carga a uma dada potência capacitiva em operação, pela expressão a seguir (MAMEDE, 2007).

$$RP(\%) = \left(1 - \frac{FP_i^2}{FP_f^2}\right) \cdot 100 \quad (1.11)$$

Onde:

RP (%) = Redução de perdas em percentual;

FP<sub>i</sub> = Fator de potência inicial (antes da aplicação do banco de capacitores);

FP<sub>f</sub> = Fator de potência final (após a aplicação do banco de capacitores e correção do fator de potência).

#### 4.2.3 PRECAUÇÕES

A montagem e execução dos experimentos devem ser conduzidas de forma a garantir a segurança de todos presentes no laboratório. Para tanto, há cuidados que devem ser seguidos por todos os alunos quanto a preparação dos experimentos, montagem dos arranjos experimentais e execução do roteiro de laboratório.

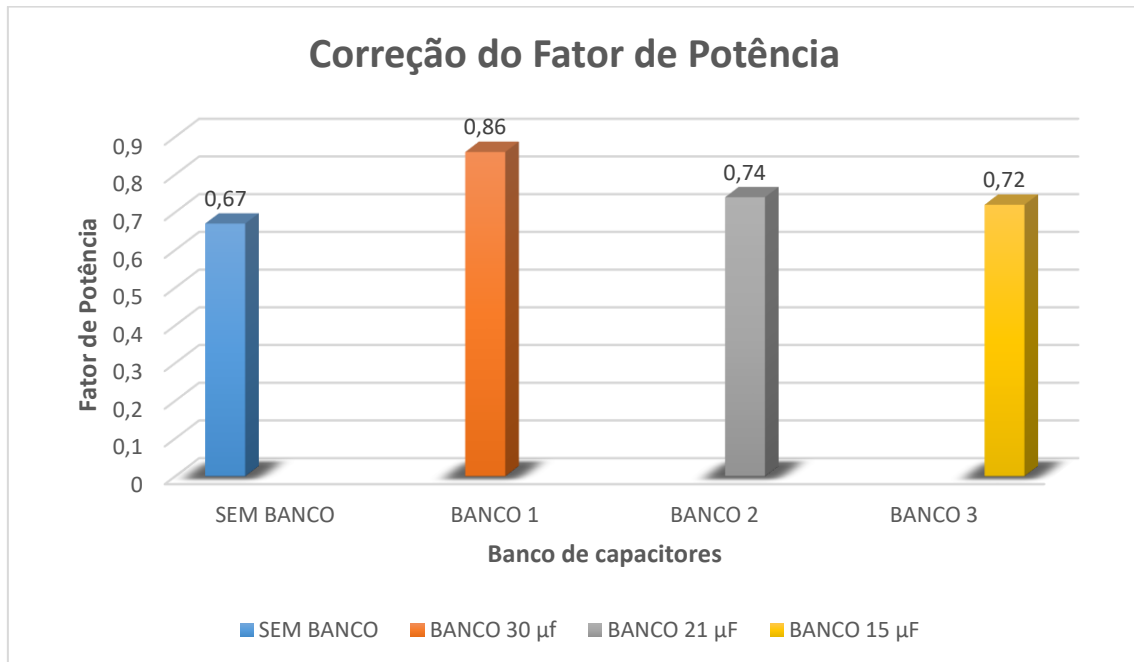
A partir dos experimentos realizados, percebeu-se alguns itens de segurança que devem ser observados:

- Antes de manusear os circuitos elétricos que compõem as montagens experimentais deve-se verificar se os mesmos estão desenergizados (fontes de alimentação desligadas e capacitores descarregados). Para tanto, utilize o voltímetro.

- Após desligar as unidades geradoras da bancada 1 e 2, manter o disjuntor banco e disjuntor motor, ligados por 7 segundos, para que os capacitores descarreguem totalmente na bobina do motor. Feito isso, desligue-os.
- Os alunos devem estar utilizando sapato ou tênis, preferencialmente com solado de borracha e nunca chinelos (ou equivalentes) para o manuseio desta bancada.
- Deve-se prender o cabelo comprido antes de iniciar a montagem e execução dos experimentos, para evitar que o mesmo entre em contato com partes energizadas e fique preso em algum dispositivo em movimento (eixo de máquinas elétricas rotativas).
- Não utilizar acessórios metálicos durante os experimentos.

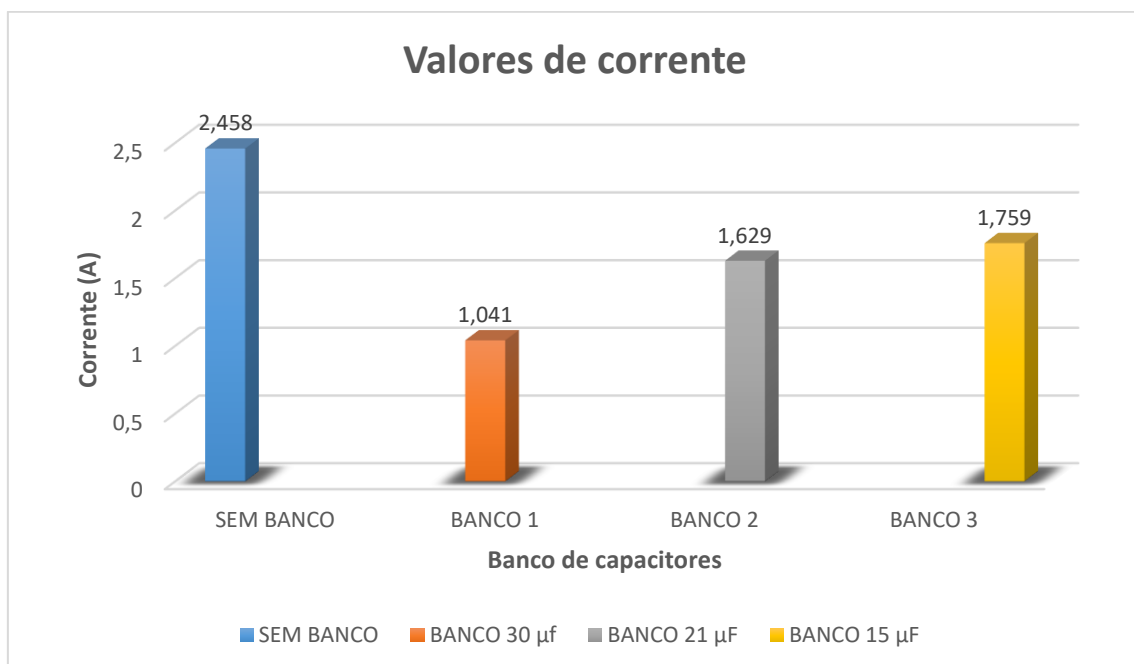
#### **4.2.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Levando em consideração que o objetivo principal do trabalho seria desenvolver uma bancada capaz de corrigir o fator de potência de um motor elétrico trifásico, conseqüentemente melhorando sua eficiência com o aumento do fator de potência e trazendo assim uma melhoria para o sistema, ao analisar o gráfico 1 foi possível chegar à conclusão de que quanto maior a capacitância do banco do banco utilizado na bancada, o motor irá opera mais próximo do fator de potência ideal.

**Gráfico 1 - Correção do Fator de Potência**

Fonte: Elaboração Própria

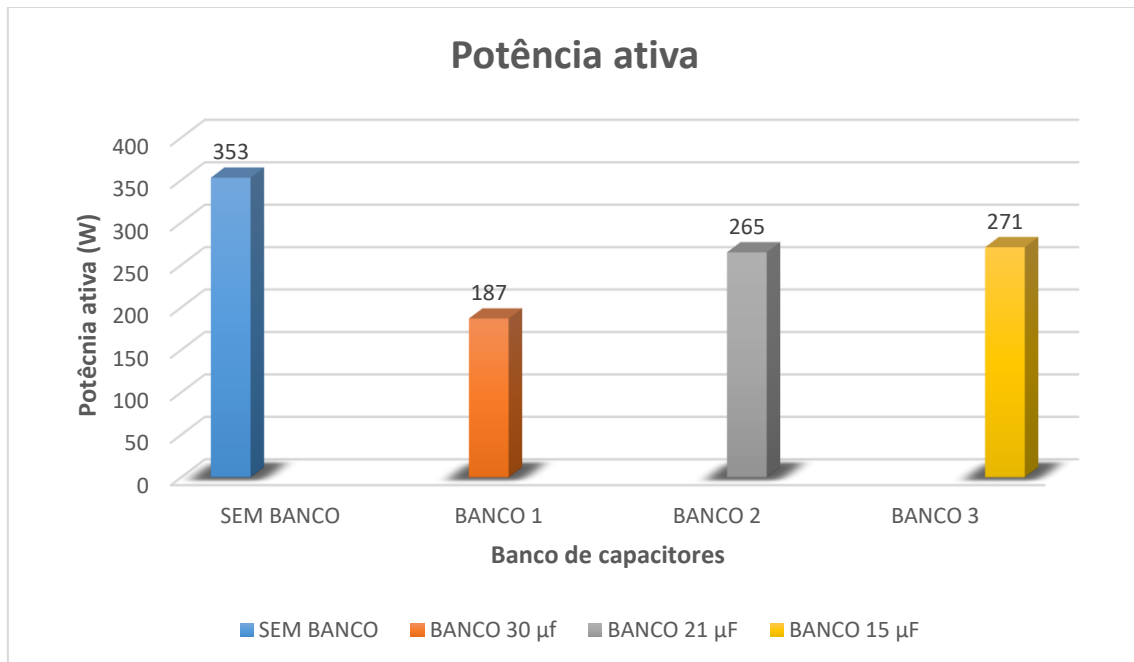
Com o aumento do fator de potência, observasse a comprovação do método escolhido com a diminuição da corrente elétrica do sistema, que é inversamente proporcional ao fator de potência. Isso pode ser observado analisando o gráfico 2.

**Gráfico 2 - Valores de corrente**

Fonte: Elaboração Própria

As perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica total. Uma vez que a corrente elétrica total cresce devido ao baixo fator de potência, aumentam-se as perdas elevando a potência ativa consumida. Pode-se observar esse acontecimento no gráfico 3.

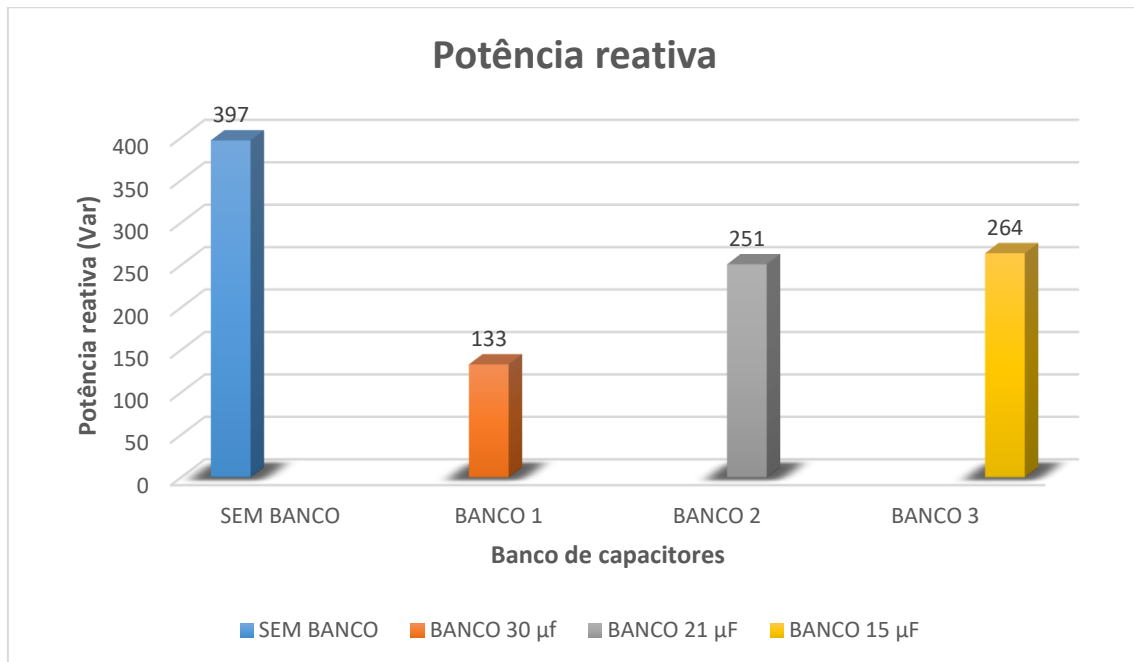
**Gráfico 3 - Potência ativa**



Fonte: Elaboração Própria

A energia reativa ao sobrecarregar uma instalação elétrica, inviabiliza sua plena utilização devido o “espaço” ocupado pela energia reativa, onde poderia ser utilizado para atendimento de novas cargas. Conforme os bancos de capacitores foram inseridos nos testes, foi possível observar a redução da potência reativa, como pode ser visto no gráfico 4.

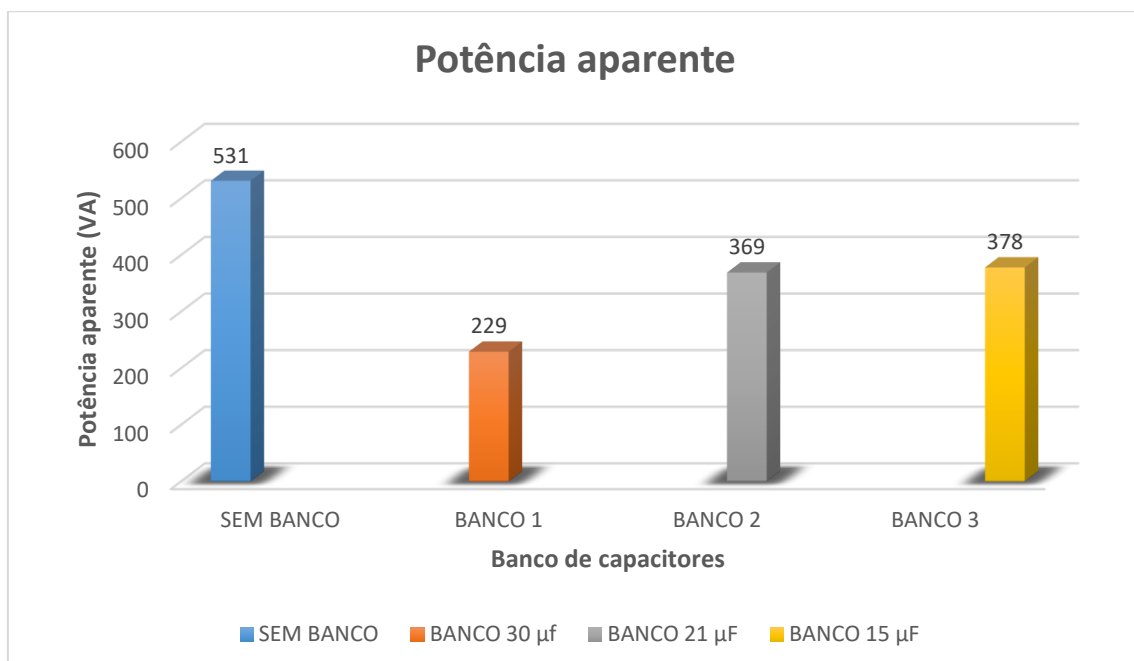
Gráfico 4 - Potência reativa



Fonte: Elaboração Própria

Como sabemos que a potência aparente é a soma vetorial da potência reativa e ativa, observando os gráficos anteriores referente a essas potências, foi possível observar que as mesmas tenderam a diminuir, conseqüentemente ocorrerá a diminuição da potência aparente, podendo ser observado no gráfico 5.

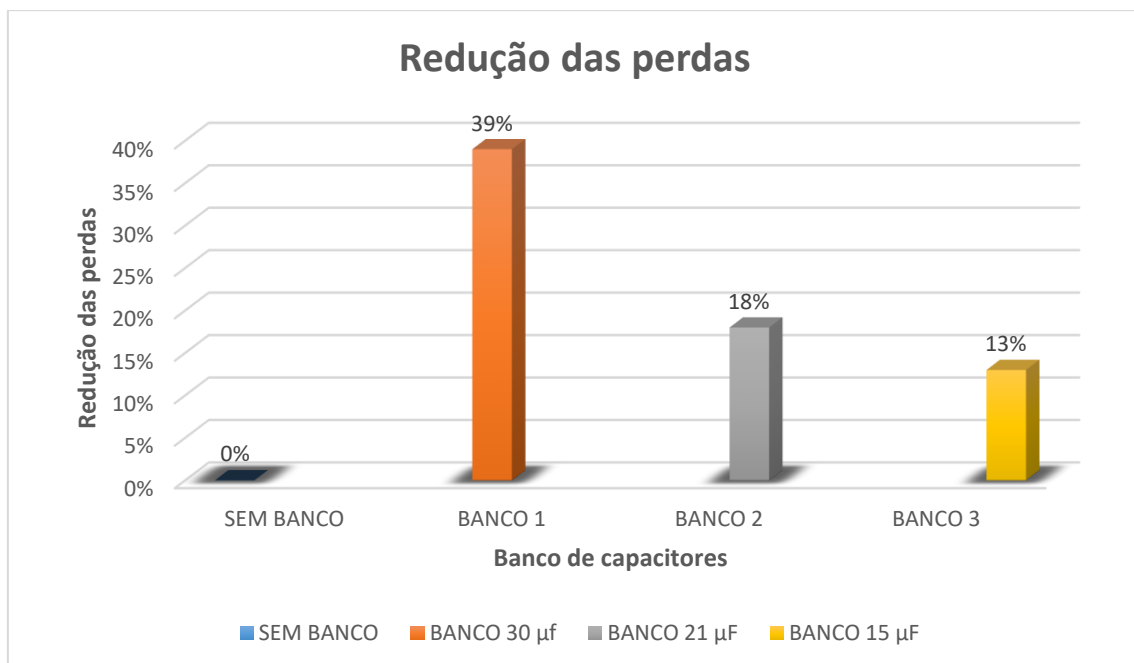
Gráfico 5 - Potência aparente



Fonte: Elaboração Própria

Conforme a equação 1.11 referente a redução das perdas, foi possível chegar em valores percentuais das perdas provocadas pelo baixo fator de potência na carga do sistema, relacionando o fator de potência inicial com o fator de potência obtido com a utilização dos bancos de capacitores presentes na bancada didática. No gráfico 6 pode-se observar os valores dessas perdas.

**Gráfico 6 - Redução das perdas**



Fonte: Elaboração Própria

Com isso, seguindo todas as orientações de montagem que se encontra no Apêndice e orientações de segurança, a bancada didática se mostra um equipamento seguro, eficaz e como uma possível ferramenta para auxiliar os professores no desenvolvimento da atividade e para os alunos do curso de Engenharia Elétrica da UNIFAP colocarem em prática aquilo que se foi passado na teoria dentro da sala de aula.

## 5 CONCLUSÃO

O projeto de dimensionamento de bancada didática com banco de capacitores para correção do fator de potência de um motor elétrico trifásico, teve como um dos objetivos possibilitar a aplicação do conteúdo: correção do fator de potência, na prática, com a confecção de uma bancada didática em ambiente controlado, ou seja, no laboratório e também colocar em prática uma tendência educacional chamada de movimento *maker*.

Essa tendência educacional, bastante difundida nos Estados Unidos, já é uma realidade em diversas IES do nosso país. Conhecida como movimento *maker*, nada mais é do que disponibilizar um espaço físico e propor ao aluno atividades de “mão na massa”, que tem uma ligação direta com o DIY – *do it yourself* (VALENTE; FREIRE; ARANTES, 2018).

Assim, os espaços *maker* têm um potencial enorme para contribuir para uma abordagem educacional mais participativa e criar caminhos para o desenvolvimento de tópicos que são mais relevantes para os alunos. Diversos estudos mostram que o fazer associado a metodologias ativas de aprendizagem podem criar condições para que o aluno seja criativo, crítico, capaz de resolver problemas e trabalhar em grupo, habilidades essenciais e necessárias no século XXI (HALVERSON; SHERIDAN, 2014; KURTI; KURTI; FLEMMING, 2014).

Os cursos de Arquitetura, Artes, Design e, principalmente, Engenharias tem-se aproveitado por demais deste conceito, que aposta que com a atuação do aluno na prática, sejam alavancados o interesse e a melhoria da aprendizagem.

Esses espaços favorecem o desenvolvimento da criatividade, do repertório e do conhecimento do aluno, pois possibilita o manuseio com diversos materiais e os projetos podem ser aqueles solicitados pelos professores ou de interesse pessoal dos alunos.

Sendo assim, tomando como norte o conceito de que teoria e prática se complementam construiu-se a bancada didática e desenvolveu-se as práticas, das quais os resultados estão descritos nesse trabalho.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados a correção do fator de potência e máquinas elétricas, recomenda-se realizar os seguintes trabalhos:

- O controle automático do fator de potência para motores elétricos trifásicos, utilizando microcontroladores para chaveamento dos capacitores.
- Projeto de medidor de isolamento de máquinas elétricas. Simular tensões para medir o índice de absorção e ensaio de rigidez dielétrica.
- Desenvolvimento de protótipo para análise de harmônicas em motores elétricos, haja visto a importância do tema na eficiência e durabilidade do mesmo.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECH, Elisiane. **O motor de Faraday. Parque da Ciência**, 2013. Disponível em: <<http://parquedaciencia.blogspot.com/2013/03/o-motor-de-faraday.html>>. Acesso em: 09 de maio 2019.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL nº 414**. Brasília: ANEEL, 2010, 254p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL nº 456**. Brasília: ANEEL, 2000. 62 p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL Nº 505**. Brasília: ANEEL, 2000. 12 p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL Nº 676**. Brasília: ANEEL, 2000. 11 p.

ARAUJO, Thiago da Cunha. **Análise de máquina síncrona de pólos salientes sólidos**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AUGUSTO, Alvaro. **Motor de indução trifásico**. 2006. 39 slides. Disponível em: <[http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/MAQ2/motores\\_inducao\\_construcao.pdf](http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/MAQ2/motores_inducao_construcao.pdf)>. Acesso em: 8 de maio 2019.

CARVALHO, GERALDO. **Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaio**. - 4º ed.- São Paulo: Érica. 2011.

CENA. Disponível em: <<http://www.bancodecapacitores.com/como-funciona-umbanco-de-capacitores.html>> Acesso em: 20 de abril 2012.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH Editora, 2013.

CHONG HAN; HUANG, A.Q.; BARAN, M.E.; BHATTACHARYA, S.; LITZENBERGER, W.; ANDERSON, L.; JOHNSON, A.L.; EDRIS, A.-A.; **“STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power**

**System**", Energy Conversion, IEEE Transaction on, Volume 23, Issue 1, March 2008  
Page(s):226 – 233.

CNE. **Resolução CNE/CES 11/2002**. Diário Oficial da União, Brasília, 9 de abril de 2002. Seção 1, p. 32.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de orientação aos consumidores: energia reativa excedente**. 2004. Disponível em: Acesso em: 10 de maio 2019.

COSTA, Guilherme Kinouti. **Controle de velocidade de um motor de indução trifásico usando técnicas de ajuste empírico para bancada de teste no laboratório de automação**. 2011.

DRANKA, Géremi Gilson. **Análise de oscilações de tensão devido à partida de motores elétricos de grande porte em redes elétricas industriais com multialimentadores**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DUALIBE, Paulo. **Capacitores: Instalação e correção do fator de potência**. São Paulo, 2000.

ERCHE, E.; LERCH, E.; POVH, D.; MIHALIC, R.(1992). **Improvement of Power System Performance Using Power Electronic Equipment**. CIGRE 14/37/38-02 Meeting Paper.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. - 6° ed.- Porto Alegre, Bookman, 2006.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C. STEPHEN D. UMANS. **Máquinas Elétricas**. tradução: Anatólio Laschuk. – 7. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2014.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. Érica Editora, 2009

GE – GEVISA: **Notas Técnicas Motores NT-02**, 2000. Disponível em: <<http://www.geindustrial.com.br/download/artigos/nt02.pdf>>. Acesso em: 13 de maio 2019.

GEDRA, R, L. et al. **Geração, transmissão, distribuição e consume de energia elétrica**. São Paulo: Érica, 2014.

GODWIN, GURNEY L.; MERRILL, EDGAR F. **Oscillatory Torques During Synchronous Motor Starting**. IEEE Transactions on Industry and General Applications, p 258 – 265, VOL. IGA-6, NO. 3, MAY/JUNE 1970.

GOMES, G. N.; MOREIRA, J. H. S.; BARBA, L. A. D.; BEMINI, D. S. S.; VOLKERS, R. **Compensação de reativos e os seus efeitos sobre o SEP (Sistema Elétrico de Potência)**. Revista Científica Esfera Acadêmica Tecnologia, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2018.

GRENZEL, Rafael. **Análise da aplicação de inversores de frequência em acionamentos de equipamentos de movimentação de cargas em Usinas Hidrelétricas**: estudo de caso. 2013.

GUEDES, M. V. **O motor de indução trifásico: selecção e aplicação**. 1º ed. Porto: Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, 1994. (Apostila).

HALVERSON, E. R.; KIMBERLY, M. S. **The Maker Movement in Education**. Harvard Educational Review, dez. 2014, v. 84, n. 4, p.495-504. Disponível em: <<http://hepgjournals.org/doi/10.17763/haer.84.4.34j1g68140382063?code=hepg-site>>. Acesso em 8 fev. 2019.

HART, Daniel W. **Power Eletronics**. 2011.

HATCH, M. **The Maker Movement Manifesto**: Rules for Innovation in the New World of Crafters, Hackers, and Tinkerers. New York: McGraw-Hill Education, 2003.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4.ed. Rio de Janeiro: Globo, 1982.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15º. ed. São Paulo: Globo, 2011.

KURTI, R. S.; KURTI, D. L.; FLEMING, L. **The Philosophy of Educational Makerspaces: Part 1 of Making an Educational Makerspace**. Teacher Librarian: The Journal for School Library Professionals, jun. 2014. Disponível em: <[www.teacherlibrarian.com/2014/06/18/educational-markerspaces](http://www.teacherlibrarian.com/2014/06/18/educational-markerspaces)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

LEBORGNE, Roberto Chouhy. 2003. **Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2003.

MAMEDE FILHO, João. **Fator de potência**. In: **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2007. cap. 4, pp. 176-227.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. – 4º ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. Grupo Gen-LTC, 2010.

MARCO A. Simões. **Prof A. Simões**, 2017. Disponível em: <[http://masimoes.pro.br/fisica\\_el/origens.html](http://masimoes.pro.br/fisica_el/origens.html)>. Acesso em: 21 jun. 2019.

O'MALLEY, John R. **Análise de circuitos**. Rio de Janeiro, RJ: McGraw-Hill, 1983.

PASERBA, J.J.; **"Recent Power Electronics/FACTS Installations to Improve Power System Dynamic Performance"**, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 24-28 June 2007 Page(s): 1 – 4.

PASERBA, J.J.; **"How FACTS controllers benefit AC transmission systems - phases of power system studies"**, Power Systems Conference and Exposition, 2009. PES '09. IEEE/PES, 15- 18 March 2009 Page(s): 1 – 4.

POMILIO, José Antenor; DECKMANN, Sigmar Maurer. **Condicionamento de energia elétrica e dispositivos FACTS**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009.

PRAXEDES, Marcos Fernando. **A evolução dos sistemas de partida dos motores elétricos trifásicos – MIT**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade São Francisco.

PROCEL Indústria. Edição seriada. **Motores elétricos Guia Básico**. Disponível em: <[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/Motor\\_elettrico.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_elettrico.pdf)>. Acesso em: 15 de maio 2019.

SANTOS, K. P.; MONTE, A. C. S. B. **Compensação de reativos em sistemas elétricos de potência**. Monografia em Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Estadual do Piauí, 2009.

VALENTE, J., A.; FREIRE, F., M., P.; ARANTES, F., L. **Tecnologia e Educação: passado, presente e o que está por vir.** – Campinas, SP : NIED/UNICAMP, 2018.

WATANABE, E. H., BARBOSA, P. G., ALMEIDA, K. C. e TARANTO, G. N. (1998). “**Tecnologia FACTS – tutorial**”, SBA Controle & Automação vol. 9 no. 1, pp. 39–55.

WEG – **Artigo técnico sobre Motores Síncronos**, 2003. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>. Acesso em: 13 de maio 2019.

WEG – **Artigo técnico sobre Motores elétricos**, 2015. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-eletricos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>. Acesso em: 12 de maio 2019.

## APÊNDICE 1 – ATIVIDADES SUGERIDAS

Roteiro experimental de atividades para serem realizadas com a Bancada Didática com Banco de Capacitores para Correção do Fator de Potência de um Motor Elétrico Trifásico.

### **Material necessário para realização dos três experimentos:**

- 2 multímetros digitais;
- 1 tacômetro;
- 2 reostatos
- 2 conversores CA-CC;
- 2 geradores síncrono;
- 2 motores assíncrono, que será utilizado como fonte de força motriz acoplado ao gerador síncrono;
- Cabos conectores;
- 1 módulo de sincronismo;
- 1 analisador de qualidade energia - FLUKE 48B;
- 1 motor elétrico trifásico;
- 1 bancada didática para correção de fator de potência.

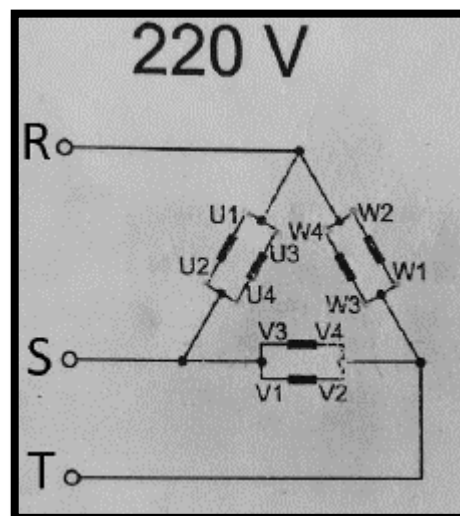
## 1. REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 1

Para realizar essa atividade, será utilizado dois geradores síncronos em sincronismo alimentando um motor elétrico trifásico e a Bancada didática para realizar a correção do fator da carga.

**Etapa 1:** O fechamento do estator do motor assíncrono.

- a) Fazer o fechamento em Delta (Figura 36) das bobinas do estator da máquina assíncrona, levando em conta a fonte de alimentação do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, que é de 220 V.

Figura 36 - Fechamento em Delta



Fonte: Própria

- b) Conectar o reostato trifásico em estrela nos terminais da bobina do rotor (E1, E2, E3) da máquina assíncrona.

**Figura 37 - Reostato**



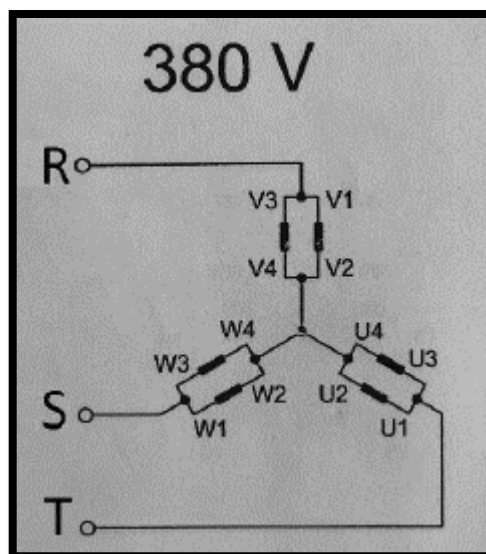
Fonte: Própria

- c) Conectar o módulo do estator da máquina assíncrona ao módulo de rede.

**Etapa 2:** O fechamento do estator do gerador síncrono.

- a) Fazer o fechamento em Estrela (Figura 38) das bobinas do estator do gerador síncrono.

**Figura 38 - Fechamento em Estrela**

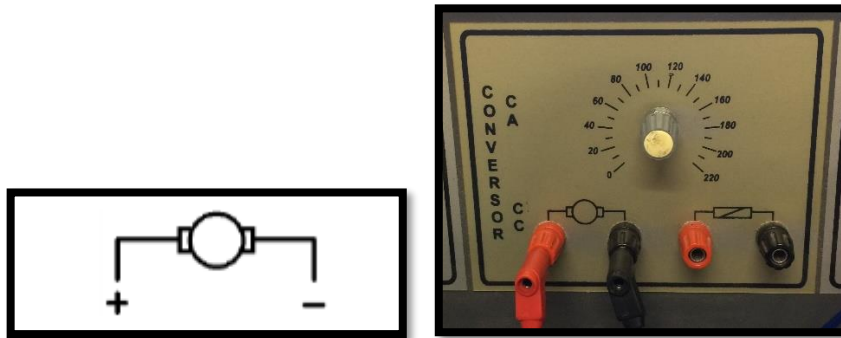


Fonte: Própria



- b) Conectar o módulo do conversor CA-CC nos terminais das bobinas do rotor, que inicialmente deve estar com a corrente de campo igual a zero.

**Figura 39 - Conversor CA-CC**



Fonte: Própria

**Etapa 3:** Ligação ao módulo de sincronismo.

- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 1 no módulo de sincronismo.
- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 2 no módulo de sincronismo.
- Conectar o motor elétrico trifásico em uma das saídas do módulo. Lembre-se que a carga deve estar desligada.
- Verificar se o disjuntor de sincronismo trifásico e os interruptores das lâmpadas de fase encontram-se desligados.

**Etapa 4:** Iniciando o sincronismo.

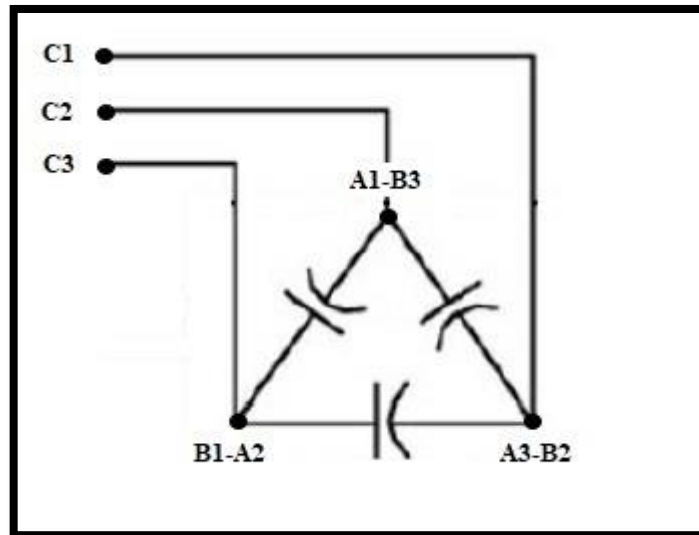
- Realizar a partida das máquinas, ajustando a corrente de excitação do gerador 1 e gerador 2, de modo que a tensão de linha seja de aproximadamente 127 V e a sua frequência de 55 Hz.
- Ajustar as tensões e as frequências dos dois geradores.
- Colocar os dois geradores na mesma sequência de fase.
- Realizar o teste das três lâmpadas para verificar se a sequência de fases dos dois geradores está correta.

- e) Observar se as lâmpadas piscam iguais, se sim, a sequência de fase estava correta, caso contrário, faça o ajuste.
- f) Caso as lâmpadas de fase desliguem, feche o disjuntor de sincronismo e desligue as lâmpadas.

**Etapa 5:** O fechamento do banco de capacitores.

- a) Conectar os capacitores de  $10\mu\text{F}$  em delta.

**Figura 40 - Fechamento capacitores em Delta**



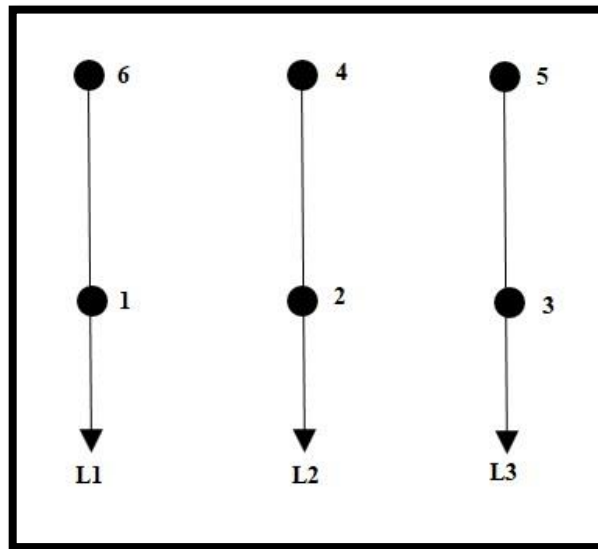
Fonte: Própria

- b) Conectar os capacitores nos terminais C1, C2, C3 do Disjuntor Banco.

**Etapa 6:** O fechamento do motor elétrico trifásico

- a) Realizar o fechamento do motor elétrico trifásico em Delta.

Figura 41 - Fechamento motor em Delta



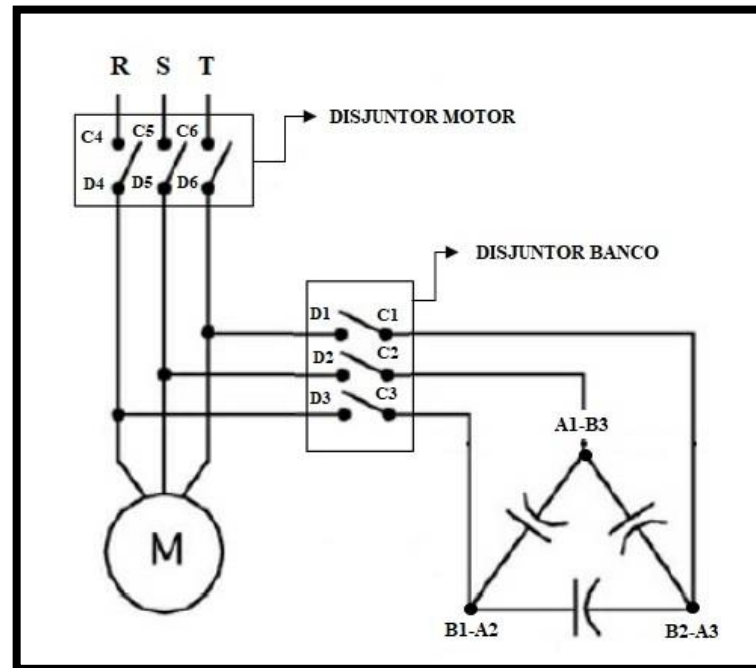
Fonte: Própria

- b) Conectar o motor na saída dos terminais D4, D5, D6 do Disjuntor motor.

**Etapa 7:** Conectar Bancada didática e motor elétrico trifásico ao sistema.

- a) Colocar o banco de capacitores 1 de  $10\mu\text{F}$  em paralelo com a carga, conectando os terminais D1, D2, D3 nos terminais D4, D5, D6. Em seguida, feche o disjuntor.
- b) Inserir o motor elétrico trifásico a rede. Conecta-se os terminais do motor, na saída D4, D5, D6 do Disjuntor motor e conecta-se na entrada C4, C5, C6 do Disjuntor motor nas fases R, S, T do módulo de sincronismo. Em seguida, feche o disjuntor.

Figura 42 - Esquema de ligação à rede



Fonte: Própria

**Etapa 8:** Atividade

- a) Preencher a tabela abaixo, comparando os resultados com banco de capacitores e sem o banco de capacitores.

Tabela 10 - Atividade (Banco 1)

GRANDEZAS	SEM BANCO	BANCO 1: 30 $\mu$ F
Corrente (A)		
P. Ativa (W)		
P. Reativa (Var)		
P. Aparente (VA)		
Tensão (V)		
FP (%)		
RP (%)		
Frequência (Hz)		

Fonte: Elaboração Própria

- b) Comparar e explicar o comportamento do fator de potência com o menor e o maior comprimento de cabo possível, conectando o Banco de capacitores em paralelo com a carga.

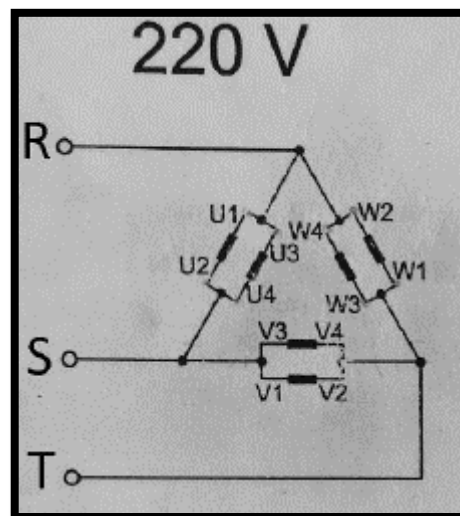
## 2. REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 2

Para realizar essa atividade, será utilizado dois geradores síncronos em sincronismo alimentando um motor elétrico trifásico e a Bancada didática para realizar a correção do fator da carga.

**Etapa 1:** O fechamento do estator do motor assíncrono.

- a) Fazer o fechamento em Delta (Figura 43) das bobinas do estator da máquina assíncrona, levando em conta a fonte de alimentação do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, que é de 220 V.

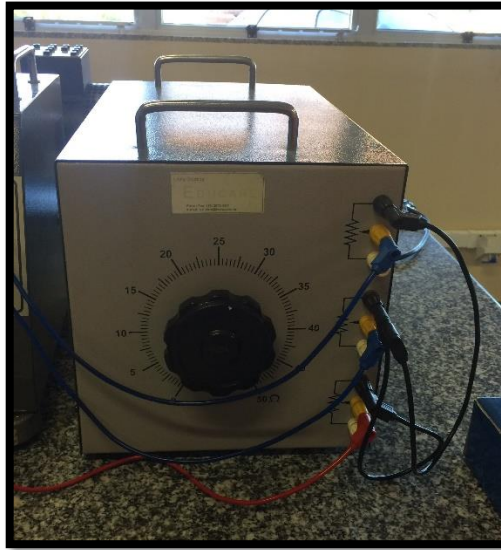
Figura 43 - Fechamento em Delta



Fonte: Própria

- b) Conectar o reostato trifásico em estrela nos terminais da bobina do rotor (E1, E2, E3) da máquina assíncrona.

**Figura 44 - Reostato**



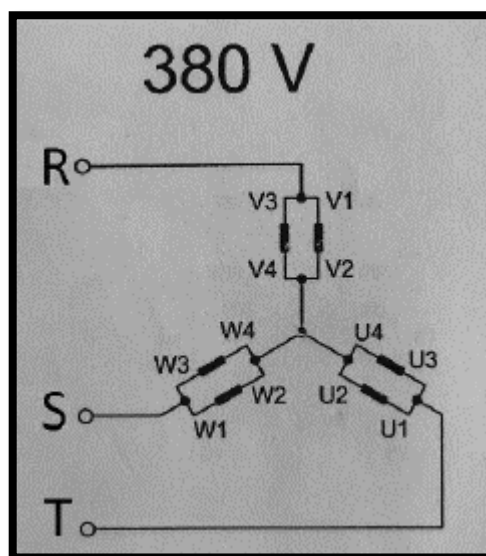
Fonte: Própria

- c) Conectar o módulo do estator da máquina assíncrona ao módulo de rede.

**Etapa 2:** O fechamento do estator do gerador síncrono.

- a) Fazer o fechamento em Estrela (Figura 45) das bobinas do estator do gerador síncrono.

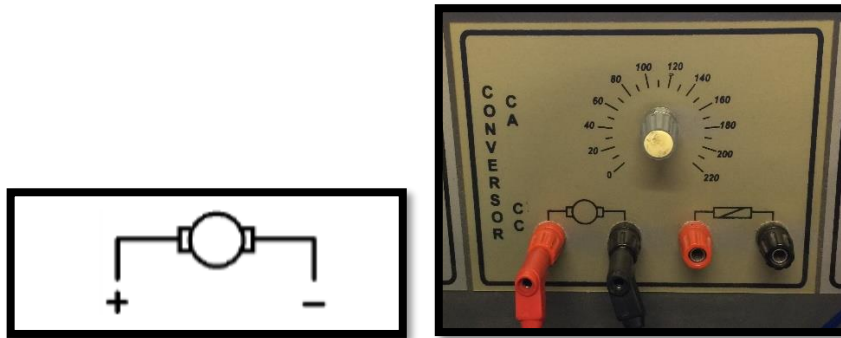
**Figura 45 - Fechamento em Estrela**



Fonte: Própria

- b) Conectar o módulo do conversor CA-CC nos terminais das bobinas do rotor, que inicialmente deve estar com a corrente de campo igual a zero.

**Figura 46 - Conversor CA-CC**



Fonte: Própria

**Etapa 3:** Ligação ao módulo de sincronismo.

- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 1 no módulo de sincronismo.
- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 2 no módulo de sincronismo.
- Conectar o motor elétrico trifásico em uma das saídas do módulo. Lembre-se que a carga deve estar desligada.
- Verificar se o disjuntor de sincronismo trifásico e os interruptores das lâmpadas de fase encontram-se desligados.

**Etapa 4:** Iniciando o sincronismo.

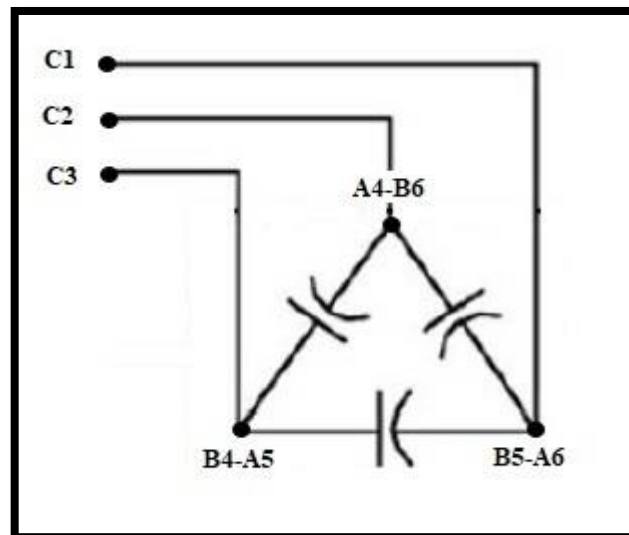
- Realizar a partida das máquinas, ajustando a corrente de excitação do gerador 1 e gerador 2, de modo que a tensão de linha seja de aproximadamente 127 V e a sua frequência de 55 Hz.
- Ajustar as tensões e as frequências dos dois geradores.
- Colocar os dois geradores na mesma sequência de fase.
- Realizar o teste das três lâmpadas para verificar se a sequência de fases dos dois geradores está correta.

- e) Observar se as lâmpadas piscam iguais, se sim, a sequência de fase estava correta, caso contrário, faça o ajuste.
- f) Caso as lâmpadas de fase desliguem, feche o disjuntor de sincronismo e desligue as lâmpadas.

**Etapa 5:** O fechamento do banco de capacitores.

- a) Conectar os capacitores de  $7 \mu\text{F}$  em delta.

**Figura 47 - Fechamento capacitores em Delta**



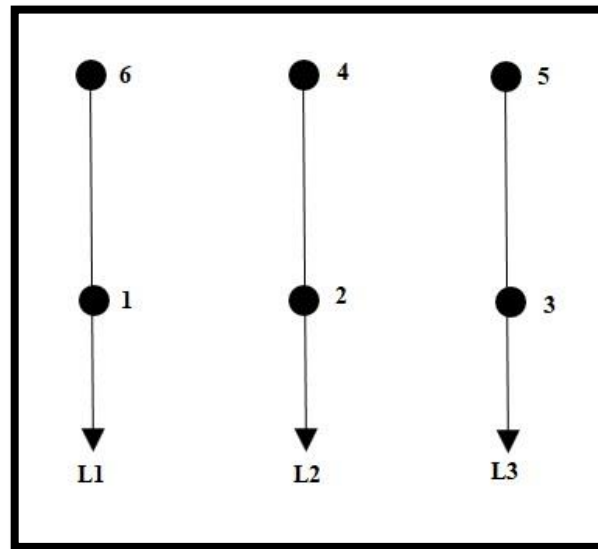
Fonte: Própria

- b) Conectar os capacitores nos terminais C1, C2, C3 do Disjuntor Banco.

**Etapa 6:** O fechamento do motor elétrico trifásico

- a) Realizar o fechamento do motor elétrico trifásico em Delta.



**Figura 48 - Fechamento motor em Delta**

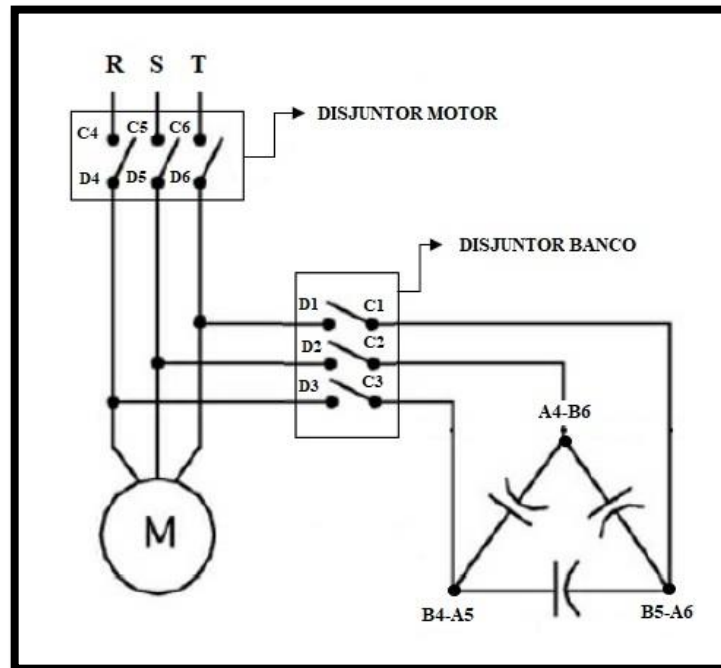
Fonte: Própria

- b) Conectar o motor na saída dos terminais D4, D5, D6 do Disjuntor motor.

**Etapa 7:** Conectar Bancada didática e motor elétrico trifásico ao sistema.

- a) Colocar o banco de capacitores 2 de 7  $\mu\text{F}$  em paralelo com a carga, conectando os terminais D1, D2, D3 nos terminais D4, D5, D6. Em seguida, feche o disjuntor.
- b) Inserir o motor elétrico trifásico a rede. Conecta-se os terminais do motor, na saída D4, D5, D6 do Disjuntor motor e conecta-se na entrada C4, C5, C6 do Disjuntor motor nas fases R, S, T do módulo de sincronismo. Em seguida, feche o disjuntor.

Figura 49 - Esquema de ligação à rede



Fonte: Própria

**Etapa 8:** Atividade

- a) Preencher a tabela abaixo, comparando os resultados com banco de capacitores e sem o banco de capacitores.

Tabela 11 - Atividade (Banco 2)

GRANDEZAS	SEM BANCO	BANCO 2: 21 $\mu$ F
Corrente (A)		
P. Ativa (W)		
P. Reativa (Var)		
P. Aparente (VA)		
Tensão (V)		
FP (%)		
RP (%)		
Frequência (Hz)		

Fonte: Elaboração Própria

- b) Comparar e explicar o comportamento do fator de potência com o menor e o maior comprimento de cabo possível, conectando o Banco de capacitores em paralelo com a carga.

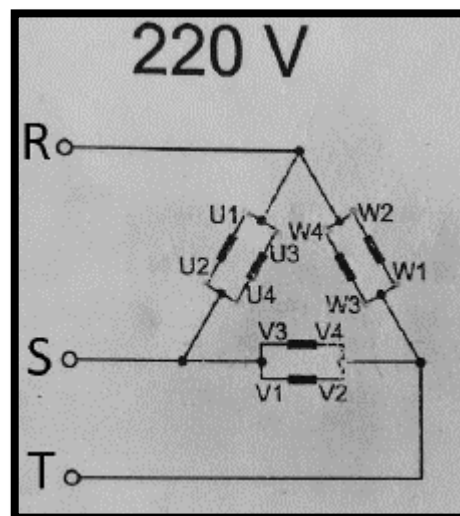
### 3. REALIZAR A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO UTILIZANDO O BANCO DE CAPACITORES 3

Para realizar essa atividade, será utilizado dois geradores síncronos em sincronismo alimentando um motor elétrico trifásico e a Bancada didática para realizar a correção do fator da carga.

**Etapa 1:** O fechamento do estator do motor assíncrono.

- a) Fazer o fechamento em Delta (Figura 50) das bobinas do estator da máquina assíncrona, levando em conta a fonte de alimentação do Laboratório de Conversão e Máquinas Elétricas, da UNIFAP, que é de 220 V.

Figura 50 - Fechamento em Delta



Fonte: Própria

- b) Conectar o reostato trifásico em estrela nos terminais da bobina do rotor (E1, E2, E3) da máquina assíncrona.

**Figura 51 - Reostato**



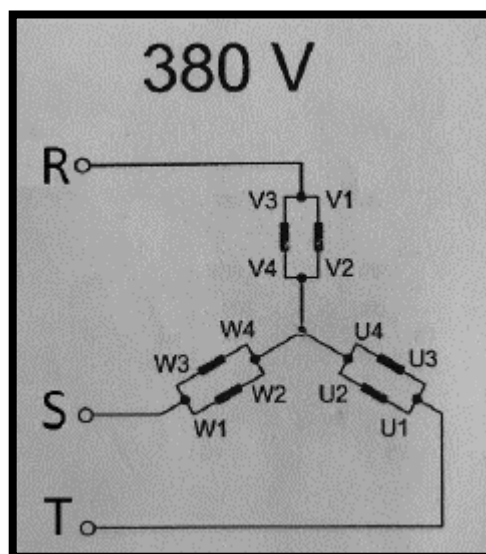
Fonte: Própria

- c) Conectar o módulo do estator da máquina assíncrona ao módulo de rede.

**Etapa 2:** O fechamento do estator do gerador síncrono.

- a) Fazer o fechamento em Estrela (Figura 52) das bobinas do estator do gerador síncrono.

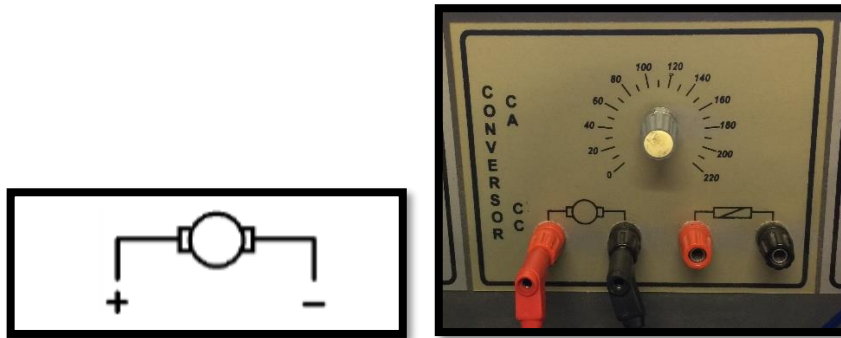
**Figura 52 - Fechamento em Estrela**



Fonte: Própria

- b) Conectar o módulo do conversor CA-CC nos terminais das bobinas do rotor, que inicialmente deve estar com a corrente de campo igual a zero.

**Figura 53 - Conversor CA-CC**



Fonte: Própria

**Etapa 3:** Ligação ao módulo de sincronismo.

- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 1 no módulo de sincronismo.
- Conectar as saídas L1, L2 e L3 do gerador síncrono 2 no módulo de sincronismo.
- Conectar o motor elétrico trifásico em uma das saídas do módulo. Lembre-se que a carga deve estar desligada.
- Verificar se o disjuntor de sincronismo trifásico e os interruptores das lâmpadas de fase encontram-se desligados.

**Etapa 4:** Iniciando o sincronismo.

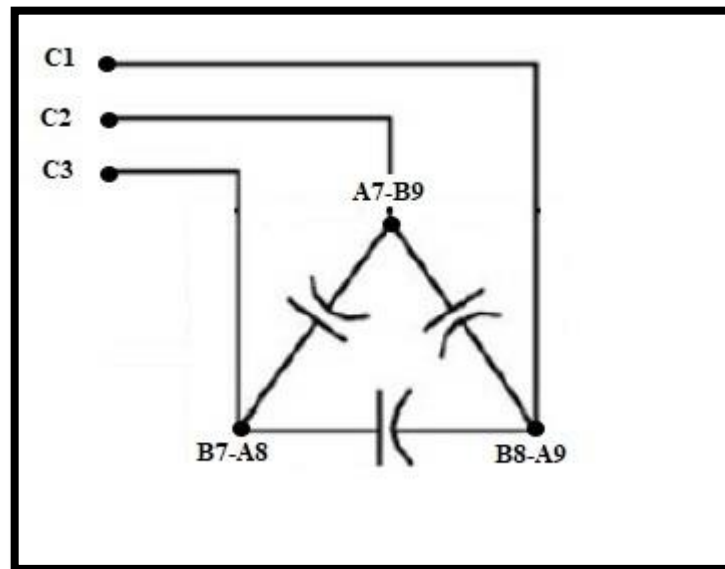
- Realizar a partida das máquinas, ajustando a corrente de excitação do gerador 1 e gerador 2, de modo que a tensão de linha seja de aproximadamente 127 V e a sua frequência de 55 Hz.
- Ajustar as tensões e as frequências dos dois geradores.
- Colocar os dois geradores na mesma sequência de fase.
- Realizar o teste das três lâmpadas para verificar se a sequência de fases dos dois geradores está correta.

- e) Observar se as lâmpadas piscam iguais, se sim, a sequência de fase estava correta, caso contrário, faça o ajuste.
- f) Caso as lâmpadas de fase desliguem, feche o disjuntor de sincronismo e desligue as lâmpadas.

**Etapa 5:** O fechamento do banco de capacitores.

- a) Conectar os capacitores de  $5 \mu\text{F}$  em delta.

**Figura 54 - Fechamento capacitores em Delta**



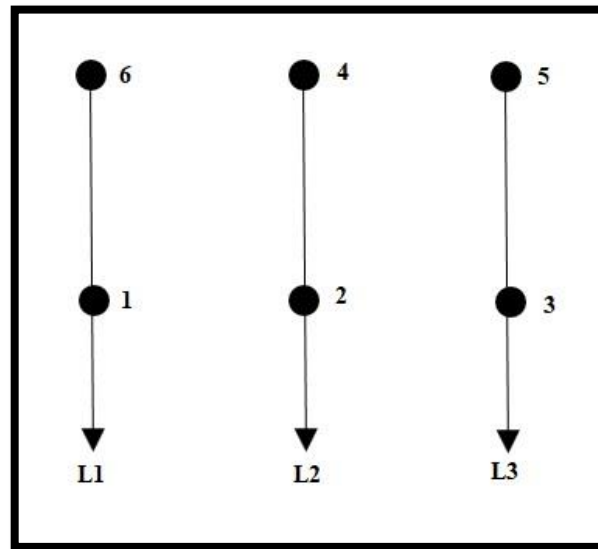
Fonte: Própria

- b) Conectar os capacitores nos terminais C1, C2, C3 do Disjuntor Banco.

**Etapa 6:** O fechamento do motor elétrico trifásico

- a) Realizar o fechamento do motor elétrico trifásico em Delta.

Figura 55 - Fechamento motor em Delta



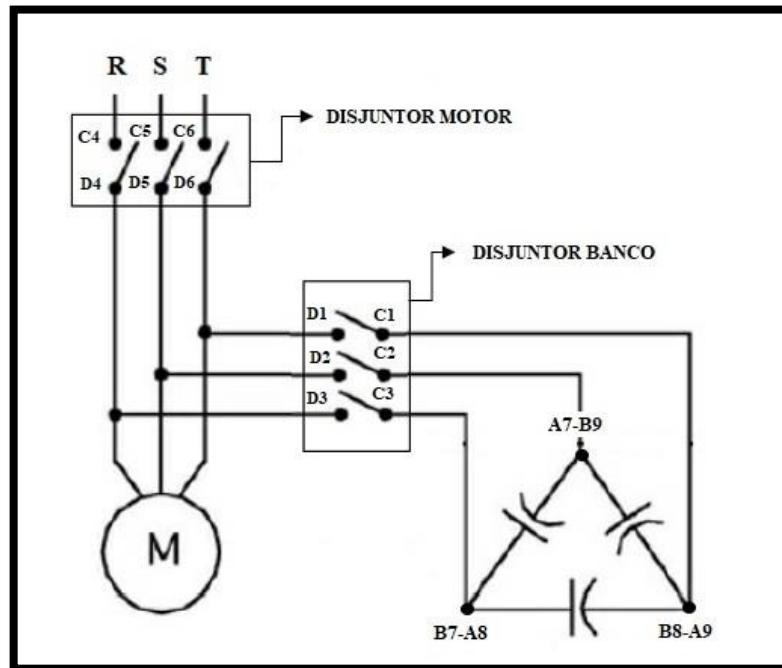
Fonte: Própria

- b) Conectar o motor na saída dos terminais D4, D5, D6 do Disjuntor motor.

**Etapa 7:** Conectar Bancada didática e motor elétrico trifásico ao sistema.

- a) Colocar o banco de capacitores 3 de  $5 \mu\text{F}$  em paralelo com a carga, conectando os terminais D1, D2, D3 nos terminais D4, D5, D6. Em seguida, feche o disjuntor.
- b) Inserir o motor elétrico trifásico a rede. Conecta-se os terminais do motor, na saída D4, D5, D6 do Disjuntor motor e conecta-se na entrada C4, C5, C6 do Disjuntor motor nas fases R, S, T do módulo de sincronismo. Em seguida, feche o disjuntor.

Figura 56 - Esquema de ligação à rede



Fonte: Própria

**Etapa 8:** Atividade

- a) Preencher a tabela abaixo, comparando os resultados com banco de capacitores e sem o banco de capacitores.

**Tabela 12 - Atividade (Banco 3)**

GRANDEZAS	SEM BANCO	BANCO 3: 15 $\mu$ F
Corrente (A)		
P. Ativa (W)		
P. Reativa (Var)		
P. Aparente (VA)		
Tensão (V)		
FP (%)		
RP (%)		
Frequência (Hz)		

Fonte: Elaboração Própria

- b) Comparar e explicar o comportamento do fator de potência com o menor e o maior comprimento de cabo possível, conectando o Banco de capacitores em paralelo com a carga.