

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**Estudo de Regulador de Tensão Monofásico por
Acoplamento Magnético Variável**

**Daniel Ribeiro Gomes
Fabio Hüls Vitor**

PROJETO DE FORMATURA / 2006

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



PROJETO DE FORMATURA / 2006

**Estudo de Regulador de Tensão Monofásico por
Acoplamento Magnético Variável**

Alunos: Daniel Ribeiro Gomes
Fabio Hüls Vitor
Orientador: Ivan Eduardo Chabu
Coordenador: Eduardo César Senger
Lourenço Matakas

*A José Vitor, Sandra, Sarah,
Raquel, Isabel e Suzana.*

*Para Elisabeth, Wilma, Celso
e Fernando.*

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais pelo constante sustento, físico e psicológico, paciência e apoio direto ou indireto, contribuindo de forma determinante para a trajetória traçada neste curso de graduação até sua conclusão no presente trabalho.

Ao professor Dr. Ivan Eduardo Chabu, docente do departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e mentor do projeto, pela orientação sempre presente e pelo constante apoio e paciência.

À Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, pelo material, mão-de-obra e espaço cedidos, sem os quais o trabalho não seria possível.

Aos professores Dr. Eduardo César Senger e Dr. Lourenço Matakas pela coordenação e exigência que resultaram em mais empenho por parte dos integrantes.

Aos professores Dr. Walter Kaiser e Dr. Wilson Komatsu pelo grande auxílio ao ceder seu laboratório e sua atenção em questões concernentes ao trabalho.

Aos colegas do Departamento de Energia e Automação Elétricas responsáveis pela concepção dos projetos “Sala Energia” e “Moodle do PEA”, os quais indiretamente tiveram participação na execução deste trabalho.

What we do in life, echoes in eternity.

Aelius Maximus Decimus Meridius

RESUMO

O presente trabalho consiste no estudo de uma alternativa para reguladores de tensão. O estudo se inicia imergindo no ambiente dos reguladores existentes, onde um extenso estudo bibliográfico é feito com a finalidade de entender todos os tipos existentes, de forma a compará-los com a proposta alternativa. Até o presente momento, tal proposta é única, consistindo em um regulador de tensão monofásico, no qual através de um acoplamento magnético variável em função da posição do “rotor”, pode-se obter tensão variável em sua saída. Com uma topologia bem simples, o que lhe traz vantagens nos estudos, sua principal diferença em relação às alternativas já existentes é a de possuir regulação contínua e simplicidade de construção. Ao longo do projeto, um pré-protótipo e dois protótipos “rotóricos” subseqüentes são construídos (o “estator” permanece o mesmo desde o pré-protótipo), cada um destes com a finalidade de superar as limitações do seu antecessor. O trabalho apresenta todos os passos dessa jornada, que se inicia no campo das idéias, e termina com o estudo de inúmeros testes e resultados dos protótipos construídos.

ABSTRACT

The present work consists a study of an alternative for voltage regulators. The study initiates immersing into the research of the existing voltage regulators, where an extensive bibliographic study is made with the purpose to understand all the existing types and to compare them with the new alternative. Until the present moment, this proposal is unique, and consists a single-phase voltage regulator, that through a changeable magnetic coupling in function of the position of the “rotor”, changeable out voltage can be obtained. With a very simple topology, which brings it advantages in the studies, its main differences in relation to the existing alternatives are the continuous voltage regulation and simplicity of construction. Throughout the project, three prototypes are constructed, each one with the purpose to surpass the limitations of its predecessor. This work presents all the steps of this journey, which initiates in the ideas, and finishes with the study of innumerable tests and results from the constructed prototypes.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1 Pesquisa dos Modelos Existentes de Reguladores de Tensão	13
1.1.1 Regulador de Bobina Móvel	14
1.1.2 Regulador de Contato Deslizante (“Variac”)	16
1.1.3 Regulador com TAP’s Comutáveis.....	17
1.1.4 Regulador de Indução.....	18
1.1.5 Regulador de escovas helicoidal (“Varivolt”).....	23
1.2 Motivação.....	25
1.3 Objetivos	25
1.4 Organização do trabalho.....	26
2 Desenvolvimento da Proposta Alternativa.....	28
2.1 O Princípio do Funcionamento	28
2.2 Abordagem Analítica	30
2.2.1 Circuito Magnético.....	30
2.2.2 Caráter da Variação	36
2.2.3 A “Zona Morta”	39
3 Desenvolvimento do Projeto.....	43
3.1 Anteprojeto (Pré-Protótipo).....	43
3.1.1 Especificações	43
3.1.2 Construção.....	45
3.2 Segundo Protótipo “Rotórico”	51
3.2.1 Justificativa.....	51
3.2.2 Especificações	51
3.2.3 Construção.....	52
3.3 Terceiro Protótipo “Rotórico”	54
3.3.1 Justificativa.....	54
3.3.2 Especificações	54
3.3.3 Construção.....	55
4 Testes e Resultados.....	56
4.1 Pré-Protótipo	56
4.1.1 Vazio	56
4.1.2 Carga	57
4.1.3 Análise.....	58
4.2 Segundo Protótipo	59
4.2.1 Vazio	59
4.2.2 Carga	60
4.2.3 Análise Comparativa.....	61
4.3 Terceiro Protótipo	65
4.3.1 Vazio	65
4.3.2 Carga	66
4.3.3 Análise Comparativa.....	67
4.3.4 Ensaios Adicionais	70
5 Considerações Finais.....	73
5.1 Dificuldades Encontradas.....	73
5.2 Estudos Futuros	74
5.3 Conclusões	74
6 Referências Bibliográficas	76
7 Anexos	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Regulador de bobina móvel monofásico [1]	14
Fig. 2 - Configuração com enrolamento auxiliar p [1]	15
Fig. 3 - Configuração com enrolamentos auxiliares p e q [1]	15
Fig. 4 - Diagrama do circuito do regulador de TAP's [3]	17
Fig. 5 - Regulador trifásico de TAP's: 750 kVA, 15 kV, faixa de $\pm 10\%$ em 32 TAP's (a) e o respectivo mecanismo de mudança de TAP's (b) [3]	18
Fig. 6 - Regulador monofásico de indução (a) Esquema geral dos enrolamentos (b) Esquema de ligações (auto-trafo) [1]	19
Fig. 7 - Posição de máxima tensão induzida com fase aditiva (a); de tensão induzida nula (b); e máxima induzida com fase subtrativa (c) [1]	19
Fig. 8 - Variação das F_{MM} 's dos enrolamentos em função da defasagem do rotor (a) e da tensão de saída, também em função da defasagem do rotor [1]	20
Fig. 9 - Esquema elétrico do regulador trifásico de indução [1]	21
Fig. 10 - Diagrama fasorial de tensões e correntes	21
Fig. 11 - Triângulo das tensões de linha	22
Fig. 12 - Varivolt: enrolamento e núcleo secundários; contato deslizante [4]	24
Fig. 13 - Enrolamento helicoidal (a) e o contato deslizante (b) [4]	24
Fig. 14 - Topologia do regulador proposto	28
Fig. 15 - Configuração Auto-Trafo (a) e Trafo (b)	29
Fig. 16 - Caminho do fluxo ao longo das partes e seus respectivos comprimentos	31
Fig. 17 - Analogia do circuito magnético com circuito elétrico	31
Fig. 18 - Curvas de magnetização das chapas ACESITA	33
Fig. 19 - Comportamento do fluxo na posição de tensão induzida nula	36
Fig. 20 - Deslocamento de 12° da posição anterior	37
Fig. 21 - Posição de máximo	38
Fig. 22 - Curva teórica da tensão de saída em função da posição do "rotor"	39
Fig. 23 - "Estator" ideal, com a extremidade dos pólos unidas no limite físico	40
Fig. 24 - "Estator" do protótipo, com pólos menores para inserir as bobinas	41
Fig. 25 - A "Zona Morta", onde a tensão na saída teoricamente não varia (valores para o pré-protótipo)	42
Fig. 26 - Eixo usinado, com anéis de retenção	45
Fig. 27 - Eixo na base onde recebeu as estampas	46
Fig. 28 - Carcaça com anel retentor das chapas "estatísticas"	46
Fig. 29 - Núcleo magnético "estático" prensado na carcaça (vista lateral)	47
Fig. 30 - Núcleo magnético "estático" prensado na carcaça (vista superior)	47
Fig. 31 - Núcleo magnético "rotórico" prensado no eixo (vista superior)	48
Fig. 32 - Núcleo magnético "rotórico" prensado no eixo (vista frontal)	48
Fig. 33 - Enrolamento dos pólos "estáticos"	49
Fig. 34 - Enrolamento da bobina "rotórica" em curto	49
Fig. 35 - "Estator" envernizado	50

Fig. 36 - Montagem em processo.....	50
Fig. 37 - Montagem finalizada.....	51
Fig. 38 - Estampas reutilizadas no novo eixo, com canais aprofundados por fresagem..	52
Fig. 39 - “Rotor” com a barra de cobre (vista superior)	53
Fig. 40 - Anel de Curto.....	53
Fig. 41 - Topologia do terceiro protótipo “rotórico”.....	54
Fig. 42 - Terceiro “rotor” (vista frontal).....	55
Fig. 43 - Terceiro “rotor” (vista superior)	55
Fig. 44 - Esquema elétrico do ensaio em vazio (a) e em carga (b).....	56
Fig. 45 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 1º “rotor” (vazio)	57
Fig. 46 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 2º “rotor” (vazio)	59
Fig. 47 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 2º “rotor” (carga)	60
Fig. 48 - Comportamento da regulação para carga de $150\ \Omega$ em função da posição (2º protótipo).....	61
Fig. 49 - Curvas superpostas dos ensaios em vazio (1º e 2º Protótipos).....	61
Fig. 50 - Configuração das linhas de fluxo em carga (auto-trafo) na posição 0º (a) e na posição 90º (b).....	64
Fig. 51 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 3º “rotor” (vazio)	65
Fig. 52 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 3º “rotor” (carga)	66
Fig. 53 - Comportamento da regulação para carga de $150\ \Omega$ em função da posição (3º protótipo).....	67
Fig. 54 - Curvas superpostas dos ensaios em vazio (3 Protótipos).....	67
Fig. 55 - Confronto das curvas de regulação para carga de $150\ \Omega$ em função da posição (dois últimos protótipos)	70
Fig. 56 - Confronto da regulação das posições 0º e 90º para diferentes cargas.....	71
Fig. 57 - Regulação da tensão na posição 45º para diferentes cargas.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das forças magnetomotrizes do circuito magnético	36
Tabela 2 - Valores em carga para o pré-protótipo.....	57
Tabela 3 - Valores em carga para o 2º protótipo “rotórico”.....	60
Tabela 4 - Valores comparativos em vazio para 1º e 2º protótipos	62
Tabela 5 - Valores comparativos em carga (pos. máx.) para 1º e 2º protótipos.....	63
Tabela 6 - Valores em carga para o 3º protótipo “rotórico”.....	66
Tabela 7 - Valores comparativos em vazio para os 3 protótipos	68
Tabela 8 - Valores comparativos em carga (pos. máx.) para os 3 protótipos.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{esp}	Ampère · Espira
A_{esp/cm}	(Ampère · Espira) / Centímetro
B_A	Indução magnética da armadura
B_{CE}	Indução magnética da coroa "estática"
B_{G1}	Indução magnética do entreferro primário
B_{G2}	Indução magnética do entreferro secundário
b_{pp}	Arco polar
B_{pp}	Indução magnética do pólo primário
B_{ps}	Indução magnética do pólo secundário
cm	Centímetro
\mathcal{F}_A	Força magnetomotriz exigida pela armadura
\mathcal{F}_{CE}	Força magnetomotriz exigida pela coroa "estática"
\mathcal{F}_{G1}	Força magnetomotriz exigida pelo entreferro primário
\mathcal{F}_{G2}	Força magnetomotriz exigida pelo entreferro secundário
\mathcal{F}_{pp}	Força magnetomotriz exigida pelo pólo primário
\mathcal{F}_{ps}	Força magnetomotriz exigida pelo pólo secundário
h_A	Altura da coroa "rotórica"
H_A	Intensidade de campo magnético da armadura
h_{CE}	Altura da coroa "estática"
H_{CE}	Intensidade de campo magnético da coroa "estática"
H_{pp}	Intensidade de campo magnético do pólo primário
H_{ps}	Intensidade de campo magnético do pólo secundário
k_c	Fator de empilhamento
k_e	Fator de enrolamento
k_f	Fator de forma do campo no entreferro

l_A	Comprimento da armadura
l_{G1}	Comprimento do entreferro primário
l_{G2}	Comprimento do entreferro secundário
l_{PP}	Comprimento do pólo primário
l_{PS}	Comprimento do pólo secundário
l_c	Comprimento real do "pacote" magnético
l_{CE}	Comprimento da coroa "estatórica"
mm	Milímetro
\mathcal{R}_A	Relutância da armadura
\mathcal{R}_{CE}	Relutância da coroa "estatórica"
\mathcal{R}_{G1}	Relutância do entreferro primário
\mathcal{R}_{G2}	Relutância do entreferro secundário
\mathcal{R}_{PP}	Relutância do pólo primário
\mathcal{R}_{PS}	Relutância do pólo secundário
S_A	Seção da armadura atravessada por fluxo
S_{CE}	Seção da coroa "estatórica" atravessada por fluxo
S_{G1}	Seção do entreferro primário
S_{G2}	Seção do entreferro secundário
S_{PP}	Seção do pólo primário
S_{PS}	Seção do pólo secundário
T	Tesla
ϕ	Fluxo básico por pólo
μ_0	Permeabilidade magnética do ar
π	Constante numérica de valor 3,141632. É equivalente ao valor da razão entre uma circunferência qualquer e seu diâmetro
τ_P	Passo polar

1. Introdução

Os reguladores de tensão são uma classe de variadores de tensão, a qual possui uma larga aplicação no mercado atual, desde equipamentos de bancada de laboratórios didáticos (0-220 V) até utilização na regulação de tensão em subestações de alta tensão (acima de 2,3 kV). Este capítulo é dedicado à pesquisa realizada sobre os tipos de reguladores de tensão existentes na atualidade, sempre salientando suas vantagens e desvantagens.

1.1 Pesquisa dos Modelos Existentes de Reguladores de Tensão

Reguladores de tensão são equipamentos estáticos que disponibilizam tensão alternada variável a partir de uma fonte de tensão de valor eficaz constante. São baseados no transformador e na máquina de indução. No decorrer do capítulo apresentaremos os seguintes modelos:

- Regulador de Bobina Móvel [1]
- Regulador de Contato Deslizante [1]
- Regulador com TAP's Comutáveis [3]
- Regulador de Indução [1]
- Regulador de escovas helicoidal ("Varivolt") [4]

1.1.1 Regulador de Bobina Móvel

Um controle contínuo de tensão pode ser obtido variando o acoplamento entre bobinas num circuito magnético comum. A Fig. 1 ilustra essencialmente um regulador monofásico. A versão trifásica compreende 3 unidades monofásicas num arranjo trifásico do núcleo. O núcleo possui enrolamentos *a* e *b* em oposição nas regiões alta e baixa do ramo. Uma bobina curto-circuitada isolada *s* pode ser movida para cima e para baixo no ramo. Quanto mais próxima de *a*, maior é a indutância mútua e menor é a impedância de entrada da mesma.

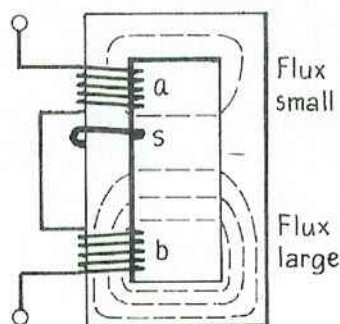


Fig. 1 - Regulador de bobina móvel monofásico [1]

Se uma tensão é aplicada em *a* e *b* em série, a distribuição entre elas depende das respectivas indutâncias, e quanto mais próxima a bobina em curto estiver de alguma delas, menor é a sua proporção de tensão aplicada.

Uma de suas limitações fica por conta da amplitude de variação, a qual se estende apenas entre 5% e 95% da tensão total aplicada através do posicionamento de *s*, que, através de sua corrente induzida, varia o fluxo de dispersão e consequentemente a reatância.

Há diversos arranjos úteis (Fig. 2 e Fig. 3). Na auto-conexão um enrolamento auxiliar *p* é usado com 1/10 de espiras de *a* ou *b*.

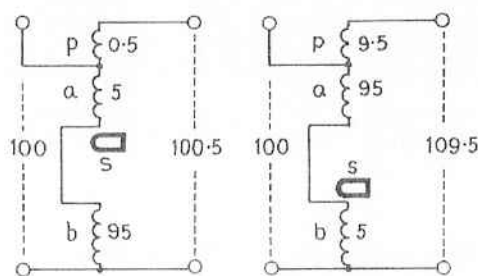


Fig. 2 - Configuração com enrolamento auxiliar p [1]

As bobinas a e p atuam como um transformador comum, de tal forma que com s próxima de a , conferindo-lhes 5% e em p 0,5%, temos na saída 100,5%. Com s próxima de b , a tensão em a é de 95% e em p 9,5%, obtendo uma saída de 109,5%, através de um ajuste contínuo pela posição de s .

Na Fig. 3, a relação de espiras de a e p é de 6,43, e a de b e q é 22,5, proporcionando na saída uma tensão variável entre 5% e 15%.

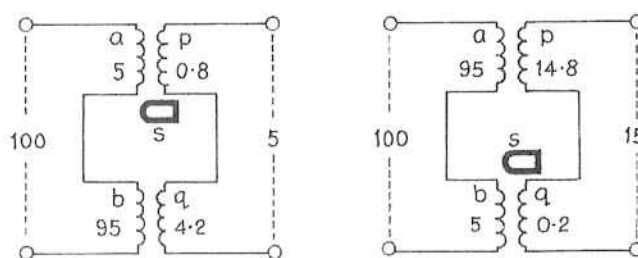


Fig. 3 - Configuração com enrolamentos auxiliares p e q [1]

Vantagens

- Variação contínua da tensão;
- Custo relativamente baixo;

Desvantagens

- Mecanismo de atuação relativamente complexo;
- Faixa estreita de variação da tensão de saída;
- Reatância de dispersão consideravelmente alta (alta regulação);

1.1.2 Regulador de Contato Deslizante (“Variac”)

Trata-se de um auto-trafo, com o enrolamento num núcleo toroidal, distribuído circularmente, sendo varrido por uma escova de contato, de forma que a tensão de saída é obtida discretamente pela tensão por espira.

Ele é essencialmente monofásico e tem valores nominais de potência limitados pela corrente admissível nas escovas.

Vantagens

- Larga faixa de variação da tensão de saída;
- Comportamento da variação praticamente contínuo, ainda que discreto.

Desvantagens

- Aplicação limitada a pequenas potências;
- A existência das escovas limita a ocorrência de sobrecargas ou curto-circuitos.

1.1.3 Regulador com TAP's Comutáveis

Esse regulador normalmente consiste de um auto-transformador cujo enrolamento série é provido de um número de TAP's os quais são comutados sob carga, tendo sido selecionados por um controle sensível de tensão. O enrolamento série é conectado de tal forma que sua tensão é aditiva ou subtrativa à tensão do enrolamento comum.

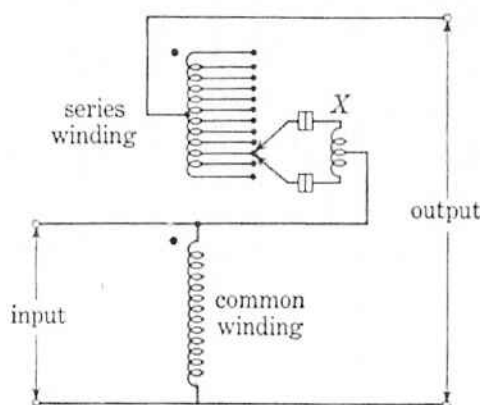


Fig. 4 - Diagrama do circuito do regulador de TAP's [3]

Um dos arranjos mais simples desse tipo de regulador é mostrado na Fig. 4, onde a saída é conectada ao ponto central do enrolamento série, possibilitando, através da seleção de TAP's acima ou abaixo desse ponto, diminuir ou aumentar a tensão de saída, respectivamente.

Os TAP's são selecionados por dois contatos móveis que deslizam sobre contatos fixos no enrolamento série. O reator X limita a corrente nas espiras que são curto-circuitadas quando os contatos móveis estão conectados a TAP's subsequentes. Se a corrente for muito alta para ser interrompida pelos contatos móveis sem abertura de arcos severos, contatos auxiliares são conectados em série com os móveis, como mostrado na Fig. 4.

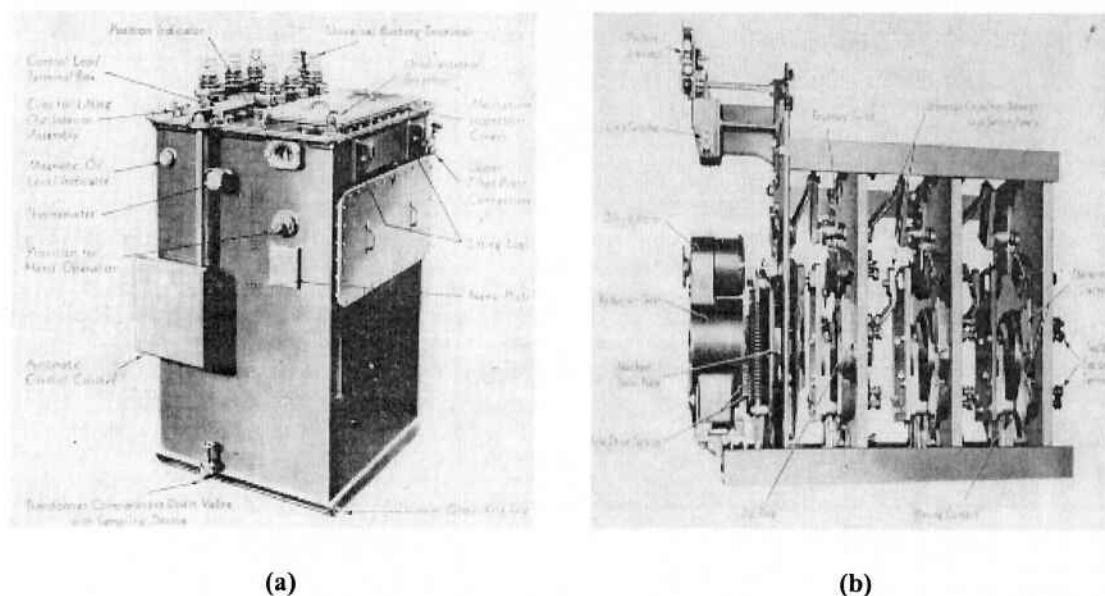


Fig. 5 - Regulador trifásico de TAP's: 750 kVA, 15 kV, faixa de $\pm 10\%$ em 32 TAP's (a) e o respectivo mecanismo de mudança de TAP's (b) [3]

Vantagens

- Baixo custo de construção;
- Opera em tensões elevadas (acima de 2,3 kV é praticamente a única alternativa economicamente viável).

Desvantagens

- Variação discreta da tensão de saída;
- Pequenas faixas de variação (entre 15 e 30%);
- Mecanismo complexo, sujeito a desgaste.

1.1.4 Regulador de Indução

A construção lembra um motor de anéis, mas a parte móvel é fixada em posições ajustáveis ao longo de um passo polar, e em geral, possui um redutor acoplado para o ajuste de posição e para o vencimento do torque.

Monofásico: As figuras mostram a seção de um regulador monofásico de 2 pólos (Fig. 6.a) e suas conexões (Fig. 6.b)

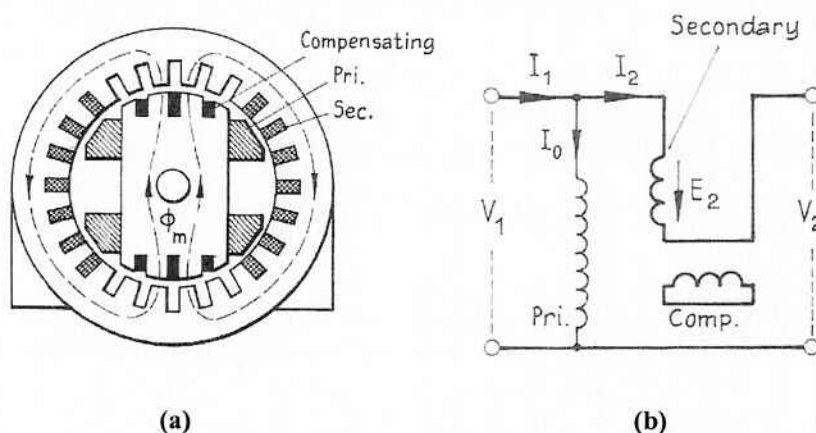


Fig. 6 - Regulador monofásico de indução (a) Esquema geral dos enrolamentos (b) Esquema de ligações (auto-trafo) [1]

A tensão constante do primário (rotor) produz um fluxo ϕ_M , o qual induz no secundário (estator) uma tensão E_2 de magnitude defasada do ângulo entre os eixos dos 2 enrolamentos.

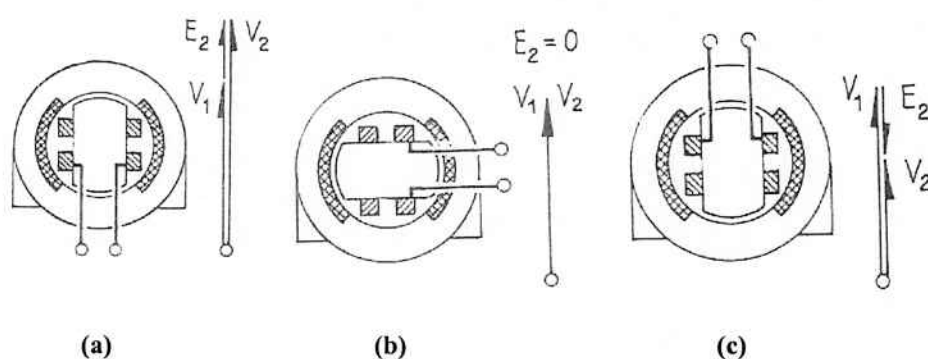


Fig. 7 - Posição de máxima tensão induzida com fase aditiva (a); de tensão induzida nula (b); e máxima induzida com fase subtrativa (c) [1]

Para orientação, E_2 é máximo e no mesmo sentido de V_1 , proporcionando uma saída $V_2 = E_2 + V_1$ (Fig. 7.a). Uma defasagem de 90° (Fig. 7.b) desacopla primário e secundário de

tal forma que $E_2 = 0$ e $V_2 = V_1$. Mais 90° (Fig. 7.c) e a tensão E_2 é invertida ao máximo, conferindo a V_2 um valor de $V_1 - E_2$.

O regulador de indução monofásico é sempre provido de um enrolamento de compensação curto-circuitado, para reduzir a reatância na posição intermediária e para estabilizar as perdas joule. A variação das F_{MM} 's do primário e do compensador são mostradas a seguir:

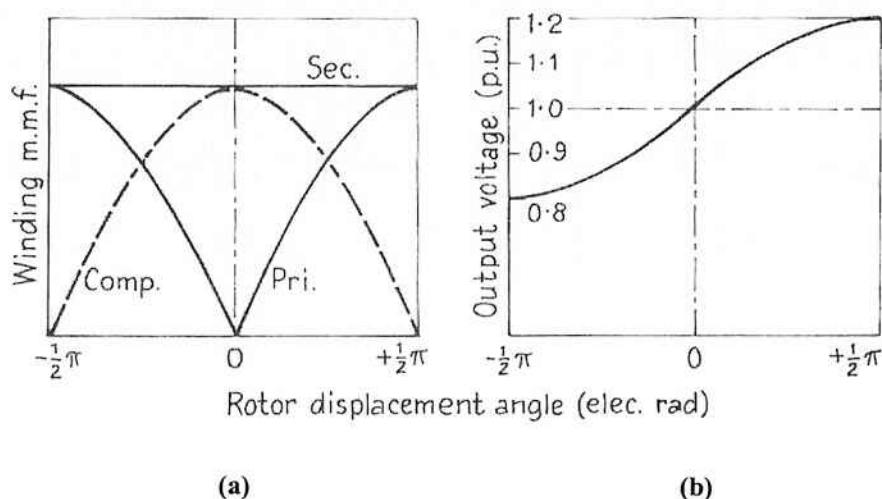


Fig. 8 - Variação das F_{MM} 's dos enrolamentos em função da defasagem do rotor (a) e da tensão de saída, também em função da defasagem do rotor [1]

Se esses dois enrolamentos tivessem a mesma resistência equivalente, a perda joule combinada seria substancialmente independente do acoplamento. Na figura está registrada a relação tensão de saída/defasagem para um regulador de $\pm 20\%$ de faixa de variação.

Trifásico: Os circuitos elétrico e magnético se assemelham aos da máquina de anéis trifásica, como o porém de que a alimentação do primário (rotor) se dá por meio de conexões flexíveis, como na Fig. 9.

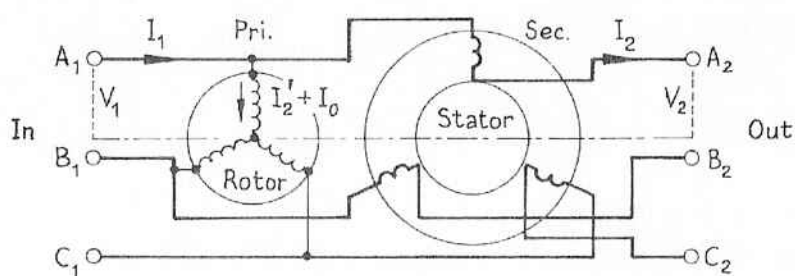


Fig. 9 - Esquema elétrico do regulador trifásico de indução [1]

O fluxo no entreferro é uma onda aproximadamente constante. A tensão secundária é consequentemente constante em magnitude, porém, seu ângulo com respeito à tensão primária varia com o ângulo de posição θ . A tensão de saída V_2 é a soma fasorial de V_1 e E_2 dada pelo diagrama circular na Fig. 10.

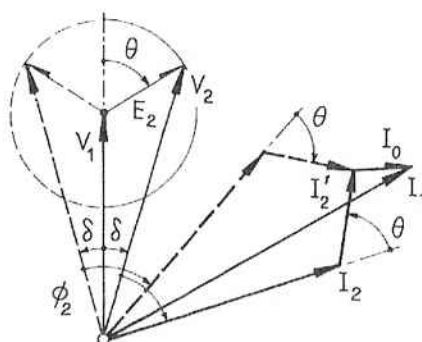


Fig. 10 - Diagrama fasorial de tensões e correntes [1]

De acordo com o sentido de θ , a regulação segue cada metade do círculo. A mudança na magnitude e fase relativa da saída trifásica $A_2B_2C_2$ com respeito à entrada $A_1B_1C_1$ é mostrada a seguir (Fig. 11).

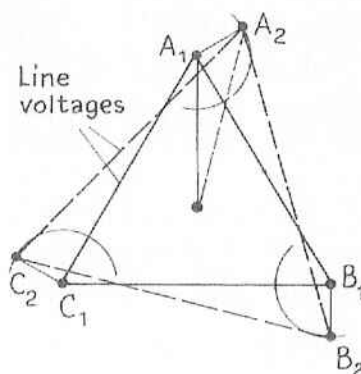


Fig. 11 - Triângulo das tensões de linha [1]

Considere a saída por fase ser V_2 e I_2 , com o ângulo de fase ϕ_2 . A corrente primária é a soma fasorial da corrente de magnetização I_0 com a I_2 equivalente ($I_2' = I_2(E_2/V_1)$). O diagrama da Fig. 10 mostra $(I_2' + I_0)$ ser menor para o caso da linha cheia. A tensão V_2 só estará na mesma direção de V_1 nas situações de máximo e mínimo. Nas outras há uma defasagem θ . Isso também pode ser obtido usando um banco de reguladores monofásico ou por um duplo regulador trifásico que compreende 2 reguladores mecanicamente acoplados com seus secundários em série e seus primários alimentados em seqüências opostas.

O regulador trifásico desenvolve um torque

$$M = kV_1 I_2' \cos(\theta \pm \phi_2) \quad (1)$$

Para um fator de potência unitário, M é máximo para $\theta = 0^\circ$ ou 180° e zero para $\theta = 90^\circ$; para uma carga puramente resistiva M é nulo para $\theta = 0^\circ$ ou 180° . No regulador duplo o torque se opõe no sentido a dar uma resultante proporcional a

$$[\cos(\theta + \phi_2) - \cos(\theta - \phi_2)] \quad (2)$$

que tende a uma carga $f.p. = 1$. O valor nominal depende do “boost” máximo. Um regulador trifásico para $6,6kV \pm 10\%$ e $200 A/fase$ tem potência nominal de

$$\sqrt{3} \cdot 6,6 \cdot 0,1 \cdot 200 = 230 \text{ kVA} \quad (3)$$

A inserção de óleo melhora a isolação e reduz o ruído.

Vantagens

- Faixas de variação da tensão de saída extremamente largas;
- Variação contínua da tensão;
- Mecanismo simples de variação;
- Elevada capacidade de curto-circuito

Desvantagens

- Alto custo de confecção.

1.1.5 Regulador de escovas helicoidal (“Varivolt”)

Trata-se de um transformador de núcleo ferromagnético rotativo. O circuito magnético consiste de duas carcaças planas e perfuradas, e núcleos rotativos cilíndricos, laminados em aço em volta de um eixo, rotacionado por um moto-redutor externo.

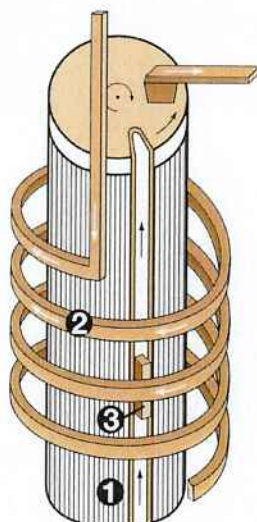


Fig. 12 - Varivolt: enrolamento e núcleo secundários; contato deslizante [4]

A Fig. 12 ilustra o princípio de funcionamento: um contato deslizante feito de cobre especial (3), fazendo um movimento helicoidal ao longo do enrolamento secundário (2), proporcionando variação contínua na saída por conta do contato contínuo entre o contato deslizante e o outro terminal do enrolamento, graças ao caminho de cobre construído no núcleo (1).



(a)



(b)

Fig. 13 - Enrolamento helicoidal (a) e o contato deslizante (b) [4]

Vantagens

- Aplicação em grandes potências;
- Largas faixas de variação da tensão de saída;
- Variação contínua;
- Escovas dimensionadas para regime de sobrecarga e curto-circuito.

Desvantagens

- Mecanismo complexo de variação;
- Alto custo de fabricação.

1.2 Motivação

Tendo em vista o apresentado acima, a principal motivação do estudo é desenvolver uma topologia que concilie as principais vantagens de cada tipo de regulador – baixo custo tanto de fabricação como de manutenção, mecanismo simples de variação, larga faixa de variação da tensão de saída, versatilidade quanto à faixa de potência aplicável (visto o regulador de comutação de TAP's ser o único viável em aplicações de altas tensões), e variação contínua da tensão.

1.3 Objetivos

O objetivo primordial é estudar uma topologia original de regulador de tensão que atenda os critérios listados no item anterior, aplicando os conhecimentos de Eletromagnetismo Aplicado, Circuitos Elétricos e Máquinas Elétricas de forma a desenvolver o anteprojeto de um protótipo (adquirindo contato com técnicas de projetos de máquinas elétricas), construí-lo (adquirindo contato com processos de fabricação) e finalmente testá-lo,

a fim de analisar os resultados, verificando a possibilidade da abertura de um tema para futuro aprimoramento.

1.4 Organização do trabalho

Esse trabalho está organizado em 5 capítulos.

O primeiro deles é dedicado à exposição do trabalho de pesquisa de vários modelos de reguladores já existentes. Cada tipo é exposto com suas principais características, tais como custo de fabricação, complexidade do mecanismo, largura admissível da faixa de tensão de saída, limitações de potência e característica da variação da tensão (contínua ou discreta), salientando-se as vantagens e desvantagens de cada um.

O capítulo 2 foca o desenvolvimento da proposta alternativa, isto é, o princípio de funcionamento da máquina enquanto idéia e toda a abordagem analítica. Nessa etapa é feito o equacionamento do circuito magnético e previsão do comportamento da variação da tensão de saída do que virá a ser o protótipo do regulador.

Os desenvolvimentos dos projetos e construções são tratados no capítulo 3. Esse capítulo mostra as especificações técnicas e construção do pré-protótipo, seus defeitos e as justificativas para a construção posterior de um segundo e de um final terceiro protótipo, ambos “rotóricos”, cada um visando melhorar o desempenho do seu antecessor. Todas as topologias desses novos protótipos “rotóricos” também são tratadas aqui.

No capítulo 4 são apresentados todos os ensaios e resultados, os quais, depois de tratados, são analisados de modo a apontarem as vantagens e desvantagens do protótipo em relação aos seus antecessores e em relação aos reguladores já existentes. Os resultados são

apresentados em tabelas e gráficos comparativos, onde se pode observar claramente a característica de funcionamento de cada protótipo.

Por fim, o capítulo 5 trata das considerações finais. Todas as dificuldades encontradas desde a abordagem analítica até os testes do terceiro e último protótipo “rotórico” são tratadas aqui. Também são feitas menções de possíveis estudos futuros da máquina e o que poderia ser estudado e feito para a obtenção de melhorias sensíveis no estado atual do trabalho. Por último, as conclusões obtidas do estudo.

2 Desenvolvimento da Proposta Alternativa

Esse capítulo tem como objetivo apresentar o princípio de funcionamento, bem como as etapas de toda a abordagem analítica que foi feita da proposta alternativa. É através dessa abordagem que serão dados os primeiros passos rumo à construção de um protótipo. Todo o anteprojeto se concentra aqui. São apresentados ainda o circuito magnético, o estudo do caráter da variação e a descoberta de uma região a qual foi chamada de “zona morta”.

2.1 O Princípio do Funcionamento

A topologia da proposta estudada é bem simples, composta de um “estator” semelhante ao de uma máquina de corrente contínua, sendo que dois pólos opostos entre si constituem o primário da máquina e os dois restantes, também opostos, o secundário. O “rotor” possui dois profundos canais diametralmente opostos entre si, contendo uma bobina em curto, como mostrado na Fig. 14.

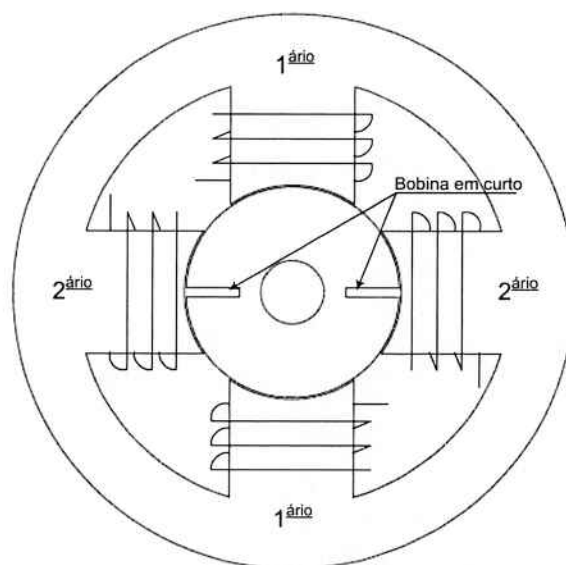


Fig. 14 - Topologia do regulador proposto

O “rotor” funciona como um “divisor de fluxo”, pois, por conta da alta relutância dos canais, o fluxo toma caminhos determinados por sua posição.

Quanto à bobina em curto, sua função se restringe a impedir que o fluxo passe pelo centro do “rotor”, fazendo com que o fluxo se feche pelos caminhos desejados. Logo se observa que o ideal seria que não houvesse caminho de material ferromagnético disponível para a passagem de fluxo, ou seja, o “rotor” se comportando como um “entreferro móvel”.

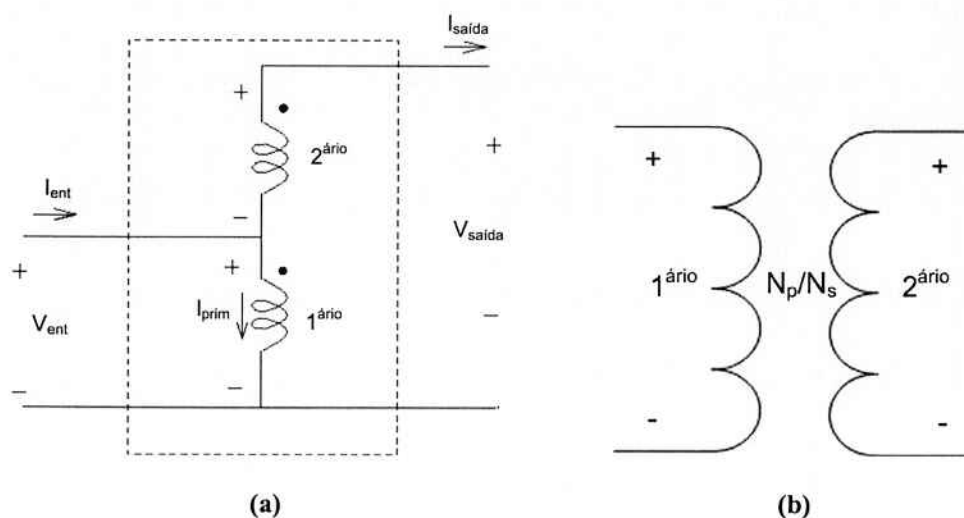


Fig. 15 - Configuração Auto-Trafo (a) e Trafo (b)

As possibilidades de configuração são já muito bem conhecidas: ligações trafo e auto-trafo, sendo esta última a mais interessante, por proporcionar uma maior faixa de variação de tensão de saída (por exemplo: se a relação de espiras for 1:1, pode-se ter uma faixa de $\pm 100\%$).

Todos os resultados e análises dirão sempre respeito à configuração auto-trafo.

2.2 Abordagem Analítica

2.2.1 Circuito Magnético

A abordagem analítica se inicia com o cálculo do circuito magnético, onde “nasce” toda máquina elétrica. Sua grande importância reside no cálculo das induções magnéticas ao longo das partes mais importantes da máquina, tais como entreferro, dentes, coroa e etc. Com base nesses cálculos analisam-se as induções para garantir que não haja muita saturação em algum trecho, evitando o consumo excessivo de corrente para estabelecer a força magnetomotriz necessária.

No caso do regulador em questão, têm-se as seguintes partes no circuito magnético: pólo primário, entreferro primário, armadura, entreferro secundário, pólo secundário e coroa “estatórica”.

Sendo na posição de máxima tensão induzida onde em teoria a máquina é colocada na condição mais severa de operação, é nesse estado no qual o circuito magnético é calculado, de modo a dimensionar os materiais para o pior caso.

$$B_g = \frac{\Phi}{k_f \tau_p \ell_c} \quad (4)$$

e aproximando o fator de forma por [2]

$$k_f \approx \frac{b_{pp}}{\tau_p} \quad (5)$$

temos

$$\Phi = B_g \cdot b_{pp} \cdot \ell_c = 0,643,12.70.10^{-6} = 0,00181104 \text{ Wb} \quad (6)$$

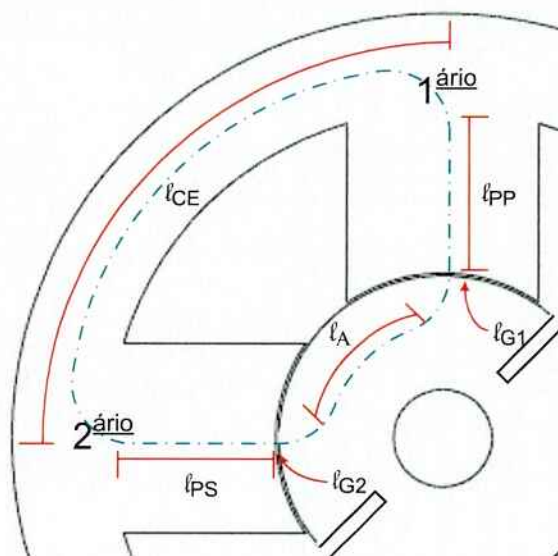


Fig. 16 - Caminho do fluxo ao longo das partes e seus respectivos comprimentos

Dado o caminho definido, foram calculadas as forças magnetomotrizes necessárias para impor fluxo nessas partes. Calculadas as forças magnetomotrizes dos elementos, faz-se a analogia do circuito magnético com o circuito elétrico. Dado que o fluxo encontra relutâncias em série, fazemos a analogia com um circuito elétrico, onde a tensão corresponde à força magnetomotriz total, as resistências (associadas em série), às relutâncias e a corrente, ao fluxo básico por pólo. Temos, portanto o circuito da Fig. 17:

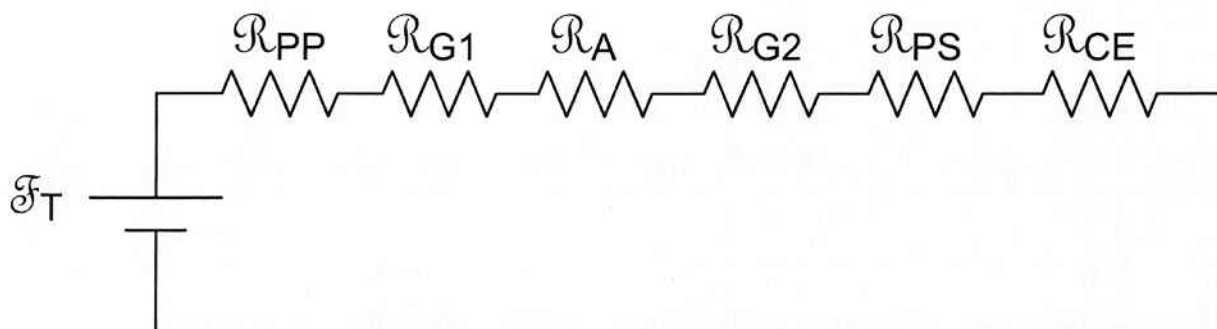


Fig. 17 - Analogia do circuito magnético com circuito elétrico

Entreferro Primário (\mathcal{R}_{G1})

$$\mathfrak{F}_{G1} = \frac{B_g \cdot \ell_{G1}}{\mu_0} = \frac{0,60,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238,73 \text{ Aesp} \quad (7)$$

Armadura (\mathcal{R}_A)

$$B_A = \frac{\Phi}{S_A} = \frac{\Phi}{\ell_c \cdot k_c \cdot h_A} = \frac{0,00181104}{70,0,95 \cdot \left(\frac{60-18}{2}\right) \cdot 10^{-6}} = 1,297 \text{ T} \quad (8)$$

Tendo calculado a indução, determina-se a intensidade de campo magnético pela curva de magnetização da chapa ACESITA E230 C3 (Aço Silício), usada na confecção dos núcleos magnéticos tanto do “estator” como do “rotor”:

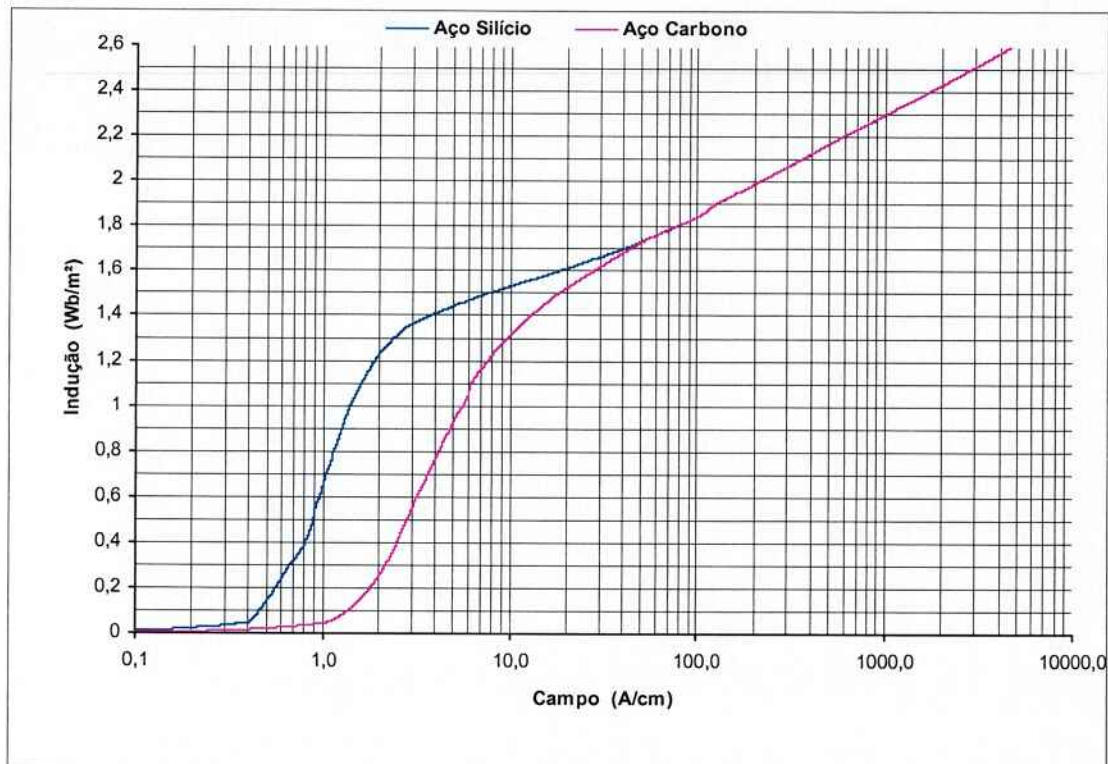


Fig. 18 - Curvas de magnetização das chapas ACESITA

$$B_A = 1,297 \text{ T} \Rightarrow H_A = 2,38 \frac{\text{Aesp}}{\text{cm}} \quad (9)$$

Para determinação da força magnetomotriz necessária, falta ainda o comprimento do caminho que fluxo faz pela armadura:

$$\ell_A = \frac{(60+18)}{2} \cdot \frac{\pi}{4} = 30,63 \text{ mm} \quad (10)$$

Logo

$$\mathcal{F}_A = H_A \cdot \ell_A = 2,38 \cdot 3,063 = 7,29 \text{ Aesp} \quad (11)$$

Entreferro Secundário (\mathcal{R}_{G2})

Considerando-se que todo o fluxo se desvia para o secundário, e sabendo-se que os comprimentos do entreferro e pólos secundários são idênticos aos do primário, temos

$$\mathcal{F}_{G2} = 238,73 \text{ Aesp} \quad (12)$$

Pólo Secundário (\mathcal{R}_{PS})

Também se admite que todo o fluxo passa pelo pólo secundário

$$B_{PS} = \frac{\Phi}{b_{PS} \cdot \ell_c \cdot k_c} = \frac{0,00181104}{35.70.0,95.10^{-6}} = 0,778 \text{ T} \Rightarrow H_{PS} = 1,12 \text{ Aesp} \quad (13)$$

$$\mathcal{F}_{PS} = H_{PS} \cdot \ell_{PS} = 1,12.3,05 = 3,416 \text{ Aesp} \quad (14)$$

Pelas cotas apresentadas no ANEXO 1, sabe-se que

$$\ell_{PS} = 30,5 \text{ mm} \quad (15)$$

Logo

$$\mathcal{F}_{PS} = H_{PS} \cdot \ell_{PS} = 1,12.3,05 = 3,416 \text{ Aesp} \quad (16)$$

Coroa "Estatórica" (\mathcal{R}_{CE})

$$B_{CE} = \frac{\Phi}{S_{CE}} = \frac{\Phi}{\ell_C \cdot k_c \cdot h_{CE}} = \frac{0,00181104}{70.0,95 \cdot \left(\frac{158-122}{2}\right) \cdot 10^{-6}} = 1,513 T \Rightarrow H_{CE} = 8,48 \frac{Aesp}{cm} \quad (17)$$

Tendo-se

$$\ell_{CE} = \frac{(158+122)}{2} \cdot \frac{\pi}{4} = 109,956 mm \quad (18)$$

Logo

$$\mathfrak{F}_{CE} = H_{CE} \cdot \ell_{CE} = 8,48 \cdot 10,9956 = 93,24 Aesp \quad (19)$$

Pólo Primário (\mathcal{R}_{PP})

Sendo os pólos idênticos em suas dimensões:

$$\mathfrak{F}_{PP} = 3,416 Aesp \quad (20)$$

Força Magnetomotriz Total (\mathfrak{F}_T)

$$\mathfrak{F}_T = \mathfrak{F}_{G1} + \mathfrak{F}_A + \mathfrak{F}_{G2} + \mathfrak{F}_{PS} + \mathfrak{F}_{CE} + \mathfrak{F}_{PP} = 584,822 Aesp \quad (21)$$

As forças magnetomotrizes podem ser resumidas na tabela abaixo, onde enxergamos as contribuições de cada parte em porcentagem:

Tabela 1 - Distribuição das forças magnetomotrizes do circuito magnético

Trecho	\mathcal{F} (Aesp)	%
Entreferro Primário	238,73	40,82
Armadura	7,29	1,25
Entreferro Secundário	238,73	40,82
Pólo Secundário	3,416	0,585
Coroa "Estatórica"	93,24	15,95
Pólo Primário	3,416	0,585
Total	584,822	100

2.2.2 Caráter da Variação

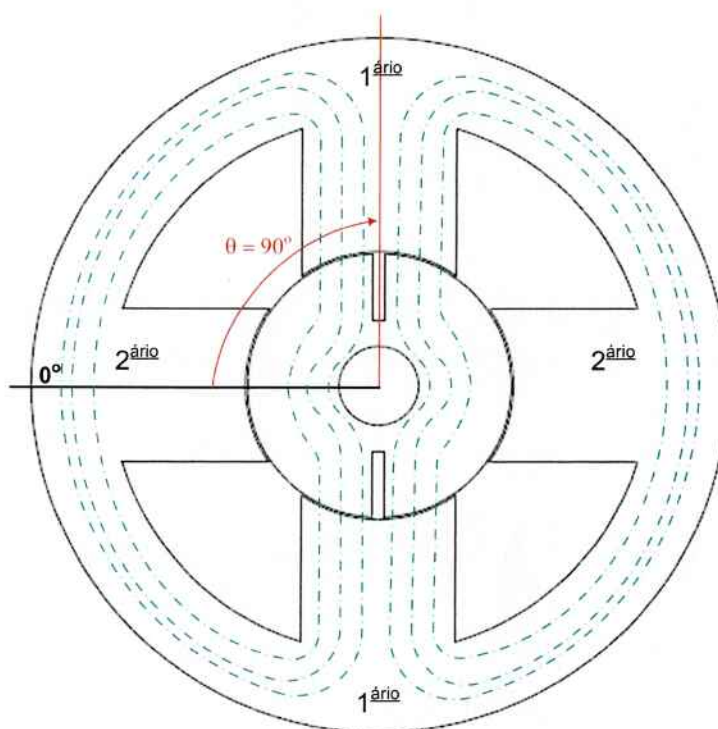


Fig. 19 - Comportamento do fluxo na posição de tensão induzida nula

Para prever o comportamento da tensão de saída em função da posição do “rotor”, admitiu-se a seguinte hipótese: partindo-se da posição de tensão induzida nula (Fig. 19), um pequeno deslocamento de 12° do canal dividiria o fluxo proveniente do pólo primário proporcionalmente às áreas polares entre cada extremidade e o canal, ou seja, o pólo de cima da figura, olhando da esquerda para a direita, está dividido em dois terços e em terço (Fig. 20).

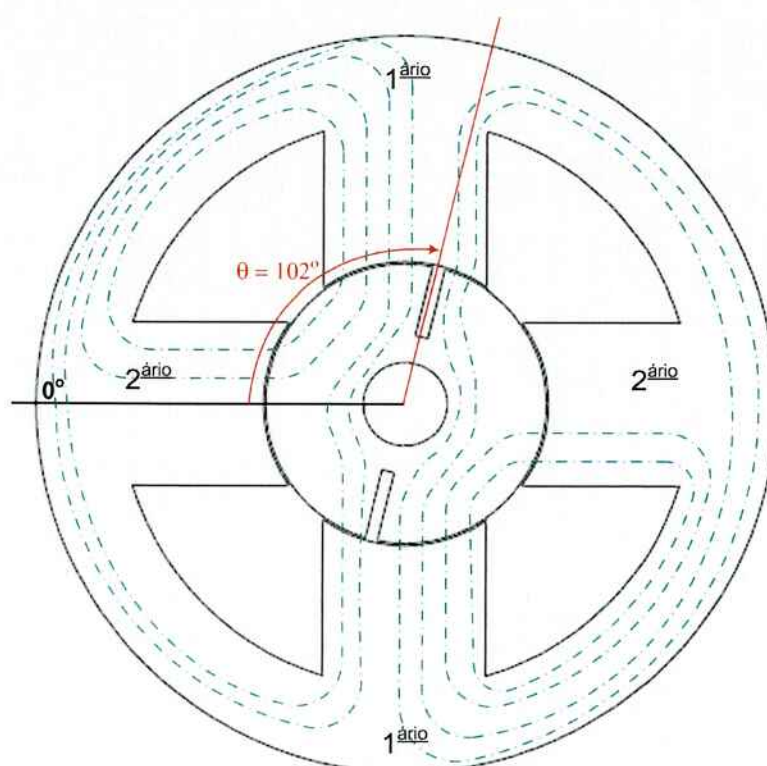


Fig. 20 - Deslocamento de 12° da posição anterior

Percebe-se que no pólo primário oposto (de baixo) houve o mesmo deslocamento, porém dividindo o pólo em, respectivamente, um terço e dois terços. Dessa forma, como mostra a Fig. 20, a diferença de fluxo se desviaria para o secundário, induzindo tensão em suas bobinas.

Se a relação do número de espiras for $1:1$ entre primário e secundário, alimentando-se o primário com 1 pu , ter-se-ia $1/3 \text{ pu}$ de tensão nas bobinas secundárias, ou seja, na

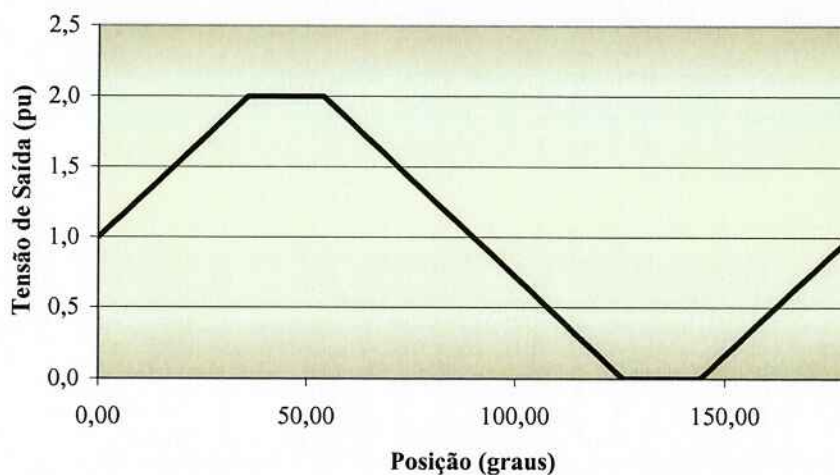


Fig. 22 - Curva teórica da tensão de saída em função da posição do “rotor”

As regiões onde há “patamares” de tensão correspondem a uma variação do “rotor” nas chamadas “zonas mortas”, detalhadas a seguir.

2.2.3 A “Zona Morta”

Existe uma zona entre os pólos primário e secundário que é chamada de “zona morta”. Trata-se de uma região onde a excursão da posição do “rotor” não provoca variação na tensão.

Tal fenômeno é ocasionado pelo fato de existir uma região de ar entre as extremidades de pólos adjacentes. Numa topologia ideal, o final da extremidade de um pólo deveria se confundir com o início da extremidade do pólo seguinte. Dessa forma, a região interna do “estator” (a que fica em face com o “rotor”) seria contínua.

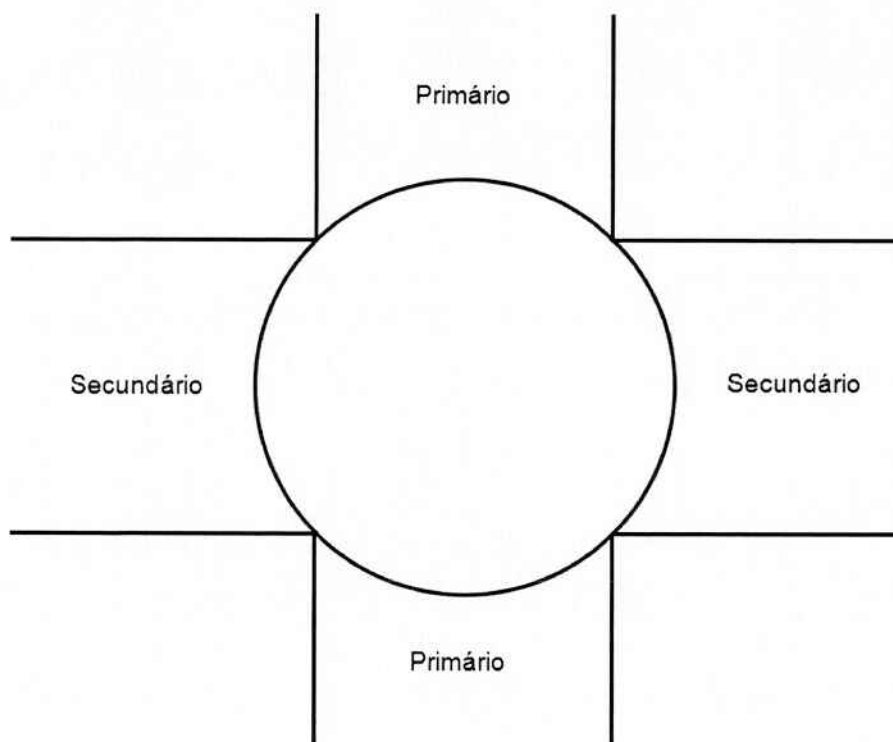


Fig. 23 - “Estator” ideal, com a extremidade dos pólos unidas no limite físico

Essa região existe por entraves construtivos, principalmente por não existirem condições de se inserir as bobinas primária e secundária nos respectivos pólos (no caso do regulador em questão não há condições de parafusar os pólos, pela geometria da estampa).

Por esse motivo, entre um pólo e outro, existe uma região de ar, onde não se aplica o princípio da relação de áreas, exposto no item anterior (2.2.2). Ou seja, não há mais fluxo a ser desviado, pois passada a extremidade de um pólo, todo fluxo criado já está concatenado com o pólo adjacente (secundário).

Outro forte motivo a se forçar a “zona morta” é o aumento significativo da dispersão entre os pólos se suas extremidades fossem contínuas.

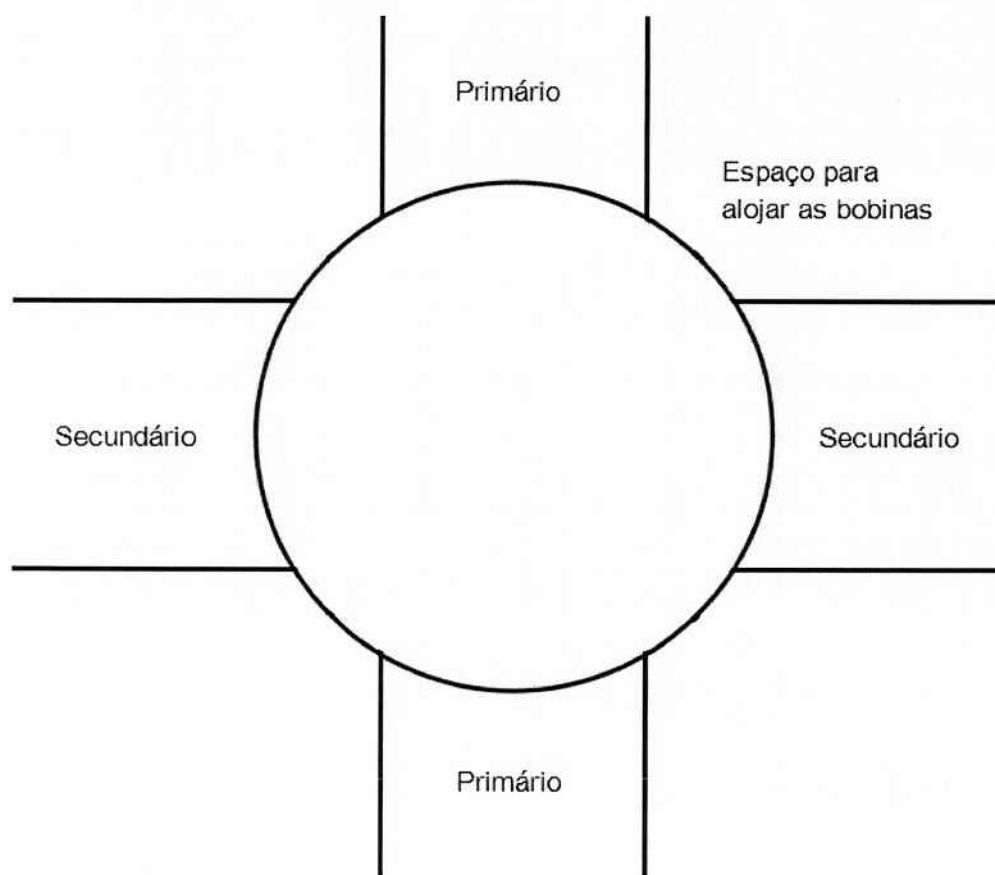


Fig. 24 - “Estator” do protótipo, com pólos menores para inserir as bobinas

Tal região, para o regulador com as medidas do pré-protótipo em questão, equivale a 9° antes da metade do primeiro quadrante e 9° depois. Isso nos dá 18° de zona morta, ou aproximadamente $9,4\text{ mm}$ de comprimento de arco entre pólos subseqüentes.

Partindo de 0° (admitido como sendo a posição onde o eixo das ranhuras está alinhado com o eixo dos pólos secundários), excursiona-se o “rotor” até os 36° onde teoricamente o máximo de tensão no secundário seria induzido. A partir daí, continuando a mover o “rotor” no mesmo sentido de rotação, 18° se passariam sem que nada acontecesse, pois se trata da zona morta, onde a indução no secundário permaneceria a mesma. A partir dos 54° , começaria a se observar o inverso da primeira parte, e a tensão no secundário decairia linearmente até zero quando se chegasse aos 90° .

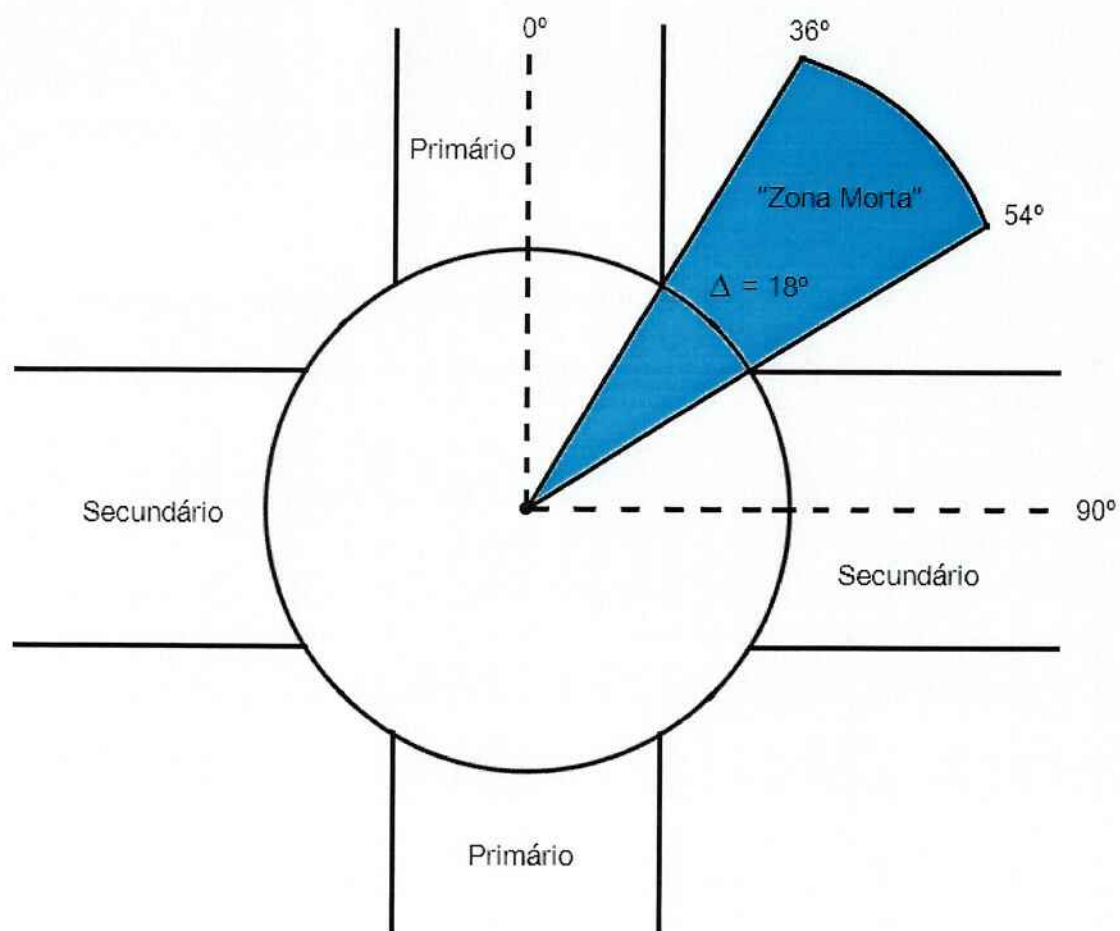


Fig. 25 - A "Zona Morta", onde a tensão na saída teoricamente não varia (valores para o pré-protótipo)

3 Desenvolvimento do Projeto

Após todo o desenvolvimento teórico, inicia-se a parte construtiva. Esse capítulo trata de todas as etapas executivas, desde o pré-protótipo até o terceiro e último deles. Além disso, apresentam-se brevemente os problemas e soluções propostas de cada um. As especificações de cada protótipo e as breves justificativas das modificações aparecem também nessa parte do trabalho.

3.1 Anteprojeto (Pré-Protótipo)

3.1.1 Especificações

Os desenhos técnicos das estampas, carcaça mais tampas e eixo encontram-se nos ANEXOS 1, 2 e 3, respectivamente.

Admite-se tensão nominal de 220 V, ou seja, 110 V por pólo, e fator de enrolamento $k_e = 1$. Dessa forma, pode-se calcular o número de espiras por pólo:

$$E_f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_f \cdot k_e \cdot \Phi \Rightarrow N_f = \frac{110}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1 \cdot 0,00181104} = 227,85 \approx 230 \text{ esp} \quad (22)$$

Em posse do número de espiras por pólo, pode-se também estimar a corrente de magnetização em vazio:

$$F_T = N_f \cdot I_{mag_{ef}} \cdot \sqrt{2} \Rightarrow I_{mag_{ef}} = \frac{584,822}{230 \cdot \sqrt{2}} = 1,798 \text{ A} \quad (23)$$

Vale salientar que é provável que tal valor de corrente esteja acima do valor real, por conta da dispersão ter sido desprezada no circuito magnético, ou seja, a força magnetomotriz total provavelmente está superestimada.

Visto o comportamento do regulador em carga ser praticamente imprevisível, optou-se por construir um pré-protótipo, de forma a estudar tal situação.

Especificações

- **Núcleos Magnéticos (“Estator” e “Rotor”)**

Material: Chapas ACESITA E230 C3

Comprimento: 70 mm, com $k_c = 0,95$

Demais Dimensões: ANEXO 1

- **Carcaça e Tampas**

Material: Aço Carbono SAE 1020

Dimensões: ANEXO 2

- **Eixo**

Material: Aço Carbono SAE 1045

Dimensões: ANEXO 3

- **Enrolamentos**

Condutor e Espiras:

- “Estator”: AWG 18, 230 espiras por pólo
- “Rotor”: AWG 15, 8 espiras

3.1.2 Construção

Feitos os desenhos técnicos já citados, passou-se à construção dos elementos do regulador na Empresa também já citada (Equacional Elétrica e Mecânica Ltda), cujas etapas podem se resumir em:

- *Usinagem do Eixo*
- *Confecção da Carcaça e Tampas (Caldeiraria)*
- *Estampagem e Prensagem*
- *Enrolamento das Bobinas*
- *Usinagem Final*
- *Montagem*

Usinagem do Eixo

A usinagem do eixo seguiu cabalmente o desenho técnico em anexo (ANEXO 3).



Fig. 26 - Eixo usinado, com anéis de retenção



Fig. 27 - Eixo na base onde recebeu as estampas

Confecção da Carcaça e Tampas (Caldeiraria)

Em paralelo seguiu-se a confecção da carcaça (oito ripas de aço igualmente espaçadas soldadas a um anel) e tampas, segundo desenho técnico em anexo (ANEXO 2).



Fig. 28 - Carcaça com anel retentor das chapas “estatóricas”

As tampas estão representadas no item “Montagem”.

Estampagem e Prensagem

Também seguindo os desenhos técnicos já citados (ANEXO 1), em paralelo confeccionaram-se as estampas “rotóricas” e “estatóricas”.

Em posse da carcaça, prensaram-se as chapas “estatóricas”:



Fig. 29 - Núcleo magnético “estatórico” prensado na carcaça (vista lateral)



Fig. 30 - Núcleo magnético “estatórico” prensado na carcaça (vista superior)

Em posse do eixo, prensaram-se as chapas “rotóricas”:

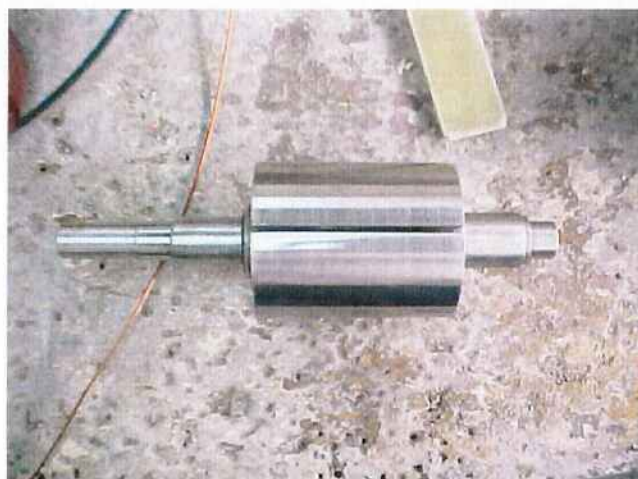


Fig. 31 - Núcleo magnético “rotórico” prensado no eixo (vista superior)



Fig. 32 - Núcleo magnético “rotórico” prensado no eixo (vista frontal)

Enrolamento das Bobinas

Após as etapas acima, passou-se ao enrolamento das bobinas primárias e secundárias nos pólos salientes, seguindo-se do enrolamento da bobina “rotórica” em curto.

Fixou-se a relação de espiras $1:1$ entre primário e secundário, ou seja, os quatro pólos receberam bobinas de *230 espiras* cada.

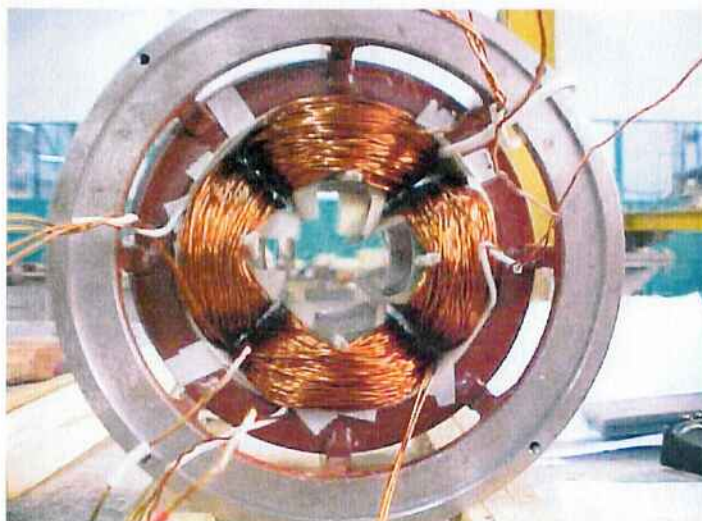


Fig. 33 - Enrolamento dos pólos "estatóricos"

O limite físico foi o determinante na escolha da bitola do fio: *AWG 18* ($0,85 \text{ mm}^2$). Da mesma forma para a bobina em curto, o espaço disponível suportou no máximo a inserção do fio *AWG 15* ($1,7 \text{ mm}^2$).



Fig. 34 - Enrolamento da bobina "rotórica" em curto

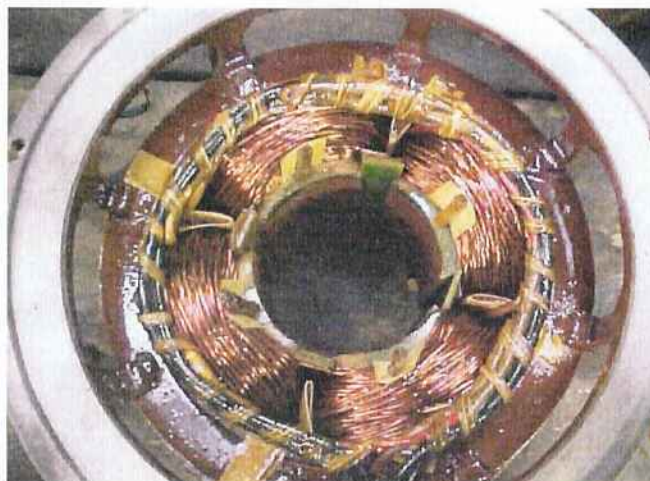


Fig. 35 - “Estator” envernizado

Usinagem Final

Após o enrolamento usinaram-se o “rotor” e o “estator” de forma a se obter, com ótima precisão, $0,5\text{ mm}$ no entreferro.

Montagem

Por fim fez-se a montagem do pré-protótipo, restando apenas os ensaios, tratados no próximo capítulo.



Fig. 36 - Montagem em processo



Fig. 37 - Montagem finalizada

Os ensaios, análises e justificativas das tentativas de otimização construtiva são detalhados no capítulo 4.

3.2 Segundo Protótipo “Rotórico”

3.2.1 Justificativa

Após ensaios e análises de desempenho do pré-protótipo, visto a folga existente no cronograma, projetou-se outro “rotor” visando melhoras na tensão de saída em vazio e em carga. O detalhamento teórico encontra-se no capítulo 4.

3.2.2 Especificações

O segundo “rotor” é então constituído de um novo eixo, não magnético, confeccionado em Aço Inox Austenítico 304, e das mesmas estampas anteriores, porém com canais mais profundos, segundo ANEXO 1.

Também se modificou a bobina em curto. Dessa vez, ao invés de fio enrolado, inseriu-se uma barra de cobre ($2,64 \times 18 \text{ mm}$) nos canais, as quais foram soldadas a um anel de cobre ($2,64 \times 16,5 \text{ mm}$).

3.2.3 Construção

O segundo eixo foi feito idêntico ao primeiro, apenas com material diferente, como já citado.

Quanto aos canais, aprofundaram-se 3 mm em cada um, por fresamento do núcleo “rotórico”.

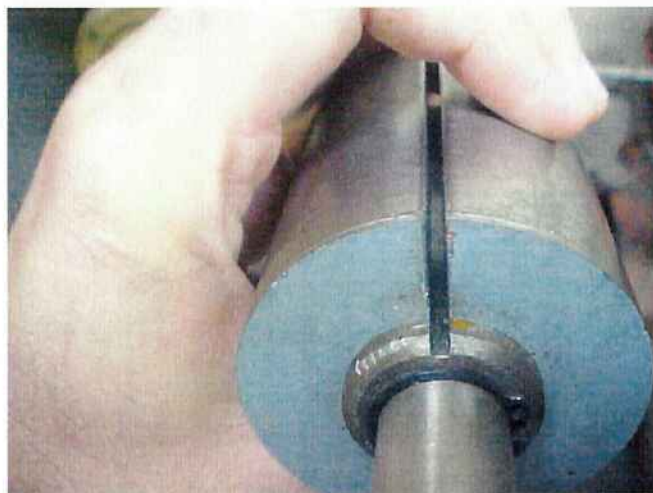


Fig. 38 - Estampas reutilizadas no novo eixo, com canais aprofundados por fresagem

Visando melhor desempenho do enrolamento em curto, trocou-se o fio de cobre por barra de cobre.



Fig. 39 - "Rotor" com a barra de cobre (vista superior)



Fig. 40 - Anel de Curto

Tal protótipo ainda submeteu-se a uma usinagem final, apenas para eliminar a saliência da barra da cobre, sem modificar o comprimento original do entreferro.

3.3 Terceiro Protótipo “Rotórico”

3.3.1 Justificativa

Após os ensaios e análise de desempenho do segundo “rotor”, tendo novamente uma folga no cronograma, projetou-se outra otimização no “rotor”, agora visando melhoria na regulação do equipamento.

3.3.2 Especificações

A única modificação no “rotor” consistiu basicamente na inserção de enrolamentos de compensação, também curto-circuitados. O desenho detalhado da estampa modificada encontra-se no ANEXO 1, enquanto um pequeno esboço está na Fig. 41. Quatro novos canais foram abertos no núcleo “rotórico”, também por meio de fresagem.

Foram utilizadas barras de cobre $3 \times 3 \text{ mm}$.

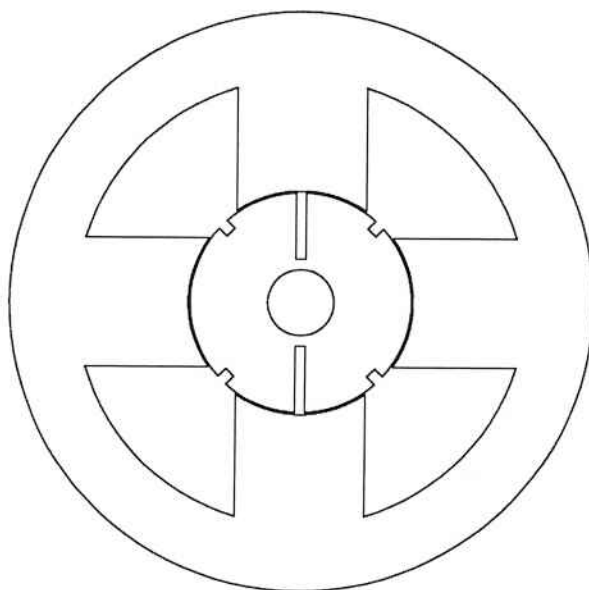


Fig. 41 - Topologia do terceiro protótipo “rotórico”

3.3.3 Construção

Por meio de fresagem os novos canais foram abertos, sendo preenchidos por barras de cobre, as quais foram soldadas ao anel já existente. Porém foi necessário abrir um sulco no anel (de acordo com a Fig. 37), para impedir que o primário sempre encontrasse uma bobina em curto na superfície do “rotor”, fazendo com que houvesse confronto de forças magnetomotrizes no primário, mesmo em vazio, elevando a corrente em tal enrolamento e comprometendo o desempenho do regulador.



Fig. 42 - Terceiro “rotor” (vista frontal)



Fig. 43 - Terceiro “rotor” (vista superior)

4 Testes e Resultados

Apresentam-se todos os ensaios realizados em cada um dos protótipos, seguidos das respectivas análises, complementadas pela apresentação de problemas e propostas para solucioná-los, ainda que parcialmente. Todos os ensaios e análises dirão respeito à configuração auto-trafo de ligação, como já citado anteriormente. Algumas fotos da bancada de testes estão no ANEXO 4.

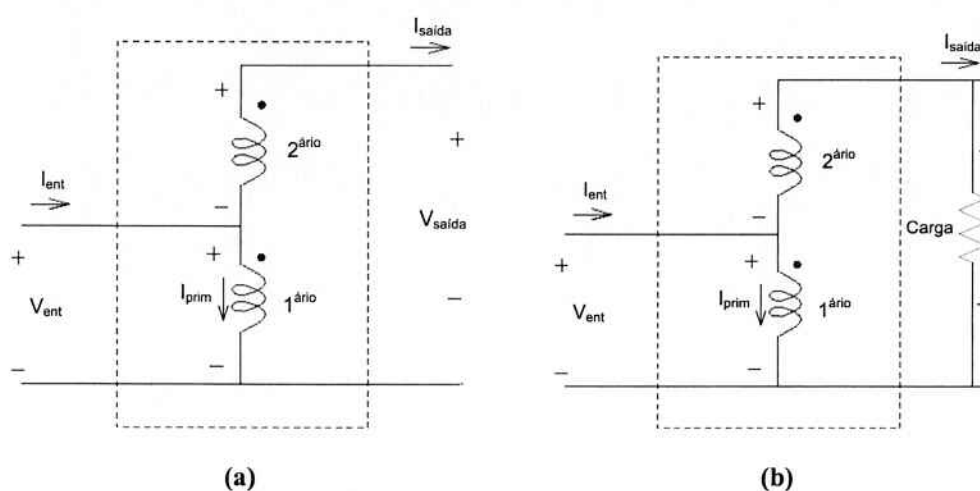


Fig. 44 - Esquema elétrico do ensaio em vazio (a) e em carga (b)

4.1 Pré-Protótipo

4.1.1 Vazio

O primeiro ensaio realizado foi o teste em vazio, sendo primário alimentado em 220 V e saída com seus terminais em aberto. A corrente de magnetização na posição de máximo correspondeu a $I_0 = 1,63\text{ A}$.

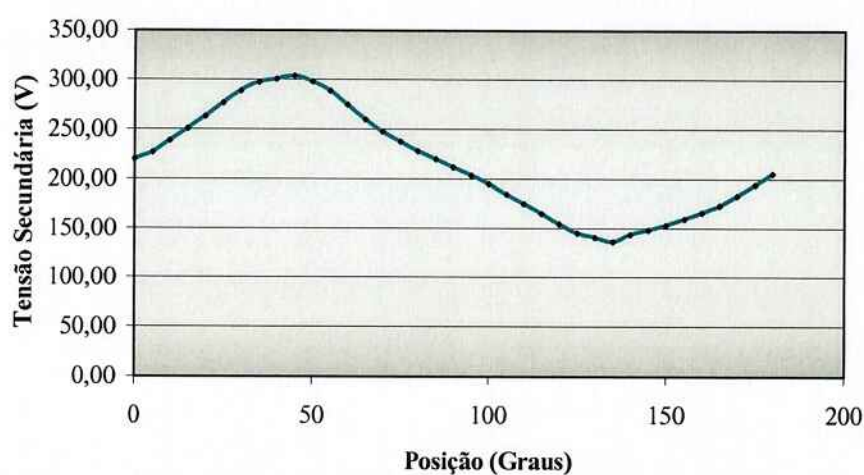


Fig. 45 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 1º “rotor” (vazio)

4.1.2 Carga

Em seguida se fez o ensaio em carga, alimentando-se o primário novamente com 220 V e colocando uma resistência de $150\ \Omega$ na saída. Os resultados abaixo são para a posição de máxima tensão induzida.

Tabela 2 - Valores em carga para o pré-protótipo

Grandeza	Valor Medido
$V_{\text{prim}}\text{ (V)}$	220
$I_{\text{prim}}\text{ (A)}$	1,72
$V_{\text{saída}}\text{ (V)}$	177
$I_{\text{saída}}\text{ (A)}$	1,19
$P_{\text{saída}}\text{ (W)}$	210,6

Dessa forma determinou-se a regulação para essa carga na posição de máxima tensão induzida:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 303,8 \text{ V}; \\
 V_{C(150\Omega)} &= 177 \text{ V}; \\
 \Re_{150\Omega} &= \frac{V_0 - V_{C(150\Omega)}}{V_{C(150\Omega)}} = \frac{303,8 - 177}{177} = 0,7164 = 71,64 \%
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

4.1.3 Análise

Vê-se claramente um desempenho muito aquém do esperado para o ensaio em vazio em relação a valores de tensão induzida, já que a faixa de tensão obtida na saída foi de $\pm 83,8 \text{ V}$, ou seja, $\pm 0,38 \text{ pu}$, e não $\pm 1 \text{ pu}$, como previsto na teoria. A provável causa seria a passagem excessiva de fluxo pela região central do “rotor”, ocasionando queda na tensão induzida no secundário. A bobina “rotórica” em curto estava sendo praticamente ineficiente, pois sendo o eixo de material magnético, ela não conseguia desviar o fluxo devidamente.

O ponto positivo foi a característica da variação: praticamente linear, de acordo com o esperado. Na região da “zona morta” houve uma variação muito pequena, também próximo do esperado.

A corrente de magnetização, como já previsto, foi ligeiramente menor do que o valor teórico ($1,798 \text{ A}$).

O ensaio em carga revelou que algo precisava ser feito, pois não houve nem sequer 1 pu na saída ($177 \text{ V} = 0,8045 \text{ pu}$), quando esperava-se apenas uma pequena queda do valor 2 pu por conta da impedância série do regulador. Logo, tal impedância estaria com um valor demasiadamente alto, o que impulsionou um projeto de otimização do “rotor”, já que modificações no “estator” seriam praticamente infrutíferas.

A primeira providência seria trocar o eixo por um de material não magnético, para que o fluxo enxergasse uma permeabilidade muito menor que a do aço.

A segunda idéia foi aprofundar as ranhuras “rotóricas” para tornar o caminho central mais fechado ainda. Saturando-se o que restou de aço entre os canais e o eixo, a permeabilidade do aço diminuiria substancialmente, fazendo com que mais fluxo fosse desviado.

Por fim, a bobina “rotórica” em curto seria também trocada. Uma barra de cobre teria melhor desempenho, por possuir menor resistência e, conseqüentemente, maior capacidade de repelir o fluxo proveniente do primário.

4.2 Segundo Protótipo

O segundo protótipo apresentou resultados coerentes com as mudanças feitas, como pode se observar abaixo.

4.2.1 Vazio

Novamente o primário foi alimentado em 220 V, e a corrente de magnetização na posição de máximo foi medida em $I_0 = 1,47 A$.

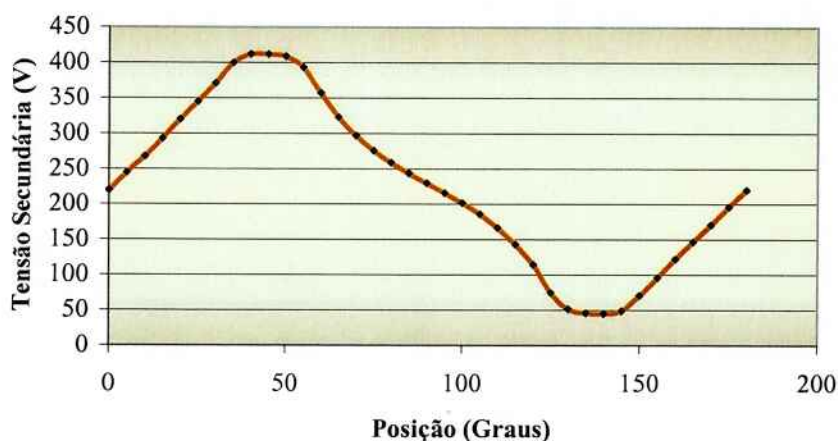


Fig. 46 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 2º “rotor” (vazio)

4.2.2 Carga

Com 220 V no primário e uma carga de 150 Ω na saída.

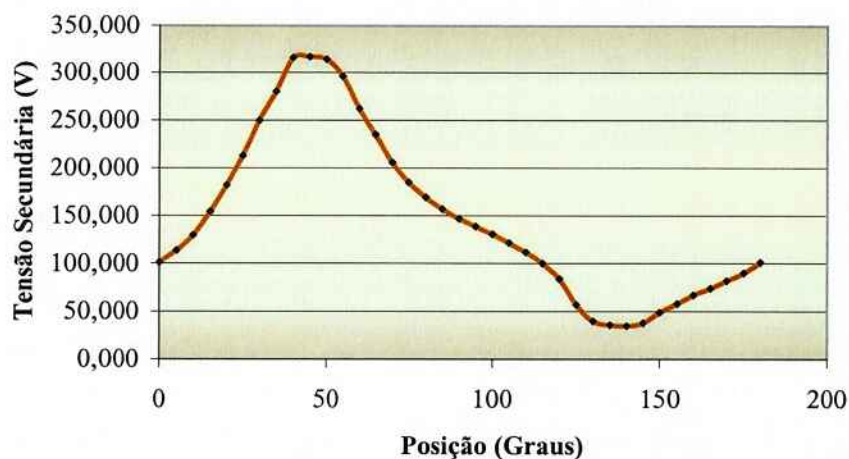


Fig. 47 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 2º “rotor” (carga)

E na posição de máxima tensão induzida:

Tabela 3 - Valores em carga para o 2º protótipo “rotórico”

Grandeza	Valor Medido
V_{prim} (V)	220
I_{prim} (A)	4,8
$V_{\text{saída}}$ (V)	317
$I_{\text{saída}}$ (A)	2,18
$P_{\text{saída}}$ (W)	691

Diferentemente do primeiro protótipo, levantou-se a curva da regulação para a carga de 150 Ω em função da posição “rotórica”:

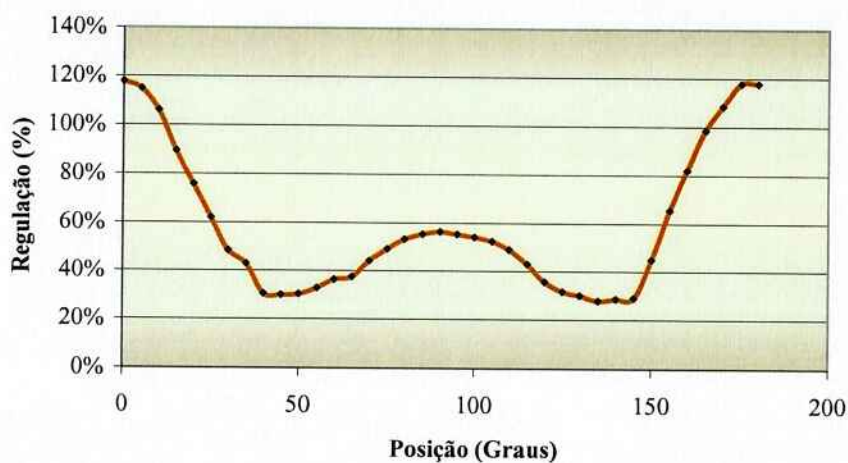


Fig. 48 - Comportamento da regulação para carga de $150\ \Omega$ em função da posição (2º protótipo)

4.2.3 Análise Comparativa

Vazio

O ensaio em vazio resultou em valores significativamente melhores do que o protótipo anterior, no que diz respeito a valores de tensão induzida nas posições de máximo e mínimo.

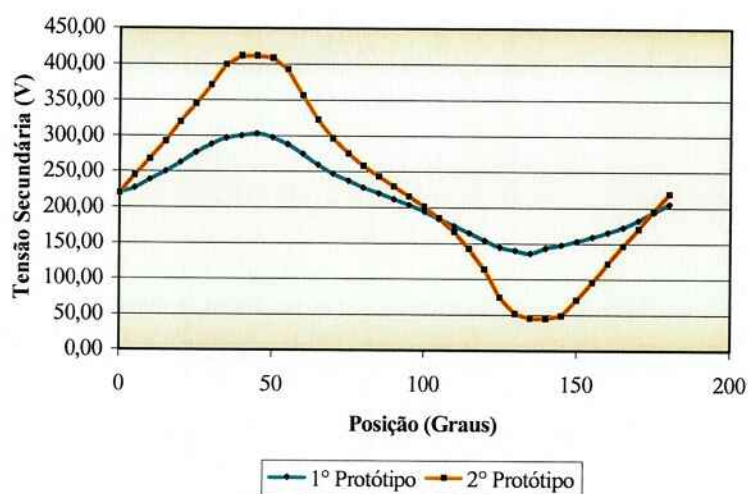


Fig. 49 - Curvas superpostas dos ensaios em vazio (1º e 2º Protótipos)

Tabela 4 - Valores comparativos em vazio para 1º e 2º protótipos

	1º Protótipo	2º Protótipo
Tensão Máxima Induzida (V)	303,8 (1,381 pu)	412 (1,873 pu)
Tensão Mínima Induzida (V)	136,2 (0,619 pu)	45 (0,205 pu)
Faixa de Variação da Tensão de saída	$\pm 0,381$ pu	$\pm 0,834$ pu
Corrente de Magnetização (pos. máx) (A)	1,63	1,47

A faixa de variação da tensão de saída aumentou para aproximadamente 219% do valor anterior, sendo coerente com o esperado, ou seja, antes a maioria do fluxo criado passava pela região central do “rotor”, comportando-se como um fluxo de dispersão, pois não era aproveitado.

A corrente de magnetização para a posição de máximo teve seu valor diminuído porque dessa vez, sendo maior parte do fluxo desviado, menor foi o caminho fechado pelas linhas de fluxo e menor a força magnetomotriz total necessária. A parte do fluxo que passava pelo centro percorria um maior caminho para se fechar.

Carga

Quanto ao ensaio em carga, faz-se necessária a comparação entre os dois protótipos apenas para a posição de máxima tensão induzida, pois foi a única posição onde se realizou medição em carga no primeiro protótipo.

Tabela 5 - Valores comparativos em carga (pos. máx.) para 1º e 2º protótipos

	1º Protótipo	2º Protótipo
Tensão na Saída (V)	177 (0,805 pu)	317 (1,441 pu)
Corrente na Saída (A)	1,19	2,18
Potência na Saída (W)	210,6	691,1
Regulação (%)	71,64	29,97

Houve também uma melhoria sensível no desempenho em carga (na posição de máximo): aumento da tensão, corrente e potência de saída, além da diminuição substancial da regulação. Isso se explica pela maior capacidade do segundo “rotor” de confrontar forças magnetomotrizes, proporcionando uma menor reatância de dispersão.

Sabendo-se que a tensão de saída na posição de mínimo foi 35 V, a faixa de variação da tensão de saída em carga foi de 0,159 pu a 1,441 pu, ou seja, o valor de 220 V não se encontra no centro da faixa, o que não é interessante para esse tipo de equipamento.

Curva de Regulação

A curva da regulação em função da posição “rotórica” para a carga de 150 Ω (Fig. 47) revelou que há um aumento anormal da impedância série do regulador para as posições de tensão induzida nula (0° e 90°). A explicação encontrada foi que, para a configuração auto-trafo em carga, mesmo com tensão induzida nula no enrolamento secundário, há corrente passante por suas bobinas, de forma a induzir fluxo que tende a anular o original (Lei de

Lenz). Porém a topologia do regulador permite que linhas de fluxo de dispersão se fechem pelo ferro.

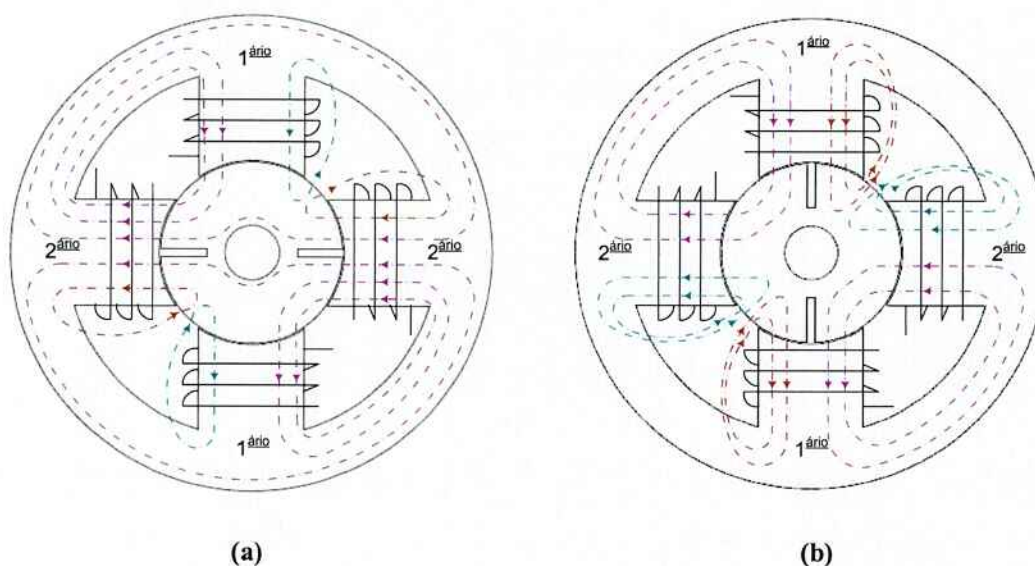


Fig. 50 - Configuração das linhas de fluxo em carga (auto-trafo) na posição 0° (a) e na posição 90° (b)

As linhas em cor roxa simbolizam as linhas de fluxo que se concatenam entre primário e secundário, quando deveriam se confrontar, forçando a dispersão, que é o que acontece com as linhas nas cores verde e marrom.

A reatância de dispersão, inversamente proporcional à relutância do caminho de dispersão, no caso das linhas em cor roxa adquire valores muito altos, já que a dispersão se fecha pelo ferro, o que ocasiona o aumento do valor da regulação, devido à alta queda de tensão na impedância série.

Pode-se observar, através do gráfico da Fig. 48, que a regulação na posição de 0° é maior que na posição de 90°. Com o auxílio da Fig. 50.a, percebe-se que pelo fato dos canais não estarem impedindo a concatenação dos fluxos secundários entre si, eles naturalmente tendem a se fechar, proporcionando um valor de reatância de dispersão bem maior do que no caso da posição de 90°.

A solução proposta consistia em enrolamentos de compensação para forçar o confronto das forças magnetomotrizes, porém só se poderia optar pela compensação de umas das posições. Por conta da geometria da estampa “rotórica” optou-se por compensar a posição de 90°, pois a compensação da posição de 0° exigiria mais do enrolamento de compensação.

4.3 Terceiro Protótipo

4.3.1 Vazio

A corrente de magnetização na posição de máximo resultou em $I_0 = 1,67 A$.

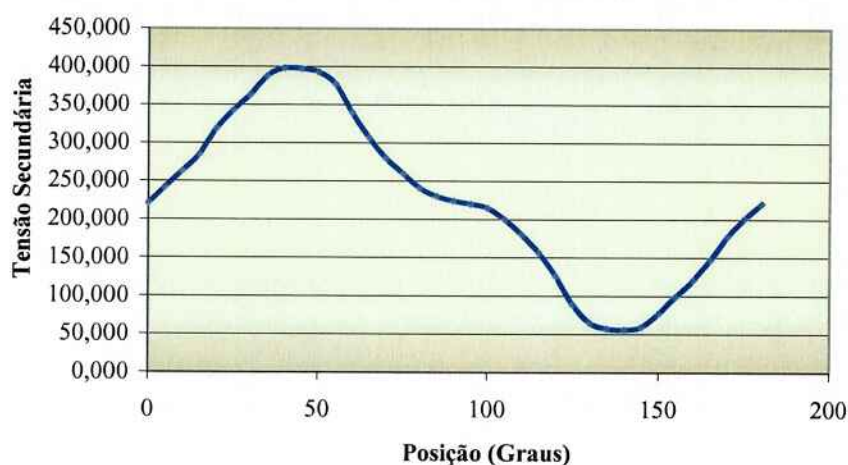


Fig. 51 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 3º “rotor” (vazio)

4.3.2 Carga

Novamente, com $R_{CARGA} = 150 \, \Omega$.

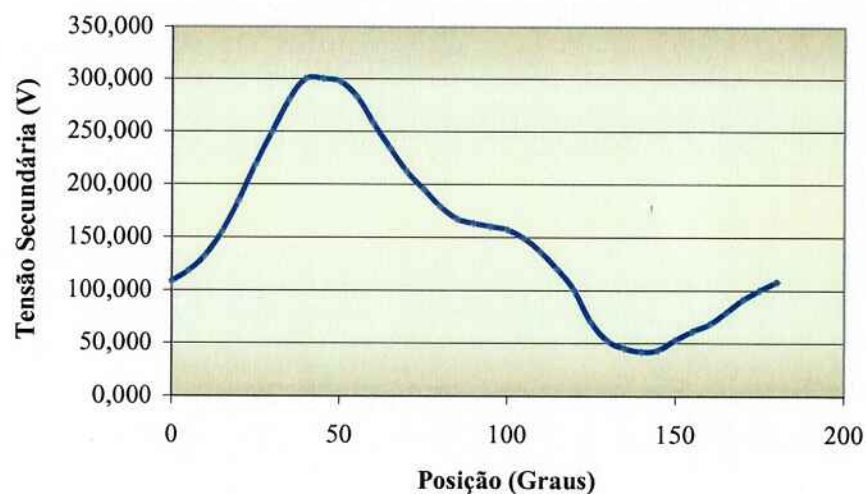


Fig. 52 - Comportamento da tensão de saída em função da posição do 3º “rotor” (carga)

Na posição de máxima tensão induzida:

Tabela 6 - Valores em carga para o 3º protótipo “rotórico”

Grandeza	Valor Medido
$V_{\text{prim}} \text{ (V)}$	220
$I_{\text{prim}} \text{ (A)}$	4,5
$V_{\text{saída}} \text{ (V)}$	300
$I_{\text{saída}} \text{ (A)}$	2,06
$P_{\text{saída}} \text{ (W)}$	618

E por fim a curva da regulação para tal carga:

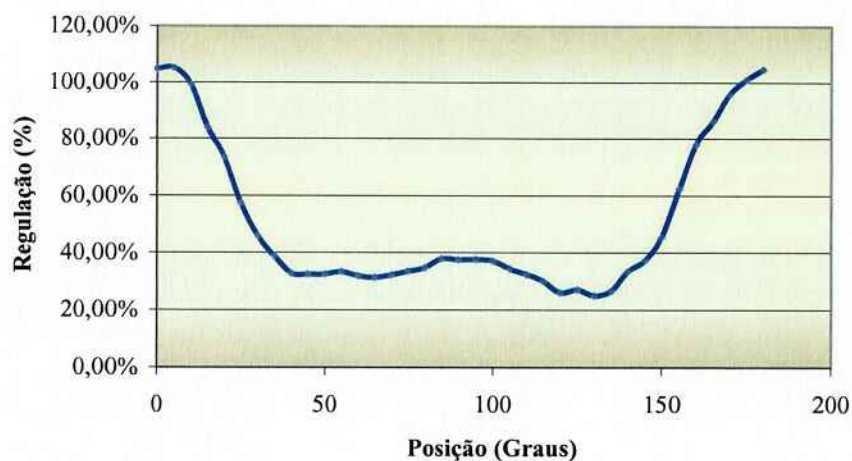


Fig. 53 - Comportamento da regulação para carga de 150 Ω em função da posição (3º protótipo)

4.3.3 Análise Comparativa

Vazio

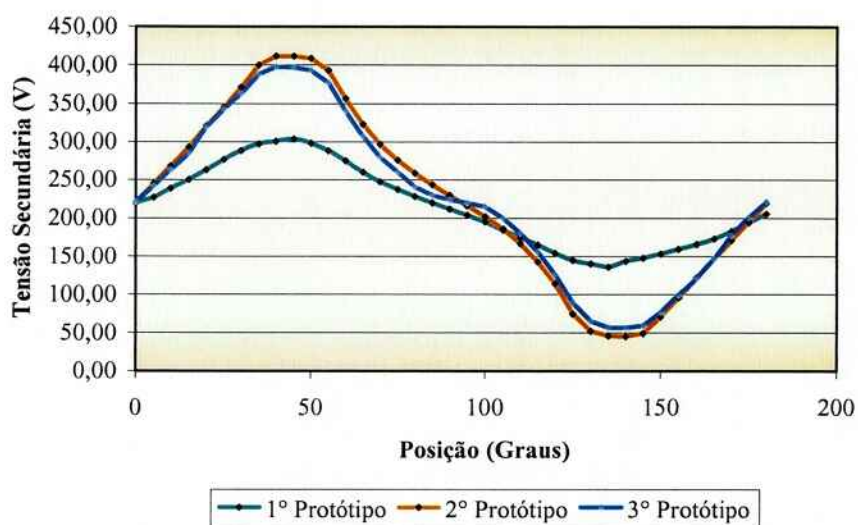


Fig. 54 - Curvas superpostas dos ensaios em vazio (3 Protótipos)

Tabela 7 - Valores comparativos em vazio para os 3 protótipos

	1º Protótipo	2º Protótipo	3º Protótipo
Tensão Máxima Induzida (V)	303,8 (1,381 pu)	412 (1,873 pu)	398 (1,809 pu)
Tensão Mínima Induzida (V)	136,2 (0,619 pu)	45 (0,205 pu)	56 (0,255 pu)
Faixa de Variação da Tensão de saída	$\pm 0,381$ pu	$\pm 0,834$ pu	$\pm 0,777$ pu
Corrente de Magnetização (pos. máx) (A)	1,63	1,47	1,67

No terceiro protótipo perdeu-se um pouco de desempenho na tensão induzida em vazio em relação ao 2º protótipo. A causa provável foi que os enrolamentos de compensação interferiram nas posições de máximo e mínimo também. Infelizmente só após a inserção foi detectado que a abertura do arco dos novos canais deveria ser de 36°, e não de 45° (vide ANEXO 1), para que a ação dos novos enrolamentos fosse mais pontual na posição de 0°.

A faixa de tensão de saída conseqüentemente caiu, o que mostra perda de desempenho em vazio.

O aumento da corrente de magnetização pode ser explicado pelo fato dos enrolamentos de compensação estarem em curto em uma posição não ortogonal ao enrolamento primário, quando na posição de máximo.

Carga

Para a comparação dos três protótipos em carga, adicionou-se mais uma coluna na tabela já mostrada, como feito na análise em vazio.

Tabela 8 - Valores comparativos em carga (pos. máx.) para os 3 protótipos

	1° Protótipo	2° Protótipo	3° Protótipo
Tensão de Saída (V)	177 (0,805 pu)	317 (1,441 pu)	300 (1,364 pu)
Corrente de Saída (A)	1,19	2,18	2,06
Potência de Saída (W)	210,6	691,1	618
Regulação (%)	71,64	29,97	32,67

Na situação de carga na posição de máximo, obteve-se novamente queda de desempenho, também ocasionada pelos fatos expostos na análise comparativa em vazio. Com uma menor tensão induzida de saída, teria-se, para a mesma carga, uma menor corrente e conseqüente menor potência de saída. A regulação nesse ponto aumentou um pouco, porém não sensivelmente.

Curva de Regulação

Por fim, sobrepondo as curvas de regulação dos dois últimos protótipos para a mesma carga:

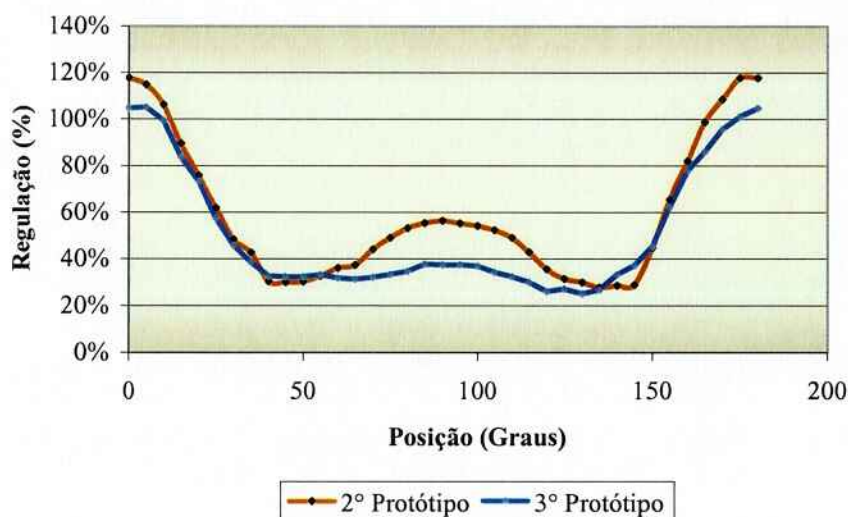


Fig. 55 - Confronto das curvas de regulação para carga de $150\ \Omega$ em função da posição (dois últimos protótipos)

Por essa curva percebe-se claramente a atuação dos enrolamentos de compensação na região de 90° . Apesar dos valores da regulação nas posições de máximo e mínimo estarem um pouco acima dos anteriores, no geral a regulação da máquina para a carga em questão melhorou, como esperado.

A regulação na posição de 0° , apesar de ter diminuído de valor, continuou muito alta em relação às outras posições.

4.3.4 Ensaios Adicionais

Por fim, realizaram-se ensaios adicionais em carga no terceiro protótipo, com diferentes resistências, com o intuito de analisar seu comportamento em função da variação de carga.

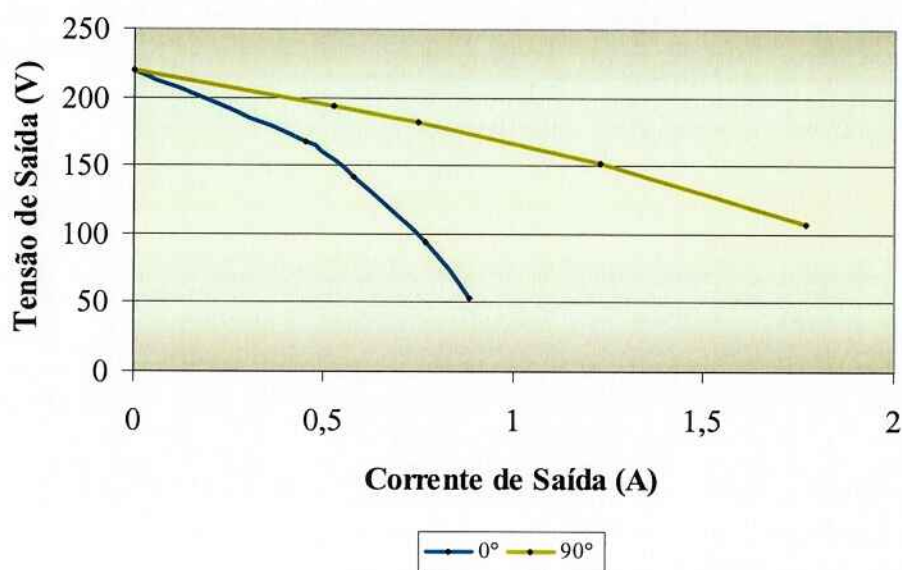


Fig. 56 - Confronto da regulação das posições 0° e 90° para diferentes cargas

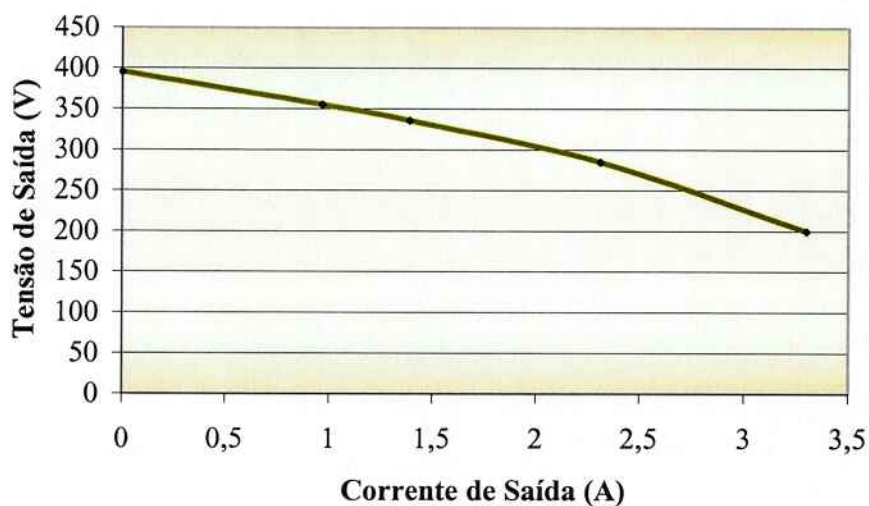


Fig. 57 - Regulação da tensão na posição 45° para diferentes cargas

Nas posições de tensão induzida (0° e 90°) observa-se claramente a diferença, acentuada pelos enrolamentos de compensação, do comportamento de cada uma frente à variação de carga. Quanto à capacidade de manter a tensão constante na saída, a posição 90°

apresenta um desempenho bem superior ao da posição 0° , ainda que absolutamente aquém do que se espera para um bom regulador.

Quanto à posição 45° , ou seja, de máxima tensão induzida, sua regulação apresenta um comportamento também muito irregular ao se aumentar a carga, o que não é nada interessante em um regulador. Dessa forma pôde-se observar como a topologia ainda precisa passar por uma série de otimizações para poder se comparar à regulação dos reguladores existentes.

5 Considerações Finais

Nesse capítulo considerações gerais do trabalho são feitas, levando em conta os seguintes aspectos: dificuldades encontradas, propostas para futuros estudos e aprimoramentos da topologia apresentada, e por fim conclusões sobre todo o estudo e trabalho realizado enquanto projeto de conclusão de curso.

5.1 Dificuldades Encontradas

Projeto

As principais dificuldades encontradas na fase do projeto da máquina foram concernentes ao seu imprevisível comportamento em carga, pois devido à imprecisão quanto à atuação da bobina “rotórica” curto-circuitada não se pôde estabelecer um equacionamento razoável que permitisse a previsão teórica, o que levou à construção do pré-protótipo.

Construção

Graças à disposição de material e equipamentos da empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda não houve dificuldades quanto ao material de construção nem à forma de construção. A única dificuldade foi o “encaixe” do projeto nas atividades da empresa, principalmente em épocas de alta demanda.

Análise dos Ensaios

Talvez a maior dificuldade do grupo tenha sido a análise dos ensaios, mais precisamente os de carga. As grandes quedas de tensão não foram imediatamente e

trivialmente explicadas, principalmente na passagem do segundo para o terceiro protótipo, onde necessitou-se enxergar o que acontecia nas posições 0° e 90° .

5.2 Estudos Futuros

Ao fim desse projeto, os estudos que foram observados como possíveis para futuras otimizações encontram-se todos no rotor: há a possibilidade da construção do tal com estampas rebitadas (obviamente com rebites de material não magnético isolado eletricamente), logo depois de parafusado no eixo, sendo o parafuso também de material não magnético e isolado eletricamente. Dessa forma acredita-se que o desempenho em carga melhore, pois ainda há com certeza passagem de fluxo pelo centro do “rotor”. Com a alternativa apresentada o rotor se comportaria da forma já citada, ou seja, um “entreferro móvel”.

5.3 Conclusões

Obviamente o 3º protótipo não atingiu um desempenho digno de um regulador economicamente viável, restando muito ainda a ser melhorado.

Quanto aos requisitos esperados para o regulador em questão citados no item 1.2 (baixo custo tanto de fabricação como de manutenção, mecanismo simples de variação, larga faixa de variação da tensão de saída, versatilidade quanto à faixa de potência aplicável e variação contínua da tensão), podem ser citados aqueles considerados alcançados pelo projeto:

- *Baixo custo;*
- *Mecanismo simples de variação;*
- *Variação contínua da tensão de saída.*

E quanto aos outros:

Larga faixa de variação da tensão de saída: ficou comprometida pela alta regulação, mesmo no último protótipo, por conta da alta queda de tensão na impedância série. A máxima faixa de variação da tensão de saída em carga foi por volta de $\pm 0,441 \text{ pu}$, um valor baixo relativamente aos reguladores que se caracterizam pela larga faixa de variação, os quais apresentam faixas por volta de $\pm 1 \text{ pu}$.

Faixa de potência aplicável: na verdade nem se pôde estimar a potência de aplicação do protótipo, pelo fato da potência de saída máxima alcançada ter sido aproximadamente 700 W , valor muito baixo para as dimensões da máquina construída.

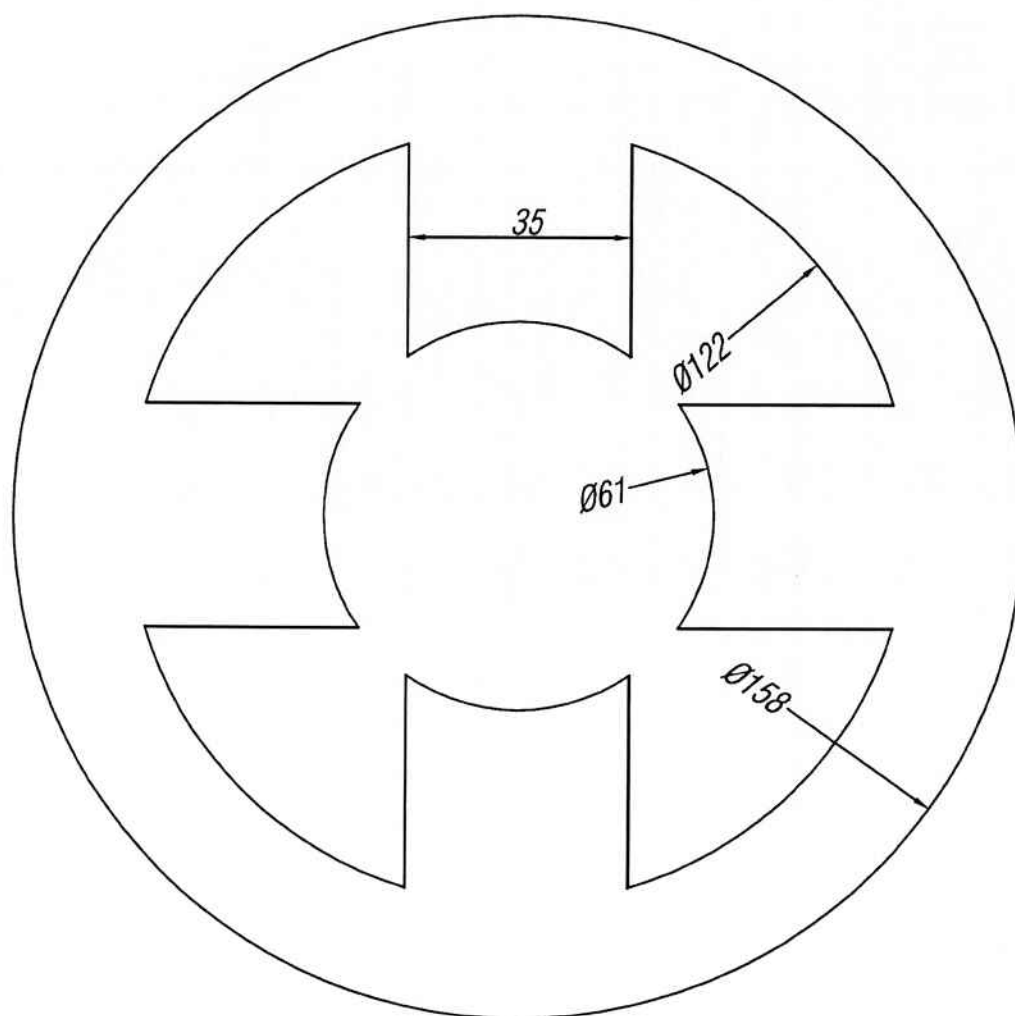
Porém apesar dos percalços e de não atingir as características acima citadas, pode-se afirmar com certeza que o trabalho realizado em todo o seu âmbito contribuiu em muito para a formação dos integrantes, não só na área de Eletromagnetismo Aplicado e Teoria de Máquinas Elétricas, mas também em conceitos básicos de projeto e construção das mesmas, complementando o trabalho de forma extracurricular.

6 Referências Bibliográficas

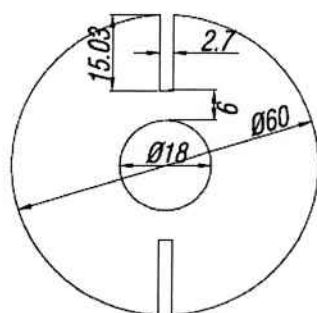
- [1] M. G. Say, *Alternating Current Machines*. Pitman, London, 1976.
- [2] AE Clayton, *Direct Current Machines*. Pitman, London, 1956.
- [3] M.I.T. EE Staff, *Magnetic Circuits and Transformers*. John Wiley & Sons, 1955.
- [4] www.bernardbonnefond.com (Products – Varivolt – Principle and Description). Data do acesso: 26/11/2006

7 Anexos

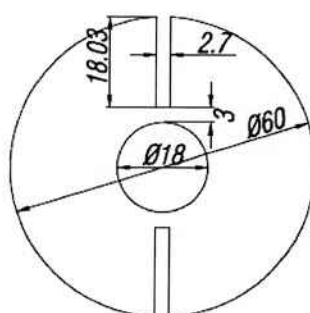
ANEXO 1 – Estampas “estatórica” e “rotóricas”



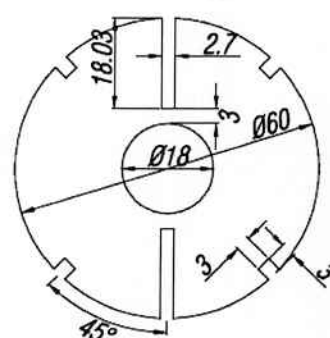
1° Protótipo



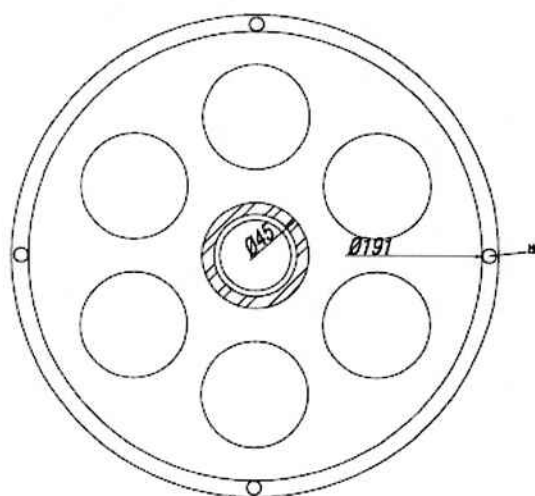
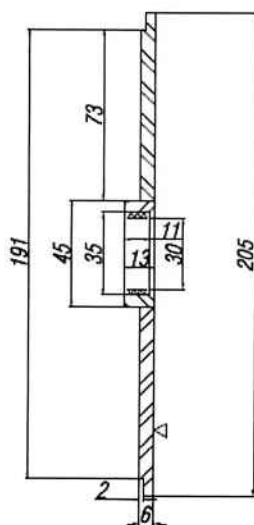
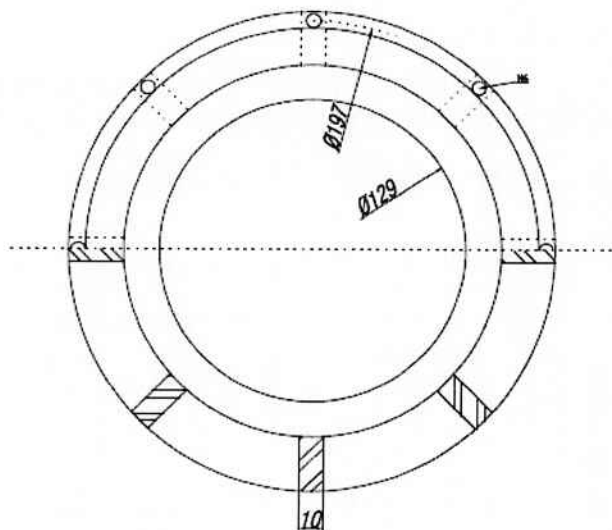
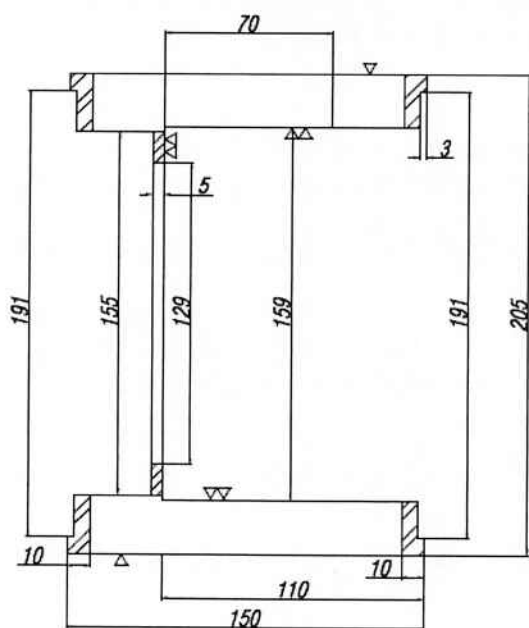
2° Protótipo



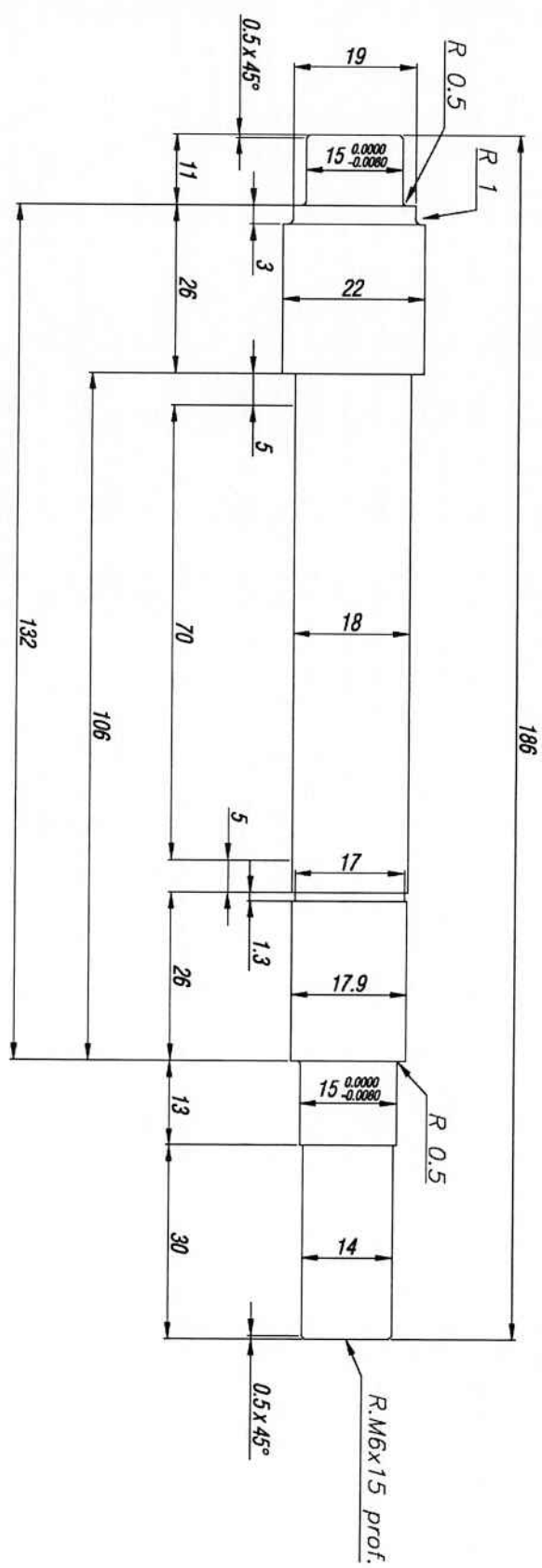
3° Protótipo



ANEXO 2 – Carcaça e Tampas



ANEXO 3 - Eixo



ANEXO 4 – Fotos de Ensaios (2º e 3º Protótipos)



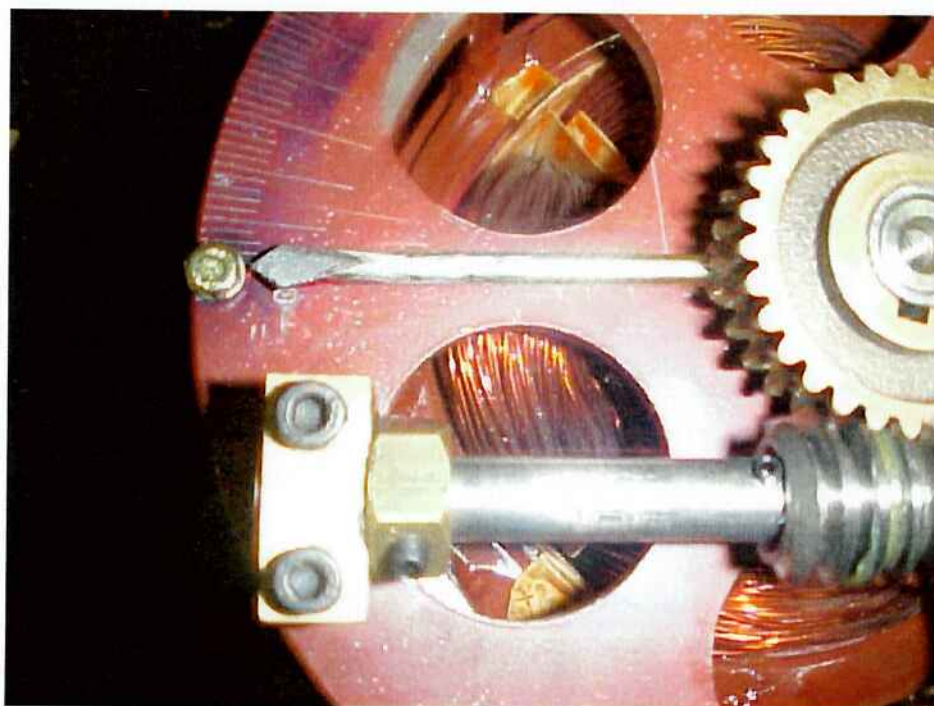
2º Protótipo com Transferidor



Bancada de Testes do 1º Protótipo



3º Protótipo com Rosca Sem Fim



Detalhe do Ponteiro