



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



**RODOLFO GERALDO ANUNCIÇÃO**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM GERADOR CC AUTO-  
EXCITADO *SHUNT***

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2019**

RODOLFO GERALDO ANUNCIÇÃO

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM GERADOR CC AUTO-  
EXCITADO *SHUNT***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. M. Sc. Fábio Alexandre Martins Monteiro.

Co-orientador: Professor Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Ouro Preto  
Escola de Minas – UFOP  
Janeiro / 2019

A636e Anunciação, Rodolfo Geraldo.  
Estudo das características de um gerador CC auto-excitado shunt  
[manuscrito] / Rodolfo Geraldo Anunciação. - 2019.

45f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Fábio Alexandre Martins Monteiro.  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas  
Fundamentais.

1. Corrente contínua. 2. Gerador. 3. Shunt. 4. Curva. I. Monteiro, Fábio  
Alexandre Martins. II. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. III. Universidade  
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

Monografia defendida e aprovada, em 23 de janeiro de 2019, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



---

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Co-Orientador



---

Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Professor Convidado



---

Eduardo Andrews Duarte Silva – Eng. Convidado

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Geraldo e Adélcia, pelo incentivo e apoio incondicional e às minhas irmãs, Monique e Pamella, pelos conselhos e apoios.

Aos amigos de Ouro Preto e aos amigos da Automação, pelo companheirismo e conhecimentos compartilhados.

A todos os professores que fizeram parte da minha graduação, por me proporcionarem conhecimento e aprendizado. Principalmente ao Paulo e ao Fábio, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os seus funcionários, pela oportunidade de fazer esse curso.

## RESUMO

As máquinas de corrente contínua podem funcionar como motores, convertendo energia elétrica em energia mecânica, ou como geradores, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Os geradores de corrente contínua são classificados quanto à sua excitação, por exemplo, o auto-excitado *Shunt*. Além disso, apresentam diversas características e curvas teóricas tanto sem alimentar uma carga quanto alimentando uma. Neste trabalho, foi feito um estudo sobre o funcionamento, construção e características de uma máquina de corrente contínua funcionando como gerador sendo excitado independentemente e auto-excitado *Shunt*. Através dos experimentos realizados em uma máquina do Laboratório de Eletrotécnica da Escola de Minas, durante um estágio realizado no Laboratório sob orientação do professor Fábio Monteiro, foi feita uma análise das curvas características do gerador sem alimentar uma carga (Curvas de Saturação e de Auto-excitação) e alimentando um conjunto de lâmpadas (Curva da Auto-excitação *Shunt* e Curva da excitação independente). Após a realização de todos os experimentos e através dos resultados obtidos comparando-os com os objetivos teóricos desejados, observou-se que todas as curvas apresentaram o desempenho esperado e a máquina também se comportou como esperado.

**Palavras-chave:** Corrente contínua. Gerador. *Shunt*. Curva.

## ABSTRACT

The direct current machines can operate as a motor, converting electrical energy into mechanical energy, or as a generator, converting mechanical energy into electrical energy. The direct current generators are classified by excitation, for example, the self-excited shunt wound. Also, they present diverse characteristics e theoretical curves either not supplying an electrical charge or supplying one. In this work, a study was carried out about the functioning, construction and characteristics of a direct current machine operating as a separately excited and self-excited shunt wound generator. Through the experiments accomplished in a machine from the School of Mines Electrotechnical Laboratory, during an internship performed at the laboratory under the professor Fábio Monteiro's orientation, was done an analysis about the generator's characteristic curves not supplying an electrical charge (Saturation and Self-Excitation Curves) and supplying a set of lamps (self-excited shunt and Separately Excitation Curves). After the realization of all experiments and by the obtained results comparing them with the intended theoretical objectives, it was observed that all curves presented the expected performance and the machine also behaved as expected.

**Keywords:** Direct current. Generator. Shunt. Curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina de corrente contínua <i>Bromberg &amp; Cia.</i> ....	14
Figura 2 – Modelo simples de um gerador elétrico .....	14
Figura 3 – Regra da mão direita .....	15
Figura 4 – Fluxo magnético e f.e.m. gerada nos condutores .....	15
Figura 5 – Escovas ligadas a um circuito externo .....	16
Figura 6 – Condutores representados por fontes de tensão .....	17
Figura 7 – Esquema generalizado das fontes de tensão .....	17
Figura 8 – Escovas posicionadas sobre contatos de atrito .....	18
Figura 9 – Gerador tetrapolar e sua representação esquemática .....	18
Figura 10 – Induzidos em Anel de <i>Gramme</i> , em Tambor e em Série .....	19
Figura 11 – Núcleo maciço de induzido e correntes parasitas .....	20
Figura 12 – Núcleo com chapas de aço laminado .....	20
Figura 13 – Inversão da corrente na bobina .....	20
Figura 14 – Esquema com a adição do interpolo .....	21
Figura 15 – Efeito magnético transversal .....	21
Figura 16 – Efeito desmagnetizante .....	22
Figura 17 – Ligação de um gerador com Excitação Independente .....	23
Figura 18 – Ligação de um gerador Auto-excitado Série .....	23
Figura 19 – Ligação de um gerador Auto-excitado <i>Shunt</i> .....	24
Figura 20 – Ligação de um gerador Auto-excitado <i>Compound</i> .....	24
Figura 21 – Curva de Saturação de um gerador <i>shunt</i> .....	25
Figura 22 – Ciclo de Histerese .....	25
Figura 23 – Curva de Auto-excitação .....	26
Figura 24 – Curva de Auto-excitação para combinações de velocidade e resistência .....	26
Figura 25 – Curva característica de um gerador sendo excitado independentemente .....	27
Figura 26 – Ligação do circuito sendo excitado independentemente .....	27
Figura 27 – Curva característica de um gerador com auto-excitação <i>shunt</i> .....	28
Figura 28 – Ligação do circuito para a auto-excitação <i>shunt</i> .....	29
Figura 29 – Esquema do circuito sem carga .....	30
Figura 30 – Gráfico 1: Curva de Saturação, aumentando $I_f$ em ambas as medições .....	33
Figura 31 – Gráfico 2: Curva de Saturação da Medição 1 .....	33
Figura 32 – Gráfico 3: Curva de Saturação da Medição 2 .....	34

Figura 33 – Gráfico 4: Curva de Auto-excitação da Medição 1 .....	35
Figura 34 – Gráfico 5: Curva de Auto-excitação da Medição 2 .....	36
Figura 35 – Terminais da bobina de campo e enrolamento do induzido .....	37
Figura 36 – Ligação correta entre terminais da bobina e enrolamento do induzido .....	37
Figura 37 – Esquema da auto-excitação <i>shunt</i> alimentando o conjunto de lâmpadas .....	37
Figura 38 – Gráfico 6: Curva de Auto-excitação <i>Shunt</i> da Medição 1 .....	39
Figura 39 – Conexão dos terminais e sentido de rotação invertido .....	39
Figura 40 – Gráfico 7: Curva de Auto-excitação <i>Shunt</i> da Medição 2 .....	40
Figura 41 – Esquema excitação independente alimentando o conjunto de lâmpadas .....	41
Figura 42 – Gráfico 8: Curva do gerador sendo excitado independentemente .....	42
Figura 43 – Gráfico 9: Comparação entre as excitações para a Medição 1 .....	43
Figura 44 – Gráfico 10: Comparação entre as excitações para a Medição 2 .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medição 1 para Curva de Saturação .....	31
Tabela 2 – Medição 2 para Curva de Saturação .....	32
Tabela 3 – Valores de $R_f.I_f$ para a Medição 1 .....	35
Tabela 4 – Valores de $R_f.I_f$ para a Medição 2 .....	36
Tabela 5 – Medição 1 para Auto-excitação Shunt .....	38
Tabela 6 – Medição 2 para Auto-excitação Shunt .....	40
Tabela 7 – Medições para gerador sendo excitado independentemente .....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivo .....	12
1.2	Justificativa .....	12
1.3	Estrutura do trabalho .....	13
<b>2</b>	<b>MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA .....</b>	<b>14</b>
2.1	Princípios de funcionamento .....	14
2.2	Construção de um gerador CC .....	15
2.2.1	Tipos de induzido .....	18
2.2.2	Equação da f.e.m. ....	19
2.2.3	Laminação do núcleo do induzido .....	20
2.2.4	Teoria da Comutação .....	20
2.2.5	Reação do induzido .....	21
2.3	Classificação dos geradores quanto à excitação .....	22
2.3.1	Excitação Independente .....	23
2.3.2	Auto-excitação Série .....	23
2.3.3	Auto-excitação <i>Shunt</i> .....	23
2.3.4	Auto-excitação Composta .....	24
2.4	Curvas Características Teóricas .....	24
2.4.1	Curva de Saturação .....	24
2.4.2	Curva de Auto-excitação .....	25
2.4.3	Curva da Excitação Independente .....	27
2.4.4	Curva da Auto-excitação <i>Shunt</i> .....	28
<b>3</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
3.1	Curva de Saturação .....	30
3.2	Curva de Auto-excitação .....	34
3.3	Curva da Auto-excitação <i>Shunt</i> .....	36
3.4	Curva da Excitação Independente .....	40
3.5	Curva Auto-excitação <i>Shunt</i> e Excitação Independente .....	42
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

Durante muito tempo, as máquinas de corrente contínua (CC) foram a solução mais natural para problemas em que a variação da velocidade era fundamental variar a velocidade durante o funcionamento.

As máquinas de corrente contínua têm como características a versatilidade e a facilidade de serem controladas. Através de diversas variações dos enrolamentos de campo, podem demonstrar várias características que relacionam tensão e corrente, por meio de suas excitações (FITZGERALD; KINGSLEY JR; UMANS, 2006).

Hoje em dia, o uso de inversores de frequência e transformadores tornou fácil a manipulação da corrente alternada (CA). Os geradores CA exigem menor manutenção e são mais baratos que os geradores CC, isso tem feito com que eles sejam mais usados atualmente.

Os geradores CC apresentam diversas características durante o seu funcionamento e curvas teóricas que podem ser comprovadas na prática. Este trabalho tem como base as atividades implementadas em uma máquina de corrente contínua, durante um estágio realizado no Laboratório de Eletrotécnica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, sob orientação do professor Me. Fábio Alexandre Martins Monteiro.

## **1.1 Objetivo**

Realizar um estudo sobre o funcionamento, aspectos construtivos e características de uma máquina de corrente contínua operando como um gerador com auto-excitação shunt. Encontrar empiricamente e analisar as características do gerador, comparando suas curvas teóricas com as obtidas experimentalmente.

## **1.2 Justificativa**

Embora as máquinas de corrente contínua não sejam tão utilizadas atualmente, os estudos sobre elas ainda são muito importantes. Uma abordagem experimental mais detalhada sobre seu funcionamento e suas características permite uma compreensão melhor dos conceitos estudados.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Neste primeiro capítulo, é feita uma breve introdução sobre máquinas de corrente contínua, além de mostrar o objetivo e a justificativa deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta as características de uma máquina de Corrente Contínua (CC), como seus princípios de funcionamento e os aspectos para a construção de uma máquina. Além disso, apresenta as classificações de um gerador quanto à sua excitação e as suas curvas características teóricas.

Em seguida, o capítulo 3 detalha as montagens práticas realizadas e mostra os resultados obtidos das curvas características.

O capítulo 4 é composto pela Conclusão, onde discute-se os resultados encontrados, comparando-os com as curvas teóricas.

Por fim, as referências bibliográficas estão presentes no capítulo 5.

## 2 MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

A máquina de corrente contínua utilizada neste trabalho é uma máquina da empresa *Bromberg & Cia.* presente no Laboratório de Eletrotécnica. A Figura 1 mostra esta máquina.

Figura 1. Máquina de corrente contínua *Bromberg & Cia.*



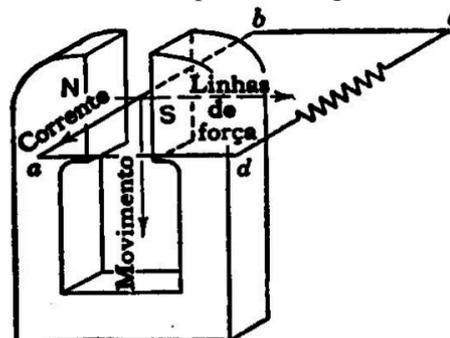
Fonte: AUTOR (2018).

### 2.1 Princípios de funcionamento

Segundo Kosow (1982), as máquinas de corrente contínua podem funcionar tanto como motores quanto como geradores. A diferença está na energia que é absorvida pela máquina, isto é, quando a máquina está sendo usada como motor é convertida energia elétrica em energia mecânica, já funcionando como gerador, é convertida energia mecânica em energia elétrica. (GRAY; WALLACE, 1982). Neste trabalho, utilizou-se a máquina funcionando apenas como gerador.

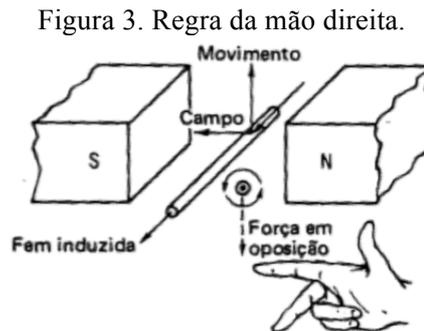
A Figura 2 mostra um modelo simples de um gerador elétrico, composto de um ímã permanente em ferradura e um condutor, ab.

Figura 2. Modelo simples de um gerador elétrico.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

O condutor ab se move e está imerso a um campo magnético, cortando as linhas de força que passam de Norte (N) a Sul (S), e é induzida uma f.e.m. (força eletromotriz) no condutor, que gera uma corrente no circuito fechado abcd (GRAY; WALLACE, 1982). O sentido desta f.e.m. pode ser determinado pela Regra da mão direita, mostrada na Figura 3, onde o polegar indica o sentido do movimento do condutor, o dedo indicador indica o sentido do campo (do N para o S) e o dedo médio indica o sentido da f.e.m. gerada (KOSOW, 1982).



Fonte: KOSOW (1982).

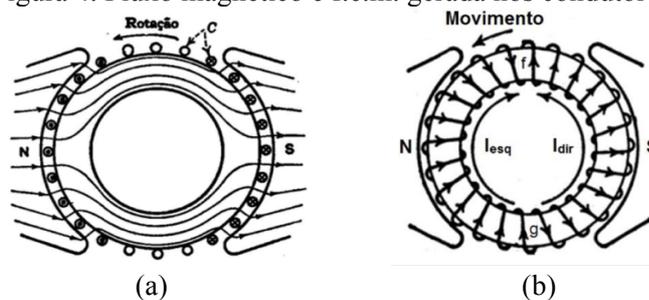
Ao se inverter o sentido do movimento do condutor, o sentido da f.e.m. também se inverte. Assim, a corrente que estava circulando em um sentido, passa a circular em outro, logo, se tem uma corrente alternada (GRAY; WALLACE, 1982).

Portanto, desejou-se construir um gerador que fornecesse corrente contínua, ou seja, que circulasse sempre em um mesmo sentido.

## 2.2 Construção de um gerador CC

Para a construção do gerador CC, coloca-se um núcleo de ferro em forma de anel entre os polos, com o mesmo centro de uma cavidade apresentada pelos polos, para diminuir a relutância do circuito magnético, como mostra a Figura 4 (a).

Figura 4. Fluxo magnético e f.e.m. gerada nos condutores.



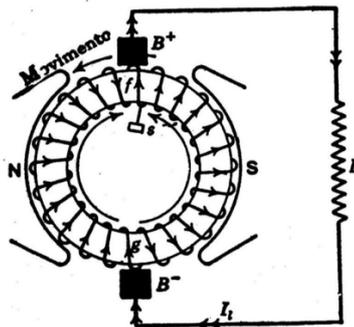
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Diversos condutores são sobrepostos ao núcleo de modo que ao girarem com velocidade constante, cortam as linhas de campo. Assim, é gerada f.e.m. nos condutores, cujo sentido é determinado pela regra da mão direita.

Os condutores internos não cortam nenhuma linha de campo, já que elas passam através do núcleo de ferro e não pelo espaço central de ar que fica dentro do núcleo. Daí somente nos condutores que estão a frente dos polos magnéticos é gerada f.e.m., que tende a enviar corrente do ponto g ao ponto f pelos dois lados, sendo que essas correntes serão iguais e opostas, como mostra a Figura 4 (b). Logo, não circulará corrente (GRAY; WALLACE, 1982).

Mas, há uma diferença de potencial entre f e g. Daí, entre os dois pontos, colocam-se contatos fixos B+ e B-, chamados de escovas, para se ligar a um circuito externo, como mostra a Figura 5.

Figura 5. Escovas ligadas a um circuito externo.

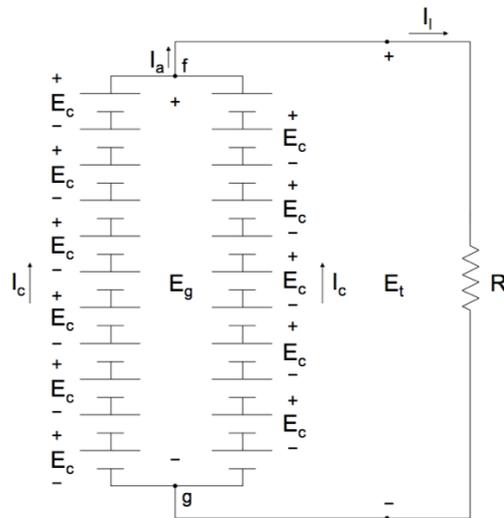


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Pode-se analisar o gerador de modo que cada condutor seja representado por uma fonte de tensão. A figura 6 mostra essa análise, onde:

- $E_c$ : Tensão gerada em cada condutor;
- $E_g$ : Tensão gerada pelo gerador;
- $E_t$ : Tensão entre os terminais do gerador;
- $Z$ : Número de condutores ativos;
- $I_c$ : Corrente em cada condutor;
- $I_a$ : Corrente no induzido;
- $I_L$ : Corrente fornecida pelo gerador;
- $p$ : Número de percursos em paralelo;
- $R$ : Carga alimentada pelo gerador.

Figura 6. Condutores representados por fontes de tensão.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

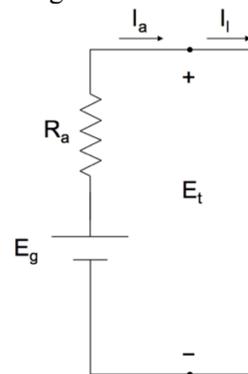
Pode-se obter as seguintes relações de tensão e corrente:

$$E_g = \frac{Z}{p} E_c \quad (1)$$

$$I_a = p \cdot I_c \quad (2)$$

Através da Equação (1), pode-se generalizar o esquema anterior, como mostra a Figura 7.

Figura 7. Esquema generalizado das fontes de tensão.



Fonte: AUTOR (2018).

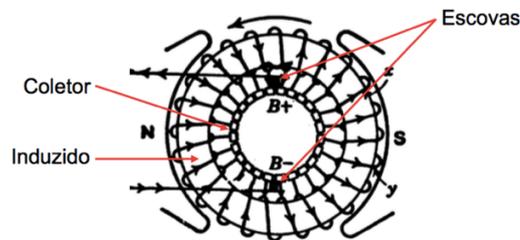
Assim, obtém-se que:

$$E_g = R_a \cdot I_a + E_t \quad (3)$$

As escovas posicionadas como mostrado na Figura 5, destruíam o enrolamento devido ao atrito. Passou-se então a posicionar as escovas sobre um conjunto de contatos especiais de atrito. A Figura 8 mostra essas conexões, onde o núcleo e o enrolamento juntos formam o induzido ou

rotor da máquina; se denomina coletor ou anel comutador os contatos de atrito; e os ímãs fazem parte do estator.

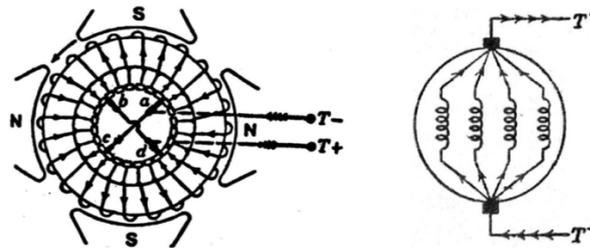
Figura 8. Escovas posicionadas sobre contatos de atrito.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Na prática, verificou-se que é mais econômico construir máquinas com mais de dois polos, em pares N e S. A Figura 9 mostra o induzido de uma máquina tetrapolar, onde a diferença de potencial entre os pontos a, b, c e d é a mesma.

Figura 9. Gerador tetrapolar e sua representação esquemática.



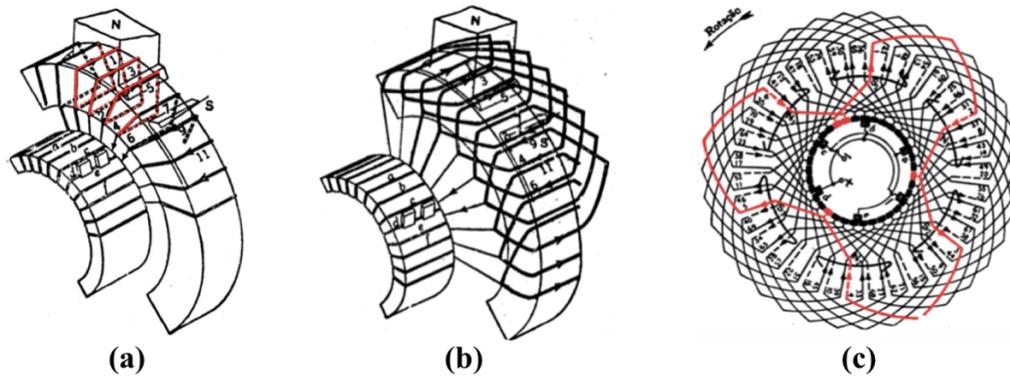
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

O circuito externo, a receber corrente fornecida pelo gerador, deve ser ligado entre os terminais T- e T+. Ao entrar na máquina, a corrente passa pelos quatro percursos do induzido, como mostra a Figura 9 (GRAY; WALLACE, 1982).

### 2.2.1 Tipos de induzido

Inicialmente, os geradores eram compostos de induzidos em Anel de *Gramme*, mostrado na Figura 10(a). Porém, esse tipo de induzido possuía grandes desvantagens como somente os condutores externos cortavam as linhas de campo, possuía apenas um condutor ativo por espira e gastava-se com material não utilizado na sua construção.

Figura 10. Induzidos em Anel de *Gramme*, Tambor e em Série.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Passou-se então a utilizar o induzido em Tambor (ou Imbricado) ou o induzido em Série (ou Ondulado), mostrados na Figura 10 (b) e (c), respectivamente. No induzido em Tambor, há dois condutores ativos por espira, o fio de cobre ficou pouco maior e os condutores são alojados em ranhuras. No induzido em Série, só há dois percursos através dele, não importando o número de polos e possui condutor muito fino (GRAY; WALLACE, 1982).

### 2.2.2 Equação da f.e.m.

Dados (GRAY; WALLACE, 1982):

- $\Phi$ : Número total de linhas de fluxo magnético por polo;
- $Z$ : Número total de condutores ativos;
- $n$ : Número de polos;
- $p$ : Número de percursos em paralelo.

Tem-se que o fluxo cortado por um condutor em uma rotação é igual a:

$$\Phi \cdot n \quad (4)$$

Daí o fluxo cortado por segundo por um condutor é:

$$\Phi \cdot n \cdot \frac{rpm}{60} \quad (5)$$

Mas o número de condutores entre uma escova positiva e outra negativa, que influenciam a d.d.p., é:

$$\frac{Z}{p} \quad (6)$$

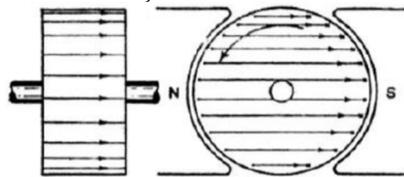
Assim, a tensão gerada ( $E_g$ ) é dada por:

$$E_g = \Phi \cdot \frac{Z}{p} \cdot n \cdot \frac{rpm}{60} = \Phi \cdot k_E \cdot rpm \quad (7)$$

### 2.2.3 Laminação do núcleo do induzido

O núcleo de ferro do induzido também corta o fluxo magnético, induzindo-se f.e.m. nele, que é igual à f.e.m. gerada nos condutores. Com isso, geram-se correntes parasitas que causam uma grande perda de energia, dissipada na forma de calor. A Figura 11 mostra um núcleo maciço de induzido com as correntes parasitas.

Figura 11. Núcleo maciço de induzido e correntes parasitas.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Para eliminar essas correntes parasitas deve-se fazer com que o núcleo de ferro não conduza corrente, construindo-o de chapas finas de aço laminado isoladas entre si, como mostra a Figura 12 (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 12. Núcleo com chapas de aço laminado.

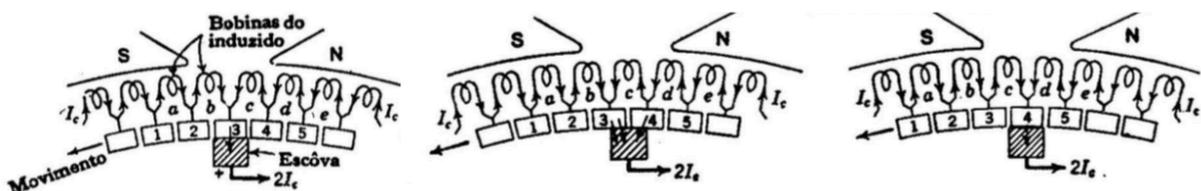


Fonte: GRAY; WALLACE (1982) e LOUREIRO.

### 2.2.4 Teoria da Comutação

Quando cada bobina do gerador passa por uma escova, a corrente nessa escova inverte de sentido de repente, como mostra a Figura 13.

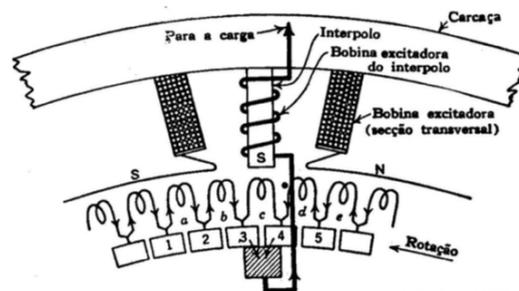
Figura 13. Inversão da corrente na bobina.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Essa inversão da corrente em uma bobina do induzido, através da escova e dos segmentos do coletor, se chama comutação. Devido à essa inversão e à autoindução, é gerada uma f.e.m. inversamente proporcional ao tempo em que ocorre a inversão, o que produz arcos elétricos, podendo queimar o coletor. O tempo disponível para se inverter a corrente é quando a bobina é curto-circuitada pela escova, necessitando-se produzir uma f.e.m. suficiente para ocasionar a inversão completa da corrente. Se consegue isto, colocando um pequeno polo, chamado de interpolo ou polo de comutação, sobre a bobina curto-circuitada, com polaridade oposta à do polo que o antecede, como mostra a Figura 14. A intensidade do interpolo deve ser diretamente proporcional à corrente gerada pelo gerador (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 14. Esquema com a adição do interpolo.

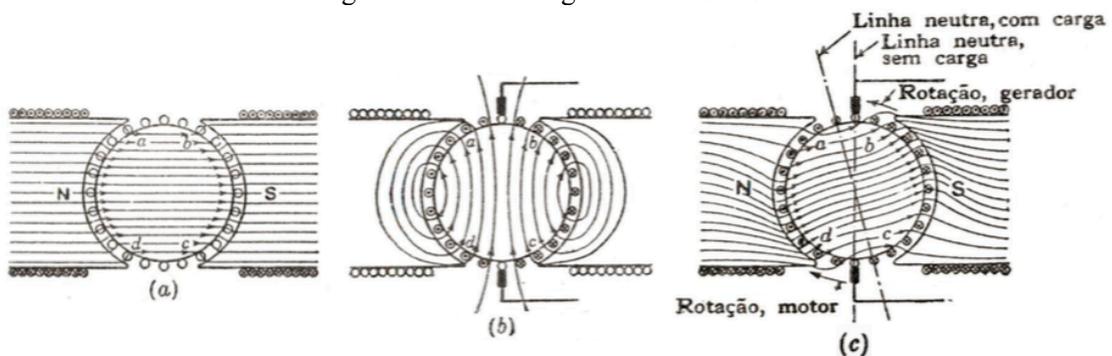


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

### 2.2.5 Reação do induzido

Quando nenhuma corrente circula pelo induzido, a densidade do fluxo magnético produzido pela corrente excitadora é praticamente uniforme sobre os polos, como mostra a Figura 15 (a).

Figura 15. Efeito magnético transversal.



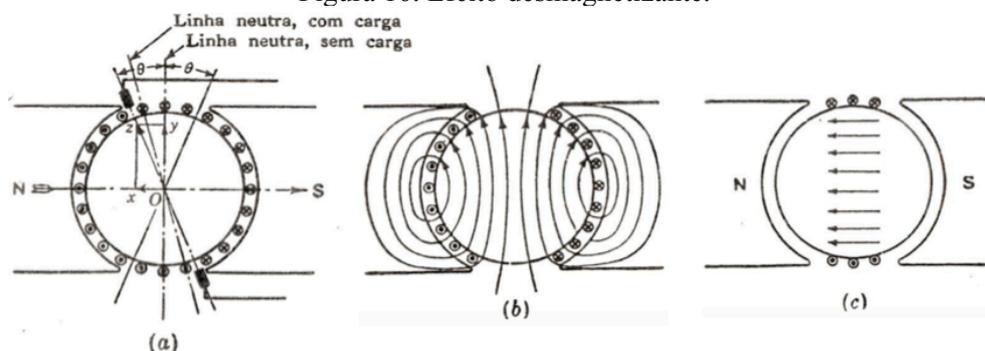
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

A Figura 15 (b) mostra o fluxo quando se faz circular corrente no induzido através de uma fonte externa, assim não há corrente nas bobinas excitadoras. A Figura 15 (c) demonstra o fluxo magnético resultante, ao se compor os campos de (a) e (b), quando se tem uma carga ligada, o

induzido faz circular corrente e as bobinas estão excitadas. Nos pontos a e c, o campo magnético devido à corrente no induzido tem sentido oposto ao produzido pela corrente nas bobinas, já nos pontos b e d, eles têm o mesmo sentido. Com isso, o fluxo diminui em a e c, e fica comprimido em b e d. Assim, devido à saturação, o fluxo total se reduz. Como o eixo magnético do induzido é perpendicular ao das bobinas, o efeito magnético produzido pela corrente do induzido é denominado efeito magnético transversal da reação do induzido.

Nos geradores que possuem polos de comutação, as escovas se situam sobre a linha neutra, sem carga. Se o gerador não possui os polos de comutação, as escovas devem ficar deslocadas para além da linha neutra, com carga, como mostra a Figura 16 (a).

Figura 16. Efeito desmagnetizante.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Na Figura 16 (b), os condutores produzem um efeito magnetizante transversal quando transportam corrente e na Figura 16 (c), os condutores produzem um efeito desmagnetizante. Com isso, as escovas ficam avançadas e o fluxo se reduz, diminuindo a tensão nos terminais. Essa é uma razão para se usar polos de comutação (GRAY; WALLACE, 1982).

### 2.3 Classificação dos Geradores quanto à excitação

Nos geradores CC, se utiliza eletroímãs como polos de excitação, cuja intensidade é regulada variando a corrente que circula nas bobinas de excitação. O gerador é excitado independentemente quando a corrente de excitação, necessária para a criação do campo magnético, é fornecida por uma fonte externa. Já quando o próprio gerador fornece essa corrente, ele é dito Auto-excitado, e pode ser excitado com três conexões:

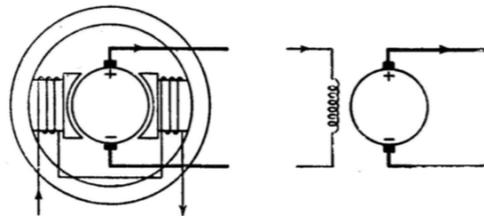
- Série;
- *Shunt* ou Paralela;
- *Compound* ou Composta (GRAY; WALLACE, 1982).

O gerador utilizado neste trabalho é um Auto-excitado *Shunt*, que também foi excitado independentemente.

### 2.3.1 Excitação Independente

A Figura 17 exemplifica um gerador sendo excitado independentemente, o que proporciona uma vantagem de se ter melhor controle do campo e conseqüentemente da tensão gerada, porém como desvantagem, necessita de uma fonte externa para alimentar as bobinas (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 17. Ligação de um gerador com Excitação Independente.

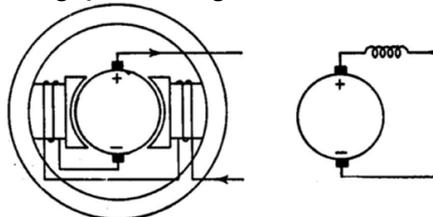


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

### 2.3.2 Auto-excitação Série

Um gerador Auto-excitado Série, no qual as bobinas de campo estão em série com o induzido e transportam a corrente total do gerador. Por isso, as bobinas são formadas por condutores de seção grande e poucas espiras (GRAY; WALLACE, 1982). A Figura 18 exemplifica tal gerador.

Figura 18. Ligação de um gerador Auto-excitado Série.



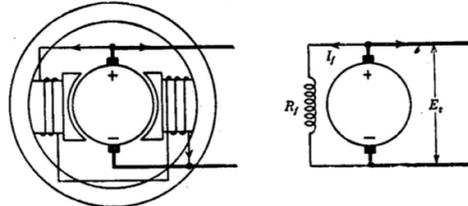
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

### 2.3.3 Auto-excitação *Shunt*

A Figura 19 mostra um gerador Auto-excitado *Shunt*, onde as bobinas de campo são ligadas em paralelo com o enrolamento do induzido. As bobinas de campo possuem resistência alta, portanto transportam uma corrente baixa, possuindo condutores finos com muitas voltas. Já a

bobina do induzido, tem uma resistência baixa, portanto transporta uma corrente maior, sendo necessário possuir condutores grossos e com poucas voltas (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 19. Ligação de um gerador Auto-excitado *Shunt*.

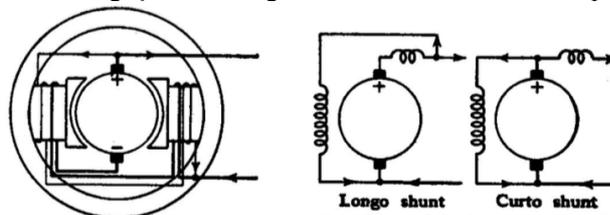


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

### 2.3.4 Auto-excitação Composta

Os geradores com auto-excitação Composta possuem tanto as bobinas *shunt*, conectadas em paralelo, quanto as bobinas série, conectadas em série. Quando as bobinas *shunt* são ligadas por fora das bobinas série, o gerador é dito de longo *shunt* e quando a ligação fica dentro das bobinas série, ele é dito de curto *shunt*, como mostra a Figura 20 (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 20. Ligação de um gerador Auto-excitado *Compound*.



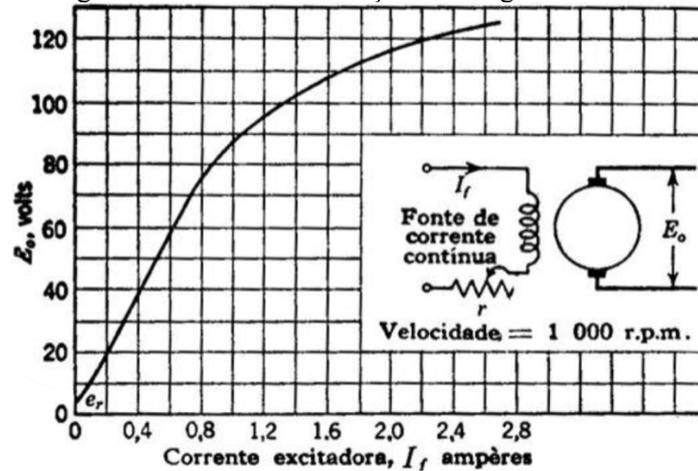
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

## 2.4 Curvas Características Teóricas

A seguir serão apresentadas as curvas características de tensão de um gerador Auto-excitado *Shunt* sem e ao alimentar uma carga.

### 2.4.1 Curva de Saturação

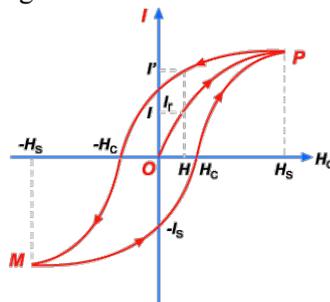
A Curva de Saturação mostra a variação da tensão gerada ( $E_0$ ), sem alimentar uma carga, com a corrente excitadora nas bobinas de campo ( $I_f$ ), considerando que a velocidade de rotação seja constante. Para se obter essa curva, deve-se excitar o gerador independentemente, conectando-o à uma fonte externa, e variar a corrente excitadora através de resistências conectadas em série com a resistência da bobina de campo ( $R_f$ ), medindo-se  $I_f$  e  $E_0$ .

Figura 21. Curva de Saturação de um gerador *shunt*.

Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

A Figura 21 mostra essa curva, onde  $e_r$  é uma tensão gerada quando ainda não há a corrente excitadora nas bobinas de campo ( $I_f$ ), devido ao magnetismo residual. Este efeito ocorre devido ao ciclo de histerese de um material ferro magnético, onde há uma densidade de fluxo remanescente. Como a tensão é diretamente proporcional ao fluxo ([pela Equação 7](#)), se há um pequeno fluxo, então há uma pequena tensão. Essa curva se comporta semelhantemente ao ciclo de histerese, mostrado na Figura 22, a tensão gerada ( $E_0$ ) é maior quando se reduz  $I_f$  do que quando se aumenta (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 22. Ciclo de Histerese.

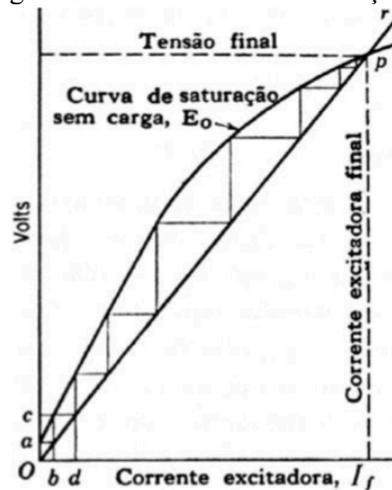


Fonte: SALMERON (2007).

## 2.4.2 Curva de Auto-Excitação

A Figura 23 mostra a Curva de Auto-excitação de um gerador CC *shunt*, onde a reta Or representa a tensão necessária para que  $I_f$  circule pela resistência da bobina de campo ( $R_f$ ), quando se conecta os enrolamentos do induzido com as bobinas de campo em paralelo, com uma velocidade de rotação constante. Assim, essa tensão é  $E = R_f \cdot I_f$ .

Figura 23. Curva de Auto-excitação.

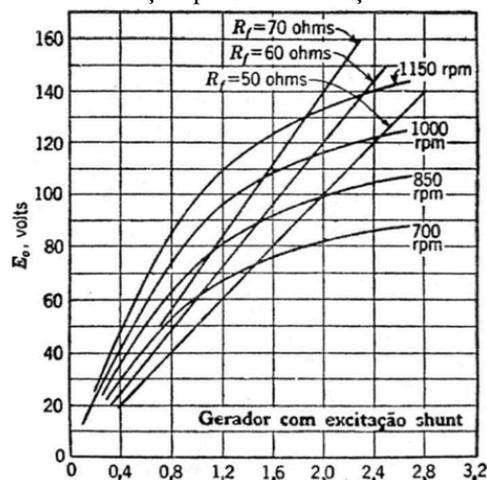


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

A tensão se eleva enquanto a tensão gerada  $E_0$  for maior do que a tensão  $R_f \cdot I_f$ . Isto ocorre até o ponto  $p$ , ponto de interseção da Curva de Saturação com a reta  $Or$ , pois após ele, a tensão gerada é menor do que a tensão necessária para que circule  $I_f$ . Neste ponto, a Tensão final e a Corrente excitadora final são os valores máximos da tensão nos terminais ( $E_t$ ) e de  $I_f$  que o gerador pode fornecer quando o gerador é auto-excitado (GRAY; WALLACE, 1982).

Pode-se obter  $E_t$  e  $I_f$  para diversos valores da velocidade de rotação e da resistência do circuito de excitação, se houver. Para diminuir a inclinação da reta  $Or$ , basta diminuir essa resistência, assim, a tensão do ponto de interseção será maior. Por outro lado, para aumentar a inclinação, basta aumentar a resistência do circuito de excitação, assim, a tensão do ponto de interseção será menor. Além disso, as Curvas de Saturação para quaisquer velocidades são sempre proporcionais. A Figura 24 mostra essas combinações (GRAY; WALLACE, 1982).

Figura 24. Curva de Auto-excitação para combinações de velocidade e resistência.

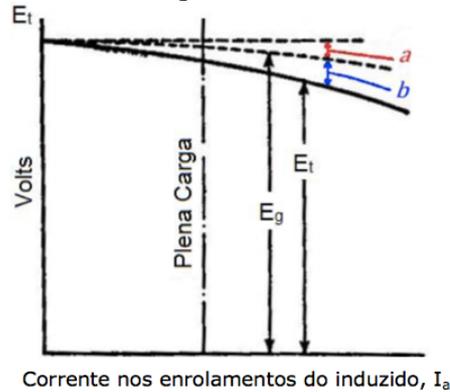


Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

### 2.4.3 Curva da Excitação Independente

A Curva da Excitação Independente mostra a variação da tensão nos terminais ( $E_t$ ) com a corrente nos enrolamentos do induzido ( $I_a$ ), com velocidade e  $I_f$  constantes.

Figura 25. Curva característica do gerador sendo excitado independentemente.



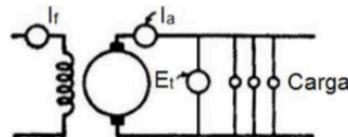
Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Como mostra a Figura 25, a tensão nos terminais ( $E_t$ ) diminui quando a corrente nos enrolamentos do induzido ( $I_a$ ) aumenta devido a dois fatores:

- a) Queda devido à reação do induzido. O fluxo por polo se reduz devido à reação do induzido, fazendo com que a tensão gerada pelo gerador ( $E_g$ ) quando o fluxo é cortado, também diminua;
- b) Queda de tensão  $R_a \cdot I_a$  devido à resistência do induzido ( $R_a$ ).

Para se obter essa curva experimentalmente, deve-se ligar as bobinas de campo a uma fonte externa que vai fornecer a corrente de excitação e conectar em paralelo aos terminais do gerador uma carga para ser regulada, como um conjunto de lâmpadas, como mostra a Figura 26.

Figura 26. Ligação do circuito sendo excitado independentemente.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

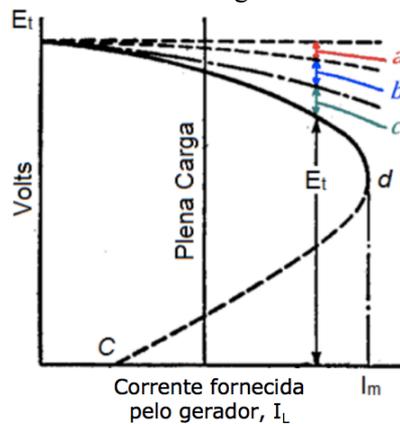
Deve-se manter a velocidade e a corrente excitadora nas bobinas de campo ( $I_f$ ) constantes, e aumentar a corrente nos enrolamentos do induzido ( $I_a$ ) acendendo as lâmpadas do conjunto conectado, isso proporciona mais caminhos para a corrente circular. Daí, basta tomar nota da

tensão nos terminais ( $E_t$ ) e da corrente nos enrolamentos do induzido ( $I_a$ ) simultaneamente (GRAY; WALLACE, 1982).

#### 2.4.4 Curva da Auto-excitação *Shunt*

A Curva característica de um gerador com auto-excitação *shunt* mostra a variação da tensão nos terminais ( $E_t$ ) com a corrente fornecida pelo gerador ( $I_L$ ). A Figura 27 mostra essa curva.

Figura 27. Curva característica de um gerador com auto-excitação *shunt*.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

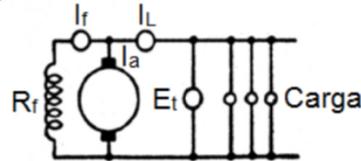
A tensão nos terminais ( $E_t$ ) se reduz devido a três fatores:

- a) Queda devido à reação do induzido. O fluxo por polo se reduz devido à reação do induzido, e como a tensão e o fluxo são diretamente proporcionais ( $E_g = k \cdot \text{rpm} \cdot \Phi$ ), se o fluxo reduz, conseqüentemente, a tensão gerada pelo gerador ( $E_g$ ) também reduz;
- b) Queda de tensão  $R_a \cdot I_a$  devido à resistência do induzido ( $R_a$ );
- c) Queda devido à diminuição da excitação. Como a tensão gerada pelo gerador ( $E_g$ ) diminui, a tensão nos terminais ( $E_t$ ) também diminui, fazendo com que a corrente excitadora nas bobinas de campo ( $I_f$ ) diminua. Isto faz com que a tensão caia ainda mais.

Devido ao fator c), em um gerador alimentando uma carga (como um conjunto de lâmpadas), a tensão nos terminais será menor na Auto-excitação *Shunt* do que na Excitação Independente (GRAY; WALLACE, 1982).

Para se obter essa curva experimentalmente, deve-se ligar as bobinas de campo em paralelo com os enrolamentos do induzido e conectar em paralelo ao circuito uma carga a ser alimentada, como um conjunto de lâmpadas, como mostra a Figura 28.

Figura 28. Ligação do circuito para a auto-excitação *shunt*.



Fonte: GRAY; WALLACE (1982).

Um motor deve fornecer energia mecânica para o gerador com velocidade e  $I_f$  constantes, assim, a tensão gerada irá alimentar a carga. Deve-se aumentar gradualmente a corrente fornecida pelo gerador ( $I_L$ ) acendendo as lâmpadas do conjunto conectado ao circuito e tomar nota de  $I_L$  e  $E_t$  simultaneamente.

Ao se acender um certo número de lâmpadas, a resistência do circuito externo diminui, aumentando  $I_L$  e diminuindo  $E_t$  até o ponto d. O acendimento de mais lâmpadas aumenta  $I_L$  por um certo momento, mas pela reação do induzido, isso gera uma queda de tensão e de corrente muito grandes. A tensão será nula ou quase nula, caso o gerador seja curto circuitado, ou seja, quando os terminais são ligados a um circuito com resistência desprezível, e assim não haverá campo de excitação. Com isso, a corrente produzida pela tensão devido ao magnetismo residual será a única a circular pelo curto-circuito. Este caso é representado pelo ponto C da Figura 30.

Dependendo de como for feita a ligação entre as bobinas de campo e os enrolamentos do induzido, quando o gerador é ligado pela primeira vez, a tensão gerada no induzido, devida ao magnetismo residual, envia uma corrente às bobinas de campo em sentido oposto ao do fluxo residual e a tensão reduz ao invés de aumentar. Para se corrigir esse problema, basta se inverter as conexões dos terminais, assim, a corrente que circula nas bobinas de campo terá sentido oposto. Outra solução seria inverter o sentido de rotação do gerador (GRAY; WALLACE, 1982).

### 3 RESULTADOS

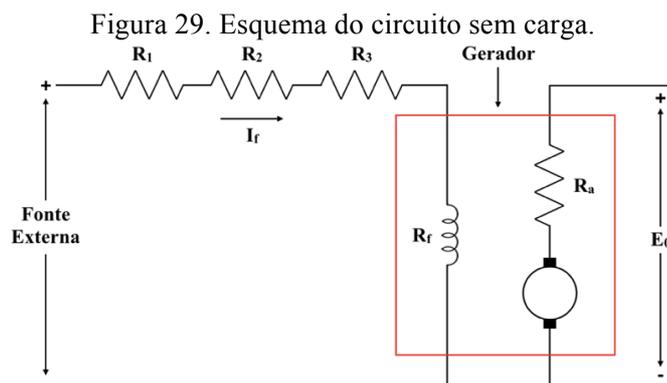
A seguir, será explicitada a metodologia usada na realização dos experimentos, detalhando as montagens e medições para a obtenção das Curvas de Saturação, Auto-Excitação, Excitação Independente e Auto-excitação *Shunt*. Utilizou-se os seguintes materiais, todos do Laboratório de Eletrotécnica:

- Motor de Indução Trifásico;
- Gerador de Corrente Contínua Auto-excitado *Shunt*;
- Fonte de Corrente Contínua;
- 2 Multímetros;
- 3 Resistências variáveis;
- 1 Conjunto de lâmpadas.

O Motor de Indução Trifásico foi utilizado para fornecer energia mecânica para o gerador, que a converte em energia elétrica. Inicialmente, mediu-se os valores da resistência da bobina de campo e da bobina do induzido, e encontrou-se  $R_f = 121,6\Omega$  e  $R_a = 7,0\Omega$ , respectivamente. Em seguida, mediu-se os valores das resistências variáveis disponíveis,  $R_1 = 152,7\Omega$ ,  $R_2 = 69,0\Omega$  e  $R_3 = 46,0\Omega$ , que tem sua impedância variada manualmente e que foram utilizadas para se variar a corrente nas bobinas de campo ( $I_f$ ).

#### 3.1 Curva de Saturação

Na montagem, conectou-se a fonte de corrente contínua (capaz de gerar aproximadamente 110V) e as resistências variáveis em série com a resistência das bobinas de campo ( $R_f$ ) e com um multímetro para se medir  $I_f$ , além de um multímetro para medir a tensão  $E_0$  sem carga. A Figura 29 mostra um esquema para o circuito dessa ligação.



Fonte: AUTOR (2018).

Feita a montagem, ligou-se o gerador e encontrou-se a tensão gerada pelo magnetismo residual  $E_0 = 3,4V$ , quando  $I_f = 0$ . Em seguida, ligou-se a fonte de corrente contínua. Como a fonte podia gerar 110V, enquanto se pudesse modificar o valor das resistências, esperou-se encontrar uma corrente mínima de 0,28A (quando  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  medem seus valores máximos) e uma corrente máxima de 0,90A (quando  $R_1 = R_2 = R_3 = 0$  e só sobra  $R_f$  como resistência), usando os seguintes cálculos:

$$I_{f\text{mín}} = \frac{110}{R_f + R_1 + R_2 + R_3} = \frac{110}{389,3} = 0,28A$$

$$I_{f\text{máx}} = \frac{110}{R_f} = \frac{110}{121,6} = 0,90A$$

Realizou-se 2 medições, tomando nota dos valores de  $I_f$  e  $E_0$  através dos multímetros:

- **Medição 1:** Aumentou-se a corrente nas bobinas de campo,  $I_f$ , ao se reduzir o valor das resistências variáveis, encontrando os valores mínimo e máximo para  $I_f$  de 0,27A e 0,84A, respectivamente. Após esse valor, variou-se através da fonte externa. Em seguida, reduziu-se  $I_f$  através da fonte externa, até se obter 0,81A, e assim aumentou-se o valor das resistências variáveis, encontrando o valor mínimo de 0,27A para  $I_f$ . Estes dados estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Medição 1 para Curva de Saturação.

Medição 1			
Aumentando $I_f$		Reduzindo $I_f$	
$I_f$ (A)	$E_0$ (V)	$I_f$ (A)	$E_0$ (V)
0,00	3,40	1,28	106,80
0,27	66,00	1,06	102,60
0,34	73,20	0,99	101,20
0,40	78,20	0,95	100,30
0,44	81,10	0,88	98,70
0,48	83,40	0,81	96,80
0,52	85,60	0,76	95,50
0,55	86,60	0,73	94,50
0,63	90,00	0,64	91,70
0,69	92,10	0,60	90,50
0,84	96,70	0,55	88,60
0,97	100,00	0,48	85,60
1,06	101,90	0,41	82,30
1,14	103,90	0,38	80,10
1,19	105,00	0,35	77,60
1,28	106,80	0,31	74,20
		0,30	73,60
		0,29	72,30
		0,27	70,80
		0,00	4,50

Fonte: AUTOR (2018).

- **Medição 2:** Repetiu-se todos os passos da Medição 1. Enquanto se aumentava  $I_f$ , encontrou-se 0,28A e 0,81A para os valores mínimo e máximo de  $I_f$ , respectivamente, utilizando as resistências variáveis e em seguida aumentou-se através da fonte externa até a corrente atingir 1,18A. Em seguida reduziu-se  $I_f$ , a fonte foi utilizada até 0,85A e após esse valor os valores das resistências variáveis foram sendo aumentados e obteve-se 0,28A como valor mínimo para  $I_f$ . A Tabela 2 expõe todos estes dados encontrados.

Tabela 2. Medição 2 para Curva de Saturação.

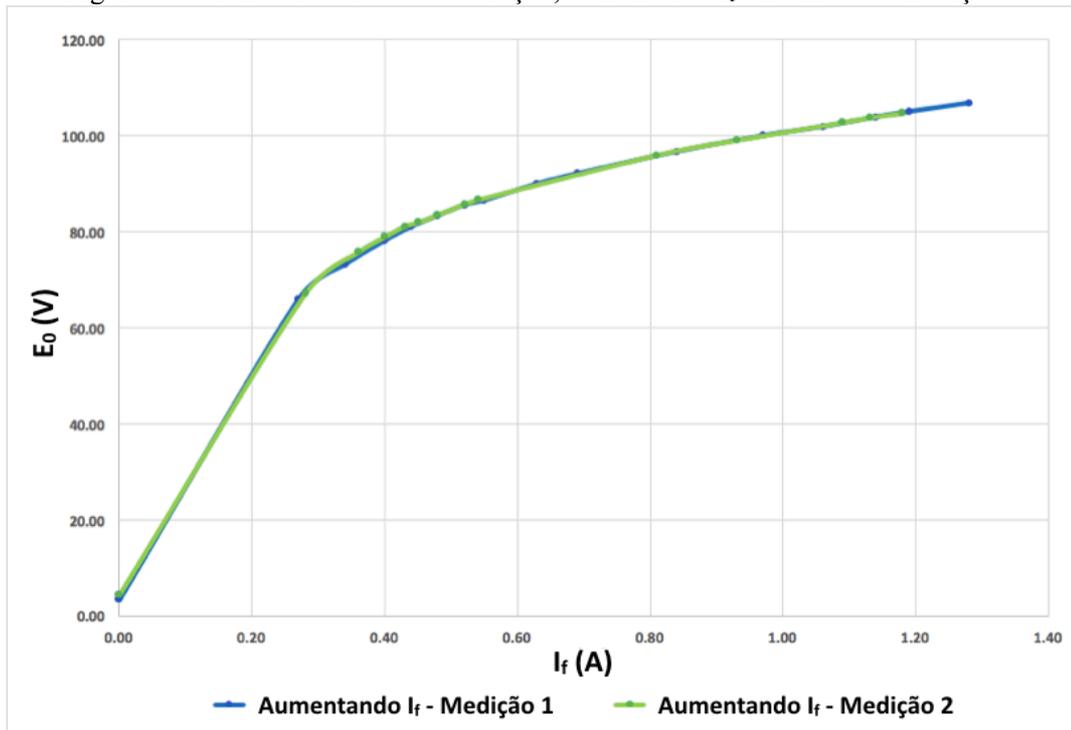
Medição 2			
Aumentando $I_f$		Reduzindo $I_f$	
$I_f$ (A)	$E_0$ (V)	$I_f$ (A)	$E_0$ (V)
0,00	4,50	1,18	104,70
0,28	67,20	1,01	101,50
0,36	75,80	0,95	100,00
0,40	79,00	0,85	97,60
0,43	81,20	0,79	96,30
0,45	82,00	0,69	93,20
0,48	83,60	0,62	90,80
0,52	85,80	0,57	89,30
0,54	86,70	0,53	87,70
0,81	96,00	0,51	86,90
0,93	99,10	0,47	85,40
1,09	102,80	0,44	83,70
1,13	103,80	0,42	82,20
1,18	104,70	0,38	80,20
		0,34	77,30
		0,31	74,30
		0,28	70,80
		0,00	4,60

Fonte: AUTOR (2018).

Com os dados das Tabelas 1 e 2, gerou-se três Gráficos  $I_f \times E_0$ , utilizando o software Microsoft Office Excel.

Para se gerar o Gráfico 1, utilizou-se dos valores tomados quando se aumentou a corrente  $I_f$  em cada uma das duas medições, afim de se comparar o comportamento entre as medições. A Figura 30 mostra esse gráfico.

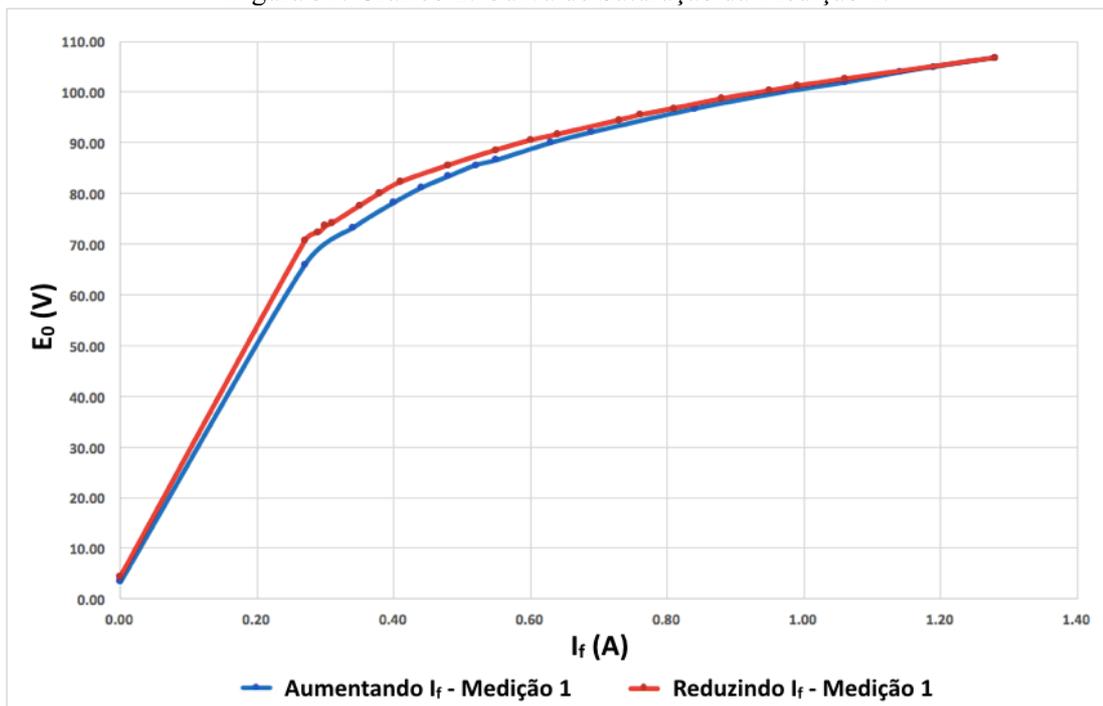
Figura 30. Gráfico 1: Curva de Saturação, aumentando  $I_f$  em ambas as medições.



Fonte: AUTOR (2018).

O Gráfico 2 representa a Curva de Saturação da Medição 1. Para se gerar este gráfico utilizou-se os valores tomados na Tabela 1 quando se aumentou e diminuiu a corrente  $I_f$ , como mostra a Figura 31.

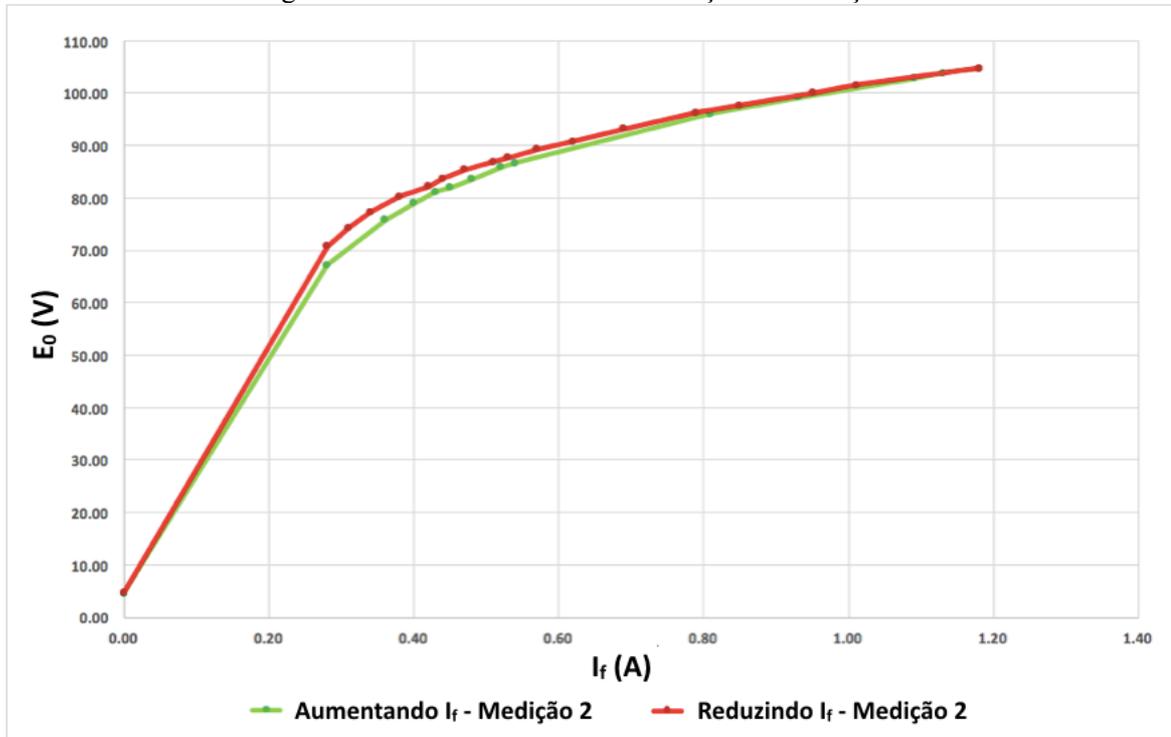
Figura 31. Gráfico 2: Curva de Saturação da Medição 1.



Fonte: AUTOR (2018).

Já o Gráfico 3 representa a Curva de Saturação da Medição 2, para o qual utilizou-se os valores tomados na Tabela 2 quando se aumentou e diminuiu a corrente  $I_f$ , como mostra a Figura 32.

Figura 32. Gráfico 3: Curva de Saturação da Medição 2.



Fonte: AUTOR (2018).

### 3.2 Curva de Auto-excitação

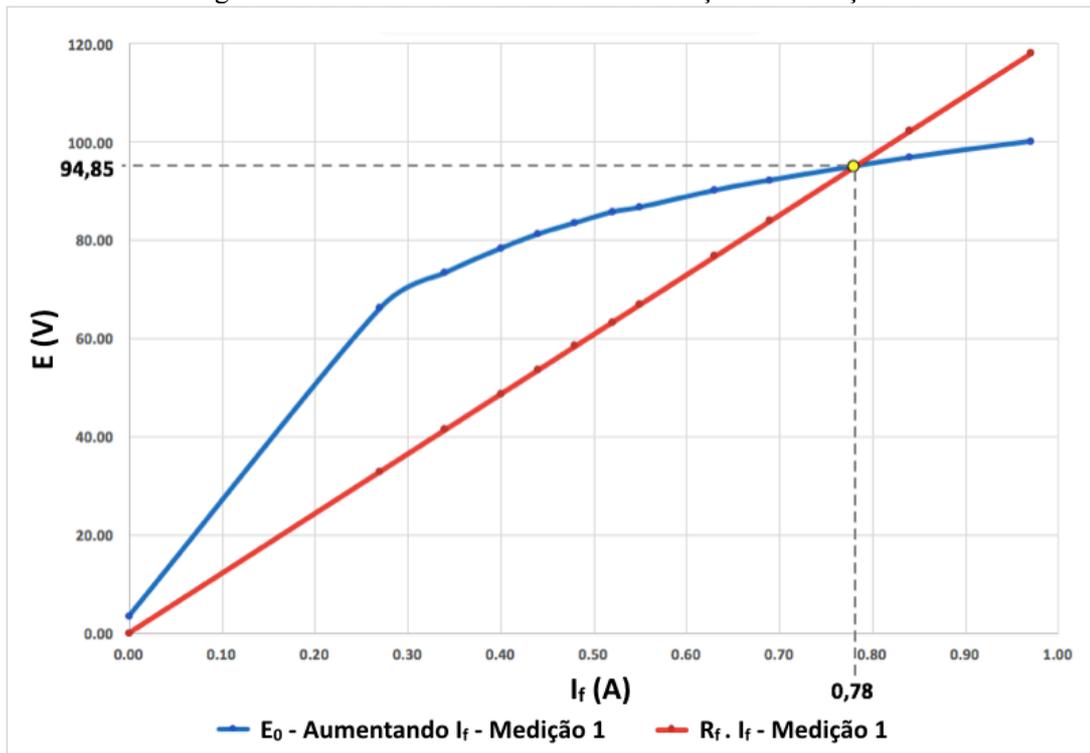
Primeiro, foi calculado o valor da tensão  $R_f \cdot I_f = 121,6 \cdot I_f$  para cada valor tomado na Medição 1 da corrente  $I_f$  (quando esta foi aumentada), para se traçar a reta  $I_f \times E$ . Além desta reta, utilizou-se os valores da tensão  $E_0$  medida para se traçar o Gráfico 4: Curva de Auto-excitação da Medição 1, também quando se aumentava  $I_f$ . Através do Gráfico 4, foi feita uma estimativa para se encontrar a interseção entre a curva e a reta, encontrando-se  $I_f = 0,78A$  e  $E = 94,85V$ . A Tabela 3 mostra esses valores e a Figura 33 exibe a curva.

Tabela 3. Valores de  $R_f \cdot I_f$  para a Medição 1.

Medição 1		
Aumentando $I_f$		
$R_f \cdot I_f$ (V)	$I_f$ (A)	$E_0$ (V)
0,00	0,00	3,40
32,83	0,27	66,00
41,34	0,34	73,20
48,64	0,40	78,20
53,50	0,44	81,10
58,37	0,48	83,40
63,23	0,52	85,60
66,88	0,55	86,60
76,61	0,63	90,00
83,90	0,69	92,10
<b>94,85</b>	<b>0,78</b>	-
102,14	0,84	96,70
117,95	0,97	100,00

Fonte: AUTOR (2018).

Figura 33. Gráfico 4: Curva de Auto-excitação da Medição 1.



Fonte: AUTOR (2018).

Em seguida, foi feito o mesmo para os valores quando se aumentou  $I_f$  na Medição 2, calculou-se o valor da tensão  $E = R_f \cdot I_f$  para cada valor da corrente  $I_f$  (quando esta foi aumentada) tomado na Medição 2. Então gerou-se o Gráfico 5: Curva de Auto-excitação da Medição 2, com os dados da reta  $R_f \cdot I_f$  e a tensão  $E_0$  medida também quando se aumentava  $I_f$ , como mostra a Figura 34. Através deste gráfico, também foi feita uma estimativa para se encontrar a interceptação

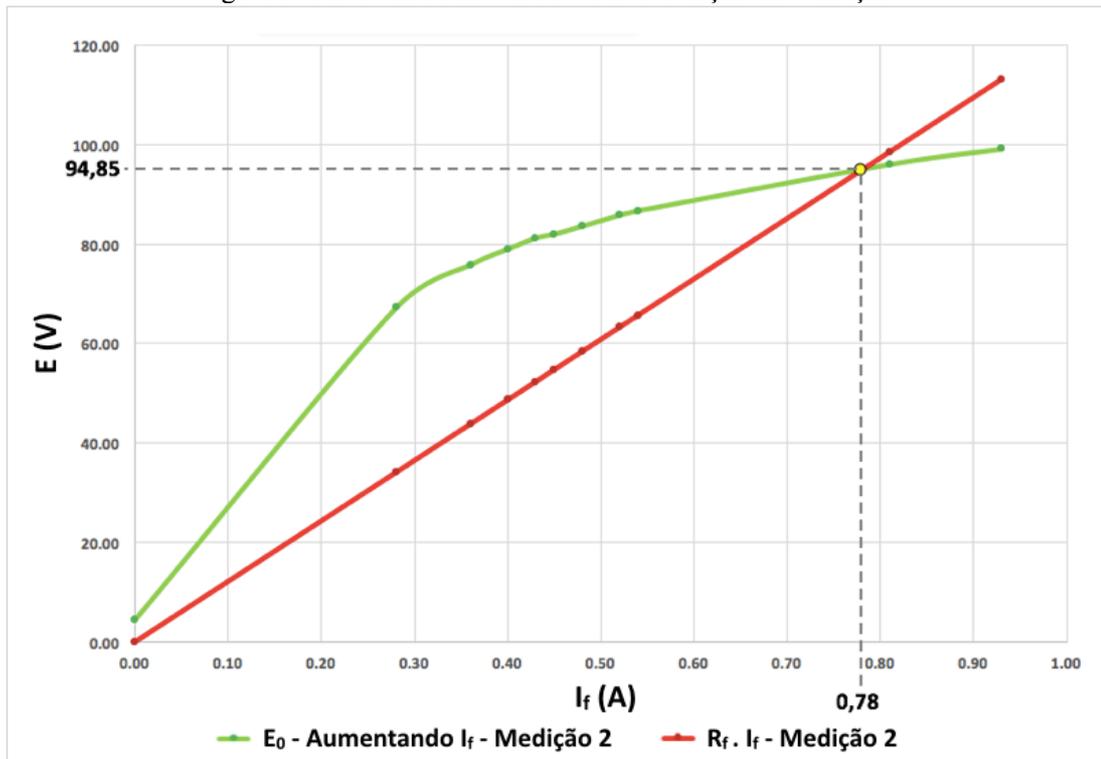
entre a curva e a reta, encontrando-se novamente  $I_f = 0,78\text{A}$  e  $E = 94,85\text{V}$ . A Tabela 4 mostra esses valores encontrados.

Tabela 4. Valores de  $R_f \cdot I_f$  para a Medição 2.

Medição 2		
Aumentando $I_f$		
$R_f \cdot I_f$ (V)	$I_f$ (A)	$E_0$ (V)
0,00	0,00	4,50
34,05	0,28	67,20
43,78	0,36	75,80
48,64	0,40	79,00
52,29	0,43	81,20
54,72	0,45	82,00
58,37	0,48	83,60
63,23	0,52	85,80
65,66	0,54	86,70
98,50	0,81	96,00
<b>94,85</b>	<b>0,78</b>	-
113,09	0,93	99,10

Fonte: AUTOR (2018).

Figura 34. Gráfico 5: Curva de Auto-excitação da Medição 2

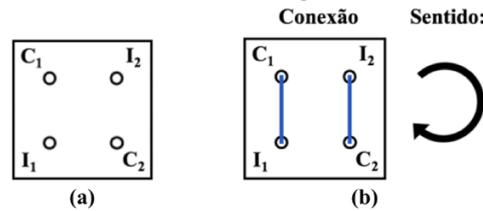


Fonte: AUTOR (2018).

### 3.3 Curva da Auto-Excitação *Shunt*

Inicialmente, identificou-se os terminais da bobina de campo e do enrolamento do induzido, como mostra a Figura 35 (a), onde  $C_1$  e  $C_2$  são da bobina de campo e  $I_1$  e  $I_2$  do induzido.

Figura 35. Terminais da bobina de campo e enrolamento do induzido.

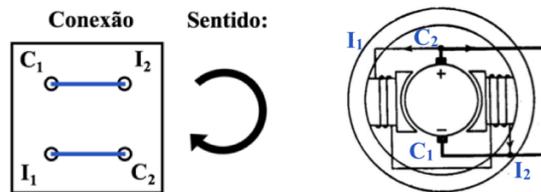


Fonte: AUTOR (2018).

Então conectou-se o conjunto de lâmpadas, em paralelo, a ser alimentado pelo gerador. Em seguida conectou-se os terminais da bobina de campo e do enrolamento do induzido em paralelo, ligando C<sub>1</sub> em I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> em C<sub>2</sub> com o gerador girando no sentido horário, como mostra a Figura 35.b), e mediu-se a tensão nos terminais do induzido. Observou-se que a tensão não se elevou, parando em 1,3V.

Daí inverteu-se as conexões, conectando-se C<sub>1</sub> em I<sub>2</sub> e I<sub>1</sub> em C<sub>2</sub> com o gerador ainda girando no sentido horário, como mostra a Figura 36.

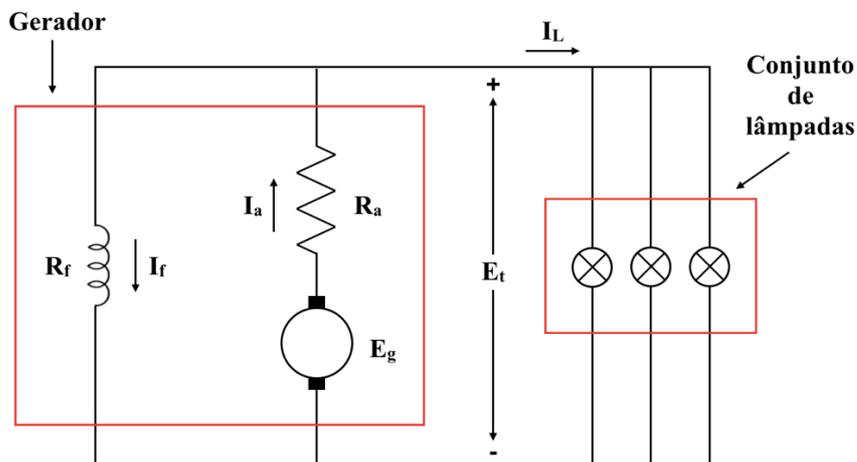
Figura 36. Ligação correta entre terminais da bobina e enrolamento do induzido.



Fonte: AUTOR (2018).

Observou-se que a tensão se elevou e se estabilizou em 86,0V. A Figura 37 apresenta um esquema para o circuito final montado.

Figura 37. Esquema da auto-excitação *shunt* alimentando o conjunto de lâmpadas.



Fonte: AUTOR (2018).

Onde:

- $E_g$ : Tensão gerada pelo gerador;
- $E_t$ : Tensão nos terminais;
- $R_a$ : Resistência nos enrolamentos do induzido;
- $R_f$ : Resistência nas bobinas de campo;
- Conjunto de lâmpadas: carga sendo alimentada pelo gerador;
- $I_L$ : Corrente fornecida pelo gerador;
- $I_a$ : Corrente nos enrolamentos do induzido;
- $I_f$ : Corrente nas bobinas de campo.
- E se pode obter as seguintes relações:

$$E_g = R_a \cdot I_a + E_t \quad (8)$$

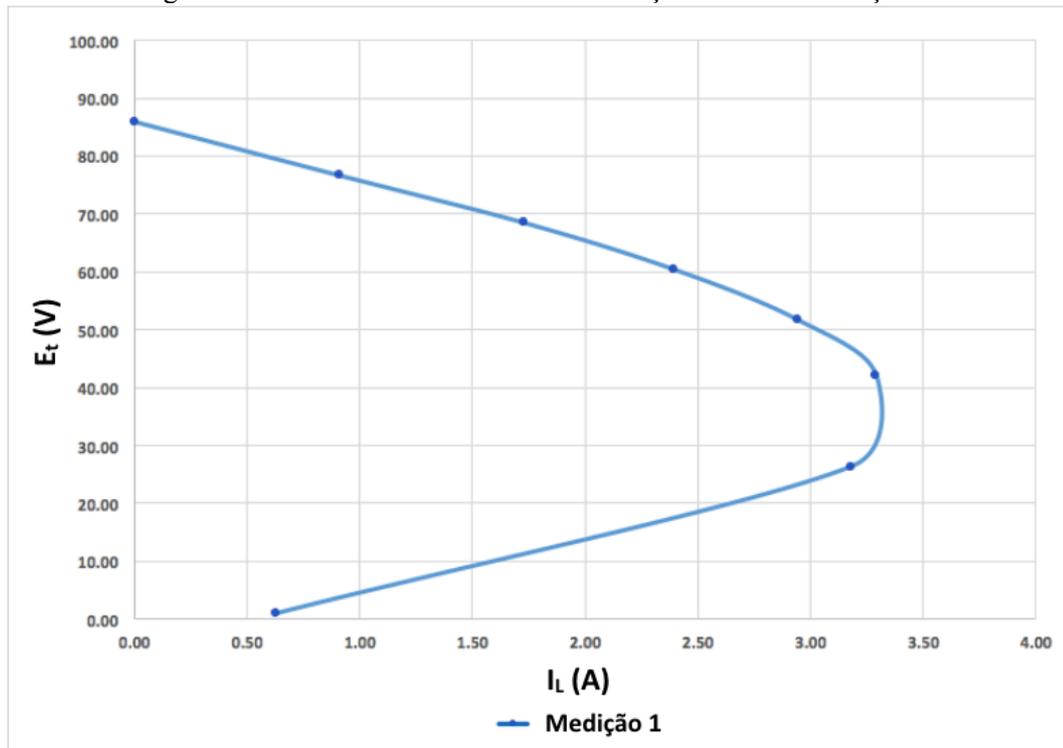
$$I_a = I_f + I_L \quad (9)$$

Aumentou-se a carga, acendendo as lâmpadas do conjunto conectado ao circuito, e tomou-se nota da corrente fornecida pelo gerador ( $I_L$ ) e da tensão nos terminais do gerador ( $E_t$ ) para cada número de lâmpadas acesas, como mostra a Tabela 5, até o circuito desligar e todas as lâmpadas apagarem. E então gerou-se o Gráfico 6, uma curva característica de um gerador com Excitação *Shunt*, como mostra a Figura 38.

Tabela 5. Medição 1 para Auto-excitação *Shunt*.

<b>Medição 1</b>		
<b>Nº Lamp.</b>	<b><math>I_L</math> (A)</b>	<b><math>E_t</math> (V)</b>
0	0,00	86,00
1	0,91	76,70
2	1,73	68,50
3	2,39	60,50
4	2,94	51,80
5	3,29	42,20
6	3,18	26,40
7	0,63	1,00

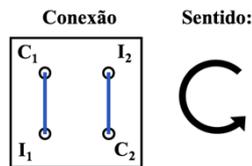
Fonte: AUTOR (2018).

Figura 38. Gráfico 6: Curva de Auto-excitação *Shunt* da Medição 1.

Fonte: AUTOR (2018).

Em seguida, inverteu-se as conexões e o sentido de rotação do gerador, como mostra a Figura 39.

Figura 39. Conexão dos terminais e sentido de rotação invertido.



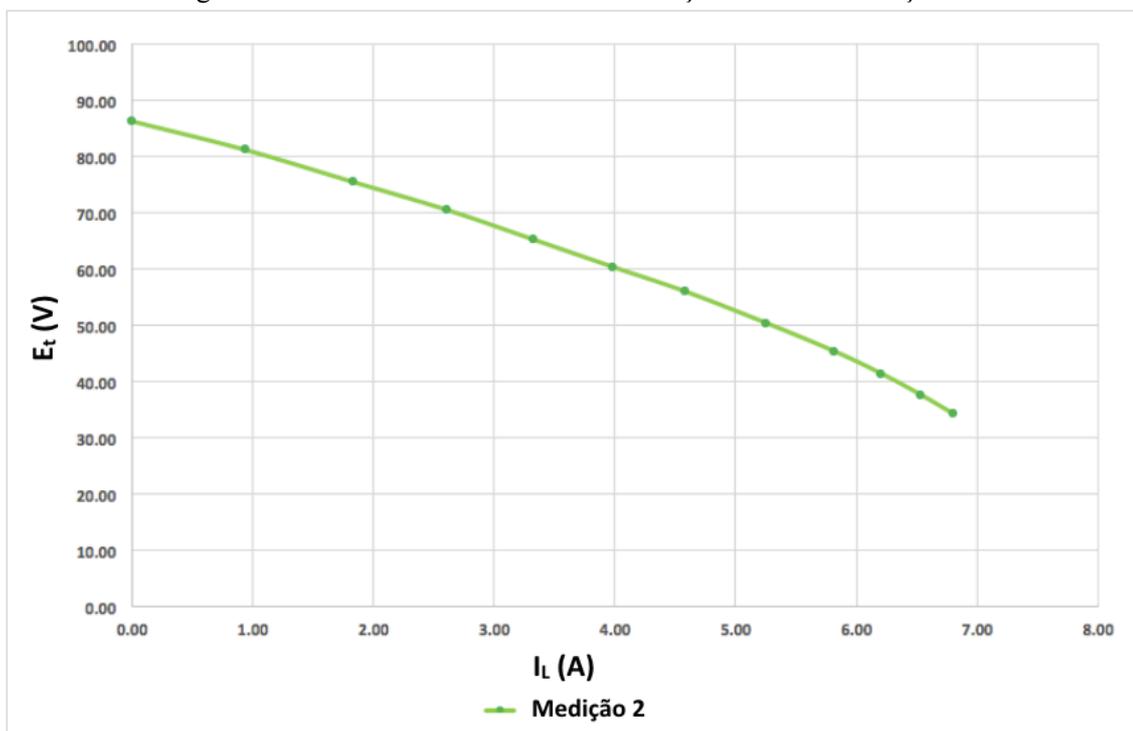
Fonte: AUTOR (2018).

Repetiu-se o processo com a nova conexão, tomou-se nota da corrente fornecida pelo gerador ( $I_L$ ) e da tensão nos terminais do gerador ( $E_t$ ) para cada número de lâmpadas acesas, como mostra a Tabela 6. Neste caso, conseguiu-se acender um número maior de lâmpadas e o circuito continuou ligado, mas como já estava com uma corrente elevada, decidiu-se parar o processo. E então gerou-se o outra curva característica de um gerador com auto-excitação *Shunt*. A Figura 40 apresenta esta curva.

Tabela 6. Medição 2 para Auto-excitação *Shunt*.

Medição 2		
Nº Lamp.	$I_L$ (A)	$E_t$ (V)
0	0,00	86,30
1	0,94	81,20
2	1,83	75,50
3	2,61	70,50
4	3,33	65,20
5	3,99	60,30
6	4,58	56,00
7	5,26	50,30
8	5,82	45,30
9	6,21	41,30
10	6,53	37,60
11	6,80	34,20

Fonte: AUTOR (2018).

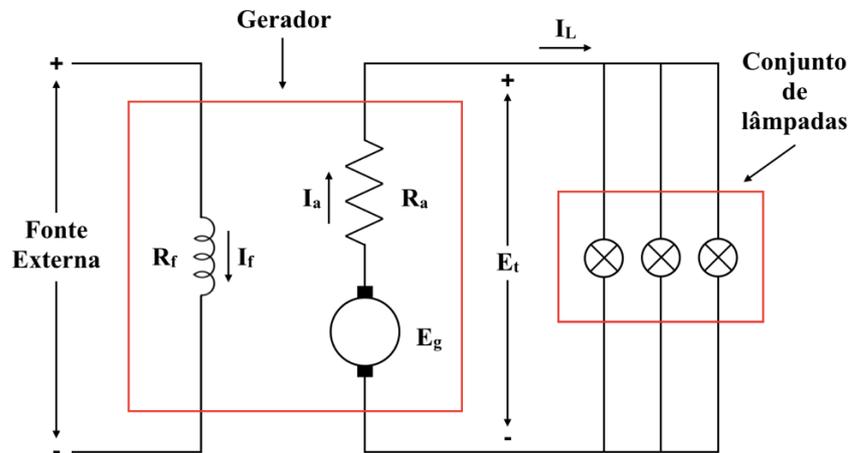
Figura 40. Gráfico 7: Curva de Auto-excitação *Shunt* da Medição 2.

Fonte: AUTOR (2018).

### 3.4 Curva da Excitação Independente

O gerador e o conjunto de lâmpadas foram ligados em paralelo à fonte de corrente contínua, sendo excitados independentemente, com o gerador girando no sentido anti-horário. A Figura 41 apresenta um esquema para o circuito dessa ligação.

Figura 41. Esquema excitação independente alimentando o conjunto de lâmpadas.



Fonte: AUTOR (2018).

Daí para cada número de lâmpadas acesas, tomou-se nota da corrente nos enrolamentos do induzido ( $I_a$ ) e da tensão nos terminais do gerador ( $E_t$ ). A Tabela 7 mostra esses dados.

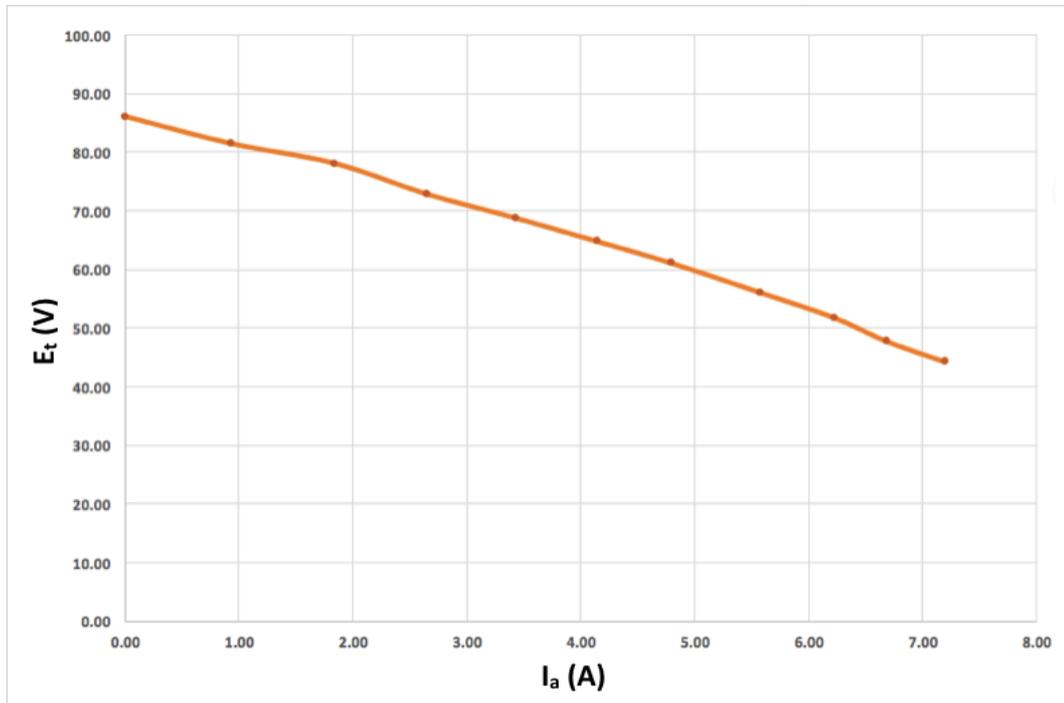
Tabela 7. Medições para gerador sendo excitado independentemente

Nº Lamp.	$I_a$ (A)	$E_t$ (V)
0	0,00	86,10
1	0,93	81,50
2	1,84	78,10
3	2,65	72,90
4	3,43	68,80
5	4,15	64,80
6	4,80	61,10
7	5,58	56,10
8	6,23	51,80
9	6,69	47,80
10	7,20	44,30

Fonte: AUTOR (2018).

Com os dados da tabela gerou-se o Gráfico 8, a Curva característica de tensão de um gerador sendo excitado independentemente, como mostra a Figura 42.

Figura 42. Gráfico 8: Curva do gerador sendo excitado independentemente.

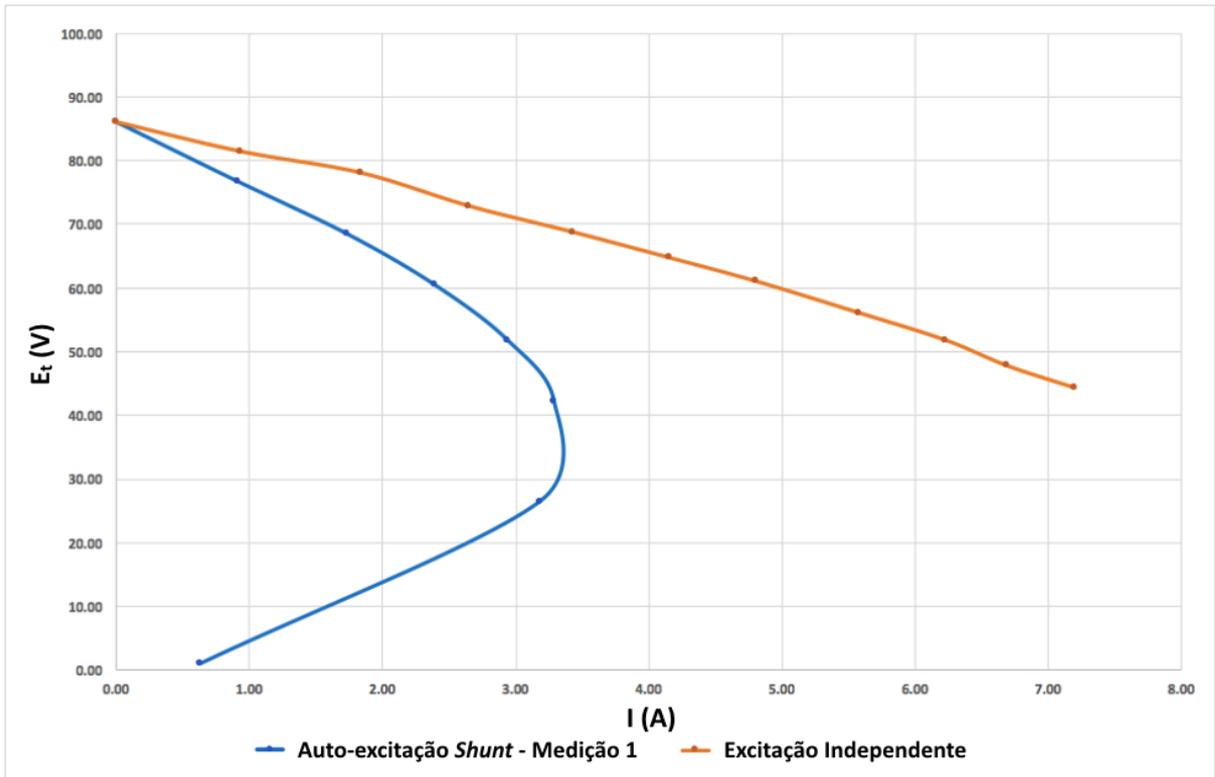


Fonte: AUTOR (2018).

### 3.5 Curva Auto-Excitação *Shunt* e Excitação Independente

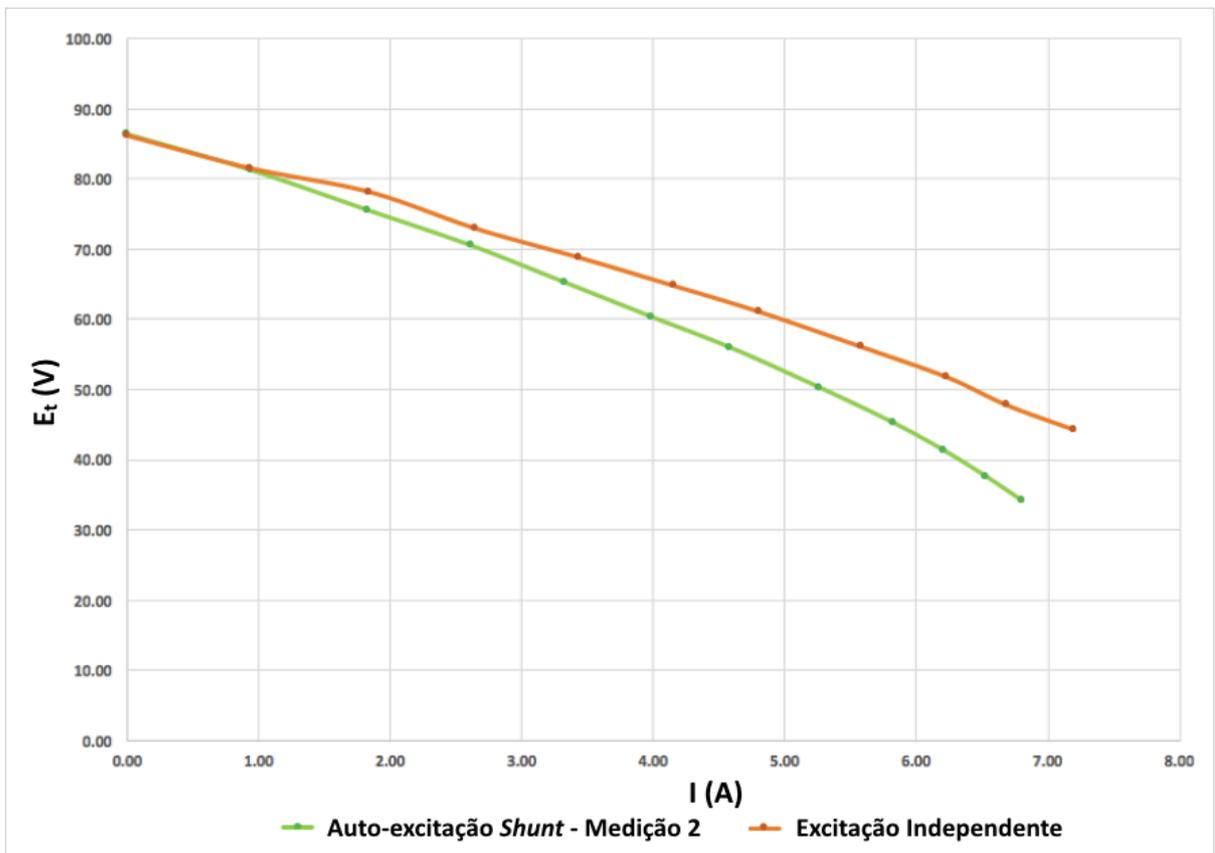
Por fim, buscou-se comparar a queda de tensão sofrida nos terminais do gerador ao ser excitado independentemente com ambas as vezes na auto-excitação *shunt*. Então gerou-se os Gráficos 9 e 10, contendo a curva característica de tensão do gerador sendo excitado independentemente juntamente das curvas da auto-Excitação Shunt, para cada uma das medições. Para a Medição 1 é mostrada na Figura 43 e para a 2 na Figura 44.

Figura 43. Gráfico 9: Comparação da entre as excitações para a Medição 1.



Fonte: AUTOR (2018).

Figura 44. Gráfico 10: Comparação da entre as excitações para a Medição 2



Fonte: AUTOR (2018).

#### 4 CONCLUSÃO

Após a realização de todos os experimentos, pode-se fazer uma análise dos resultados obtidos comparando-os com os objetivos teóricos desejados. Observou-se que as Curvas de Saturação obtidas experimentalmente tiveram o formato teórico esperado, iniciando com uma tensão devido ao magnetismo residual, em ambas medições quando se aumentou  $I_f$ . Além disso, quando se reduziu  $I_f$ ,  $E_t$  foi maior do que quando se aumentou  $I_f$ , como previsto devido ao ciclo de histerese. Já nas Curvas de Auto-excitação, nos pontos de interseção, encontrou-se em ambas medições um valor muito alto de tensão, 94,85V, em comparação com os valores de  $E_t$  encontrados na Excitação Independente, 86,1V, e na Auto-excitação Shunt, 86,0V e 86,3V. Nas Curvas de Auto-excitação Shunt, na Medição 1, a curva obtida teve formato esperado. Conseguiu-se acender um certo número de lâmpadas até  $E_t$  e  $I_a$  reduzirem até valores quase nulos. Na Medição 2, com o sentido de rotação invertido, conseguiu-se acender um número maior de lâmpadas, porém o processo foi interrompido pois o valor da corrente estava elevado. Assim, não foi possível obter a curva completa, mas encontrou-se um formato esperado até onde foi possível. Na Curva de Excitação Independente, também se encontrou o formato teórico desejado, demonstrando as quedas de tensão esperadas. Além disso, comparando as Curvas de Excitação Independente com as de Auto-excitação Shunt, foi possível comprovar nas duas medições, que a tensão nos terminais é menor na auto-excitação pela queda devido à diminuição da excitação.

Conclui-se que o trabalho foi de grande importância, já que a abordagem de forma prática possibilita ao estudante vivenciar o que foi aprendido na universidade. Além de permitir que o estudante obtenha conhecimentos através de um aprendizado técnico, com o objetivo de observar e aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas estudadas durante a graduação.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de mais medições para se ter uma base maior de análise. Além disso, pode-se realizar a construção de um caderno da máquina de corrente contínua utilizada com todas as características levantadas neste trabalho, bem como indicações de atividades práticas que podem ser realizadas nesta máquina durante a disciplina de eletrotécnica dos cursos de graduação da Universidade Federal de Ouro Preto.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C., UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas – Com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Bookman, 2006. 608p.

GRAY, A., WALLACE, G. A. **Eletrotécnica: Princípios e Aplicações**. 7. ed. MAGALDI, M., MENEZES, A. A. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1982. 702p.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e transformadores**. 4. ed. DAIELLO, F. L., SOARES, P. A. Porto Alegre: Globo, 1982.

LOUREIRO, M. A. F. **Máquinas de corrente contínua**. Portugal. Disponível em: <<http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/motoresCC2.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2018.

SALMERON, R. A. **Eletricidade e Magnetismo (Básico)**. São Paulo: e-física - Ensino de Física Online, Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA), USP, 2007. Disponível em: <[http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/campo\\_magnetico/histerese/](http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/campo_magnetico/histerese/)>. Acesso em: 08 jan. 2018.

Certifico que o aluno **RODOLFO GERALDO ANUNCIACÃO**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado “**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE UM GERADOR CC AUTO-EXCITADO SHUNT**”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



---

Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Co-orientador

Ouro Preto, 24 de janeiro de 2019.