



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica



RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

ALUNO: PEDRO LEONARDO FALCÃO COSTA

ORIENTADOR: EDGAR ROOSEVELT BRAGA FILHO

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2012

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Relatório final de estágio supervisionado apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

ALUNO: _____
Pedro Leonardo Falcão Costa

ORIENTADOR: _____
Professor Dr. Edgar Roosevelt Braga Filho

Campina Grande
Outubro de 2011

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir esse trabalho.

Agradeço também à minha mãe, Francisca Euda, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a todos meus amigos, Daniel, Diego, Camila, Karina, Naelso, Higor, Bruno, Yonatha, Raphael, Vagner, Fausto e Cintya que com todo carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradecimento especial a Adalberto e Cândido que muito me auxiliaram nas fases de condicionamento e ensaio das máquinas.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

Sumário

Agradecimentos	4
Lista de figuras	7
1 Introdução	9
1.1 Laboratório de máquinas elétricas	10
1.2 Atividades desenvolvidas	10
2 Recondicionamento de máquinas elétricas	11
3 Montagem da bancada de experimentos	16
4 Obtenção dos parâmetros físicos	19
4.1 Caracterização de perdas mecânicas	20
4.1.1 Objetivo do ensaio	20
4.1.2 Descrição do ensaio	20
4.1.3 Dados coletados	21
4.1.4 Tratamento dos dados e conclusões	22
4.2 Determinação de resistência elétrica por fase da máquina elétrica síncrona. ..	24
4.2.1 Objetivo do ensaio	24
4.2.2 Descrição do ensaio	24
4.2.3 Dados coletados	25
4.2.4 Tratamento dos dados e conclusões	26
4.3 Característica em circuito aberto da máquina elétrica síncrona.	27
4.3.1 Objetivos do ensaio	27
4.3.2 Descrição do ensaio	27
4.3.3 Dados coletados	28
4.4 Característica em curto circuito da máquina elétrica síncrona.	29
4.4.1 Objetivos do ensaio	29
4.4.2 Descrição do ensaio	30
4.4.3 Dados coletados	31
4.4.4 Tratamento dos dados e conclusões	31
4.5 Determinação da característica externa da máquina elétrica síncrona	33
4.5.1 Objetivo do ensaio	33
4.5.2 Descrição do ensaio	34
4.5.3 Dados coletados	35
4.5.4 Conclusões	37

4.6	Determinação da característica composta da máquina elétrica síncrona.	38
4.6.1	Objetivos	38
4.6.2	Descrição do ensaio	38
4.6.3	Dados coletados.....	39
4.6.4	Conclusões	40
4.7	Ensaio do fator de potência nulo.	40
4.7.1	Objetivos	40
4.7.2	Descrição do ensaio	41
4.7.3	Dados coletados.....	41
4.7.4	Tratamento dos dados e conclusões.....	42
4.8	Ensaio da máxima corrente atrasada da máquina síncrona.	46
4.8.1	Objetivos	46
4.8.2	Descrição do ensaio	46
4.8.3	Tratamento dos dados e conclusões.....	47
4.9	Determinação da impedância Homopolar da máquina síncrona	49
4.9.1	Objetivo.....	49
4.9.2	Descrição do ensaio	49
4.9.3	Cálculo da impedância homopolar da máquina síncrona.....	51
4.10	Ensaio do rotor livre da máquina assíncrona	52
4.10.1	Objetivos	52
4.10.2	Descrição do ensaio	52
4.10.3	Dados coletados.....	52
4.11	Ensaio de rotor bloqueado da máquina assíncrona.	54
4.11.1	Objetivos	54
4.11.2	Descrição do ensaio	54
4.11.3	Tratamento dos dados e conclusões.....	55
5	Conclusão	58
6	Bibliografia	59

LISTA DE FIGURAS

figura 1 - Visão frontal e lateral da máquina CC.	11
figura 2 - Visão frontal e lateral da máquina síncrona.	12
figura 3 - Visão frontal e lateral da máquina assíncrona.	12
figura 4 - Carcaças pintadas com tinta envernizadora branca.	13
figura 5 - Máquina CC a) estator e rotor antes da aplicação do verniz.	14
figura 6 - Máquina Síncrona a) estator e rotor antes da aplicação do verniz.	15
figura 7 - Máquina CC pós-recondicionamento.	15
figura 8 - Máquina Síncrona pós recondicionamento.	16
figura 9 - Máquina Assíncrona pós-recondicionamento.	16
figura 10 - Mancais e Suporte dos mancais.	17
figura 11 - Suporte das máquinas.	17
figura 12 - Acoplador de eixo.	18
figura 13 - Estrutura suporte da bancada de experimentos.	18
figura 14 - Bancada de experimentos concluída.	19
figura 15 - Diagrama de ligação do ensaio de determinação de perdas mecânicas.	20
figura 16 - Imagem do ensaio de determinação de perdas mecânicas.	22
figura 17 - Gráfico das perdas mecânicas.	23
figura 18 - Diagrama de ligação Y para obtenção da resistência elétrica por fase a frio.	24
figura 19 - Diagrama de ligação em Delta para obtenção da resistência elétrica por fase a quente.	25
figura 20 - Imagem do ensaio para obtenção da resistência elétrica por fase da máquina síncrona.	26
figura 21 - diagrama de ligação do ensaio de circuito aberto da máquina síncrona.	28
figura 22 - Imagem do ensaio de circuito aberto da máquina síncrona.	29
figura 23 - Diagrama de ligação do ensaio de curto-circuito da máquina síncrona.	30
figura 24 - Imagem do ensaio de curto-circuito da máquina síncrona.	31
figura 25 - Curvas de Circuito aberto e Curto-circuito da máquina síncrona.	32
figura 26 - Diagrama de ligação do ensaio de característica externa da máquina síncrona.	34

figura 27 - Diagrama de tensões por fase da máquina síncrona de rotor liso.....	35
figura 28 - Segmento de elipse gerado com os pontos da tabela 7.....	36
figura 29 - Imagem ampla do ensaio de característica externa da máquina síncrona.....	36
figura 30 - Painel de controle de conexão das cargas.....	37
figura 31 - Banco de cargas.....	37
figura 32 - Segmento de hipérbole gerado com os pontos da tabela 8.....	40
figura 33 - Diagrama de ligação do ensaio do fator de potência nulo.....	41
figura 34 - Imagem do ensaio do fator de potência nulo.....	42
figura 35 - Curvas do ensaio da carga indutiva e circuito aberto.....	43
figura 36 - Triângulo de Potier.....	44
figura 37 - Diagrama de ligação do ensaio da máxima corrente atrasada.....	46
figura 38 - Imagem do ensaio da máxima corrente atrasada.....	47
figura 39 - Curva de capacidade do gerador síncrono.....	48
figura 40 - Diagrama de ligação do ensaio de rotor livre da máquina assíncrona.....	52
figura 41 - Imagem do ensaio de rotor livre da máquina assíncrona.....	53
figura 42 - Rotor bloqueado.....	54
figura 43 - Circuito monofásico equivalente da máquina assíncrona.....	55
figura 44 - Circuito monofásico equivalente final da máquina síncrona.....	57
figura 45 - Transformação de referencial abc para d-q onde a impedância homopolar permite reversibilidade.....	49
figura 46 - Diagrama do ensaio de determinação da impedância homopolar.....	50
figura 47 - Imagem do ensaio de determinação da impedância homopolar.....	51

1 INTRODUÇÃO

Em época bastante remota, os gregos descobriram que certo tipo de rocha, encontrada na cidade de Magnésia, Ásia Menor, tinha o poder de atrair pequenos pedaços de ferro. A rocha era constituída por um tipo de minério de ferro chamada magnetita (Óxido magnético de ferro) e por isso o seu poder de atração foi chamado de magnetismo.

Mais tarde descobriu-se que se prendendo um pedaço dessa rocha (óxido magnético de ferro, ímã natural) na extremidade de um barbante ela se posicionava de tal maneira que uma das suas extremidades apontava sempre para uma mesma direção. Esses pedaços de rocha, suspensos por um fio, receberam o nome de “pedra-guia” e foram usadas pelos chineses há dois mil anos, para viagens no deserto, e também pelos marinheiros, quando das primeiras descobertas marítimas.

Assim começa a história do magnetismo, com o passar dos anos todos os fenômenos magnéticos foram estudados e descobrimos por fim que podemos utilizar a interação de forças magnéticas em máquinas elétricas girantes.

O primeiro objetivo do estágio está intimamente relacionado com o aprendizado desses fenômenos magnéticos e suas aplicações em máquinas, pois se tratou de recondicionar e mensurar os parâmetros físicos de três máquinas que se encontravam abandonadas e inutilizadas no laboratório de máquinas elétricas da UFCG. As máquinas foram transportadas para o bloco NERG pertencente à faculdade onde se encontra uma oficina equipada com as ferramentas necessárias para o recondicionamento das máquinas.

O segundo objetivo do estágio foi de contribuir com o laboratório de máquinas com a formação de uma nova bancada de experimentos com as máquinas recondicionadas. A subseção a seguir fala brevemente sobre o laboratório de máquinas elétricas da UFCG.

1.1 LABORATÓRIO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

O laboratório encontra-se no bloco BL da faculdade, serve para aulas demonstrativas e práticas para as disciplinas de Conversão Eletromecânica e Máquinas Elétricas. Neste laboratório encontramos uma estrutura de sala de aula convencional com quadro e cadeiras, armários e bancadas no perímetro oposto à entrada e bancadas de experimentos munidas, cada uma delas, com máquinas elétricas conectadas e de objetivo didático, complementando as disciplinas citadas.

1.2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

As três máquinas recondicionadas são referentes aos três principais tipos de máquinas elétricas, uma máquina de corrente contínua ou CC, uma máquina síncrona e uma máquina assíncrona.

Essas três máquinas elétricas encontravam-se desativadas por vários anos no laboratório de máquinas elétricas da UFCG. Elas apresentavam várias partes com deterioração por uso e por tempo inativas, essas partes e todo processo de recondicionamento estarão descritos na subseção 3.1 a seguir. O objetivo de recondicionar essas máquinas foi de poder aprender detalhadamente sobre as partes que as compõem, como funcionam e poder contribuir com a capacidade de material didático do laboratório de máquinas, pois depois de recondicionadas e testadas, elas foram integradas a formação de uma nova bancada de experimentos do laboratório. O processo de montagem desta bancada está descrito na subseção 3.2.

Por fim, foram realizados vários ensaios para determinação de parâmetros físicos pertencentes à máquina. Todos os ensaios e seus respectivos procedimentos estão detalhados na subseção 3.3.

2 RECONDICIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

As três máquinas foram coletadas e encaminhadas à oficina do NERG para o recondicionamento. A primeira ação foi testar a continuidade de seus enrolamentos com um multímetro calibrado na opção de medir resistência, esse passo tem como objetivo verificar se existe algum enrolamento partido, caso houvesse algum, esta máquina iria para uma oficina especializada em repor enrolamentos. Todas as máquinas não apresentaram enrolamentos rompidos, apenas valores de resistência diferentes que já eram esperados, pois os cabos que conectam os enrolamentos aos pontos de ligação externos do painel estavam bastante deteriorados, alguns por estarem parcialmente queimados devido a correntes altas e outros por estarem oxidados.

Estão ilustradas as visões frontal e lateral das três máquinas nas figuras 1,2 e 3, máquina de corrente contínua, máquina síncrona e máquina assíncrona respectivamente antes de começar o processo de recondicionamento.



Figura 1 - Visão frontal e lateral da máquina CC.



Figura 2 - Visão frontal e lateral da máquina síncrona.



Figura 3 - Visão frontal e lateral da máquina assíncrona.

Pode-se observar vários pontos de oxidação no corpo geral e desgaste nos porta-escovas, escovas e anéis coletores em todas as máquinas. O processo de recondicionamento começou com o da máquina CC, ela foi desmontada para uma melhor análise dos pontos com problema. Ela foi a única máquina que apresentou o eixo do rotor desbalanceado, esse problema pode ter sido provocado por má utilização da máquina ou devido ao próprio tempo em que passou inativa numa mesma posição e pelo peso do enrolamento de armadura causou um empeno no eixo.

O processo de balanceamento do eixo é minucioso, mas não é complexo. Primeiramente, é posto o rotor para girar em seu eixo com auxílio de uma máquina de balanceamento, da mesma forma que uma broca é posta pra girar numa furadeira. Um braço mecânico com um pincel na ponta é gradativamente aproximado do eixo

desbalanceado, ao encostar no eixo do rotor, ele vai deixar a marca exatamente do lado que está empenado. Com auxílio de uma prensa pode-se fazer uma força contrária ao empeno e assim gradativamente o eixo vai sendo balanceado até ficar com o giro perfeito, sem ondulações.

Depois foram desmontadas as máquinas síncrona e assíncrona, mas não foi necessário balancear o eixo de nenhuma das duas. Após desmontadas, as peças que fazem a junção das partes como parafusos, porcas e mancais foram lavadas com desoxidantes e lubrificantes para remoção das impurezas. Todos os cabos que fazem ligação dos enrolamentos aos painéis externos foram trocados por novos para evitar perdas por resistências parasitas e proporcionar melhor conexão.

As carcaças, estatores e rotores das máquinas foram limpos por processo de sopro com alta pressão. Nas carcaças, os pontos com oxidação foram cuidadosamente lixados para posteriormente serem pintadas. Por dentro foi pintada com tinta envernizadora branca (figura 4) que facilita a visualização das peças internas e por fora foram pintadas com tinta envernizadora verde para evitar oxidação e destacar a máquina frente a outros objetos do local onde serão instaladas.



Figura 4 - Carcaças pintadas com tinta envernizadora branca.

Nos rotores, todos os coletores foram cuidadosamente lixados para melhorar a conexão com as escovas que por sua vez foram trocadas com o mesmo propósito. Os enrolamentos dos rotores foram envernizados com vernizes de alto desempenho que proporcionam proteção mesmo em eventuais altas temperaturas. Esse verniz tem coloração avermelhada e só foi aplicado após todos os rotores irem para estufa e esquentar em torno de 60° Celsius, pois a dilatação proporciona melhor aderência e atuação do verniz.

Os estatores também passaram pelo processo de aquecimento em estufa e aplicação de verniz de alto desempenho, lembrando sempre de ter cuidado com as partes de plástico para não derreterem na operação. As figuras a seguir mostram o antes e depois da máquina CC e da síncrona até o término dos processos supracitados. As fotos referentes à máquina assíncrona não precisam ser mostradas devido grande semelhança com a máquina síncrona. Observe que na máquina CC os enrolamentos de campo estão no estator e os enrolamentos de armadura estão no rotor, no caso das máquinas síncrona e assíncrona a disposição é exatamente o contrário. Observe também que para o processo de aplicação do verniz, primeiramente é feito o isolamento com fitas nas partes que são condutoras para não interferir no contato com as escovas e no eixo dos rotores para evitar perdas por atrito ao girar.

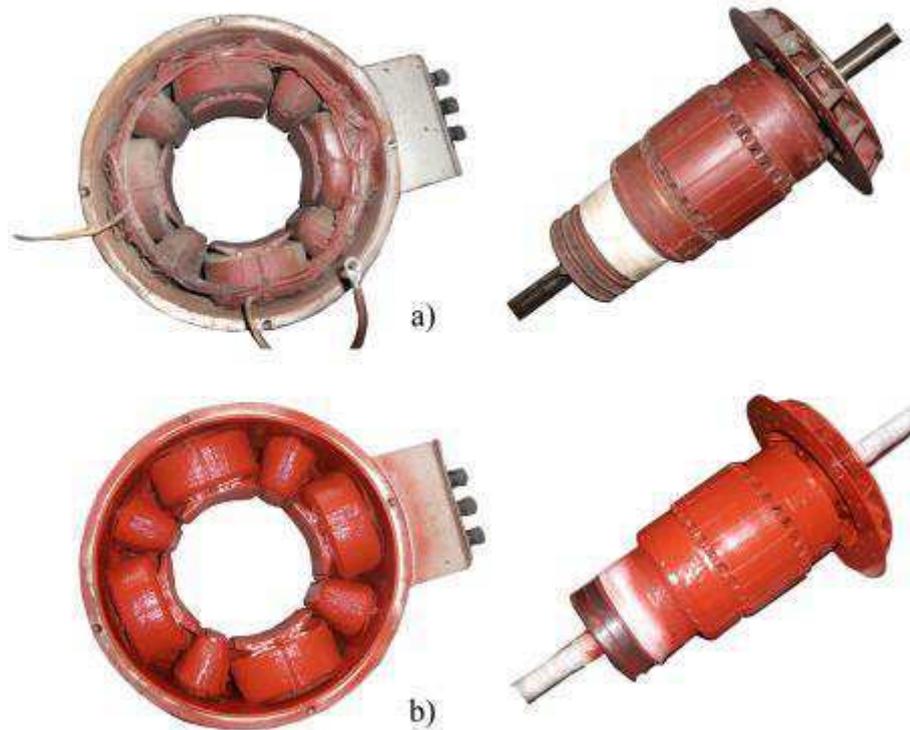


Figura 5 - Máquina CC a) estator e rotor antes da aplicação do verniz.

b) estator e rotor após a aplicação do verniz.

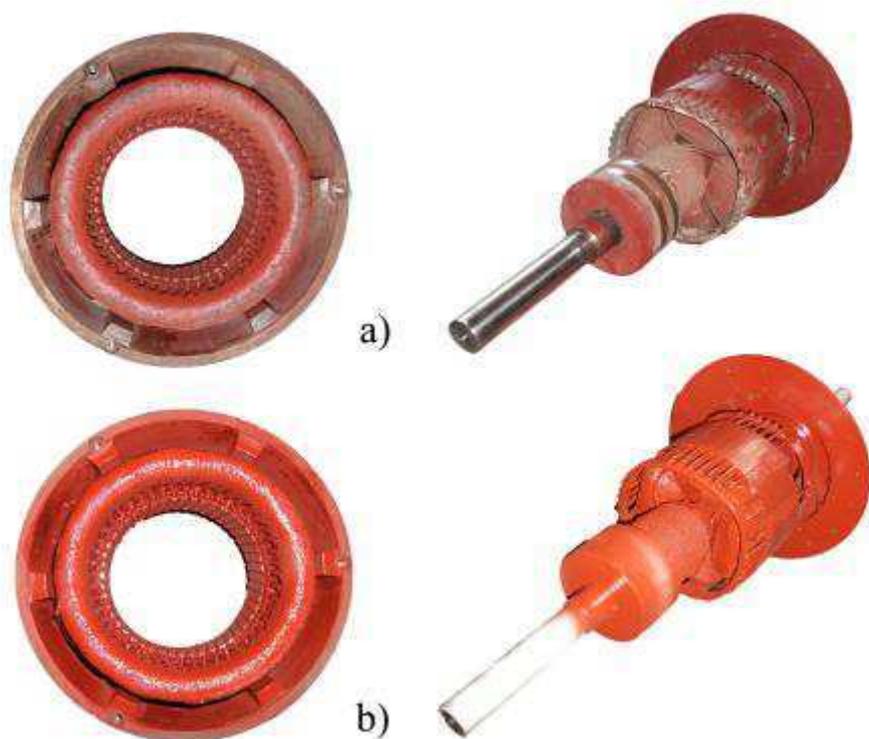


Figura 6 - Máquina Síncrona a) estator e rotor antes da aplicação do verniz.

b) estator e rotor após a aplicação do verniz.

Após a etapa de pintura e condicionamento internos, todos os rolamentos que sustentam os eixos das máquinas foram trocados por novos. Nas figuras 7,8 e 9 estão as imagens de como as máquinas ficaram após serem remontadas.



Figura 7 - Máquina CC pós-recondicionamento.



Figura 8 - Máquina Síncrona pós recondicionamento.



Figura 9 - Máquina Assíncrona pós-recondicionamento.

Depois de remontadas, todas as máquinas foram ligadas e apresentavam um melhor funcionamento, pois os ruídos haviam praticamente desaparecido, pode ser notado que giravam bem melhor que antes as vibrações também haviam praticamente desaparecido.

3 MONTAGEM DA BANCADA DE EXPERIMENTOS

Essa etapa consistiu em unir as três máquinas recondicionadas à uma estrutura de ferro para formar uma nova bancada de experimentos para o laboratório de máquinas elétricas. O primeiro passo foi retirar as impurezas e pintar com a mesma tinta branca de

antes os mancais externos (estruturas que comportam os rolamentos) e suportes dos mancais. Após realizado esta etapa, as peças encontravam-se da seguinte forma na figura 10.



Figura 10 - Mancais e Suporte dos mancais.

O segundo passo foi lixar, retirar impurezas e pintar da mesma forma as estruturas de base de cada máquina. Esta estrutura é que proporciona a fixação da máquina com a armação de ferro, após recondicionada elas encontravam-se da seguinte forma na figura 11.



Figura 11 - Suporte das máquinas.

O terceiro passo foi a confecção dos acopladores de eixos das máquinas, isto porque elas foram conectadas de forma que a máquina síncrona ficasse no centro delas. A máquina CC ficou na extremidade esquerda servindo como máquina primária e a máquina assíncrona na extremidade direita. Os acopladores permitem que o usuário

possa acoplar e desacoplar qualquer máquina dependendo da atividade que será feita. Na figura 12 podemos observar esse acoplador.



Figura 12 - Acoplador de eixo.

O quarto passo foi a confecção da estrutura metálica de sustentação da mesa de experimento. Com barras de ferro ela foi construída e com a mesma tinta branca anteriormente citada ela foi pintada. A estrutura teve que ser feita de forma bem rígida, pois as máquinas em conjunto tem um peso bastante elevado e necessitam de uma estrutura muito resistente para segurá-las. Na figura 13 pode-se observar como ficou a mesa antes de serem postas as máquinas.

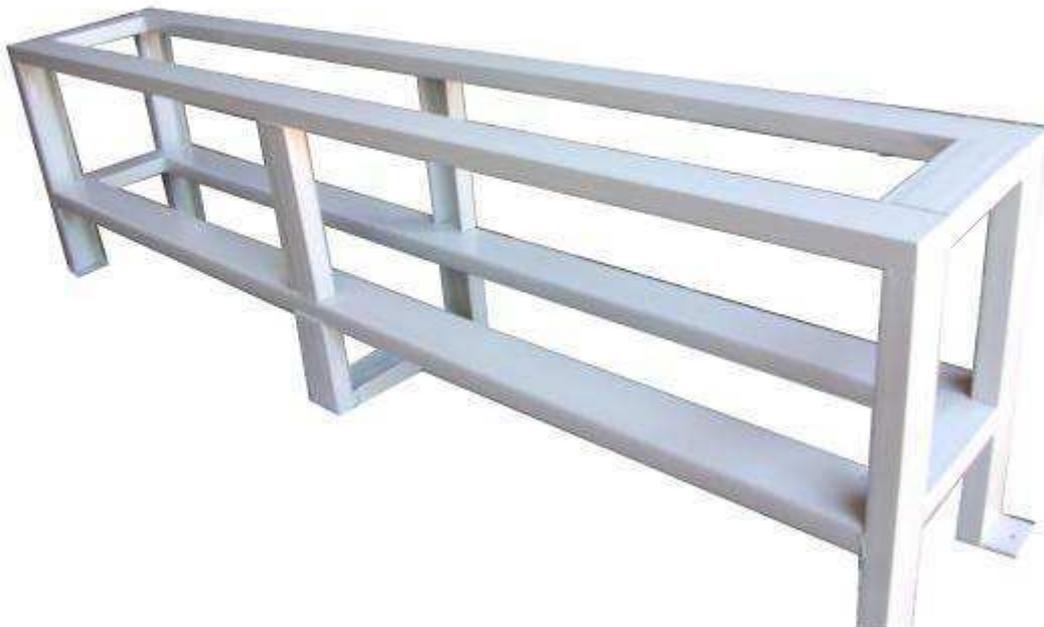


Figura 13 - Estrutura suporte da bancada de experimentos.

Por fim, de maneira minuciosa, foram unidas todas as partes de modo que os eixos das máquinas ficassem perfeitamente alinhados. Os mancais, suporte de mancais, suporte das máquinas e estrutura de ferro foram unidos com parafusos e porcas. O resultado final pode ser visto na figura 14.



Figura 14 - Bancada de experimentos concluída.

4 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS

Nesta seção serão apresentados todos os ensaios feitos em laboratório com o objetivo de obter os parâmetros físicos das máquinas recondicionadas. Todos os passos para realização dos ensaios estão detalhados, todos os ensaios possuem um diagrama esquemático das ligações elétricas nas máquinas e também possuem a imagem real de como o ensaio foi montado no laboratório.

Aqui estarão contidas todas as tabelas obtidas com os dados aferidos nos ensaios, com esses dados e baseado na teoria de máquinas elétricas e conversão eletromecânica, poderemos chegar aos valores finais que cada ensaio propõe.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DE PERDAS MECÂNICAS.

4.1.1 OBJETIVO DO ENSAIO

Pode-se dividir as perdas totais de uma máquina elétrica em três categorias: perdas elétricas; perdas magnéticas; e perdas mecânicas. Esta última caracteriza-se fundamentalmente pela união das perdas por atritos (apoios de rolamentos) e perdas por arrasto aerodinâmico que produz um binário resistente ao girar. Este ensaio tem como objetivo mensurar as perdas mecânicas que cada máquina possui no sistema de acoplamento que compõe a bancada de experimentos. Obtemos as perdas em watts que caracterizam os atritos nos rolamentos, acoplamentos e arrasto aerodinâmico.

4.1.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A máquina de corrente contínua é ligada com alimentação de campo constante de 400 mA CC, seguindo o arranjo da figura 15. A seguir, é variada a tensão de alimentação de armadura no intuito de obter o valor de tensão e corrente de armadura para os valores de rotação predefinidos entre 600 rpm e 1800 rpm (velocidade síncrona). Três baterias de ensaios são feitas: a primeira com a máquina CC desacoplada mecanicamente das outras; em seguida acoplada com a máquina síncrona; e por último com máquina síncrona e motor de indução. Com esse procedimento pode-se calcular as perdas mecânicas de cada máquina secundária no ato do acoplamento.

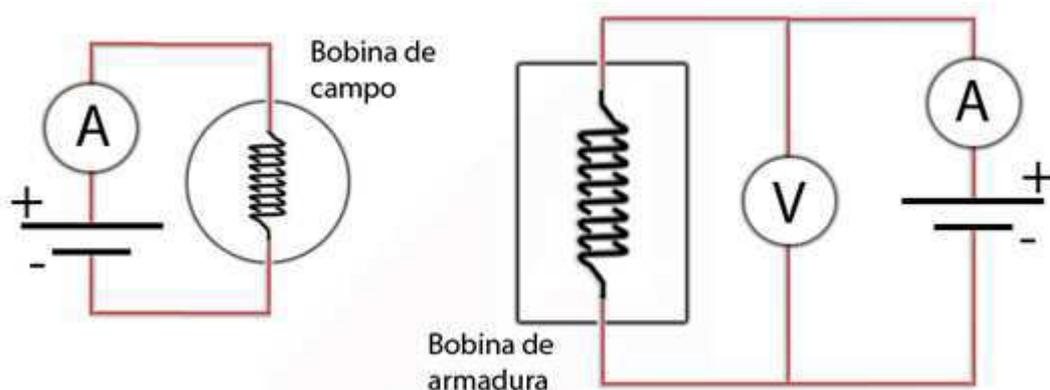


Figura 15 - Diagrama de ligação do ensaio de determinação de perdas mecânicas.

4.1.3 DADOS COLETADOS

Nas Tabelas 1,2 e 3 a seguir estão os resultados obtidos para as três condições de operação propostas.

Tabela 1 – Máquina CC desacoplada

rpm	1800	1600	1400	1200	1000	800	600
V_a	84	110	138	163	188	214	240
I_a	0,5	0,5	0,55	0,6	0,62	0,68	0,7

Tabela 2 – Máq. CC + Máquina síncrona

rpm	1800	1600	1400	1200	1000	800	600
V_a	84	110	136	160	188	214	240
I_a	1	1	1,05	1,1	1,12	1,18	1,3

Tabela 3 – Máq. CC + Máquina síncrona + Motor de indução

rpm	1800	1600	1400	1200	1000	800	600
V_a	84	110	138	162	185	210	240
I_a	1,79	1,87	1,98	2	2,04	2,12	2,32

Na figura 16 temos a imagem de como o experimento foi montado no laboratório. Observe que para obtermos fontes CC, nós retificamos a forma de onda alternada que sai dos variacs e em seguida ligamos nos terminais da máquina. Este arranjo de retificadores estará presente em todos os ensaios que necessitem de alimentação CC. Observe que o variac monofásico alimenta o campo da máquina CC e o variac trifásico alimenta a armadura, pois a corrente é maior e o variac monofásico não suportaria.

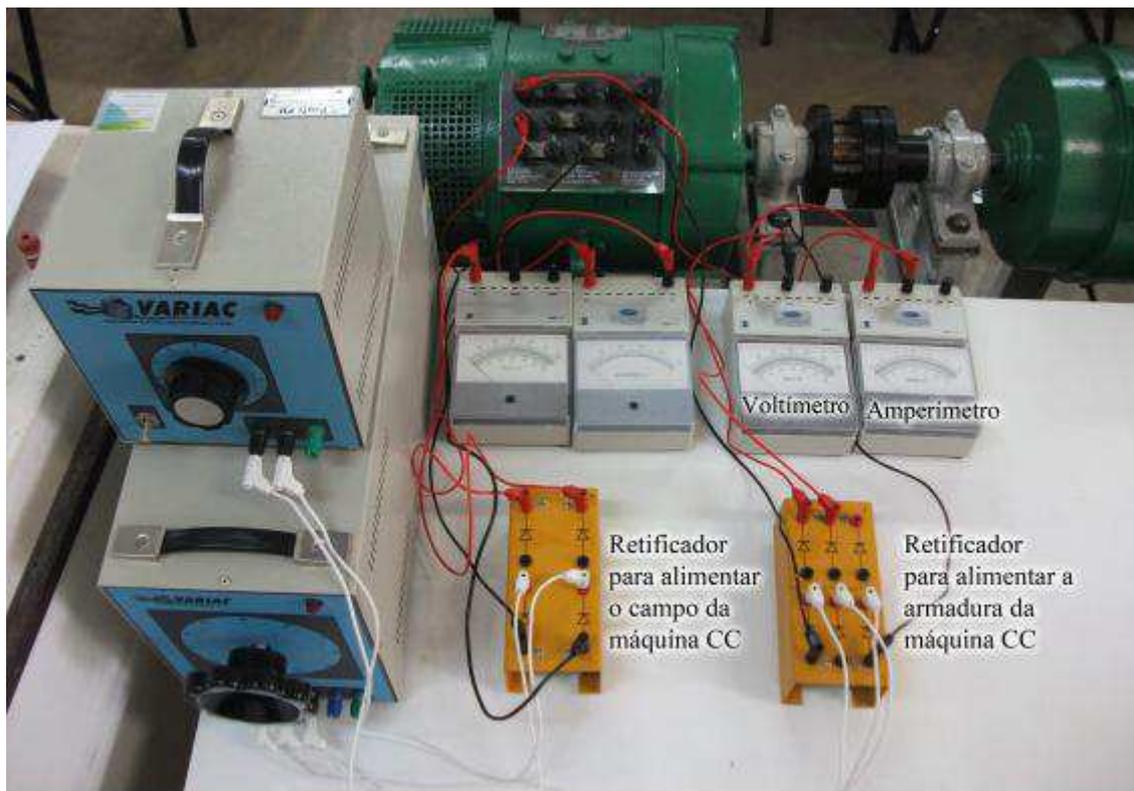


Figura 16 - Imagem do ensaio de determinação de perdas mecânicas.

Os acopladores são as peças negras que estão entre as máquinas no eixo em comum delas, facilmente podem fazer ou desfazer o acoplamento.

4.1.4 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

Pode-se observar no primeiro ensaio que a variação da tensão de alimentação da armadura é mínima podendo ser considerada constante para cada rotação nas três séries. Por outro lado, a corrente de armadura apresenta um crescimento à medida que as máquinas foram sendo acopladas, isto prova o aumento de potência necessária para que a máquina primária consiga obter a rotação desejada. Na figura 17 estão postos os pontos calculados na forma de potência ativa por $P = V * i$ no eixo vertical e a rotação no eixo horizontal. As tensões utilizadas para o cálculo da potência foram a média aritmética das três séries.

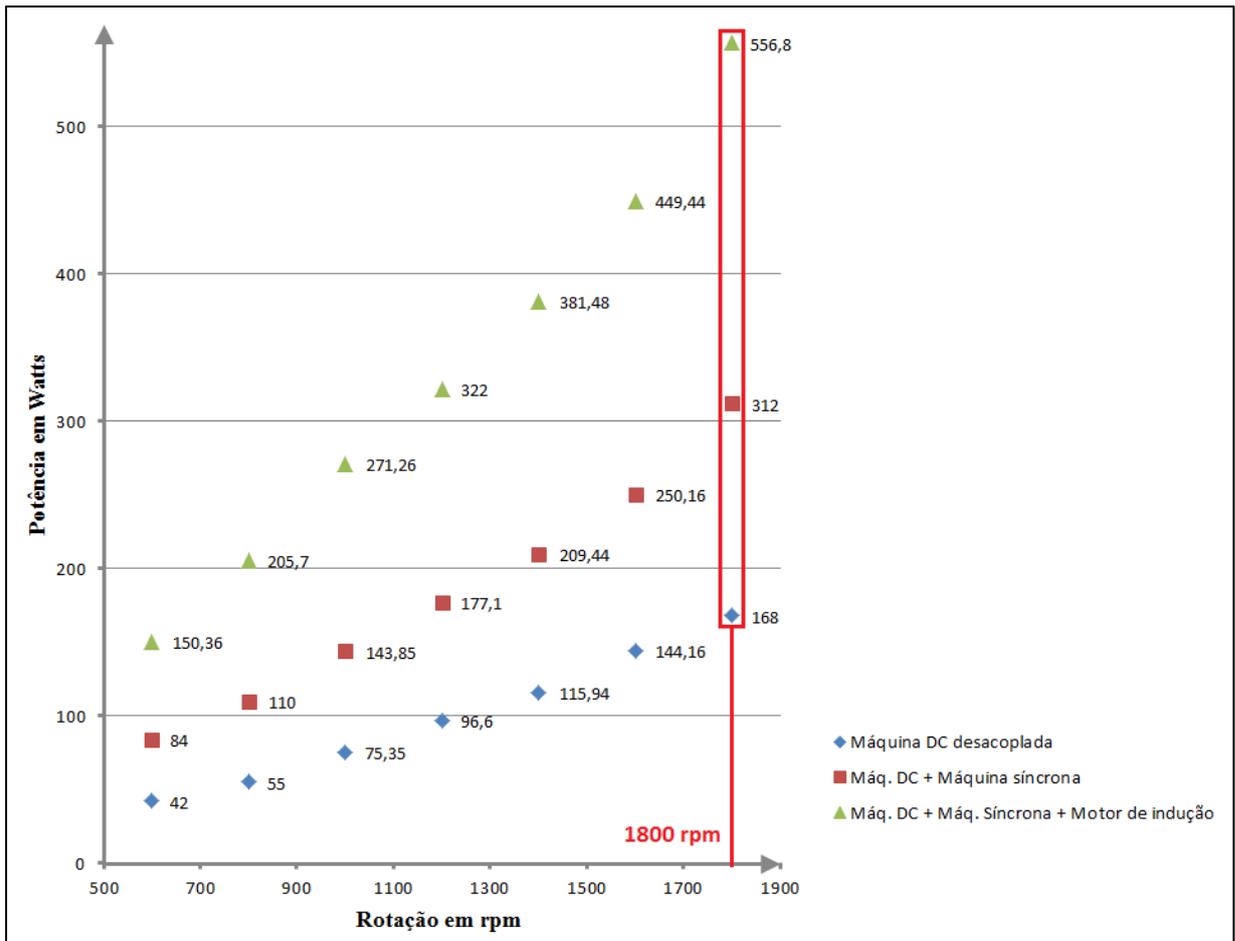


Figura 17 - Gráfico das perdas mecânicas.

Observando particularmente o gráfico na rotação de 1800 rpm, podemos ver que o motor de indução é a maior carga mecânica do conjunto, as respectivas perdas mecânicas são:

$$312 \text{ W} - 168 \text{ W} = \mathbf{144 \text{ W}}$$
 para máquina síncrona.

$$556,8 \text{ W} - 312 \text{ W} = \mathbf{244,8 \text{ W}}$$
 para o motor de indução.

Pode-se observar, que do conjunto de máquinas, a assíncrona é a que tem maior perda mecânica. Esta máquina que possui potência nominal de 2 kW, temos 12,2% só de perdas mecânicas e isso é péssimo relativo ao rendimento da máquina, como ela serve apenas para objetivo didático, isso não é problema, todavia se fosse uma máquina em uma indústria, certamente estaria condenada.

4.2 DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA POR FASE DA MÁQUINA ELÉTRICA SÍNCRONA.

4.2.1 OBJETIVO DO ENSAIO

Baseado na lei fundamental de Ohm, ao ser aplicada uma diferença de potencial elétrico em um caminho que se configure um circuito elétrico com impedância característica, surge uma corrente elétrica diretamente proporcional à intensidade da tensão elétrica. Esse ensaio tem o objetivo de obter o valor da resistência elétrica por fase na armadura da máquina síncrona referida à temperatura de 75°C, que segundo a NBR 5052 [1], é a temperatura preferencial de operação constante.

4.2.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Primeiro, para obtenção do valor de resistência a frio, foram conectadas em série dupla, quatro bobinas da máquina síncrona, de forma que se estabeleceu a ligação em Y da máquina de acordo com a figura 18 sendo fechado o circuito por uma fonte de corrente contínua para medição exclusivamente da resistência elétrica com o auxílio de um voltímetro em paralelo e um amperímetro em série, pois com a frequência zero a parte indutiva das bobinas é anulada.

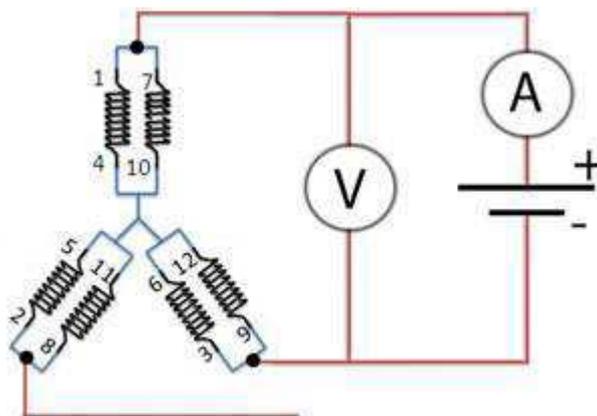


Figura 18 - Diagrama de ligação Y para obtenção da resistência elétrica por fase a frio.

Segundo, para obtenção do valor da resistência a quente, após uma bateria de ensaios aplicados e com a máquina aquecida, as bobinas agora foram conectadas em

ligação Δ dupla de acordo com a figura 19 seguido da mesma configuração de alimentação e medição da anterior.

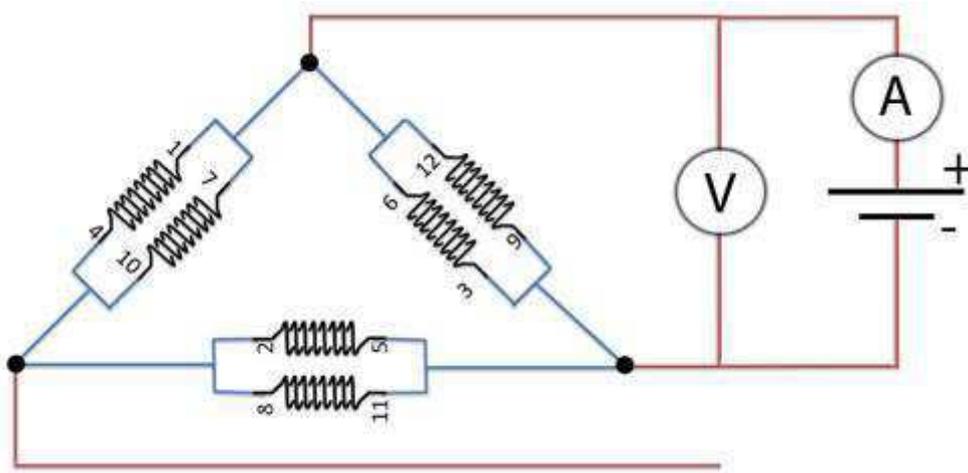


Figura 19 - Diagrama de ligação em Delta para obtenção da resistência elétrica por fase a quente.

4.2.3 DADOS COLETADOS

Na Tabela 4 a seguir temos os resultados obtidos variando a corrente e obtendo a tensão correspondente, note que estão presentes as duas medições, a primeira quando a máquina estava fria e a segunda quando a máquina estava quente, esse procedimento serve para referenciar posteriormente a resistência à temperatura de 75°C .

Tabela 4

$I_{CC}(A)$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$V_{CC}(v)_f$	7,76	15,32	22,70	30,40	38,40
$V_{CC}(v)_q$	2,87	5,76	8,70	11,48	14,40

Na figura 20 tem-se a imagem de como o ensaio foi montado no laboratório.

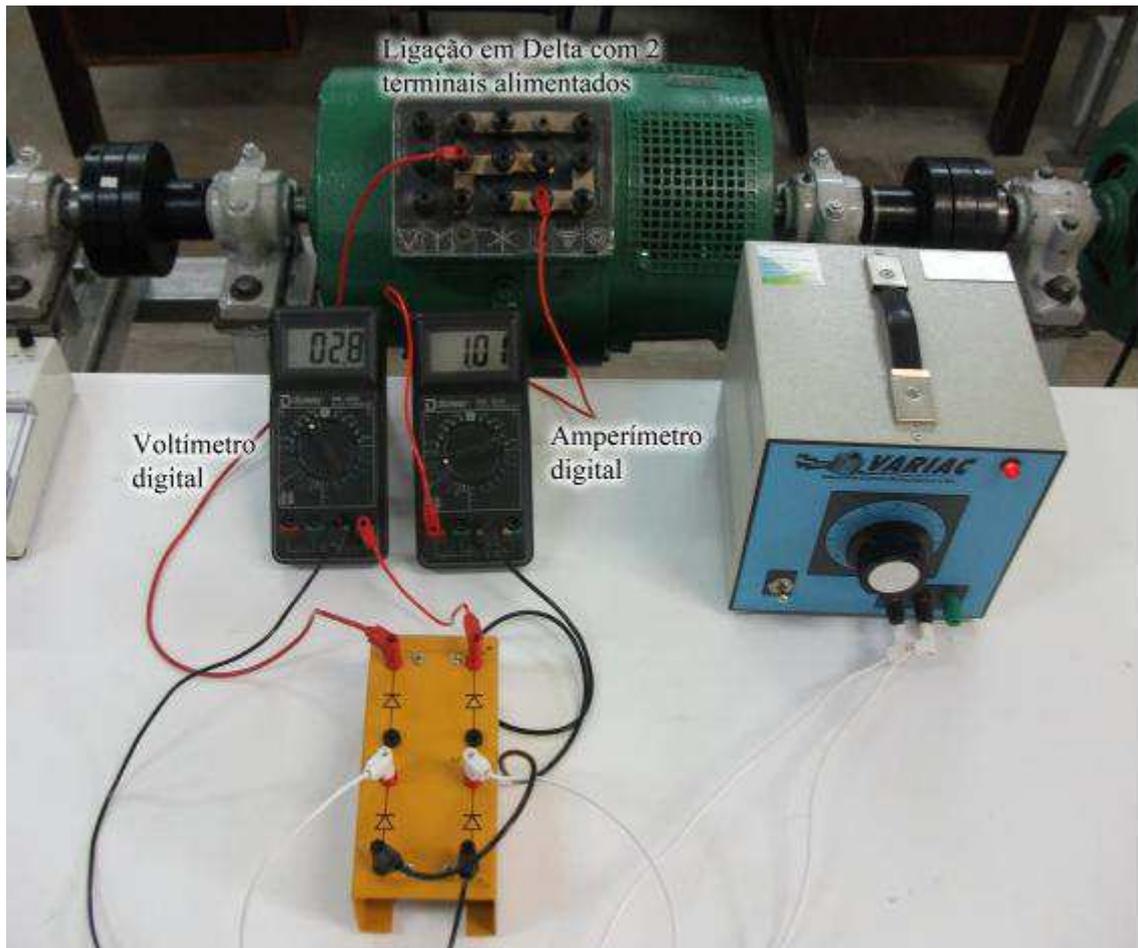


Figura 20 - Imagem do ensaio para obtenção da resistência elétrica por fase da máquina síncrona.

4.2.4 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

Baseado nos dados da tabela 4, pela relação fundamental da lei de Ohm $V = R \cdot I$ é estimado um valor para resistência à frio R_f e quente R_q fazendo a média aritmética das resistências calculadas por coluna:

$$R_f = \frac{\frac{7,76}{1} + \frac{15,32}{2} + \frac{22,70}{3} + \frac{30,40}{4} + \frac{38,40}{5}}{5} \cong 7,65 \frac{\Omega}{\text{bobina}} \text{ ou } 3,675 \frac{\Omega}{\text{fase}} \quad (7)$$

$$R_q = \left(\frac{\frac{2,87}{1} + \frac{5,76}{2} + \frac{8,70}{3} + \frac{11,48}{4} + \frac{14,40}{5}}{5} \right) * 3 \cong 8,28 \frac{\Omega}{\text{bobina}} \text{ ou } 4,14 \frac{\Omega}{\text{fase}} \quad (8)$$

Agora para referenciar a resistência à temperatura de 75° C segue-se as seguintes equações de recorrência [2].

$$T_2 = T_1 + \left[\frac{(R_q - R_f)}{R_f} \right] \cdot (234,5 + T_1) \quad (9)$$

$$R_a = R_q + R_q \cdot \left[\frac{75 - T_2}{234,5 + T_2} \right] \quad (10)$$

Em que:

T_1 é a temperatura ambiente de 25° C

T_2 é a temperatura estimada do enrolamento quando quente.

R_a é o valor médio estimado da resistência da associação referenciada a 75°C

Após aplicar a fórmula de recorrência, obtemos **$R_a \cong 4,54 \Omega/fase$** .

Pudemos verificar que não importa como os enrolamentos de armadura são ligados, se em delta ou estrela, nós podemos aferir o valor da resistência por fase e pela formula de recorrência nós podemos calcular o valor dela referido à 75°C.

4.3 CARACTERÍSTICA EM CIRCUITO ABERTO DA MÁQUINA ELÉTRICA SÍNCRONA.

4.3.1 OBJETIVOS DO ENSAIO

Visando comprovar a relação que surge entre a força magnetomotriz transformada em força eletromotriz na dependência da excitação da bobina de campo da máquina elétrica, esse ensaio tem o objetivo de obter a curva característica de circuito aberto, ou seja, tensão terminal em função da excitação do campo, para observar a saturação da máquina síncrona. Obter em seguida o valor da reatância síncrona (saturada e não saturada) por fase da máquina síncrona (em conjunto com o ensaio de curto-circuito). Devido o segundo objetivo, a análise dos dados e conclusões para esse ensaio só serão apresentadas ao final da subseção do ensaio de curto-circuito.

4.3.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

É posto um voltímetro CA entre fases da máquina síncrona e gradativamente o valor da corrente de excitação de campo CC da máquina é variado a fim de verificar a

tensão ou força eletromotriz em função da força magnetomotriz imposta ao campo da máquina. A configuração deste ensaio é apresentada na figura 21.

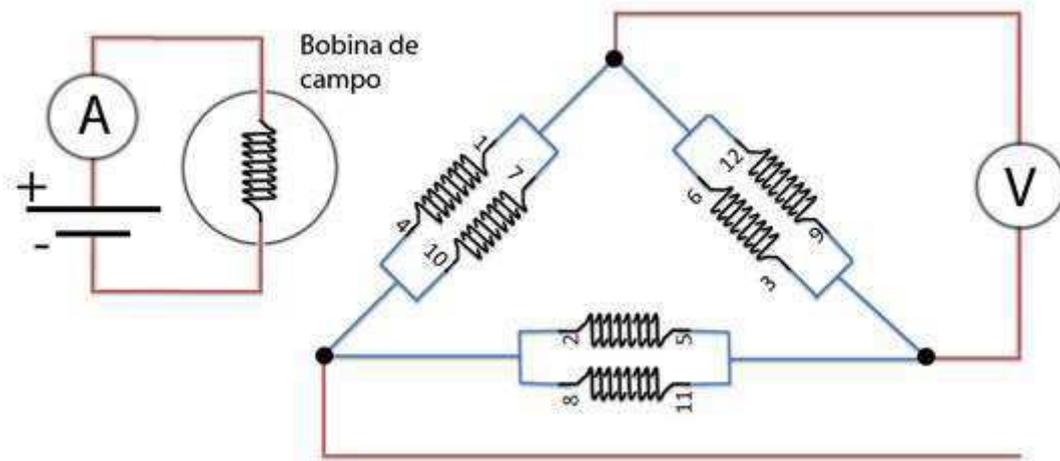


Figura 21 - diagrama de ligação do ensaio de circuito aberto da máquina síncrona.

O motor de corrente contínua, mantendo a ligação de alimentação do primeiro ensaio, sendo a máquina primária da geração, é posto na rotação síncrona de 1800 rpm. Já no campo da máquina síncrona, não excedemos em mais de 20% o valor de corrente de excitação da máquina que é de 0,6 A.

4.3.3 DADOS COLETADOS

Na tabela 5 abaixo, temos o comportamento da tensão para os diferentes níveis de excitação. Os valores de tensão da tabela são uma média aritmética de três seções de medidas para o conjunto de valores da corrente de campo.

Tabela 5

$i_f(A)$	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
$V_{t_{CA}}$	0	106	142	175,3	200	222,6	236	250

$i_f(A)$	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
$V_{t_{CA}}$	261,3	272,3	279,3	287	294,6	301

Na figura 22 tem-se a imagem de como o ensaio foi montado no laboratório, observe que a montagem da máquina primária está a mesma do primeiro ensaio. Observe o acoplamento fechado que une a máquina CC ao gerador síncrono. Para verificar se a máquina já atingiu a rotação síncrona, dispomos de um aparelho chamado Tacômetro digital, ele faz a leitura via *laser* diretamente na fita refletora que esta colada no acoplador.

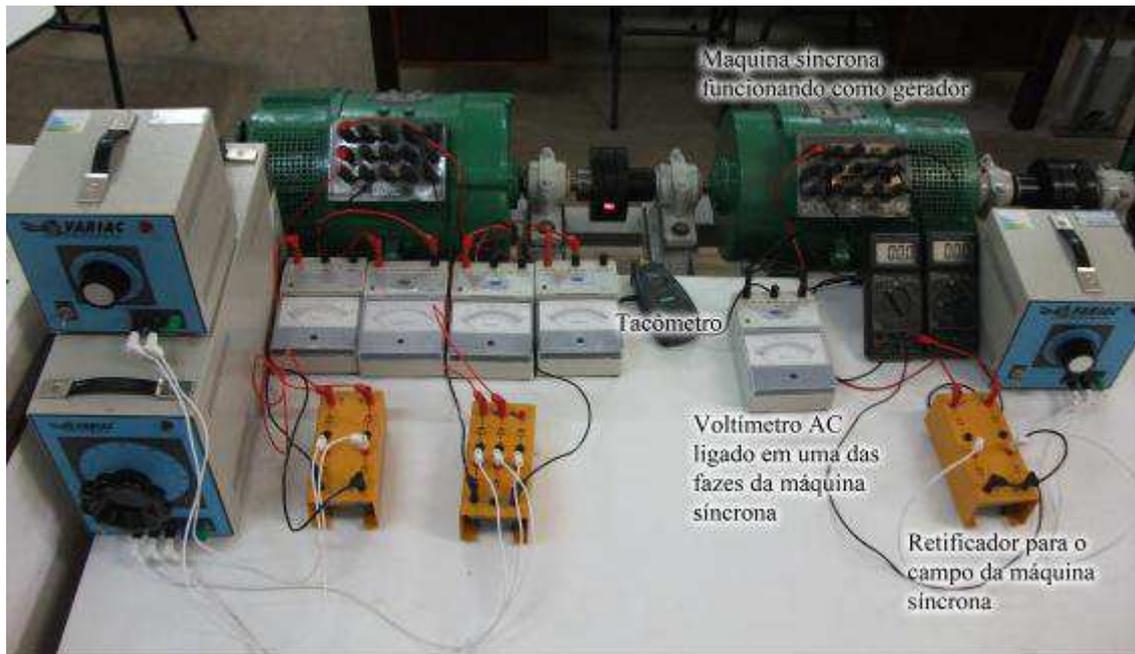


Figura 22 - Imagem do ensaio de circuito aberto da máquina síncrona.

4.4 CARACTERÍSTICA EM CURTO CIRCUITO DA MÁQUINA ELÉTRICA SÍNCRONA.

4.4.1 OBJETIVOS DO ENSAIO

Visando observar a relação entre excitação de campo da máquina e corrente elétrica máxima obtida nos terminais de armadura, esse ensaio tem o objetivo de obter a curva característica curto-circuito, ou seja, corrente em função da excitação do campo da máquina, para observar sua linearidade. Obter o valor da reatância síncrona (saturada

e não saturada) por fase da máquina síncrona (em conjunto com o ensaio de circuito aberto).

4.4.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Em geral, a resistência de armadura das máquinas síncronas são desprezíveis ou de valores baixos em relação à reatância por fase, então considerando que para corrente nominal de armadura de curto-curto circuito, a tensão de entreferro é então bem pequena e relacionada com a resistência, o fluxo resultante é bem pequeno e conseqüentemente a máquina opera em condições não-saturada. Portanto, a corrente de armadura no curto-circuito é diretamente proporcional a corrente de campo e o gráfico esperado para o ensaio é uma reta.

Os terminais da máquina síncrona são conectados para formar o curto-circuito entre eles, da mesma forma gradativamente o valor da corrente de excitação de campo da máquina é variado a fim de verificar o valor da corrente de curto circuito com o auxílio de um amperímetro ligado em paralelo a uma das fases da máquina, segundo a configuração ilustrada na figura 23. Da mesma forma que anteriormente, utilizou-se a máquina CC como primária na rotação de 1800 rpm.

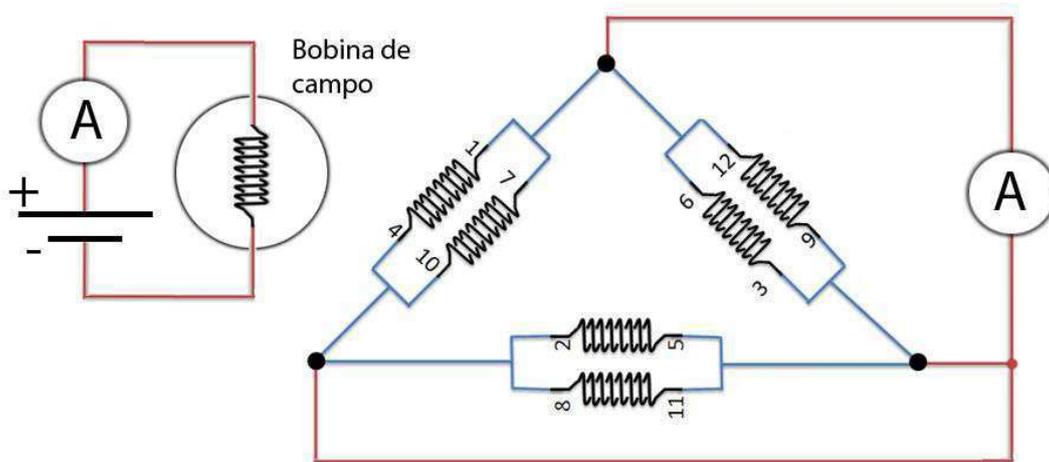


Figura 23 - Diagrama de ligação do ensaio de curto-circuito da máquina síncrona.

4.4.3 DADOS COLETADOS

Na tabela 6 a seguir, temos o resultado deste ensaio:

Tabela 6

$i_f(A)$	0,0	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$I_{a_{CC}}(A)$	0,0	3,26	4,05	4,93	5,65	6,54

Na figura 24 temos a imagem de como o ensaio foi montado no laboratório, observe que as únicas diferenças são os terminais curto-circuitados e o amperímetro CA no lugar do voltímetro de antes.

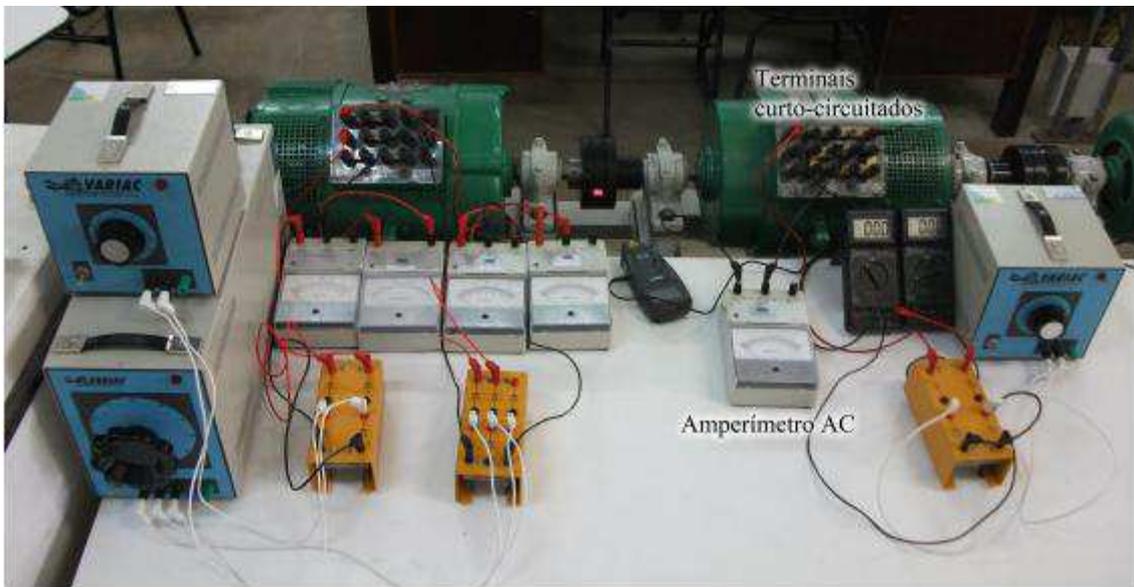


Figura 24 - Imagem do ensaio de curto-circuito da máquina síncrona.

4.4.4 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

Os dados das Tabelas 5 e 6 estão representados na figura 25 com um detalhe que o eixo vertical $I_{a_{CC}}(A)$ está referido do lado direito para melhor visualização.

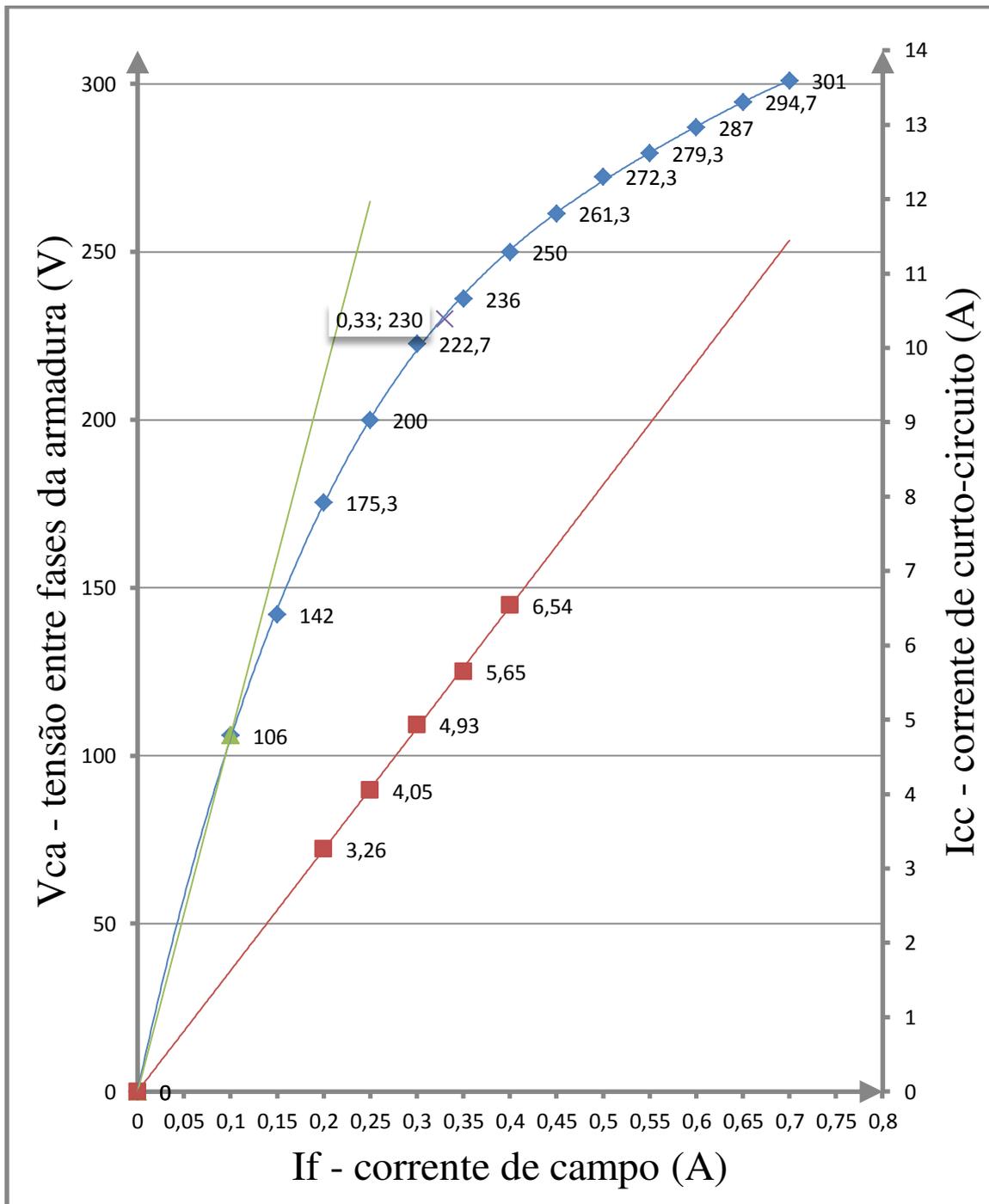


Figura 25 - Curvas de Circuito aberto e Curto-circuito da máquina síncrona.

Segundo as curvas de circuito aberto (não-saturada ▲ e saturada ◆) e a curva de curto-circuito ■, podemos encontrar facilmente a expressão referente à curva de circuito aberto não-saturada e curto-circuito para esta configuração da máquina, são elas:

$$V_{t_{CA_{ns}}} = 1060 * i_f \quad (11)$$

$$I_{a_{CC}} = 16,228 * i_f \quad (12)$$

A partir da equação: $Z = V_{nominal} / I_{acc}$ seguindo a tensão nominal de 230 V

da máquina na rotação síncrona, obtemos:

Impedância saturada, $Z_s = 42,9 \Omega/fase$

Impedância não-saturada, $Z_{ns} = 65,3 \Omega/fase$

Para encontrar as respectivas reatâncias “X” basta aplicar em: $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$

Farei $R = R_a$ que foi encontrado anteriormente e igual a $4,54 \Omega/fase$

Reatância saturada, $X_s = 42,65 \Omega/fase$

Reatância não saturada, $X_{ns} = 65,14 \Omega/fase$

Pode-se observar que a curva de circuito aberto possui uma região praticamente linear chamada de reta de entreferro e que ocorre a saturação magnética, que é o estado alcançado quando um aumento na aplicação externa de um campo magnético não pode aumentar a magnetização do material adicionalmente, de modo que o campo magnético total limita-se. Nesta condição o material está totalmente magnetizado, e virtualmente todos os domínios magnéticos estão alinhados na mesma direção. Observa-se também que a curva para corrente de curto-circuito é linear.

4.5 DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA EXTERNA DA MÁQUINA ELÉTRICA SÍNCRONA.

4.5.1 OBJETIVO DO ENSAIO

Verificar o comportamento da tensão terminal face à adoção de cargas elétricas de natureza fortemente resistiva mantendo a intensidade da corrente de campo ou excitação I_f .

4.5.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

É posto um voltímetro entre fases e um amperímetro em série com uma fase da máquina síncrona funcionando como gerador novamente sendo tocada à 1800 rpm pela máquina CC da mesma forma que antes. Ligadas aos terminais de armadura por fase da máquina estão conjuntos de cargas (lâmpadas incandescentes) que são gradativamente acopladas (paralelamente) ao circuito fazendo com que varie a intensidade da impedância e não modifique sua natureza. Foram utilizadas lâmpadas incandescentes por serem bem próximas a natureza de uma carga puramente resistiva. Este arranjo pode ser observado na figura 26.

O i_f foi determinado com 6 conjuntos de lâmpadas ligados com sua tensão de operação de 230 V, foi observado $i_f = 0,36 A$. Este valor de i_f para 10 conjuntos de cargas nos retorna $I_a = 4,55 A$ que já é bem próximo do valor de corrente máxima descrito na placa na máquina que é de 5 A.

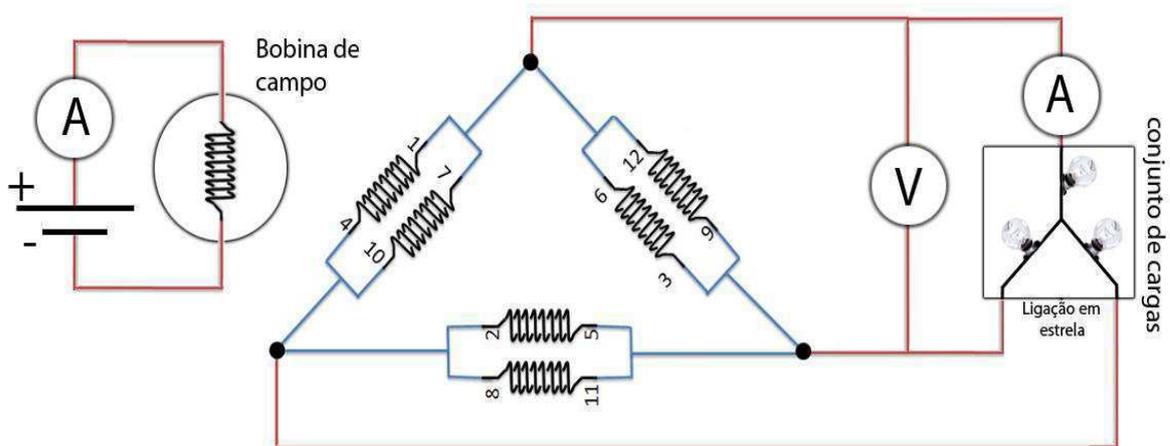


Figura 26 - Diagrama de ligação do ensaio de característica externa da máquina síncrona.

Considerando a máquina em estudo sendo de rotor liso, nós podemos observar o seguinte diagrama de tensões que rege o comportamento dessa máquina.

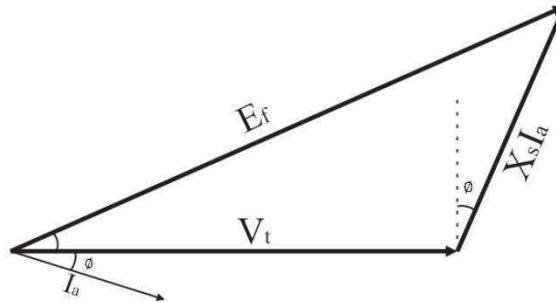


Figura 27 - Diagrama de tensões por fase da máquina síncrona de rotor liso.

em que:

$$E_f^2 = V_t^2 + 2V_t X_s I_a \text{sen}\phi + (X_s I_a)^2 \quad (3)$$

Como foi comentada anteriormente, a carga do ensaio no laboratório é considerada puramente resistiva, então o termo $2V_t X_s I_a \text{sen}\phi$ da equação é nulo devido a corrente não sofrer atraso para esse tipo de carga.

Então, pode-se rearranjar a equação da seguinte forma:

$$\frac{I_a^2}{\left(\frac{E_f}{X_s}\right)^2} + \frac{V_t^2}{E_f^2} = 1 \quad (4)$$

Que corresponde a equação característica de uma elipse, observamos os resultados para o primeiro quadrante já que temos apenas valores positivos para corrente, tensões e impedância.

4.5.3 DADOS COLETADOS

A Tabela 7 a seguir mostra os resultados obtidos no ensaio:

Tabela 7

Conjunto de cargas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_a(A)$	0,00	0,48	0,98	1,49	1,97	2,45	2,94	3,36	3,80	4,17	4,55
$V_t(volt)$	240	238	234	233	230	224	220	216	208	200	190

Na figura 28 estão postos estes pontos referentes à Tabela 7, é observado no gráfico gerado com esses pontos que segue uma forma elíptica, o fato de manter a excitação faz com que a amplitude de E_f não mude, apenas a fase é modificada. Quando o circuito está em aberto $V_t = E_f$ e quando está em curto circuito $I_a = \frac{E_f}{X_s} = 5,84$.

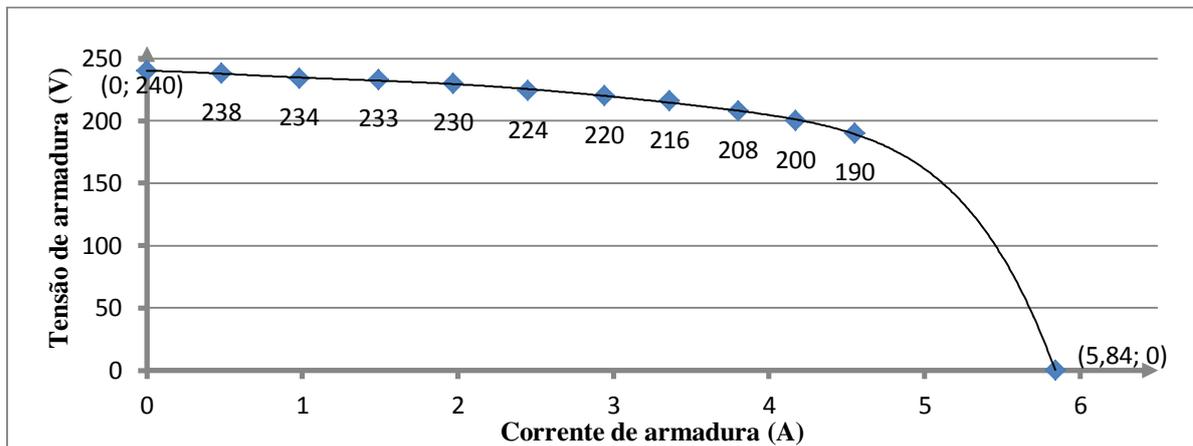


Figura 28 - Segmento de elipse gerado com os pontos da tabela 7.

Nas figuras 29, 30 e 31, tem-se as imagens do ensaio, o painel de conexões do banco de cargas e o banco de cargas respectivamente.



Figura 29 - Imagem ampla do ensaio de característica externa da máquina síncrona.



Figura 30 - Painel de controle de conexão das cargas.



Figura 31 - Banco de cargas.

4.5.4 CONCLUSÕES

Pode-se perceber que realmente o comportamento da tensão em função da corrente de excitação segue o formato de uma elipse segundo o segmento de elipse que vemos no gráfico da figura 28. Então a equação (3), que caracteriza o diagrama fasorial de tensões da máquina, está validada.

4.6 DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA COMPOSTA DA MÁQUINA ELÉTRICA SÍNCRONA.

4.6.1 OBJETIVOS

Verificar o comportamento da Corrente de armadura I_a em função da corrente de excitação face à adoção de cargas fortemente resistivas mantendo a tensão terminal em 230V.

4.6.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O arranjo de voltímetro, amperímetro, máquina CC e cargas é o mesmo do ensaio anterior, porém, é mantida tensão terminal $V_t = 230 V$ e regulando I_f de acordo com o que a carga vai solicitando mais corrente de armadura I_a .

A equação (3) é novamente utilizada para análise do comportamento do experimento, para o tal, podemos dizer que existe uma relação direta proporcional entre E_f e I_f , lembrando que vamos regulando I_f com cada acréscimo de carga, conseqüentemente é variado o valor de E_f para manter V_t .

Considerando um fator 'k' de proporcionalidade entre E_f e I_f , temos a equação (1) escrita da seguinte forma:

$$(k \cdot I_f)^2 = V_t^2 + 2V_t X_s I_a \text{sen}\phi + (X_s I_a)^2 \quad (5)$$

Lembrando que $\text{sen}\phi = 0$, dividindo todos os termos por V_t^2 que é constante agora temos:

$$\frac{I_f^2}{\left(\frac{V_t}{k}\right)^2} - \frac{I_a^2}{\left(\frac{V_t}{X_s}\right)^2} = 1 \quad (6)$$

Que corresponde a equação característica de uma hipérbole, observa-se os resultados para o primeiro quadrante já que temos apenas valores positivos para corrente, tensão e impedância.

4.6.3 DADOS COLETADOS

Os resultados do ensaio estão na tabela 8 abaixo:

Tabela 8

Conjuntos de cargas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_f(A)$	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,44
$I_a(A)$	0,00	0,47	0,96	1,44	1,92	2,40	2,92	3,39	3,88	4,35	4,87

Na figura 32 estão postos estes pontos referentes à tabela 5, é observado no gráfico gerado com esses pontos que segue uma forma hiperbólica, em que o ponto que toca o eixo de I_f e mostra $I_a = 0$, nos diz que é necessária esta excitação de campo para obter a tensão terminal fixada para o experimento mesmo o circuito estando em aberto.

No gráfico gerado podemos observar que se faz necessário o ajuste de corrente de campo para que a máquina não entregue tensão terminal fora de um determinado padrão previamente estabelecido, normalmente esse padrão é 220 V (por fase) para uso em instalações comerciais comuns. Numa estação de controle de uma hidrelétrica o ajuste da corrente de campo dos geradores síncronos é de fundamental importância para a qualidade da energia entregue à população.

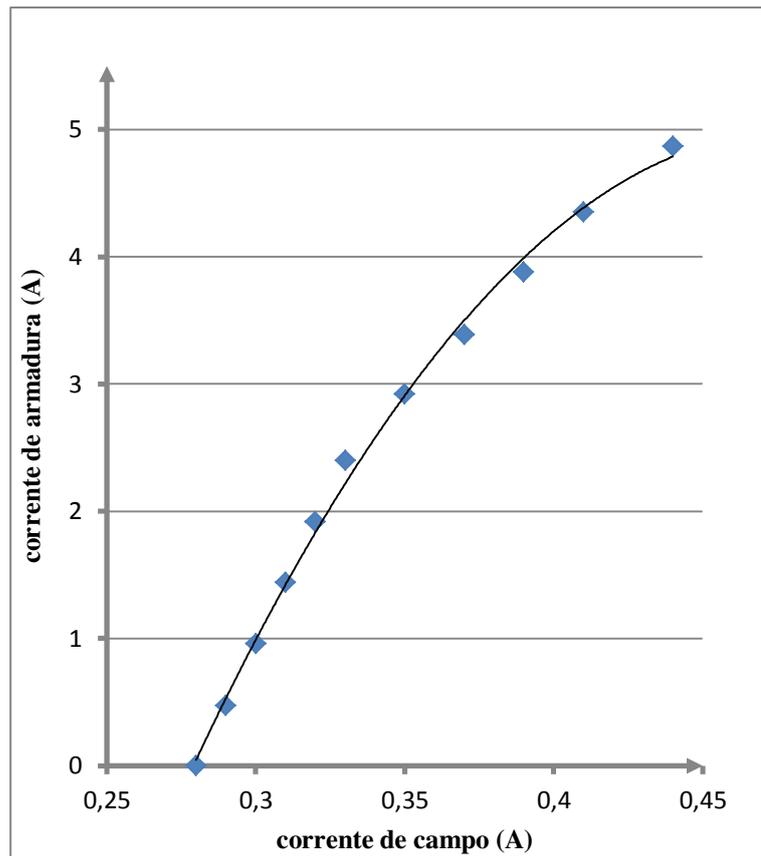


Figura 32 - Segmento de hipérbole gerado com os pontos da tabela 8.

4.6.4 CONCLUSÕES

Podemos perceber que realmente o comportamento da corrente de armadura em função da corrente de excitação segue o formato de uma hipérbole segundo o segmento de hipérbole que vemos no gráfico da figura 32. Então a equação (3), que caracteriza o diagrama fasorial de tensões da máquina, novamente é validada.

4.7 ENSAIO DO FATOR DE POTÊNCIA NULO.

4.7.1 OBJETIVOS

Visando observar o atraso de fase da corrente de armadura e comprovar que a tensão terminal será menor para uma carga indutiva do que o circuito aberto para uma mesma corrente de excitação de campo, esse ensaio tem o objetivo de verificar o comportamento da curva de tensão terminal em função da excitação do campo ao

alimentar uma carga fortemente indutiva, ou seja, com fator de potência quase nulo. Em conjunto aos ensaios de circuito aberto e curto-circuito, obteremos a regulação da máquina síncrona pelo método de Potier.

4.7.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Ainda com a máquina síncrona funcionando como gerador, neste ensaio precisamos fazer com que ela alimente uma carga indutiva (fator de potência nulo), mas não dispúnhamos de banco de indutores perfeitos no laboratório, então ligamos o gerador à máquina assíncrona como sendo a mais próxima carga indutiva que poderíamos ter a disposição.

Mantendo as ligações do ensaio de circuito aberto da máquina síncrona, variando logicamente que ela irá alimentar a máquina assíncrona, temos o seguinte diagrama de ligação na figura 33.

Novamente a corrente de campo é variada para obtenção da tensão terminal correspondente. Lembrando que temos que manter a rotação síncrona de 1800 rpm com auxílio da máquina CC novamente.

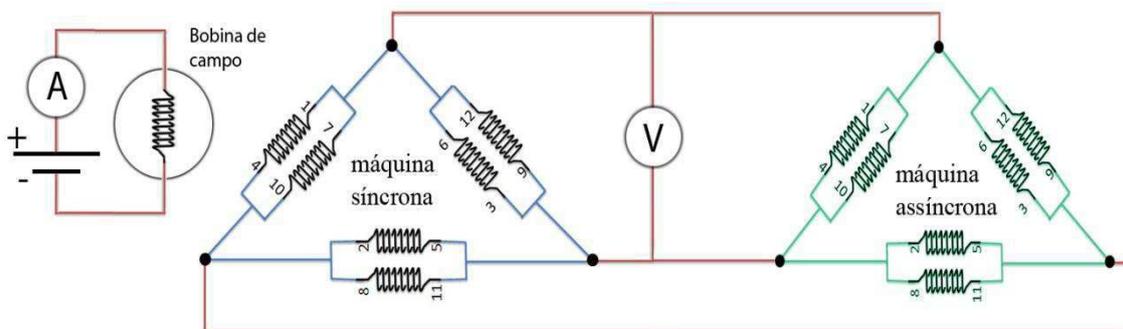


Figura 33 - Diagrama de ligação do ensaio do fator de potência nulo.

4.7.3 DADOS COLETADOS

Na Tabela 9 temos os valores de tensão medidos em função da corrente de campo.

Tabela 9

$i_f(A)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$V_{t_{CA}}$	83	140	189	220	240	257

Na figura 34 temos a imagem referente ao ensaio montado no laboratório.



Figura 34 - Imagem do ensaio do fator de potência nulo.

4.7.4 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

A partir dos dados coletados no ensaio do fator de potência nulo e com os valores obtidos da subseção anterior relativo aos ensaios de circuito aberto e curto-circuito, nós podemos encontrar a regulação da máquina síncrona.

O método que optei para tal determinação foi o de Potier. A seguir, na figura 35, nós podemos perceber que o comportamento de uma carga fortemente indutiva segue a forma da curva de circuito aberto e sofre um deslocamento na diagonal inferior direita. Todo processo de obtenção do triângulo e valores de Potier estão detalhados a seguir.

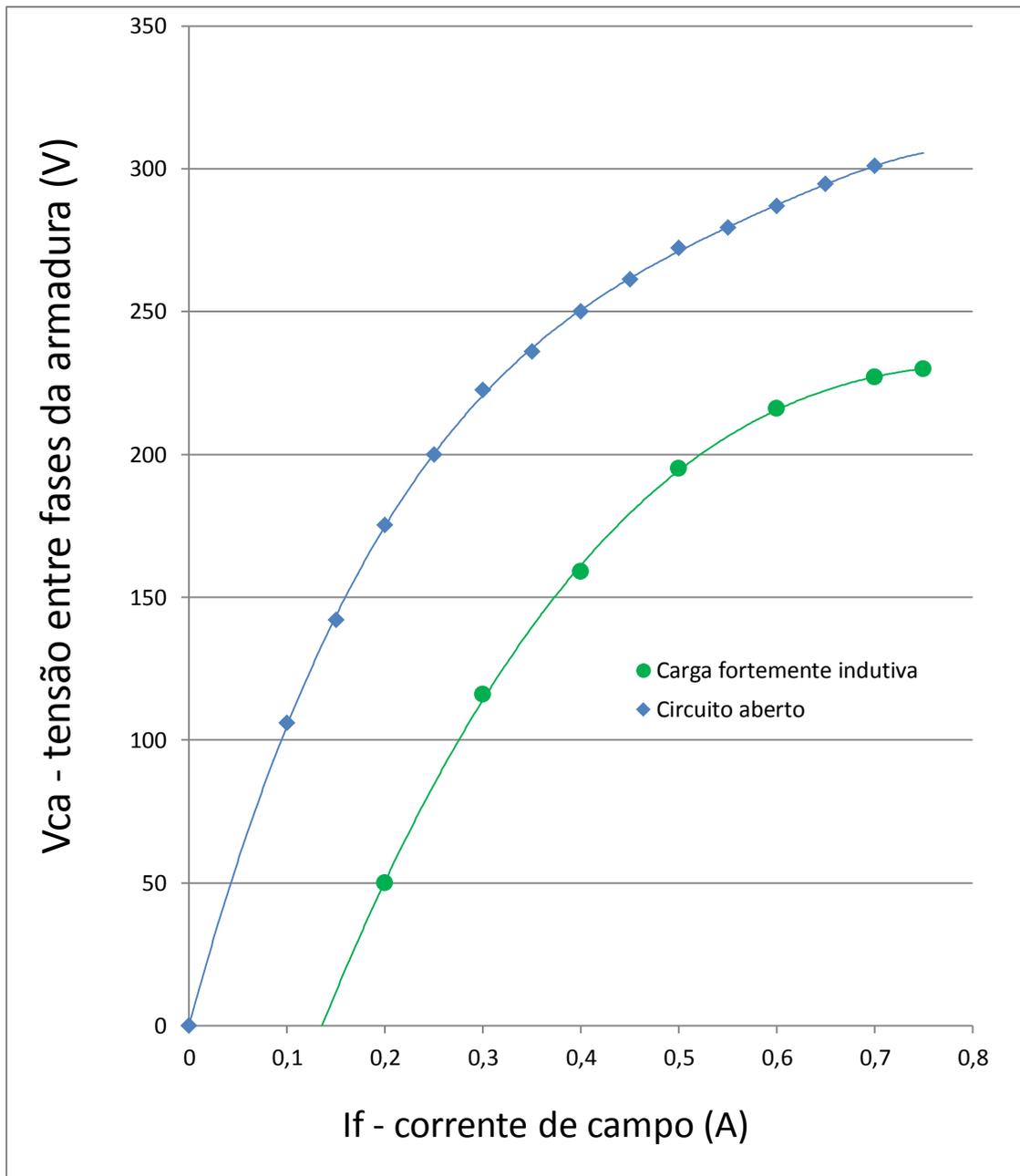


Figura 35 - Curvas do ensaio da carga indutiva e circuito aberto.

Para definirmos a base do triângulo de Potier nós precisamos saber que corrente de excitação impõe corrente de curto-circuito nominal da máquina. Sabendo que na placa da máquina encontramos escrito a corrente nominal de 5A para configuração delta, podemos saber pela reta de curto-circuito (figura 25) que a corrente de campo é de 0,3 A correspondente no eixo horizontal. Esta corrente de campo corresponde ao tamanho da base do triângulo de Potier. Deslocamos essa base do triângulo para cima e seguindo a curva da carga fortemente indutiva até a altura de 230 V no eixo vertical que corresponde à tensão nominal da máquina para esta configuração.

Traçando uma reta auxiliar paralela a reta do entreferro (não saturada) tocando a extremidade esquerda da base do triângulo, nós obtemos o lado esquerdo do triângulo ao fazer que essa reta atinja um ponto pertencente à curva de circuito aberto. Obtido esse último ponto, nós assim fechamos o triângulo de Potier em que a altura do mesmo é o valor $\Delta V_{Potier} = 37,8 V$, podemos observar estes passos resultando na figura 36.

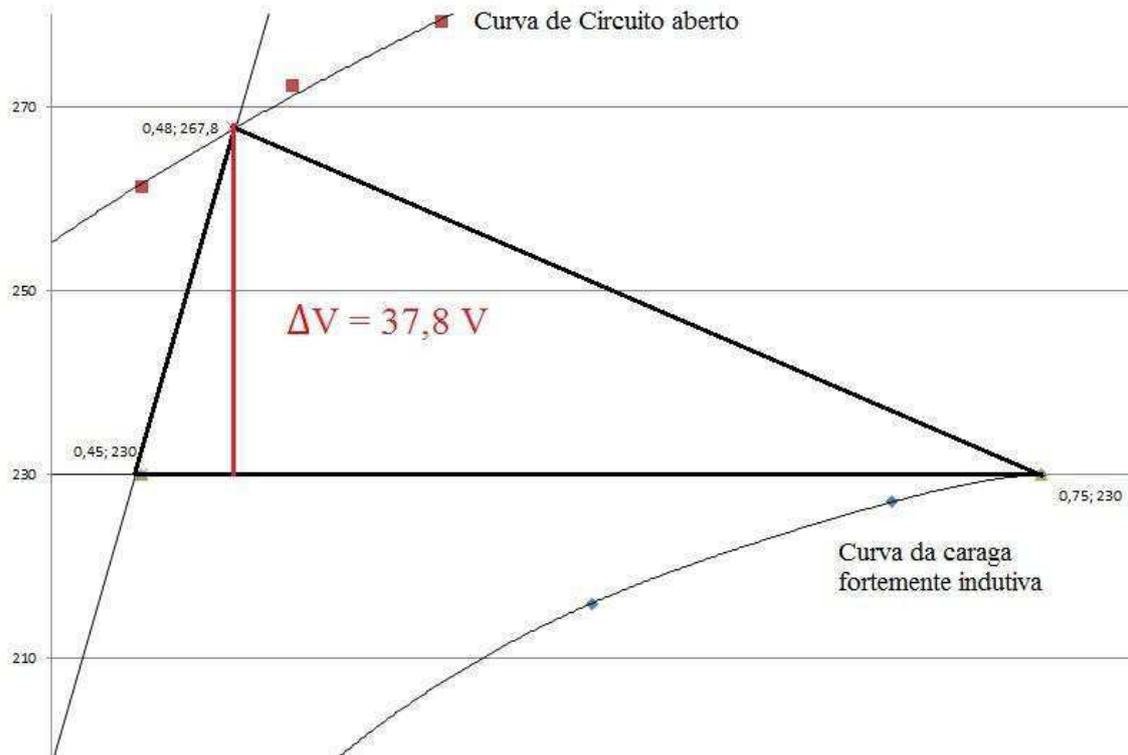


Figura 36 - Triângulo de Potier

Após obtido o triângulo, encontramos a reatância de dispersão pela razão de ΔV_{Potier} pela corrente de armadura nominal.

$$X_L = \frac{\Delta V_{Potier}}{I_{nominal}} = \frac{37,8}{5} = 7,56 \Omega \quad (13)$$

Considerando a máquina como sendo de polos salientes, obtemos a reatância de Potier como sendo:

$$X_P = 1,2 * X_L = 1,2 * 7,56 = 9,072 \Omega \quad (14)$$

Com esse valor de reatância, nós podemos calcular agora a tensão de Potier.

$$V_P = V_{nominal} + jX_P * I_{nominal} + R_a * I_{nominal} = 276,3 V \quad (15)$$

É importante lembrar que precisamos saber o fator de potência dado na placa da máquina para colocar como grau de defasamento da corrente no cálculo da tensão de Potier acima.

Sabendo da tensão de Potier, temos que calcular o fator de saturação K_s , basta saber o valor de corrente de campo correspondente às curvas de entreferro e circuito aberto que temos no gráfico da figura 25. Os valores são:

$$I_{f \text{ entreferro}} = 0,26 \text{ A} \quad \text{e} \quad I_{f \text{ circuito aberto}} = 0,53 \text{ A}$$

$$K_s = \frac{I_{f \text{ circuito aberto}}}{I_{f \text{ entreferro}}} = 2,03 \quad (15)$$

Agora calculamos a reatância de magnetização não saturada X_M :

$$X_M = X_{ns} - X_p = 65,14 - 9,072 = 56,068 \Omega$$

Por fim chegamos à reatância síncrona saturada X_{ss} :

$$X_{ss} = \frac{X_M}{K_s} + X_p = 36,7 \Omega \quad (16)$$

Precisamos calcular agora a tensão E_f de carga baseado no valor da nossa reatância síncrona saturada por:

$$E_f = V_{nominal} + jX_{ss} * I_{nominal} + R_a * I_{nominal} = 382,2 \text{ V} \quad (17)$$

Com o valor que já tínhamos calculado referente à tensão de Potier, traçamos uma reta saindo da origem e encontrando esse ponto na curva de circuito aberto, esta é chamada de reta de Potier. Depois de obtida a função que descreve esta reta, nós precisamos marcar nela o ponto correspondente à tensão E_f e traçarmos uma reta vertical por esse ponto até que toque a curva de circuito aberto ou curva saturada, o ponto correspondente nesta última curva citada será o E_0 que precisamos para fazer o cálculo da regulação percentual. Temos a equação da reta de Potier sendo:

$$V(I_f)_{Potier} = 521,32 * I_f \quad (18)$$

Então para $V(I_f)_{Potier} = E_f$, temos $I_f = 0,73$. Com esse valor de corrente de campo nós temos $E_0 = V(I_f)_{circuito \text{ aberto}} = 304,2 \text{ V}$.

Finalmente obtemos a regulação como sendo:

$$Regulação = \frac{E_0 - V_{nominal}}{V_{nominal}} \cong \mathbf{0,2 \text{ ou } 20\%} \quad (19)$$

4.8 ENSAIO DA MÁXIMA CORRENTE ATRASADA DA MÁQUINA SÍNCRONA.

4.8.1 OBJETIVOS

Considerando a máquina síncrona como sendo de polos salientes, que condiz com a realidade, podemos dividir a reatância do estator em duas ortogonais, que são a reatância de eixo direto e em quadratura. Esse ensaio tem o objetivo de obter o valor da reatância de eixo direto e em quadratura da máquina síncrona e conseqüentemente sua relação percentual. Construir, a partir dos valores obtidos até aqui, a carta de capacidade da máquina síncrona.

4.8.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Neste ensaio temos a máquina síncrona funcionando como motor, para isso, primeiramente curto-circuitamos os terminais do enrolamento de campo da referida máquina e alimentamos a armadura em sua tensão nominal de 230 V entre fases pela configuração duplo delta como vimos anteriormente. Diagrama de ligação na figura 37.

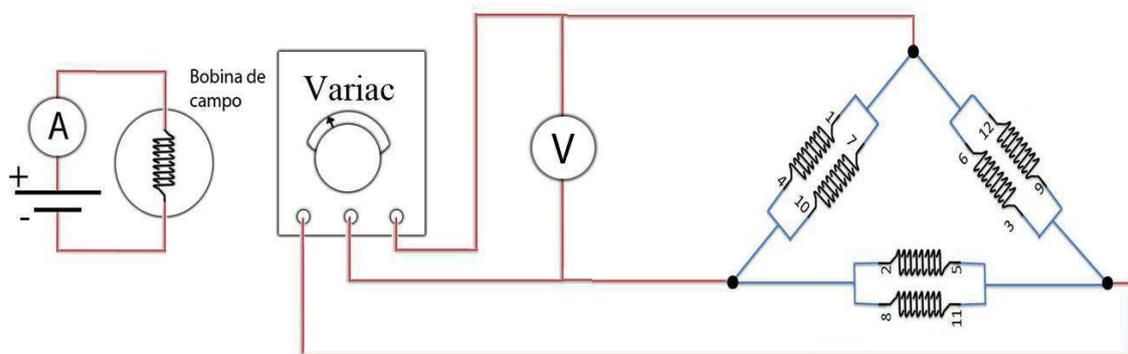


Figura 37 - Diagrama de ligação do ensaio da máxima corrente atrasada.

Após a máquina atingir sua rotação síncrona, é desfeita a ligação de curto-circuito do campo e posto no lugar uma fonte CC para construção do campo no enrolamento. Em determinado nível de corrente observamos o salto de polo, que é o ponto que nos interessa para esse ensaio. A corrente medida foi de 11.4 A.

Na figura 38 temos a imagem de como o ensaio foi montado no laboratório.

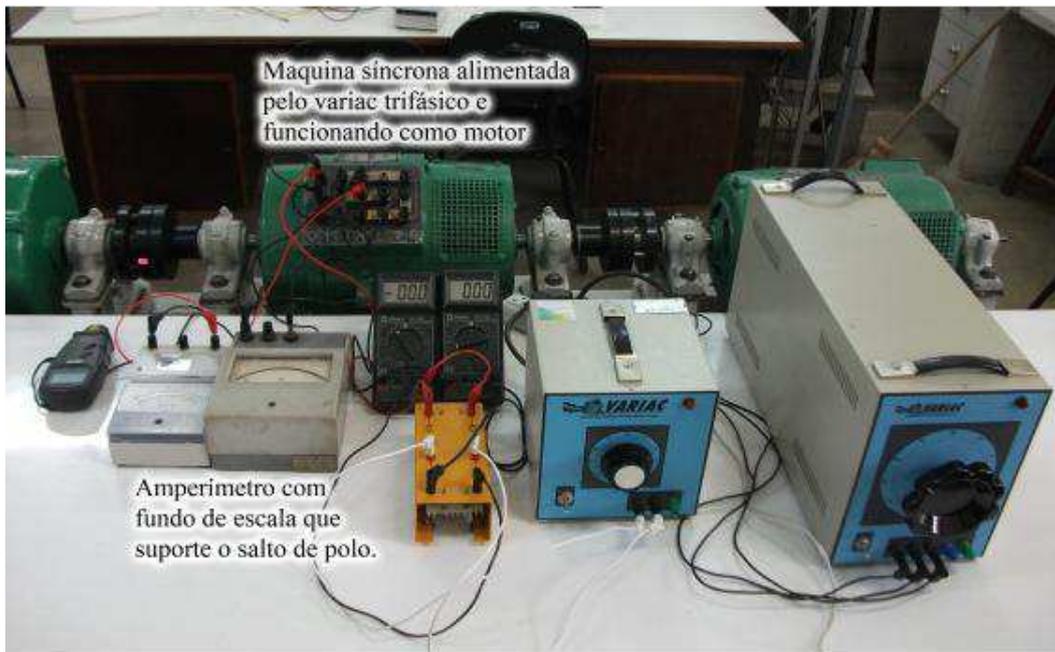


Figura 38 - Imagem do ensaio da máxima corrente atrasada.

4.8.3 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

Com os dados obtidos no ensaio da máxima corrente atrasada da máquina síncrona, nós podemos calcular o valor da reatância de eixo em quadratura, segundo Fitzgerald [2], basta calcular a reatância pela razão direta da tensão pela corrente prè-salto de polo. Então temos:

$$X_q = \frac{230}{11,4} = \mathbf{20,17 \Omega} \quad (20)$$

Como já possuímos o valor de X_s , basta calcular agora X_d pela relação:

$$X_d = \sqrt{X_s^2 - X_q^2} = \mathbf{37,57 \Omega} \cong X_{ss} \quad (21)$$

Que nos trás uma relação de que $X_q = \mathbf{0,54} * X_d$.

Agora nós podemos finalmente traçar a curva de capacidade da máquina síncrona, pois temos os valores necessários. Para tal, utilizei uma ferramenta desenvolvida por Costa Jr [3] baseado na literatura de máquinas elétricas síncronas [2]. Na figura 39 temos a curva de capacidade do gerador síncrono para os seguintes valores em p.u.

- $X_{q_pu} = 0,76$ $X_{d_pu} = 1,38$
- $V_{nominal_pu} = 1$
- *limite superior de potência = 0,9 (pela vida útil do gerador)*
- *limite inferior de potência = 0,10 (pela qualidade da frequência síncrona)*
- *limite de subexcitação = 0,1*
- *margem segura de estabilidade = 0,10 ou 10%*

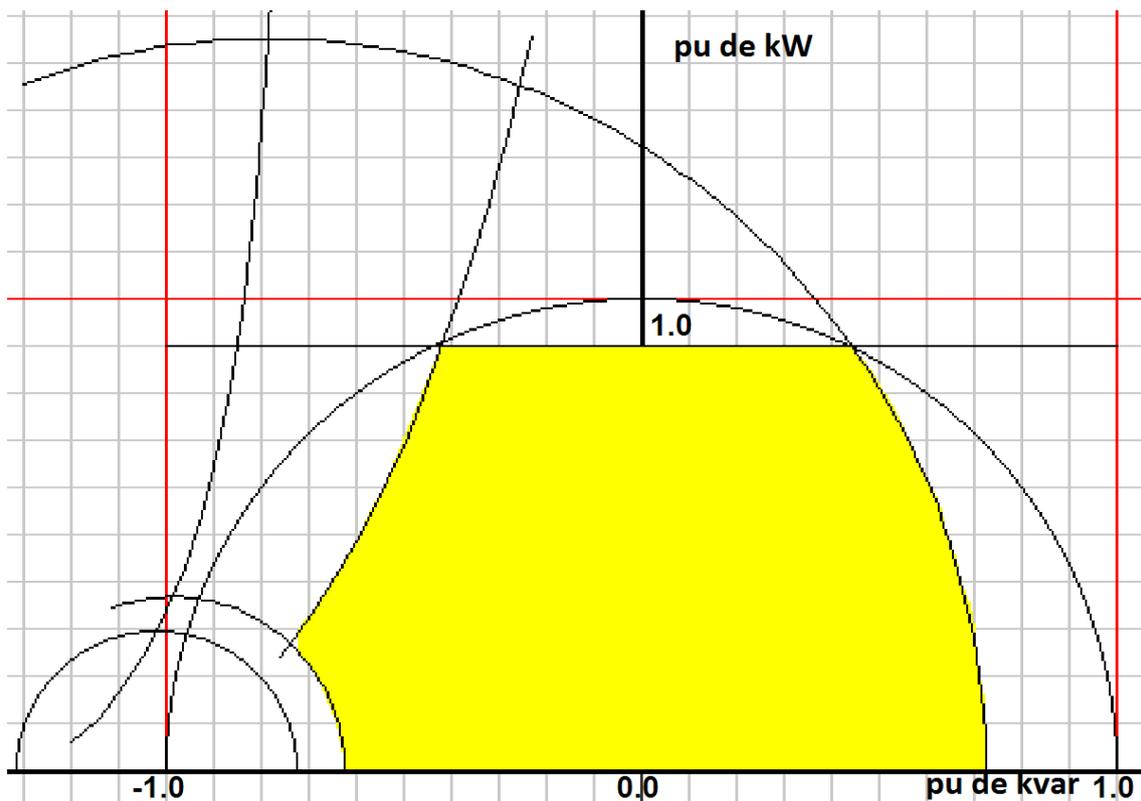


Figura 39 - Curva de capacidade do gerador síncrono.

4.9 DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HOMOPOLAR DA MÁQUINA SÍNCRONA

4.9.1 OBJETIVO

Obtenção do valor da reatância homopolar em que podemos constituir um sistema de componentes d-q, com uma componente direta ou longitudinal (d), uma componente em quadratura ou transversal (q) e uma componente homopolar (o), que é introduzida para manter a reversibilidade da transformação entre os dois referenciais [4] segundo a figura 45.

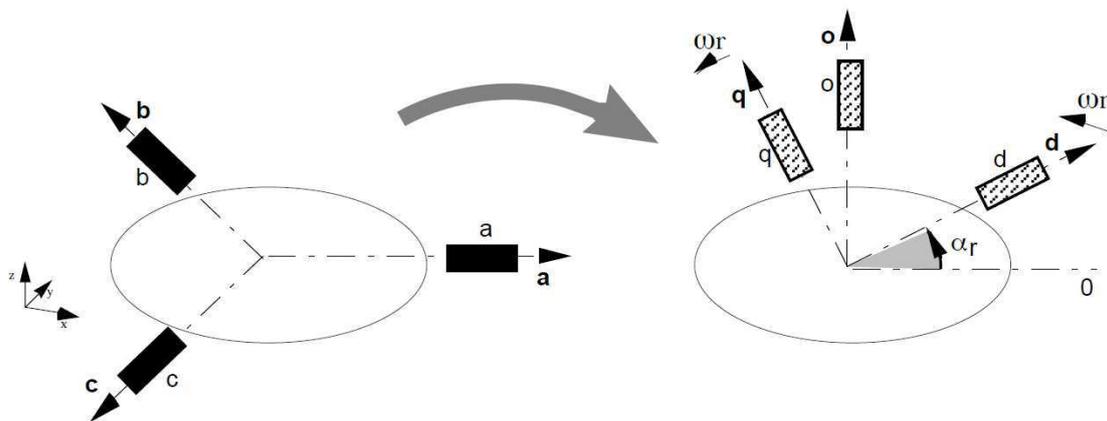


Figura 40 - Transformação de referencial abc para d-q onde a impedância homopolar permite reversibilidade.

4.9.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Devido às dificuldades de utilização do modelo de um alternador síncrono em coordenadas de fase, há a necessidade de procurar um outro modelo referido a um referencial em que as respectivas equações tenham uma forma mais compacta e com mais fácil tratamento matemático.

Para que se mantenha a equivalência entre os dois modelos é necessário que os efeitos magnéticos, produzidos pelas bobinas colocadas segundo dois referenciais sejam iguais. Para que resulte uma simplificação, o novo referencial deverá ter dois eixos coplanares ortogonais, o que faz anular alguns coeficientes de indução mútua, e deve

rodar à velocidade do rotor, para que seja constante o ângulo entre o referencial a que está referido o estator e o referencial rotórico, o que torna as indutâncias independentes do ângulo de posição do rotor, e portanto, do movimento.

Considerando que as bobinas no referencial estacionário das fases, a,b,c, têm um número efetivo de espiras iguais a $N_e/3$, e que no referencial d-q, móvel e que forma um ângulo $\alpha_r = \omega_r \cdot t + \alpha_0$ com a origem do referencial trifásico, as bobinas terão $N_e/2$ espiras efetivas, então, a relação entre 2 sistemas de correntes elétricas que criam uma mesma distribuição de força magnetomotriz nos dois referenciais é,

$$\{i_{dgo}\} = [C_p] \cdot \{i_{abc}\}$$

em que $[C_p]$ é a matriz transformação de Park.

$$[C_p] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & \cos(\alpha_r + 2\pi/3) \\ -\text{sen } \alpha_r & -\text{sen}(\alpha_r - 2\pi/3) & -\text{sen}(\alpha_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Neste ensaio ligamos as bobinas de armadura da máquina em série respeitando a polaridade das bobinas como é mostrado no diagrama de ligação na figura 46. Então o sistema é alimentado com uma tensão alternada e a máquina CC impõe a rotação síncrona de 1800 rpm. São medidos os valores da tensão, da corrente e da potência ativa de acordo com a instrumentação adequada.

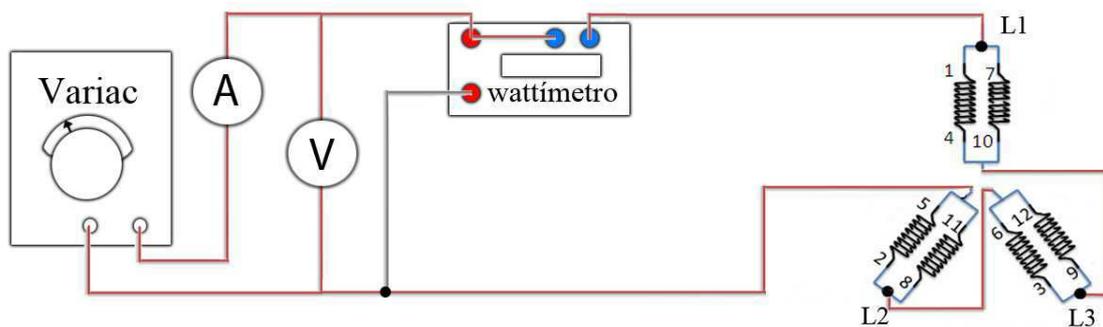


Figura 41 - Diagrama do ensaio de determinação da impedância homopolar.

Ao alimentarmos o circuito com uma corrente de 2 A, obtivemos 32 Volts e 50 Watts nas leituras dos demais instrumentos.

Na figura 47 temos a imagem do ensaio montado no laboratório.

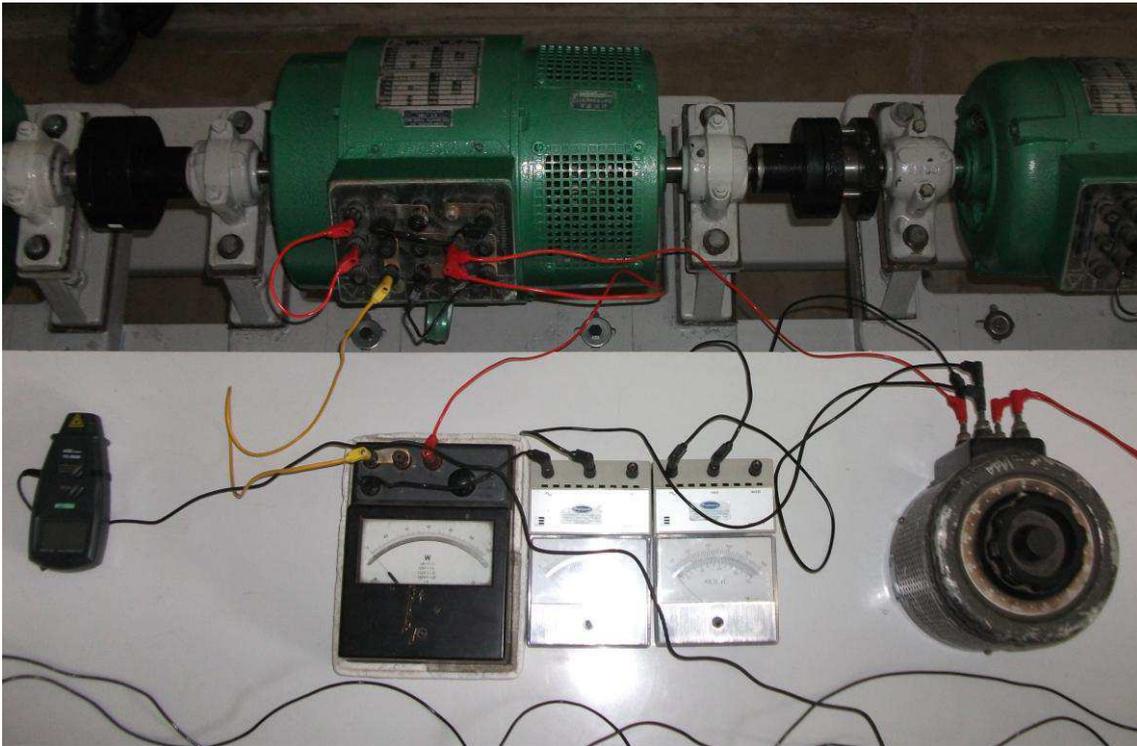


Figura 42 - Imagem do ensaio de determinação da impedância homopolar.

4.9.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA HOMOPOLAR DA MÁQUINA SÍNCRONA

Baseado nos dados do ensaio para determinação da impedância homopolar, primeiro calculo o ângulo de defasamento da corrente circulante por:

$$\theta = \arccos\left(\frac{50}{2 * 32}\right) = 38,62^\circ$$

Em seguida encontro $X_{homopolar}$ por:

$$X_{homopolar} = \frac{32 * \text{sen}(\theta)}{2} = 10,58 \Omega$$

4.10 ENSAIO DO ROTOR LIVRE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

4.10.1 OBJETIVOS

Verificar o total de perdas rotacionais na máquina, que são as perdas mecânicas (já mensuradas no primeiro ensaio) e as perdas elétricas no entreferro. Obter os parâmetros necessários que compõem o diagrama monofásico da máquina assíncrona (em conjunto com o ensaio de rotor bloqueado). Devido ao segundo objetivo desse ensaio, a análise dos dados e conclusões só serão apresentadas ao final da subseção posterior relativa ao ensaio de rotor bloqueado.

4.10.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Neste ensaio, o rotor da máquina assíncrona ou de indução é desacoplado do resto da bancada para ficar livre e sofrer apenas as perdas rotacionais. O ensaio conta com a aferição de potência ativa, que a rede injeta na máquina, pelo método dos dois wattímetros. Temos também um amperímetro CA em série com uma das fases e um voltímetro CA em paralelo na mesma fase segundo o diagrama de ligação da figura 40.

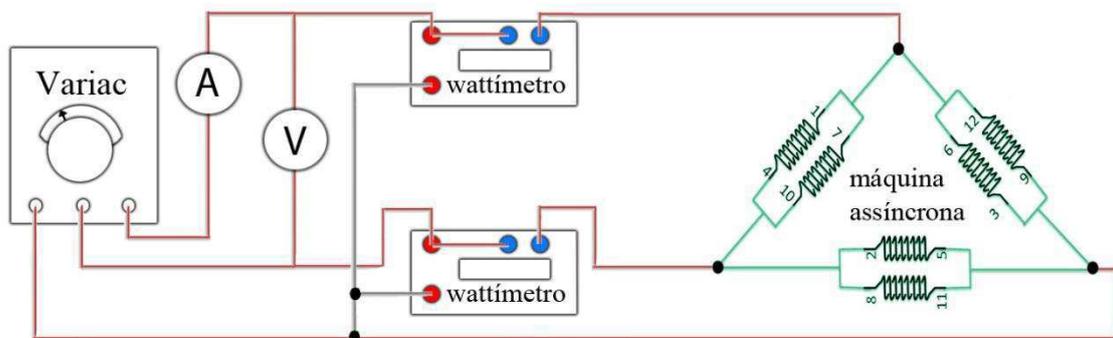


Figura 43 - Diagrama de ligação do ensaio de rotor livre da máquina assíncrona.

Ao variarmos a tensão no variac, nós obtemos diferentes resultados para potência ativa e corrente de armadura.

4.10.3 DADOS COLETADOS

Os resultados dos wattímetros e amperímetro estão dispostos na tabela 10.

Tabela 10

$V_t(\text{volt})$	220	200	180	160	140	120	100	80	60
$I_a(\text{A})$	3,7	2,9	3,24	1,98	1,65	1,46	1,41	1,41	1,71
W_1	650	500	380	290	230	190	155	130	115
W_2	-320	-230	-170	-100	-50	-20	10	25	40

Legenda: **Bobina de corrente invertida por perceber deflexão negativa**

Na figura 41 temos a imagem de como foi montado o ensaio no laboratório.



Figura 44 - Imagem do ensaio de rotor livre da máquina assíncrona.

4.11 ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.

4.11.1 OBJETIVOS

Verificar as perdas elétricas e obter os parâmetros necessários que compõem o diagrama monofásico da máquina assíncrona (em conjunto com o ensaio de rotor livre).

4.11.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Temos exatamente a mesma configuração elétrica do ensaio de rotor livre.

Para bloquear a rotação da máquina, nós travamos um alicate de pressão diretamente no eixo do lado contrário ao acoplador. Injetamos uma corrente de 8A e obtivemos as seguintes leituras nos wattímetros e voltímetro: $W_1 = 425$, $W_2 = -125$ e no voltímetro 67 V.

Na figura 42 tem-se a imagem de como o rotor foi bloqueado.



Figura 45 - Rotor bloqueado.

4.11.3 TRATAMENTO DOS DADOS E CONCLUSÕES

Do primeiro ensaio pode-se obter as perdas mecânicas da máquina assíncrona. Aqui faremos uma análise semelhante a da subseção 4.1 só que para rotação de 1700 rpm que está escrita na placa da máquina assíncrona. Avaliando as curvas para a rotação de 1700 rpm nós obtemos $P_{rot} = 201,33 W$.

Segundo a leitura dos wattímetros para a tensão de 220 V (tensão de linha para configuração delta), nós obtemos 330 W de perdas em vazio P_{vz} .

Realizando o mesmo ensaio de determinação da resistência por fase da máquina síncrona, obtemos $R_1 = 2,5 \Omega$, que é o nosso primeiro parâmetro calculado para compor o circuito equivalente por fase da máquina assíncrona da figura 43.

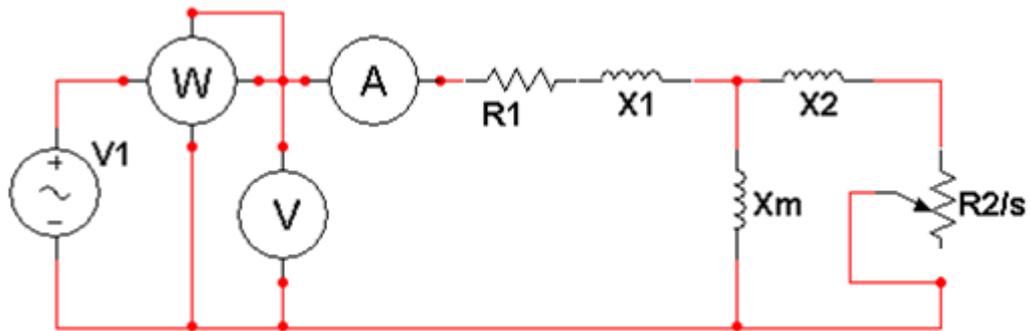


Figura 46 - Circuito monofásico equivalente da máquina assíncrona.

No ensaio a vazio, podemos desconsiderar a parte do rotor da máquina devido ao escorregamento ser quase nulo e tornar a resistência R_2/s tendendo ao infinito e conseqüentemente não deixando corrente passar. Seguindo esse raciocínio, nós podemos calcular uma reatância a vazio X_{vz} que será igual a soma de $X_1 + X_m$, pois estão em série.

$$X_{vz} = \frac{\sqrt{(\sqrt{3} * V_L * I_L)^2 - P_{vz}^2}}{\sqrt{3} * I_L^2} = 57,8 \Omega \quad (22)$$

Somente com o ensaio a vazio não é possível separar os valores de X_1 e X_m , então parte-se para o ensaio de rotor bloqueado. Neste caso temos que voltar a considerar o circuito monofásico completo, pois a corrente no rotor não é desprezível. A impedância equivalente para o rotor bloqueado fica $Z_{bl} = R_{bl} + jX_{bl}$.

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{\sqrt{3} * I_{bl}^2} = \frac{300}{\sqrt{3} * 8^2} = 2,7 \Omega \quad (23)$$

$$X_{bl} = \frac{\sqrt{(\sqrt{3} * V_{bl} * I_{bl})^2 - P_{bl}^2}}{\sqrt{3} * I_{bl}^2} = 36,6 \Omega \quad (24)$$

Porém como desejamos conhecer X_1 , X_m , X_2 e R_2 precisamos abrir a impedância obtendo as seguintes igualdades:

$$R_{bl} = R_1 + R_2 * \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 \quad (25)$$

$$X_{bl} = X_1 + X_2 * \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \quad (26)$$

Segundo a norma ABNT NBR5383-1, que cita a relação entre as reatâncias para motores de rotor bobinado: $X_1/X_2 = 0,78$. Lembrando que $X_1 + X_m = 123,5 \Omega$, nós podemos rearranjar a equação (26) obtendo o seguinte:

$$(X_{vz} - 0,78 * X_2) * (X_{bl} - 0,78 * X_2) - X_2(X_{vz} - X_{bl}) = 0 \quad (27)$$

Obtendo $X_2 = 26,97 \Omega$.

Com o valor de X_2 , obtemos o valor de X_1 pela relação:

$$X_1 = X_2 * 0,78 = 21,03 \Omega$$

E de $X_1 + X_m = 57,8 \Omega$, tiramos o valor de X_m :

$$X_m = 57,8 - X_1 = 36,77 \Omega$$

Por fim, da equação (25) tiramos $R_2 = 0,6 \Omega$.

Com os valores de R_1 , X_1 , X_m , X_2 e R_2 pode-se obter o diagrama do circuito monofásico equivalente desta máquina assíncrona:

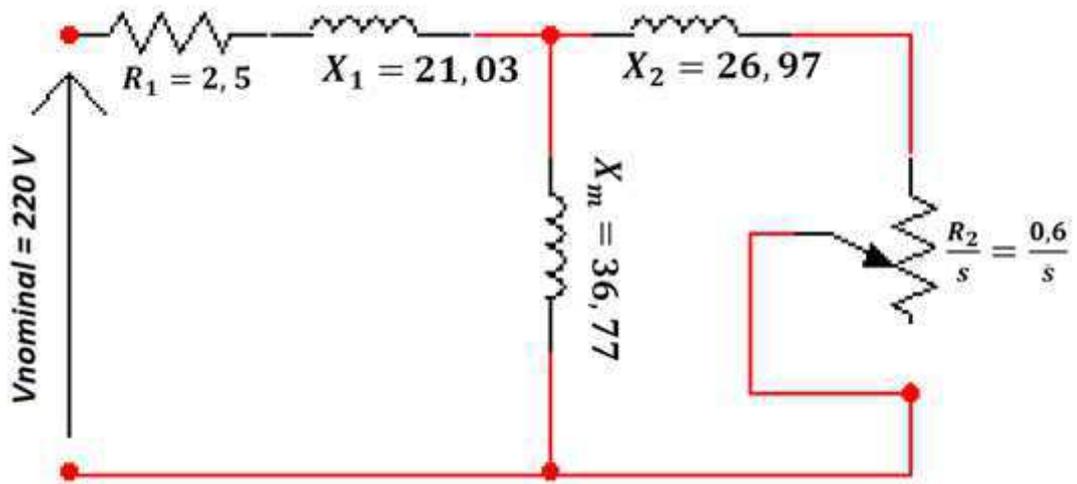


Figura 47 - Circuito monofásico equivalente final da máquina síncrona.

Pode-se perceber que esta máquina, mesmo para rotação de 1700 rpm, possui uma grande parcela de perdas e seu diagrama monofásico está bem condizente com a realidade.

5 CONCLUSÃO

Considero meu estágio como um verdadeiro exemplo de aprendizado, pois pude trabalhar com máquinas reais que estudei durante a graduação e estudar a fundo sobre elas. Pude compreender melhor como uma máquina elétrica funciona em cada mínima parte que a constitui e, além disso, eu pude contribuir com o enriquecimento do laboratório de máquinas ao adicionar uma nova bancada de experimentos para os futuros alunos das disciplinas de laboratório de conversão eletromecânica e máquinas elétricas.

Os ensaios foram satisfatórios e os resultados foram obtidos com tratamento de dados de forma minuciosa para evitar falhas, pois esse relatório poderá ser utilizado para acompanhamento dos experimentos da disciplina laboratório de máquinas.

As máquinas recondicionadas estão perfeitamente operantes, quaisquer divergências dos valores calculados com a realidade são devido a erros provocados pelos instrumentos de medição, mas podem ser desprezados no contexto geral.

Por fim, foi uma experiência árdua, porém enriquecedora e frutuosa. De forma alguma reclamo ao dizer árdua, está foi a motivação e fiz exatamente pelo desafio.

6 BIBLIOGRAFIA

[1] ABNT NBR 5052:1984

[2] Máquinas Eléctricas, A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Alexander Kusko
Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA.

[3] P. da Costa Jr., A. N. de Souza, P. S. da Silva, e J. E. C. Castanho,
“A Visual Tool for Building Synchronous Generator Capability Curves”,
FL, USA, 2012.

[4] M. Vaz Guedes, O alternador síncrono trifásico, modelização. Faculdade de
engenharia da universidade do porto, 1996.