

MEC-SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS – CAMPUS FORMIGA
Bacharelado Em Engenharia Elétrica

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA LEITURA DO
TORQUE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Andreza Patrícia Batista

Orientadora: Prof^a. Msc. Mariana Guimarães dos
Santos

FORMIGA – MG
2018

ANDREZA PATRÍCIA BATISTA

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA LEITURA DO TORQUE DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Msc.Mariana Guimarães dos Santos.

FORMIGA – MG

2018

Batista, Andreza Patrícia.
621.3 Sistema microcontrolado para leitura do torque de máquinas elétricas
/ Andreza Patrícia Batista. -- Formiga : IFMG, 2018.
84p. : il.

Orientador: Prof. MSc. Mariana Guimarães dos Santos
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Máquinas elétricas. 2. Célula de carga. 3. Arduíno. I. Título.

CDD 621.3

ANDREZA PATRÍCIA BATISTA

**SISTEMA MICROCONTROLADO PARA LEITURA DO TORQUE DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em:

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Msc. Mariana Guimarães dos Santos

Eng^ª. Aline Fraga Silva

Prof. Dr. André Roger Rodrigues

Dedico este trabalho aos meus pais e esposo, pelo amor, pelos incentivos, me ajudarem a persistir, não deixar desistir dos meus sonhos e sempre acreditarem assim como eu na providência de Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelas providencias que sempre colocou em minha vida e nunca me desamparou. Também pela graça dos dons do Espírito Santo: sabedoria, inteligência, conselho, fortaleza, ciência, piedade e temor de Deus.

Aos meus familiares, principalmente os meus queridos e amados pais, que mesmo na simplicidade me deram ensinamentos de sabedoria que jamais esquecerei. Minha admirável mãe Antônia de Fátima S. Batista que sempre me encheu de palavras sábias e sempre me ajudou em tudo que precisava e sempre que necessário um bom “puxão de orelha”. Ao meu querido pai Waldeirio Ferreira Batista, que não mediu esforço para acordar bem cedo durante muitos anos e me levar no ponto de ônibus. Meus irmãos Andréa e Adenilson, principalmente meu irmão também padrinho, que mesmo nas horas difíceis nunca perdeu o sorriso do rosto. Minha querida sobrinha Thayná que foi o maior presente que Deus deu para nossa família, a alegria da nossa vida.

Ao meu querido e amado Daniel Aparecido, namorado, noivo e esposo, que vivenciou toda minha caminhada não só de estudos mas de vida. “A gente morou e cresceu na mesma rua, como se fosse o sol e a lua, dividindo o mesmo céu...”(O grande amor da minha vida, Gian e Giovane).

Aos meus amigos, uns que já carregava na bagagem, outros que fui adquirindo ao longo dessa caminhada em especial Ana Bárbara e Bruna sempre presentes nas dificuldades da faculdade, e aquelas que conquistei em minha morada de pensionato nas quais demos muitas risadas.

A minha orientadora, Prof^a. Msc. Mariana Guimarães, por sempre me auxiliar e incentivar, disponível para solucionar minhas dúvidas e ser uma professora admirável;

Aos servidores e funcionários do IFMG – Campus Formiga pela dedicação ao trabalho e pelo suporte que concedem;

Aos meus queridos colegas de trabalho, em especial do meu setor, que sempre estiveram à disposição para auxiliar e ajudavam no horário especial de estudante e que cada um com seu jeito generoso me ajudando de alguma forma.

“O Senhor é o pastor que me conduz, não me falta coisa alguma...”.

(Salmo 22,1)

RESUMO

As máquinas elétricas são equipamentos responsáveis pelo fornecimento de potência eletromecânica quando utilizadas como motores, ou potência elétrica, no caso da utilização como geradores. Atuando como motor ou gerador, as máquinas elétricas têm como umas das grandezas fundamentais de estudo e trabalho, o torque. Como gerador, este é responsável pelo movimento do eixo, ou seja, pela potência mecânica de entrada do sistema. Já no funcionamento como motor, o torque é disponibilizado no eixo para manobras de cargas. Uma alternativa para medição de valores de torque é utilização de células de carga que são dispositivos sensibilizados pela força eletromotriz desenvolvida por máquinas elétricas por meio da pressão de suas carcaças sobre a superfície dos mesmos. Sendo a célula de carga um transdutor, faz-se necessária a conversão do sinal de entrada, força resultante, em um sinal elétrico de saída. Esta conversão é realizada com a utilização da Segunda Lei de Newton. O sinal de saída analógico é processado por uma plataforma que utiliza o arduino e disponibiliza os valores de torque medidos em um display. Assim, o presente trabalho tem como objetivo realizar estudos e testes na célula de carga disponível nos *kits* de máquinas elétricas De Lorenzo do Brasil, do Laboratório de Máquinas do IFMG-Campus Formiga. Por meio deste conversor analógico/digital, enviou os sinais à plataforma Arduino, que disponibilizou os dados dos torques exercidos pela máquina em um *display* LCD e com os respectivos dados, comparou com os valores calculados da máquina (corrente e tensão de armadura e velocidade) que faz-se uso dos diagramas de potência para determinar as perdas. Ambos valores obtidos foram inseridos em gráficos. Este estudo é fundamental para o aperfeiçoamento das aulas práticas da disciplina de Máquinas Elétricas no ambiente laboratorial e, conseqüentemente, melhoria das condições de aprendizado dos alunos.

Palavras chave: máquinas elétricas. torque. célula de carga. arduino.

ABSTRACT

The electric machines consist of equipments responsible for the supply of electromechanical power when used as motors, or electric power, in the case of the use as generators. Acting as an engine or generator, electric machines have as one of the fundamental values of study and work, the torque. As a generator, it is responsible for the movement of the shaft, that is, the mechanical input power of the system. In operation as an engine, the torque is available on the axle for load maneuvers. An alternative for measuring torque values is the use of load cells that are sensitized by the electromotive force developed by electric machines by the pressure of their casings on the surface of the same. Since the load cell is a transducer, conversion of the input signal, resulting force, into an output electrical signal is required. This conversion is accomplished using Newton's Second Law. The analog output signal is processed by a platform that uses the Arduino and provides the measured torque values in a display. Thus, the present work has the objective of carrying out studies and tests in the load cell available in the De Lorenzo do Brasil electric machine kits, from the Machine Laboratory of the IFMG-Campus Formiga. By means of this analog / digital converter, it sent the signals to the Arduino platform, which provided the data of the torques exerted by the machine on an LCD display and with the respective data, compared with the calculated values of the machine (armature current and voltage and speed) that the power diagrams are used to determine the losses. Both values were inserted in graphs. This study is fundamental for the improvement of the practical classes of the Electrical Machines discipline in the laboratory environment and, consequently, improvement of the learning conditions of the students.

Keywords: electric machines. torque. load cell. arduino..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Configurações de ligação do campo máquina CC.	20
Figura 2 - Modelo de resistência elétrica típica.	23
Figura 3 - Ponte de <i>Wheatstone</i>	24
Figura 4 - Circuitos com extensômetros em meia-ponte (A) e ponte completa (B).	24
Figura 5 - Compressão (a) e tração (b) nas células de carga.	25
Figura 6 - Tipos de células de carga	25
Figura 7- Estrutura de célula de carga	26
Figura 8- Diagrama de potência do gerador cc.	28
Figura 9 - Diagrama de potência do motor cc.	28
Figura 10- IDE arduino.	31
Figura 11 - Diagrama de bloco de aplicação de balança de pesagem.	32
Figura 12- Módulo HX711	32
Figura 13 - Display LCD.	33
Figura 14- Representação do sistema proposto	34
Figura 15 - Configuração Shunt Máquina cc em excitação independente.	36
Figura 16 - Bornes de ligação da máquina cc.	37
Figura 17 – Montagem da máquina cc	37
Figura 18 - Bornes do Motor de indução.	38
Figura 19- Montagem do motor de indução em 220 V.	38
Figura 20- <i>Kit</i> Exsto para alimentação trifásica (220V).	39
Figura 21 -Carga para Gerador cc.	39
Figura 22 - Adição de uma carga no Gerador cc.	39
Figura 23 - Máquina cc montada como gerador.	40
Figura 24 - Diagrama de potência do gerador cc.	40
Figura 25- Bornes de conexão do gerador síncrono.	41
Figura 26- Montagem do gerador síncrono.	41
Figura 27 - Carga trifásica do <i>kit</i> De Lorenzo	42
Figura 28 - Carga trifásica montada.	42
Figura 29 - Chaves trifásicas usadas.	42
Figura 30 - Máquina cc montada como motor.	42
Figura 31 - Diagrama de potência do motor cc	43
Figura 32 - Localização da célula de carga na máquina CC.	44

Figura 33 - Conector de ligação.....	45
Figura 34 - Cabos de ligação.	45
Figura 35 - Pesos na balança	46
Figura 36 - Peso na célula de carga	46
Figura 37 - Ajuste para o <i>display</i> LCD.....	46
Figura 38 - Ligação do Módulo HX711	47
Figura 39 - Plataforma Arduino UNO	48
Figura 40 - Fluxograma do processamento do Arduino.	50
Figura 41 - Ligação do potenciômetro.....	52
Figura 42 - Montagem do <i>display</i> com o Arduino no projeto.	52
Quadro 1- Dados de placa da máquina cc.	36
Quadro 2 - Bornes de ligação da Máquina cc.....	37
Quadro 3- Dados de placa das máquinas síncrona e assíncrona da Motron.	43
Quadro 4 - Especificações nominais da célula de carga.....	45
Quadro 5- Dados do módulo HX711.....	47
Quadro 6 - Pinagem do Módulo LCD.	51
Gráfico 1 - Calibração da célula de carga.....	55
Gráfico 2 - Calibração da célula de carga de Souza (2014).....	56
Gráfico 3 - Gráfico gerador cc no sentido horário.....	59
Gráfico 4 - Gerador cc sentido no anti-horário.....	63
Gráfico 5 – Torque por tensão terminal.....	65
Gráfico 6 - Corrente da carga por tensão terminal.....	65
Gráfico 7 - A característica de terminal de um gerador CC de excitação independente.	65
Gráfico 8 - Motor cc no sentido horário.	68
Gráfico 9 - Motor CC no sentido anti-horário.	70
Gráfico 10 - Torque x velocidade do motor cc no sentido horário prático.....	71
Gráfico 11 - Característica de conjugado versus velocidade de um motor CC em derivação ou de excitação independente presente na literatura.	71

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Dados coletados da balança e da célula de carga realizado 3 x.....	54
Tabela 2 -Dados do Gráfico plotado de Souza (2014).	56
Tabela 3 - Dados Gerador cc operando no sentido horário.	58
Tabela 4 - Dados do gerador cc operando no sentido anti-horário.....	62
Tabela 5 – Dados do motor cc à vazio e suas perdas.....	66
Tabela 6 – Dados do motor cc sentido horário.	67
Tabela 7 - Motor cc operando no sentido anti-horário.	69
Tabela 8 - Custo do projeto	72

SUMÁRIO

1	VISÃO GERAL DO TRABALHO	13
1.1	Introdução	13
1.2	Tema.....	14
1.3	Justificativa	15
1.4	Objetivos.....	16
1.4.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.4.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Máquinas Elétricas	18
2.2	Células de carga	22
2.3	Plataforma Arduino	30
2.3.1	<i>Módulo HX 711</i>	31
2.3.2	<i>Display LCD.....</i>	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	O sistema proposto	34
3.1.1	<i>Máquinas Elétricas de corrente contínua</i>	35
3.1.2	<i>Célula de Carga</i>	44
3.1.3	<i>Módulo HX711</i>	46
3.1.4	<i>Arduino UNO</i>	47
3.1.5	<i>Display LCD.....</i>	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1.	Calibração da célula de carga	53
4.2.	Dados do sistema.....	56
4.3.	Resultados da máquina cc.....	57
4.3.1	<i>Máquina de corrente contínua como gerador CC</i>	57
4.3.2.	<i>Máquina de corrente contínua como motor</i>	65
4.4	Custo do projeto	72
5	CONCLUSÃO.....	74
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXO I.....	80

1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

1.1 Introdução

Atualmente, a energização de um sistema de iluminação ou de um equipamento eletrodoméstico parece ser uma atividade simples, porém a realização de atividades como estas foram necessários quase dois séculos de muitos estudos e dedicação de cientistas, engenheiros e professores. Foi em 1831, por Michael Faraday o surgimento da primeira da máquina elétrica que relacionou energia elétrica e mecânica, a descoberta considerada como o maior avanço individual no progresso da ciência (KOSOW, 2005).

As máquinas elétricas rotativas, convertem energia elétrica em mecânica e vice-versa. Ao transformar energia elétrica em mecânica a máquina funciona como motor. Já no caso de converter energia mecânica em elétrica, denominada gerador. As máquinas podem ser classificadas no que diz respeito à alimentação, em corrente contínua ou alternada, quando os princípios de funcionamentos e aspectos construtivos. Dentre os principais tipos de máquinas podemos destacar as de corrente contínua, síncrona, assíncrona, de imã permanente, de relutância variável, de histerese, sem escovas, etc. Embora existam diferenças entre os aspectos construtivos, funcionamento e aplicação, os princípios físicos fundamentais que regem o seu comportamento são bem similares, baseando-se na interação de dois campos magnéticos, presentes no estator e rotor que resulta uma força que dá origem ao torque. (CHAPMAN, 2013); (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006). O foco deste trabalho, está na medição do torque das máquinas de corrente contínua.

Motores e geradores de corrente contínua possuem um papel de extrema relevância em sistemas industriais, podendo ser utilizados em atividades para ampla faixa de velocidade ou controle preciso da tensão de saída dos geradores, como, por exemplo, em setores como indústria química e petroquímica, siderúrgicas, processos de laminação, máquinas têxteis e veículos de tração. A classificação das máquinas de corrente contínua é realizada de acordo com as diversas combinações de alimentação dos enrolamentos de campo, podendo ser: excitação em derivação ou *shunt*, série, composto ou independente (SILVA, 2016); (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

A grandeza torque é relevante para o estudo da máquina CC, como gerador ou como motor. Sendo responsável pelo torque de entrada para promover a força motriz na no caso de gerador CC, e disponibilizando o torque no eixo no caso do funcionamento como motor CC.

Conforme Kosow (2005) e Del Toro (1994), a força eletromagnética e o torque eletromagnético são sinônimos, e resultam da interação entre campos magnéticos presentes nas estruturas construtivas das máquinas. (DEL TORO, 1994); (KOSOW, 2005).

Kosow (2005) define torque como: “a tendência do acoplamento mecânico (de uma força e sua distância radial ao eixo de rotação) para produzir rotação”. O conceito da força está diretamente relacionado com a segunda lei de Newton que diz que a força resultante em Newton é a multiplicação da massa de um corpo (kg) pela aceleração (m/s^2) empregada a este corpo (VILLATE, 2012).

A medição do torque em máquinas elétricas rotativas é realizada por meio de dispositivos como dinamômetros, por exemplo, ou por meio de medição indireta, utilizando-se valores de potência e velocidades medidos.

Atualmente, encontram-se no mercado também, alguns dispositivos que realizam a medição da grandeza torque, tendo-se como requisito básico a lei de Newton, como, por exemplo, a célula de carga. Esta é um transdutor, que realiza a leitura de uma grandeza mecânica e a transforma em uma grandeza elétrica, utilizando-se extensômetros de resistências elétricas que submetidos a uma pressão sobre sua superfície variam o valor das resistências e por consequência o valor do torque medido. (BORGES et al, 2015).

Vários tipos de dispositivos podem ser utilizados para melhoria no processamento de um sinal elétrico. O arduino é uma boa opção para esta tarefa, pois permite a associação de uma linguagem de programação intuitiva, sendo considerado um “cérebro” programável para qualquer tipo de controle. Além disso, possui algumas interfaces de saída como os *displays*, por exemplo, que disponibilizam caracteres para informação ao usuário (BLUM, 2016).

Com a finalidade de melhoria no monitoramento do torque em aulas práticas no ambiente laboratorial do IFMG-Campus Formiga, é proposto um sistema microcontrolado capaz de realizar a medição do torque desenvolvido pelas máquinas elétricas de corrente contínua, por meio da célula de carga e o processamento do sinal utilizando o arduino. O sistema disponibilizará via *display* LCD o torque instantâneo para diferentes condições de carga.

1.2 Tema

A grandeza torque é fundamental para o estudo e utilização das máquinas elétricas. O torque pode ser definido como a tendência de giro de um acoplamento mecânico em função da força, aplicada em relação à distância do seu eixo de rotação. No caso das máquinas de

corrente contínua, quando funcionam como gerador, um torque mecânico é exercido no eixo da máquina, no qual se encontra o enrolamento de armadura. Este ao girar na presença de um campo magnético estabelecido pelos enrolamentos de campo, presente no estator, induz tensão que, após retificação mecânica realizada por meio de (escovas e comutador), disponibiliza as tensões geradas em seus terminais. Já como motor, com a circulação de corrente nos enrolamentos do rotor, existe a produção de um campo magnético que interage com o campo magnético criado no enrolamento de campo, produzindo o torque. Assim, observa-se a importância da medição do torque para o estudo do comportamento das máquinas elétricas nas duas operações, como motor e como gerador, já que é a força motriz que realiza o giro do rotor da máquina e na presença do campo pode gerar tensão ou na presença de circulação de corrente gera o esforço para o eixo do motor.

1.3 Justificativa

Por meio da medição do torque é possível analisar o comportamento das máquinas em diferentes condições de carga, além disso, a associação desta grandeza com outras, como velocidade e potência, por exemplo, estabelece as principais curvas de estudo de aplicação das máquinas.

O Laboratório de Máquinas Elétricas do IFMG-Campus Formiga possui *kits* didáticos com máquinas elétricas rotativas acopladas (máquinas de corrente contínua e de corrente alternada, síncrona e assíncrona). Nestes *kits*, existe uma célula de carga acoplada à carcaça da máquina que permite a obtenção do torque desenvolvido. No entanto, esta medição não tem sido utilizada nas práticas laboratoriais por falta de conhecimento a respeito do funcionamento da célula de carga, uma vez que os manuais entregues pelos fornecedores não contém as informações necessárias para a utilização dos dispositivos presentes nos *kits* didáticos. Desta forma, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo “investigar” o processo de medição de torque utilizando a célula de carga e desenvolver uma forma de apresentar este resultado na unidade padrão desta grandeza (N.m), através de um *display* LCD. Assim, o dispositivo desenvolvido poderá ser utilizado para desenvolvimento das práticas laboratoriais das disciplinas de máquinas elétricas, melhorando a qualidade de ensino e aprendizado dos alunos, por meio da relação entre conhecimentos teóricos e práticos. Vale ressaltar que a célula de carga permite a medição do torque com quaisquer combinações de máquinas ligadas. Neste trabalho o foco estará na medição do torque da máquina cc como gerador e como motor e realizar comparação com dados coletados por medições de corrente e

tensão de armadura. Esta escolha é realizada por questões práticas de validação do dispositivo desenvolvido. Tais questões são explicitadas na seção de metodologia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Desenvolver um dispositivo microcontrolado capaz de processar o sinal da célula de carga presente no *kit* das Máquinas Elétricas do laboratório do IFMG e mostrar ao usuário o torque em (N.m.) com o uso de um *display* LCD.

1.4.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado são necessários os seguintes objetivos específicos:

- Estudo sobre o funcionamento das máquinas elétricas, especialmente da máquina de corrente contínua operando como motor e como gerador;
- Estudo sobre o torque das máquinas CC na configuração excitação independente, bem como as relações entre as grandezas corrente, tensão e velocidade angular;
- Estudo sobre a forma de medição do torque por meio da célula de carga e das relações e unidade envolvida neste estudo;
- Estudo a respeito de métodos de medição indireta de torque para validação do dispositivo desenvolvido;
- Estabelecimento da comunicação entre plataforma microcontrolada, arduino, com a célula de carga, utilizando-se o módulo HX711;
- Desenvolvimento de um código de programação que realize o monitoramento das mudanças do torque em função de cada carga adicionada;
- Validação do dispositivo desenvolvido por meio de ensaios experimentais, comparando-se os valores de torque medidos pela célula de carga com valores de torque calculados (medição indireta), utilizando-se valores de corrente, tensão e velocidades medidos;

- Configuração da programação para apresentação no *display* de valores de torque na unidade N.m do Sistema Internacional (SI) e utilização das máquinas elétricas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado ao referencial teórico do protótipo desenvolvido, trazendo os estudos e as definições acerca das máquinas elétricas rotativas, da célula de cargas e da plataforma de desenvolvimento e comunicação do arduino.

2.1 Máquinas Elétricas

Atualmente, as máquinas elétricas estão presentes em quase todas as atividades cotidianas, sejam em ambientes comerciais e residenciais, ou em ambientes industriais. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME).

No Brasil o consumo de energia elétrica pela indústria é de aproximadamente 43,7% de toda energia produzida no país, deste valor o consumo pela força motriz em operação chega ser 68%, o que leva a constatar-se que 30% de toda a energia do país é consumida por motores elétricos (ENERGIA, 2015).

Como geradores, o Brasil tem como maior fonte de energia elétrica as hidroelétricas, que fazem uso destas máquinas para transformar a energia mecânica proveniente do movimento das pás rotativas em energia elétrica, que é fornecida aos consumidores por meio dos sistema elétrico de potência (PENA, 2018).

Sistemas ou máquinas energizadas com corrente alternada ou que geram tensões alternadas, são classificados como dispositivos *ca*, do mesmo modo, quando energizados ou geram corrente contínua, são classificados como sistemas *cc* (DEL TORO, 1994); (KOSOW, 2005).

As máquinas de corrente alternadas podem ser divididas basicamente em síncronas e assíncronas. Nas máquinas síncronas, o campo magnético presente no rotor, gira na mesma velocidade do campo magnético girante presente no estator, ou seja, em sincronismo. Já nas máquinas de indução ou assíncronas, existe uma diferença entre estas duas velocidades, denominada escorregamento. Ambas podem trabalhar como motor ou gerador, dependendo das aplicações (CHAPMAN, 2013); (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

As máquinas de corrente contínua apresentam algumas diferenças construtivas e de funcionamento, especialmente por possuírem um sistema que realiza a retificação das tensões geradas, que são naturalmente alternadas, em contínuas. Este sistema é formado pelo

comutador e as escovas e trata-se de um retificador mecânico acionado pelo próprio movimento da máquina (CHAPMAN, 2013).

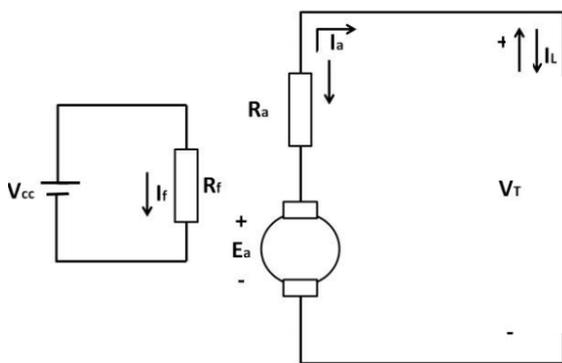
No passado, as principais aplicações das máquinas CC estavam associadas a atividades que exigiam um controle de velocidade e para tais aplicações a máquina de corrente contínua era a melhor opção. Atualmente, com a utilização de dispositivos a base de eletrônica de potência, os inversores, as máquinas de corrente contínua perderam espaço para as máquinas de indução, que possuem diversas vantagens como: menor custo, robustez e vida útil. Ainda assim, máquinas *cc* são encontradas em diversas aplicações, principalmente como motor, podendo ser encontradas em máquinas de papel, bobinadeira e desbobinadeira, laminadores, máquinas de impressão, extrusoras, prensas, moinhos de rolos, mesa de testes de motores entre outras (SIEMENS, 2016).

As máquinas *cc* possuem enrolamentos de campo, localizados no estator, que são responsáveis pela produção de um campo magnético fixo. Na parte móvel (girante), encontram-se os enrolamentos de armadura responsáveis pela circulação da corrente alternada. Podem ser classificadas conforme o fluxo de potência, em motores e geradores, e conforme a alimentação dos seus enrolamentos de campo em: excitação independente, ou autoexcitada (*shunt*, série ou composta) (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

- Excitação independente, Figura 1 (a): quando uma fonte independente ou externa alimenta o campo da máquina. São utilizados em sistemas que necessitam de controle da tensão de armadura dentro de uma ampla faixa de valores (VILLAR, 2006); (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006);
- Derivação ou *shunt*, Figura 1(b): a alimentação do enrolamento de campo *shunt* é proveniente da própria armadura da máquina, como fica em paralelo com a armadura, sendo constituído por muitas espiras de fio fino (VILLAR, 2006);
- Série, Figura 1 (c): a excitação é produzida por um enrolamento de campo ligado em série com a armadura, este possuiu uma “dependência” exclusiva da carga para o seu funcionamento, pois seu fluxo é produzido em função da corrente de armadura e da carga. Este enrolamento deve suportar toda corrente que passa pela carga, assim é constituído por poucas espiras constituídas por fios grossos (VILLAR, 2006);

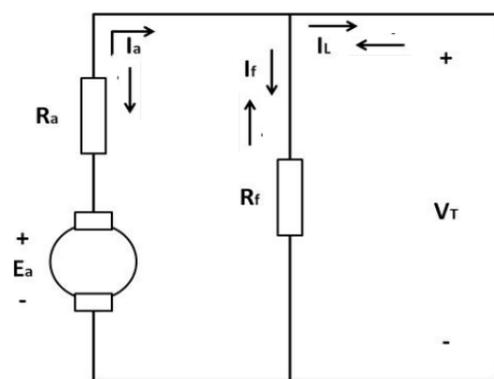
- Composto, Figura 1(d) : neste caso tanto o enrolamento série quanto o *shunt* é energizado simultaneamente. Deve ser levado em consideração o vetor do campo série e *shunt*. Quando ambos estão em mesmo sentido é uma máquina cumulativa, porém quando estão em sentidos opostos são considerados diferenciais. O último não possui aplicação prática e pode causar uma regulação de tensão muito ruim na presença de carga (VILLAR, 2006); (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Figura 1: Configurações de ligação do campo máquina CC.



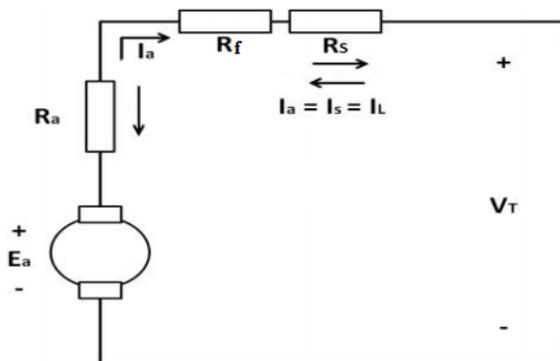
(a) Excitação independente

Fonte: Acervo próprio autor (2018).



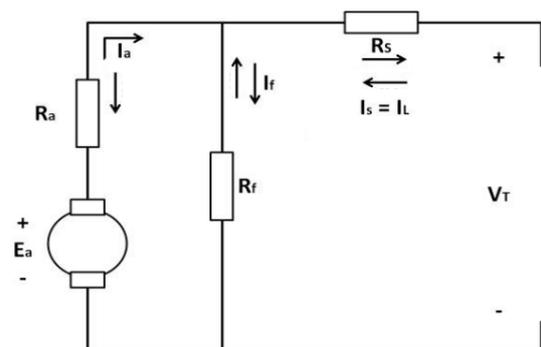
(b) Derivação ou *shunt*.

Fonte: Acervo próprio autor (2018).



(c) Série

Fonte: Acervo próprio autor (2018).



(d) Composto curto

Fonte: Acervo próprio autor (2018).

A Figura 1 representa a configuração de formas de enrolamento de campo, sendo V_{cc} alimentação externa, I_f corrente de campo, R_f resistência de campo, I_a corrente de armadura, E_a tensão de armadura e V_t tensão de saída (gerador) ou tensão de entrada (motor). O sentido

da seta representa o sistema trabalhando como gerador seta para direita e motor seta para esquerda.

Na operação como gerador, os enrolamentos de campo localizados no estator, produzem um campo magnético fixo e os condutores da armadura são colocados para girar vindo de uma fonte mecânica externa. O movimento de condutores na presença de um campo magnético, induz tensões alternadas que são retificadas e disponibilizadas na armadura. Já na operação como motor, existe a circulação de corrente nos enrolamentos de armadura localizados no rotor. Este movimento ocorre na presença do campo magnético fixo produzido no estator. A interação entre os campos magnéticos do rotor e estator produz a força magnética, ou torque, que é disponibilizado no eixo para operação de cargas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Segundo Kosow (2005), os dispositivos de conversão eletromecânica relacionam as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Essa relação dá origem a uma grandeza de fundamental importância para o estudo das máquinas elétricas, o torque.

Percebe-se que o torque é da início ao processo de geração de energia, como torque mecânico de entrada, e como torque de saída para operação de cargas no funcionamento como motores.

Nas máquinas *cc* o torque é gerado pela interação de ampere-condutor, com a densidade de fluxo da máquina conforme mostrada na Equação 1 (DEL TORO, 1994).

$$T = \frac{p}{2} J \Phi \quad 1$$

Na qual:

T é o torque, em N.m;

P é número de polos;

J é a lâmina de corrente equivalente da distribuição ampère-corrente do enrolamento de armadura, em A/rad;

Φ é o fluxo por pólo, em Wb;

Desta forma, é possível determinar uma relação entre o torque e a corrente que circula na armadura, Equação 2, utilizando-se uma constante que está relacionada ao projeto construtivo das máquinas e seus enrolamentos (DEL TORO, 1994).

$$T = K_T \Phi I_a \quad 2$$

Na qual:

T é o torque, em N.m;

K_T é a constante de torque;

Φ é o fluxo por polo, em Wb;

I_a é a corrente de armadura, em A;

Por fim, sabe-se que a potência mecânica exercida pela máquina é dada pelo produto do conjugado pela velocidade mecânica, conforme Equação 3 (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

$$T \omega_n = I_a E_a \quad 3$$

Na qual:

T é o torque, em N.m;

ω_n é a velocidade angular, em rad/s;

I_a é a corrente de armadura, em A;

E_a é a tensão de armadura, em V;

A medição da velocidade realizada pelos equipamentos comerciais é dada, na maioria das vezes, em rotações por minuto, porém para o estudo do torque da máquina, a velocidade deve ser um dado angular, logo o valor medido deve ser convertido de RPM (rotação em minuto) em rad/s (radianos por segundo). Para tal a Equação 4 pode ser utilizada, (SILVA FILHO, 2014).

$$\frac{rad}{s} = \frac{rpm \ 2 \ \pi}{60} \quad 4$$

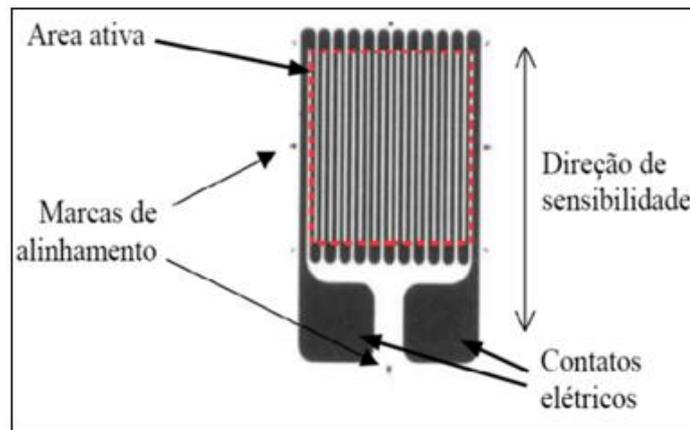
2.2 Células de carga

As células de carga são sistemas que realizam medições por meio de extensômetro de resistência elétrica. São classificados como transdutores uma vez que, recebem energia de um sistema e convertem esta energia em outra forma de energia diferente. Este é o caso das células de carga que usam a pressão mecânica sobre a superfície e convertem esta pressão em

um sinal elétrico. Esta é uma forma mais comum de medição de força e tensão, e possui grande aplicabilidade devido ao seu custo reduzido, facilidade em manusear e instalar, e razoável linearidade (BORGES, 2015); (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017).

Segundo Devitte (2012), a resistência elétrica do extensômetro varia de acordo com o sentido da área ativa, em que a força é aplicada, como pode ser visto na Figura 2. Esta força aplicada é responsável pela deformação elástica no material.

Figura 2 - Modelo de resistência elétrica típica.

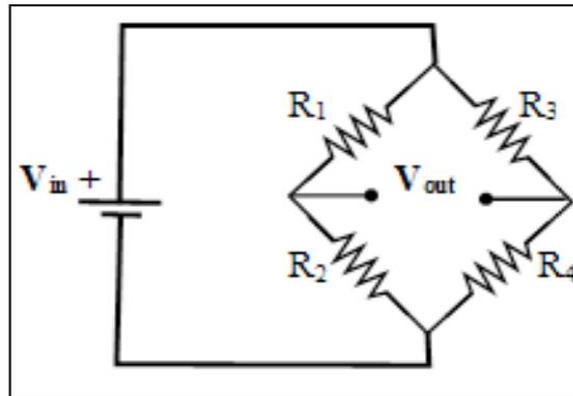


Fonte – Extraído de (DEVITTE, 2012).

De acordo com Nunes, Marcílio e Larissa (2017), explica que o extensômetro deve ser fixado em uma estrutura para ser sua base, assim a peça e o extensômetro é deformado na mesma proporção devido ao esforço mecânico, sabendo-se o valor dessa resistência pode-se determinar a deformação da peça.

Deve-se realizar um ajuste de acordo com o tipo de material, que podem ser alumínio, aço ou ferro, uma vez que a temperatura pode causar uma variação na resistência. O extensômetro possui um arranjo em ponte de *Wheatstone*, que compara as deformações entre as resistências e elimina o erro associado à temperatura (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017).

A ponte de *Wheatstone*, Figura 3, foi proposta por Samuel Hunter Chistie em 1833, sendo popularizada por Sir Charles Wheatstone em 1858. A maioria das células de carga utiliza em sua estrutura com quatro extensômetros (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017). (DEVITTE, 2012).

Figura 3 - Ponte de *Wheatstone*.

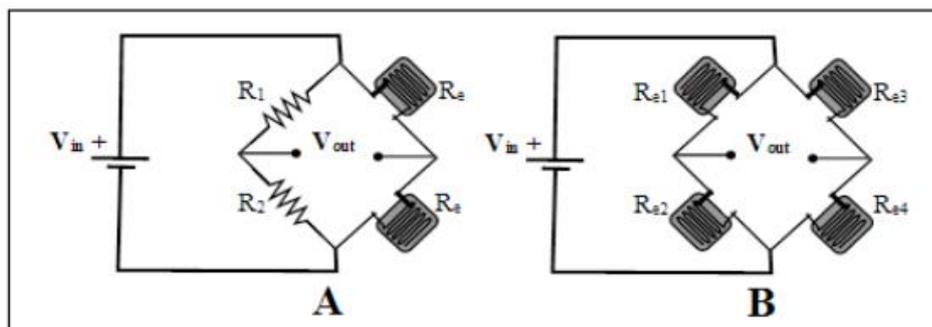
Fonte – Extraído de (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017).

Uma fonte de tensão de entrada V_{in} alimenta o circuito e a medição acontece por meio da tensão de saída V_{out} , que pode ser equacionada conforme a Equação 5 (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017).

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_{in} \quad 5$$

Desta forma, podem-se substituir os resistores da Figura 3 por dois extensômetros (meia-ponte) ou quatro extensômetros (ponte completa) como apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Circuitos com extensômetros em meia-ponte (A) e ponte completa (B).

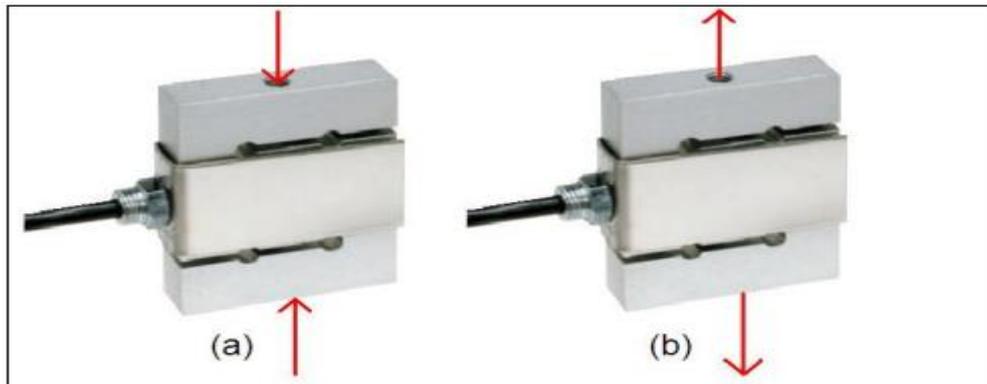


Fonte – Extraído de (NUNES; MARCÍLIO; LARISSA, 2017).

As células de carga podem ter vários formatos e podem medir esforços em ambos os sentidos de acordo com as aplicações específicas. Com faixas de medições e aplicações

diferentes, podem medir basicamente forças de compressão e forças de tração, como mostra a Figura 5 (DEVITTE, 2012).

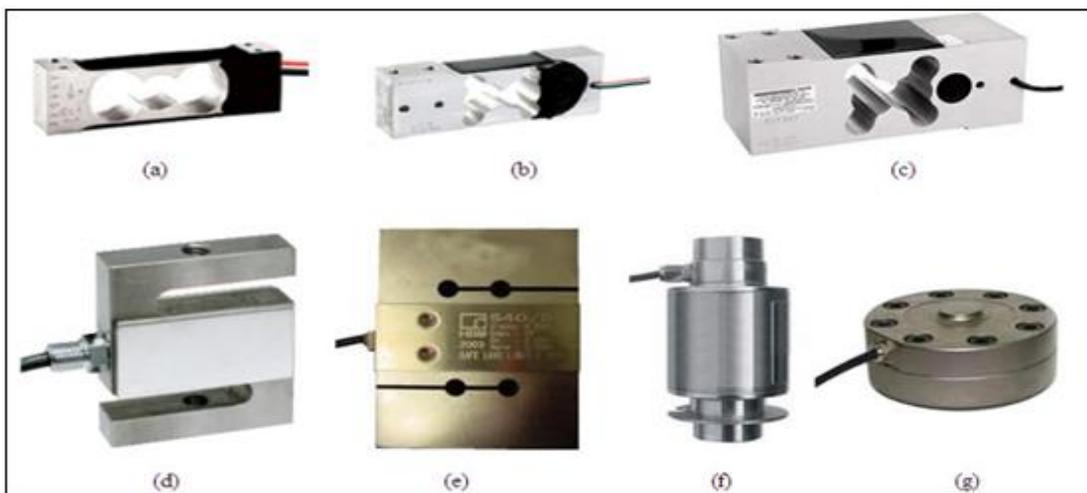
Figura 5 - Compressão (a) e tração (b) nas células de carga.



Fonte: Extraído de (DEVITTE, 2012).

Alguns dos modelos de célula de carga apresentados por Devitte (2012), podem ser visualizados na Figura 6. As células de carga do tipo transdutor de força de duas vias, com variação de 0,3 kg a 250 kg, são mostradas em (a, b e c). Já para cargas tipo 'S', para medir esforço de tração e compressão, variáveis de 20 kg a 10.000 kg, são visualizadas em (d e e). Por fim, células de cargas tipo coluna, utilizadas em caso de grandes esforços e com variações de 5.000 kg a 50.000 kg, são visualizadas em (f e g).

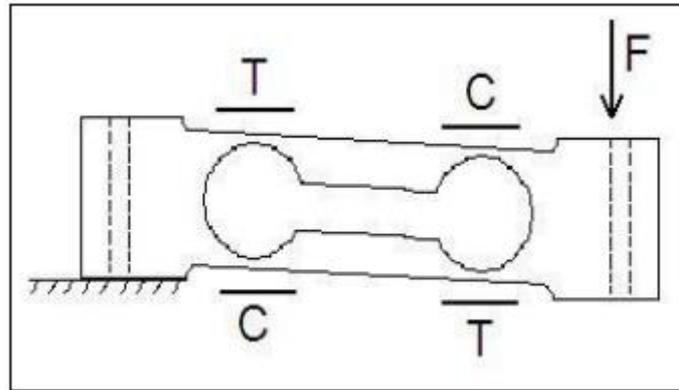
Figura 6 - Tipos de células de carga



Fonte – Extraído de (DEVITTE, 2012).

A Figura 7 apresenta uma ilustração da estrutura da célula de carga e a representação da atuação da força (DEVITTE, 2012).

Figura 7- Estrutura de célula de carga



Fonte – Extraído de (DEVITTE, 2012).

Na Figura 7, T representa a tração, C a contração e F a força aplicada (DEVITTE, 2012). Considerando as propriedades mencionadas demonstrados na Figura 7, Wohlgemuth e Rosa (2012) aplica a Equação 6 para determinar o torque proveniente da célula de carga.

$$C_{nm} = P_c \Delta_{ec} \quad 6$$

Na qual:

C_{nm} é o conjugado do motor, em kgf.m;

P_c é peso medido pela célula de carga, em kgf;

Δ_{ec} é a distância entre o centro do eixo do motor e o ponto de medição da célula de carga, em metros;

Desta forma, ao realizar uma força na extremidade da célula de carga em F, sensibiliza a mesma e emite um sinal de saída. Esta força pode ser exercida por meio da carcaça da máquina CC. Em que, a força é exercida em relação a uma distância do eixo girante, sabendo-se desta informação pode-se determinar o torque.

O torque em N.m, é necessária a conversão da massa kg (quilograma) em N (Newton). Para tal, Villate (2012) faz uso da segunda Lei de Newton e estabelece que, se a massa do corpo for constante e havendo ou não a variação na velocidade, a força resultante é expressa pela Equação 7.

$$F = m a \quad 7$$

Na qual:

F é a força, em N (Newton);

m é a massa do corpo, em kg ou kgf (quilograma ou quilograma força);

a é a aceleração do corpo podendo ser também a gravidade, em m/s² (metros por segundos ao quadrado);

Assim a Equação 7 pode ser inserida na Equação 6 e obtendo-se a Equação 8.

$$C_{nmN} = P_c a \Delta_{ec} \quad 8$$

Na qual:

C_{nmN} é o conjugado do motor, em N.m;

P_c é peso medido pela célula de carga, em kgf;

a é a aceleração do corpo podendo ser também a gravidade, em m/s²;

Δ_{ec} é a distância entre o centro do eixo do motor e o ponto de medição da célula de carga, em metros;

A medição do torque realizada pela célula de carga, após adequação dos valores das grandezas, exibirá um resultado em N.m, unidade convencional para o estudo desta grandeza. O conjugado também pode ser obtido por meio da manipulação do diagrama de potência da máquina de corrente contínua quando a velocidade é conhecida. Esta relação é estabelecida pela Equação 9

$$T = \frac{P}{W_n} \quad 9$$

T é o torque, em N.m;

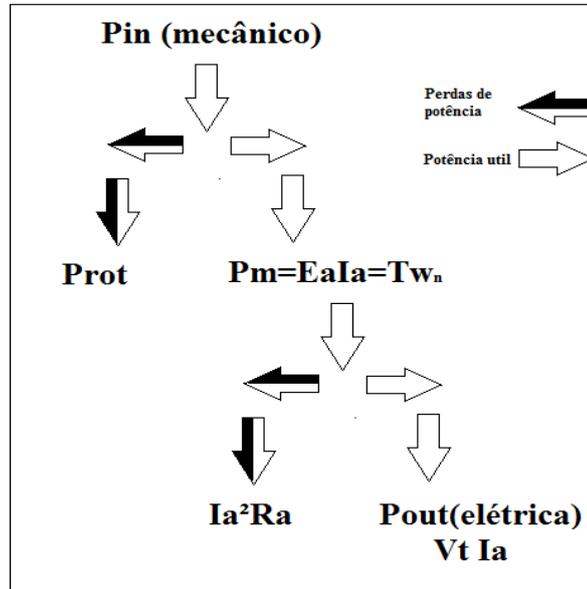
P é a potência, em (W);

W_n é a velocidade angular, em rad/s;

Assim, para determinar os dados de conjugado de uma máquina é importante conhecer o seu diagrama de potências, ou seja, conhecer as perdas envolvidas no funcionamento das máquinas CC como motores ou geradores, que são, perdas nos enrolamentos, perdas por histerese, perdas rotacionais e de magnetização, perdas das escovas e perdas suplementares (DEL TORO, 1994).

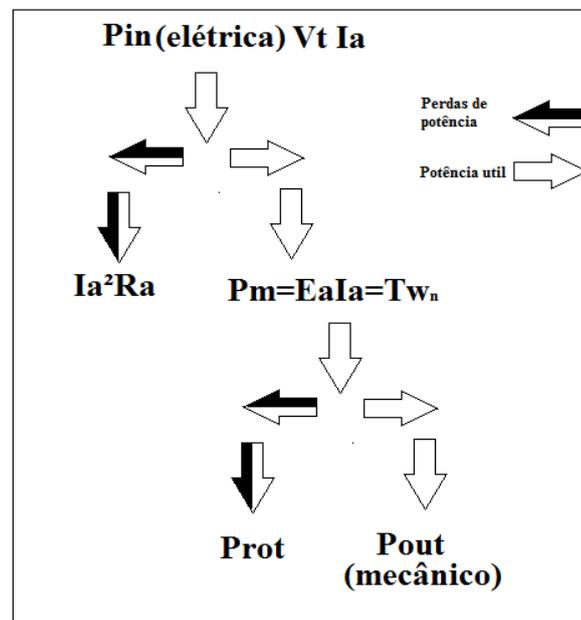
O diagrama de potência do gerador de corrente contínua é apresentado na Figura 8 e o diagrama de potência do motor cc é ilustrado na Figura 9.

Figura 8- Diagrama de potência do gerador cc.



Fonte – Adaptada de (DEL TORO, 1994).

Figura 9 - Diagrama de potência do motor cc.



Fonte – Adaptado de (DEL TORO, 1994).

Na qual:

P_{in} é a potência de entrada;

P_{rot} é a potência rotacional;

P_m é a potência mecânica, igual, corrente vezes tensão armadura, igual, torque vezes velocidade;

R_a é a resistência de armadura;

P_{out} é a potência de saída.

Com os respectivos diagramas de potência é possível a obtenção equações de motor cc e gerador cc. Para o gerador cc tem-se a tensão terminal é dado pela Equação 10.

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad 10$$

Que proporciona uma potência elétrica de saída do gerador com a seguinte Equação 11:

$$P_{out} = V_t I_a = E_a I_a - I_a^2 R_a \quad 11$$

Já como motor a tensão terminal de entrada conforme Equação 12.

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad 12$$

Assim a potência elétrica de entrada possui a seguinte relação, tensão terminal (V_t) vezes corrente de armadura (I_a) ou a soma da tensão de armadura (E_a) vezes corrente de armadura com corrente de armadura ao quadrado vezes resistência de armadura (R_a), Equação 13:

$$P_{in} = V_t I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a \quad 13$$

A comparação entre o valor de torque medido pela célula de carga e o valor de torque calculado por meio dos diagramas de potências será utilizada como validação para o dispositivo de medição desenvolvido.

2.3 Plataforma Arduino

O conceito Arduino surgiu na Itália em 2005, sendo uma plataforma microcontrolada *open source*, baseada em *hardware* e *software*. A interação com o seu ambiente é realizada por meio de entradas de sinais provenientes de sensores e botões por exemplo. Estas entradas são processadas e enviadas às saídas de sinais que ativam atuadores como motores, luzes, *display*, etc. (TEIXEIRA, 2018); (CAVALCANTE et al, 2014).

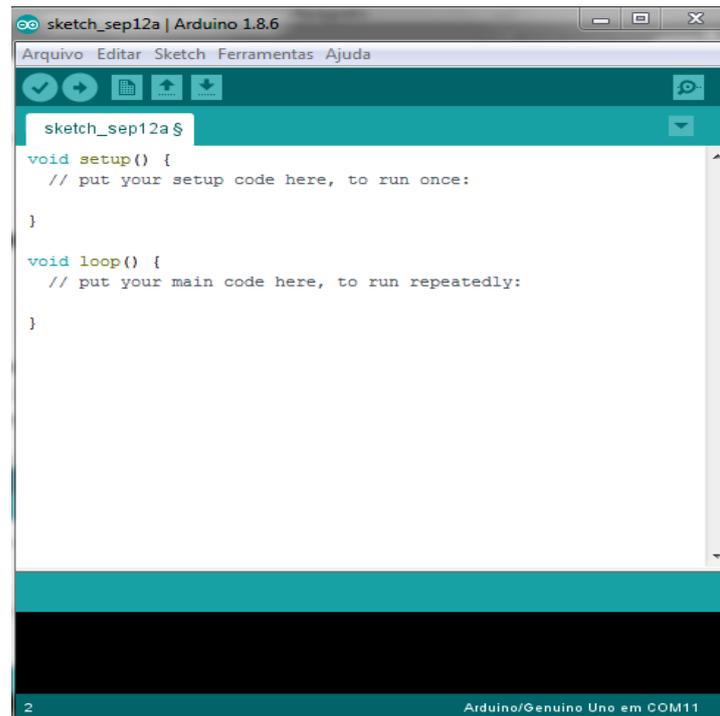
O Arduino pode ser conectado a um computador, a uma rede, ou mesmo a *internet* para enviar e recuperar dados e atuar sobre eles (MCROBERTS, 2011). No mercado existem, atualmente, uma série de versões, todas com microprocessador de 8 *bits* e da família *Atmel AVR*, com linguagem de programação C++ (TEIXEIRA, 2018).

Dentre as versões existentes de plataformas arduino, o arduino Uno surge como uma inovação para versão italiana de 2009 Duemilanove. Outras existentes são a Mini, Nano e *Bluetooth* do arduino e a Mega 2560, sendo a última com maior capacidade de memória e um número maior de pinos de entrada/saída (MCROBERTS, 2011).

Segundo McRoberts (2011), o arduino pode ser programado em um Ambiente de Desenvolvimento Integrado ou IDE (*Integrated Development Environment*). Trata-se de um *software* livre, instalado nos sistemas operacionais como *Windows*, *Linux* e *Mac OS*.

Essa interface visual IDE, ilustrada na Figura 10, permite que os algoritmos de programação para sejam transferidos para o microcontrolador através da comunicação serial via porta USB do computador, possibilitando que o arduino execute tarefas. (TEIXEIRA, 2018).

Figura 10- IDE arduino



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

O arduino possui portas analógicas e digitais, as de sinais digitais possuem dois estados High (5V) e Low (0V). Já as analógicas, conseguem simular qualquer valor de tensão entre 0 e 5 V. Mesmo trabalhando com sinais analógicos, o seu microcontrolador internamente só trabalha com valores digitais, desta forma ele possui um conversor (A/D) de 10 *bits* de resolução. Assim para determinar a sua resolução, faz-se a relação entre a tensão de 5 V que é a tensão de referência (V_{ref}), e a quantidade de *bits* para cálculo da resolução por meio da Equação 14 (TEIXEIRA, 2018).

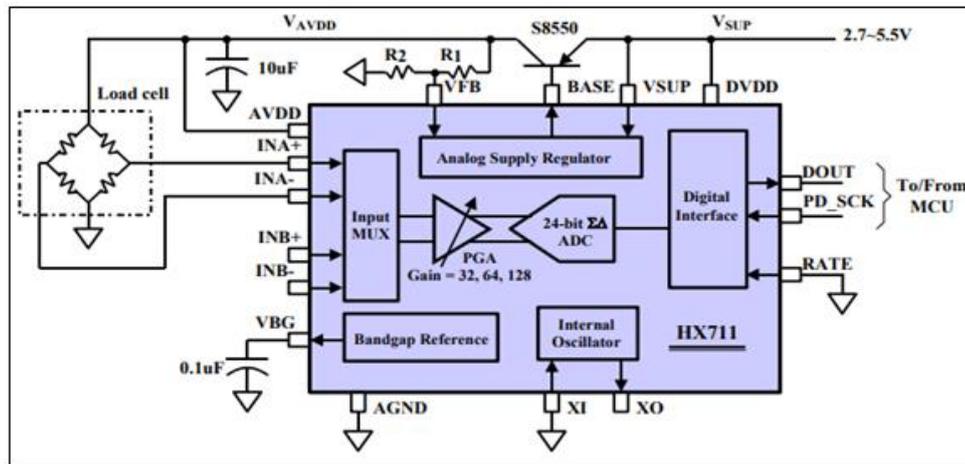
$$Resolução = \frac{V_{ref}}{2^{10} - 1} \cong 4,9 \text{ mV} \quad 14$$

2.3.1 Módulo HX 711

O HX711, cuja topologia básica é apresentada na Figura 11, é um conversor A/D que funciona como um amplificador de sinal e um conversor com precisão de 24 *bits*. Este foi projetado para balanças industriais e aplicações de controle para células de carga, porém

existem módulos já pré fabricados encontrados no mercado em caso de uso padrão (KOLLROSS, 2016).

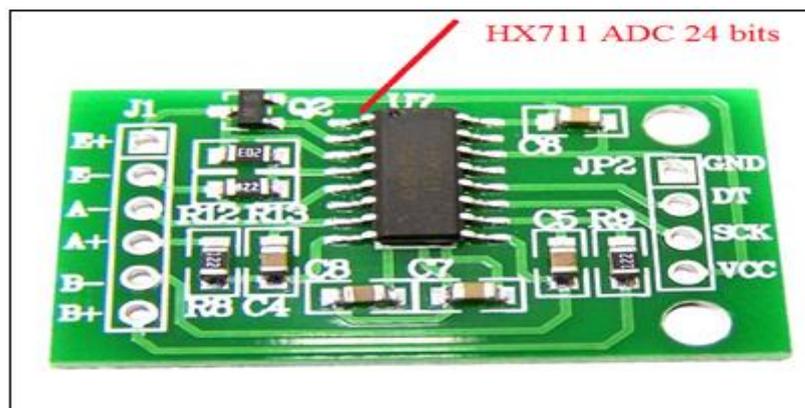
Figura 11 - Diagrama de bloco de aplicação de balança de pesagem.



Fonte – Extraído de (SEMICONDUCTOR, 2018).

Para melhoria na utilização, encontra-se o módulo pré fabricado, mostrado na Figura 12, circuito que inclui os respectivos resistores e capacitores, este será utilizado no respectivo trabalho. Nota-se também, que o chip HX711 ADC encontra-se na placa já pré-montada. Em caso de um circuito específico o usuário pode montar seu próprio circuito para melhorar o funcionamento do HX711 (ELETRODEX, 2018).

Figura 12- Módulo HX711



Fonte –Extraído de (ELETRODEX, 2018).

Realizar a linguagem de comunicação do módulo ao arduino é necessário utilizar a

biblioteca do módulo que pode ser encontrada na *web*, biblioteca "HX711.h" (GITHUB, 2018).

2.3.2 *Display LCD*

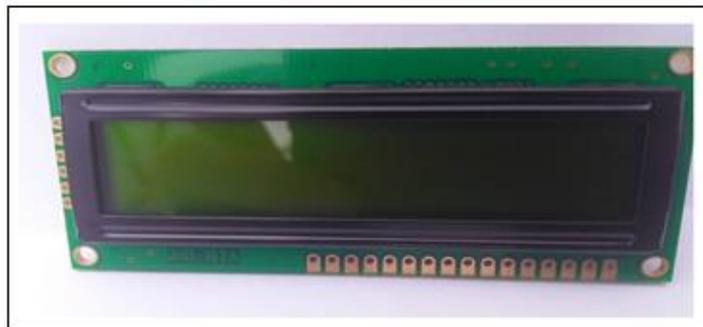
O *display* de Cristal Líquido ou em inglês LCD (*Liquid Crystal Display*), é utilizado para exibir símbolos e textos nas plataformas arduinos e em microcontroladores. Ele consiste de líquido polarizado feito por duas camadas com a solução do líquido entre elas. Sendo que suas principais características são leveza, portabilidade e baixo consumo de energia elétrica (GEDDES, 2016) (MULTILÓGICA-SHOP, 2018).

O LCD pode variar o número de linhas e de colunas, a cor dos caracteres e a cor de fundo, por exemplo, no caso de *displays* 16x2, tem-se 16 caracteres e duas colunas, desta forma pode “escrever” 32 caracteres (MULTILÓGICA-SHOP, 2018).

Para o envio dos caracteres do arduino para a tela de LCD é necessário usar a biblioteca *LiquidCrystal* que mapeia os caracteres e com comando *print lcd*, envia a mensagem do *sketch* para a tela (GEDDES, 2016).

Este módulo, presente na Figura 13, possui um controlador próprio, que realiza a interligação por pinos a outras placas. Deve-se alimentar o módulo pelos pinos de alimentação e interligar o barramento de dados e controle com a placa do usuário. Além disso, é necessário um protocolo de comunicação entre ambos, que envia *bytes* de instruções e *bytes* de dados pelo sistema do usuário (BARBACENA; FLEURY, 1996).

Figura 13 - Display LCD.



Fonte - Acervo próprio autor

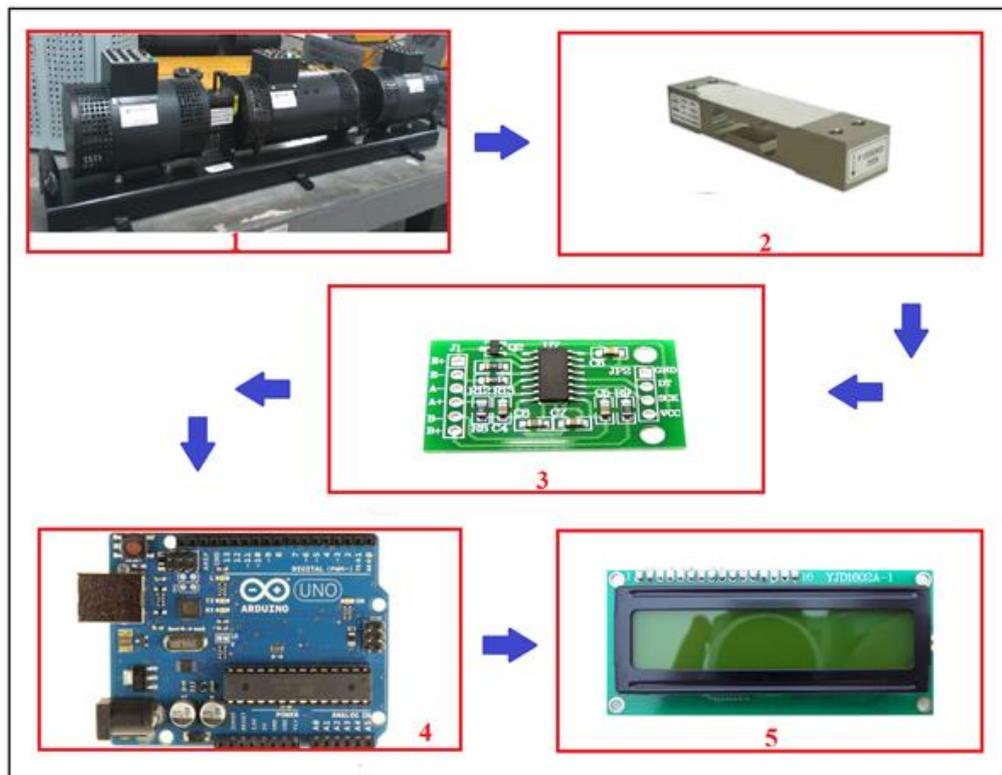
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhadas todas as etapas de desenvolvimento de uma ferramenta para medição do torque das máquinas de corrente contínua, do Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Formiga. A medição é realizada por meio de um sistema microcontrolado que é detalhado a seguir.

3.1 O sistema proposto

A Figura 14 apresenta a representação esquemática do modelo de sistema de medição de torque proposto. O sistema é composto por diferentes módulos, os quais foram enumerados para facilitar a identificação e a compreensão da aplicação de cada um no sistema desenvolvido.

Figura 14- Representação do sistema proposto



Fonte – Acervo do próprio autor (2018).

De acordo com a Figura 14, as partes que compõem o sistema são:

1 – Máquinas Elétricas: Corrente contínua;

- 2 – Células de Carga;
- 3 – Módulo HX711;
- 4 – Arduino;
- 5 – *Display* LCD;

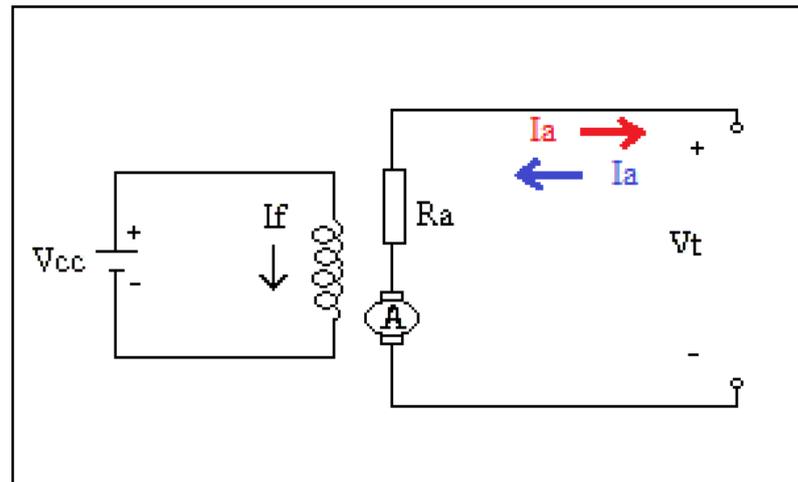
O trabalho teve como objetivo a medição do torque da máquina CC (1), que será realizada pela sensibilização da célula de carga (2), acoplada à carcaça da máquina. Esta quando energizada como motor ou gerador produzirá um torque, ou seja, uma força sobre a superfície da célula de carga que enviará sinais ao módulo HX711 (3) que fará a amplificação e conversão analógico/digital do sinal que será enviado ao arduino (4). O arduino processa este sinal, realiza os respectivos cálculos para obtenção do torque da máquina e envia os dados ao *display* LCD (5), mostrando ao usuário o respectivo dado de torque da máquina no sentido horário ou anti-horário. Este valor será comparado com o torque calculado da máquina para validação dos resultados.

Nas próximas subseções, cada uma das partes enumeradas na Figura 14 são detalhadas para compreensão de todas as estruturas e funcionalidades implementadas no dispositivo.

3.1.1 Máquinas Elétricas de corrente contínua

A máquina de corrente contínua possui configurações de alimentação dos enrolamentos de campo de acordo com suas aplicações. As máquinas com excitação independente possuem a vantagem de manterem constantes as correntes e tensões nos enrolamentos *shunt*, independente das condições, cargas e operação, como motor ou como gerador. Esta característica é importante neste estudo, pois permite a avaliação do torque sem a interferência destes parâmetros no estudo. A Figura 15, apresenta uma ilustração do circuito equivalente da máquina de corrente contínua em excitação independente, no qual a corrente de armadura em vermelho, indica o funcionamento como gerador, e a corrente de armadura em azul, como motor. A resistência da armadura (R_a) que modela as perdas de natureza ôhmica devida à circulação de corrente na armadura. O termo V_t é a tensão de saída do gerador e no caso de motor representa sua tensão de entrada. Já V_{cc} é a alimentação de uma fonte externa de entrada do campo *shunt* e o I_f é a corrente que circula no campo, neste caso, próximos do nominal de campo da máquina.

Figura 15 - Configuração Shunt Máquina cc em excitação independente.



Fonte - Acervo próprio Autor (2018).

Neste trabalho, utiliza-se a máquina de corrente contínua do conjunto de máquinas acopladas do kit didático da empresa *De Lorenzo* do kit presente no Laboratório de Máquinas, que possui os seguintes dados nominais de placa:

Quadro 1- Dados de placa da máquina cc.

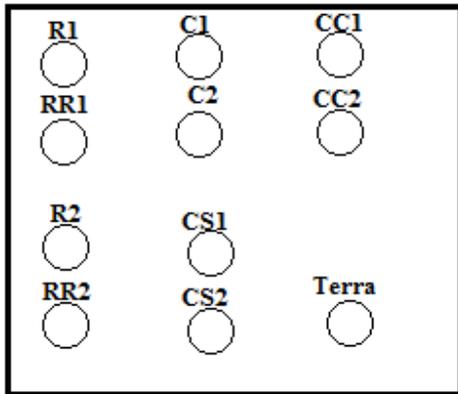
ITEM	DESCRIÇÃO	UNIDADE
Corrente de armadura	4	Ampere (A)
Tensão de armadura	190	Volt (V)
Corrente de Campo	0,4	Ampere (A)
Tensão de Campo	160	Volt (V)
Potência	500	Watt (W)
Velocidade	1800	Rotação por minuto (RPM)

Fonte – Adaptado do dados de placa da Máquina cc, *Motron*.

Com os dados apresentados no Quadro 1 pode-se determinar o valor do torque nominal da máquina utilizando-se a Equação 3, sendo este igual a 2,65 N.m. Este valor pode ser utilizado como base para comparações e validação de resultados.

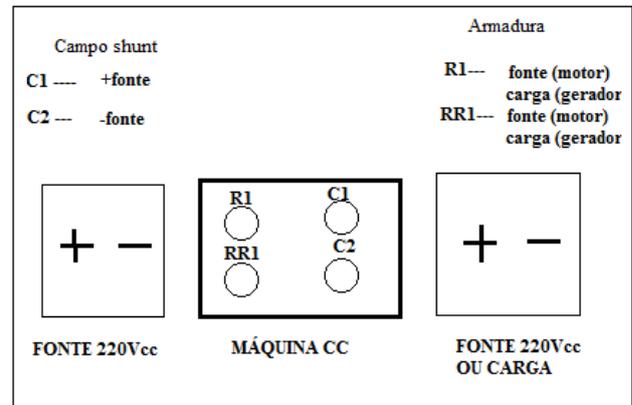
A máquina de corrente contínua possui configurações para ligação apresentadas na Figura 16. A Figura 17 apresenta a ligação da máquina CC em excitação independente.

Figura 16 - Bornes de ligação da máquina cc.



Fonte - Adaptado de (LORENZO, 2014).

Figura 17 – Montagem da máquina cc



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A identificação dos bornes para ligação é fornecida pelo fabricante do *kit* didático. O Quadro 2 descreve os bornes com as respectivas estruturas da máquina de corrente contínua.

Quadro 2 - Bornes de ligação da Máquina cc.

BORNES	NOMECLATURA
R1-RR1	Armadura
C1-C2	Campo
CC1-CC2	<i>Compound</i>
R2-RR2	Auxiliar
CS1-CS2	Campo Série

Fonte – Adaptado de (LORENZO, 2014).

A proposta deste trabalho é a medição do torque das máquinas de corrente contínua, operando como motor e como gerador. Para tal, é utilizado um conjunto de máquinas acopladas que possui uma máquina cc, uma máquina síncrona e uma máquina assíncrona. Assim, para a avaliação da operação da máquina cc como motor, a máquina síncrona será utilizada como gerador e nela serão acopladas cargas resistivas para verificação de condições de carga distintas. Já na operação da máquina cc como gerador, será acoplado ao seu eixo o motor de indução, que será responsável pela disponibilização da força motriz necessária para a operação do gerador de corrente contínua e cargas em seus terminais de saída. A seguir são detalhadas as operações como gerador e como motor da máquina cc, respectivamente.

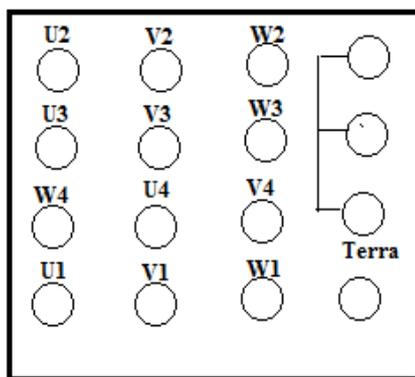
I. Operação como gerador

Para que a máquina de corrente contínua opere como gerador é necessário uma fonte mecânica rotativa para girar seu eixo. Neste caso, fez-se uso de uma máquina assíncrona ou Motor de Indução Trifásico (MIT), que está acoplado ao mesmo eixo da máquina cc, sendo ambos da empresa *De Lorenzo*.

O Motor de indução do *kit* é do tipo rotor bobinado, utilizou-se de reostato trifásico que foi possível o controle da velocidade do motor e é utilizado para partida do mesmo.

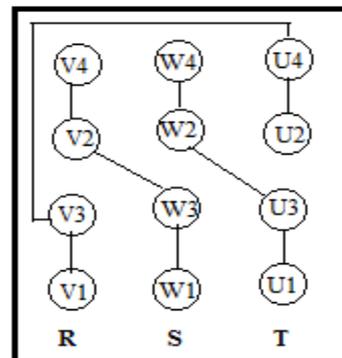
O motor possui algumas configurações de fechamento de acordo com os níveis de tensão desejados como: a-Triângulo (Δ), b-Estrela (Y), c-Duplo-Triângulo ($\Delta\Delta$) e d-Duplo-Estrela (YY). Neste trabalho o fechamento é realizado em $\Delta\Delta$ na tensão de 220V. A disposição dos bornes para fechamento e ilustração da ligação é apresentada nas Figura 18 e Figura 19.

Figura 18 - Bornes do Motor de indução.



Fonte – Adaptação de (LORENZO, 2014).

Figura 19- Montagem do motor de indução em 220 V.



Fonte - Acervo próprio autor

Para alimentação do MIT é utilizado um circuito trifásico proveniente do *kit* da Exsto, Figura 20 presente no laboratório de máquinas.

Figura 20- Kit Exsto para alimentação trifásica (220V).



Fonte - Acervo do próprio autor.

Na operação da máquina de corrente contínua como gerador, utiliza-se um circuito monofásico de resistores de potência como carga, mostrados nas Figura 21 e Figura 22 . A resistência de cada carga individual é de 486Ω , está também faz parte do kit e possui esse valor já determinado, e o chaveamento das cargas permite a inserção das mesmas em paralelo.

Figura 21 -Carga para Gerador cc.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Figura 22 - Adição de uma carga no Gerador cc.

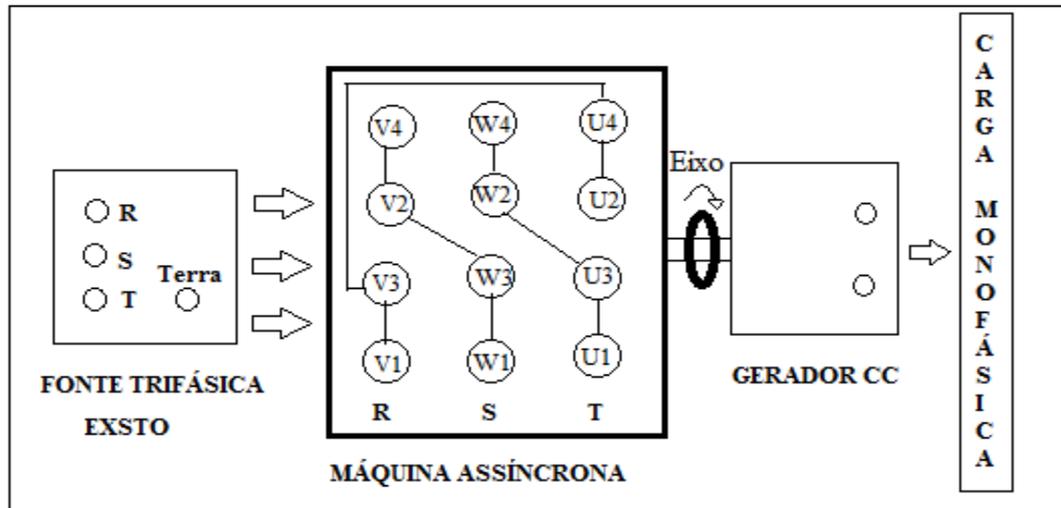


Fonte - Acervo próprio autor (2018).

As cargas são adicionadas uma a uma, levando em consideração os valores nominais da corrente de campo e de armadura, assim como as tensões dos enrolamentos conforme descrito no Quadro 1.

A Figura 23, ilustra a montagem completa para avaliação do torque da máquina cc funcionando como gerador, para diferentes cargas resistivas e tendo como fonte de força motriz o motor de indução.

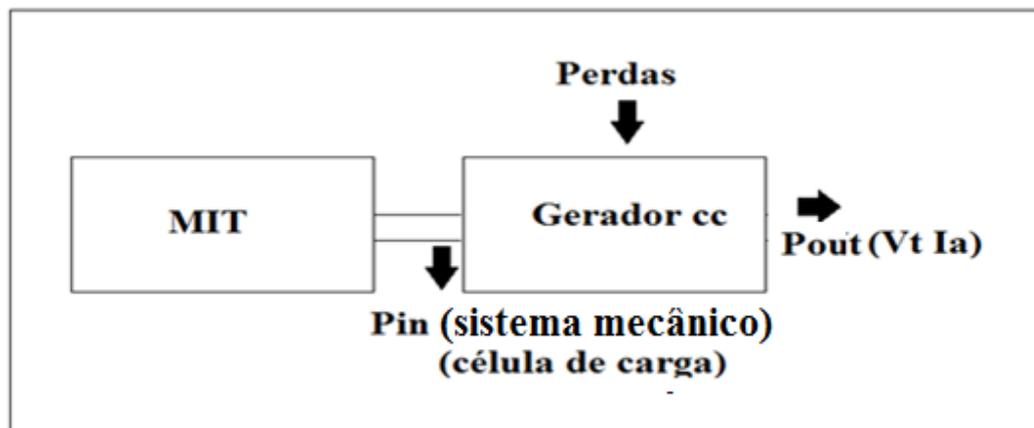
Figura 23 - Máquina cc montada como gerador.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A Figura 8 apresenta uma ilustração do diagrama de potência do gerador cc. Esta análise será fundamental para obtenção do torque por meio das equações e medições de correntes, tensões e velocidades. Assim, com o diagrama de potência supracitado, pode-se identificar no conjunto das máquinas as respectivas potências de entrada (P_{in}), perdas e potências de saída (P_{out}) como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Diagrama de potência do gerador cc.

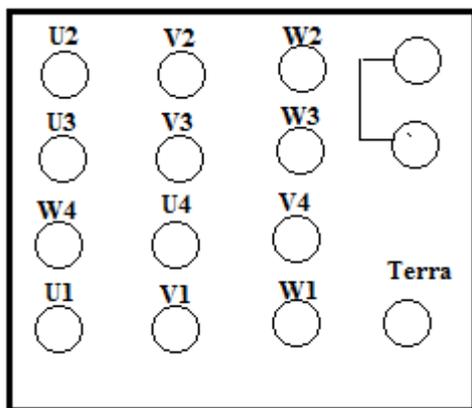


Fonte- Acervo próprio autor (2018).

II. Operação como Motor

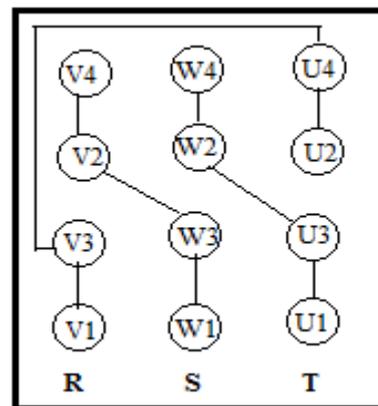
Para a máquina trabalhando como motor cc é utilizado uma máquina síncrona do *kit*, acoplada ao rotor da máquina cc, trabalhando como gerador e, em seus terminais de saída, são adicionadas cargas trifásicas em fechamento com tensão 220V. São utilizadas duas cargas, ligadas em estrela com valor de resistência de fase de 968Ω cada, cargas presente no kit e fechamento proporciona esse valor. A adição das cargas é realizada em no funcionamento com gerador. O fechamento dos terminais da máquina assíncrona é realizado em $\Delta\Delta$ na tensão de 220V. A Figura 25 ilustra os bornes de conexão do gerador síncrono e a Figura 26 representa o fechamento da máquina síncrona como gerador com tensão de saída em 220 V.

Figura 25- Bornes de conexão do gerador síncrono.



Fonte – Adaptação de (LORENZO, 2014).

Figura 26- Montagem do gerador síncrono.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

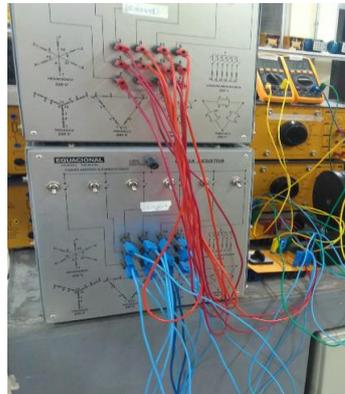
As Figura 27 e Figura 28 ilustram o fechamento das cargas trifásicas. Já a Figura 29 representa as chaves trifásicas utilizadas para manobras de inserção e retirada de cargas.

Figura 27 - Carga trifásica do kit De Lorenzo



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Figura 28 - Carga trifásica montada.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

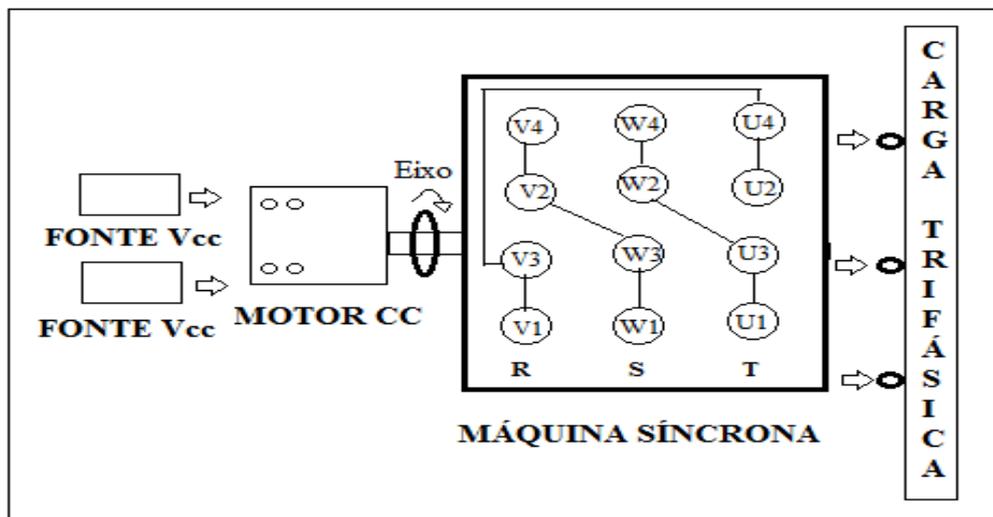
Figura 29 - Chaves trifásicas usadas.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A Figura 30, ilustra a montagem completa para avaliação do torque da máquina CC funcionado como motor, para adição de duas cargas trifásicas adicionais ao gerador síncrono acoplado ao eixo.

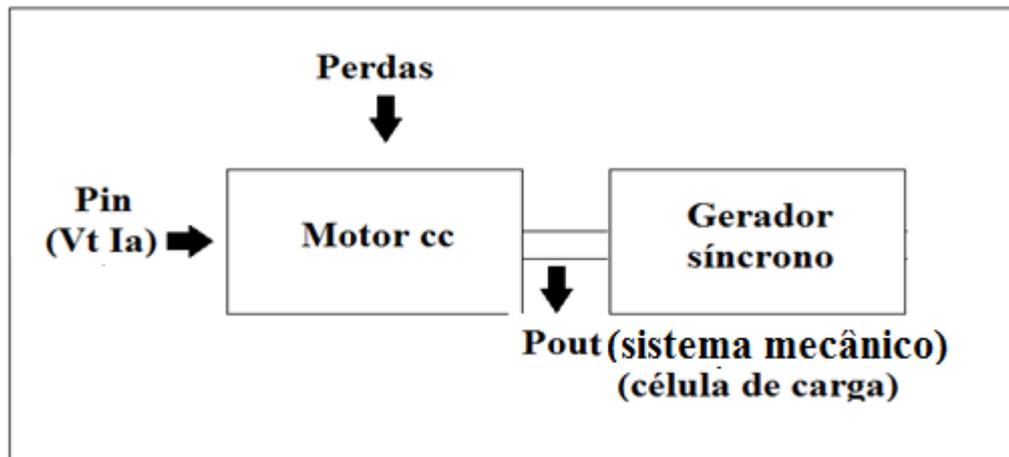
Figura 30 - Máquina cc montada como motor



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A Figura 9 apresenta uma ilustração do diagrama de potência do motor cc. Esta análise é fundamental para obtenção do torque por meio das equações e medições de correntes, tensões e velocidades. Assim, com o diagrama de potência mencionado, podem-se identificar no conjunto das máquinas as respectivas potências de entrada, perdas e potências de saída como mostra a Figura 31.

Figura 31 - Diagrama de potência do motor cc



Fonte – Acervo próprio autor (2018).

Os dados de placa das duas máquinas, síncrona e assíncrona, encontram-se no Quadro abaixo. Os valores de tensões e correntes são monitorados a todo o momento durante os ensaios para garantia da segurança dos ensaios e atendimento das especificações nominais.

Quadro 3- Dados de placa das máquinas síncrona e assíncrona da Motron.

	ITEM	DESCRIÇÃO	GRANDEZA
Máquina síncrona	Potência	500	Watt (W)
	Tensão	220-380-440-760	Volt (V)
	Polos	4	-
	Tensão de excitação	12	Volt (Vcc)
	Frequência	60	Hertz (Hz)
	Velocidade	1800	Rotação por minuto (rpm)
Máquina Assíncrona	Potência	500	(W)
	Tensão	220-380-440-760	Volt(V)
	Polos	4	-
	Corrente Armadura	3,8	Ampere (A)
	Frequência	60	Hertz (Hz)
	Velocidade	1800	Rotação por minuto (rpm)

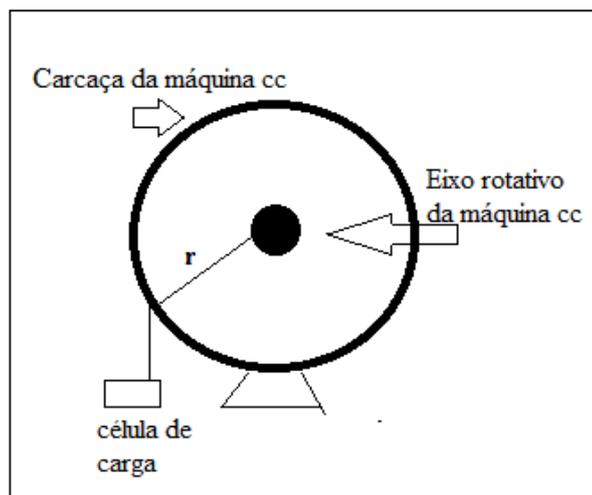
Fonte – Adaptado de (LORENZO, 2014).

Os valores de torque obtidos pela célula de carga serão comparados com valores de torque calculados por meio da Equação 3, que relaciona torque e velocidade. Desta forma, faz-se necessária a medição da velocidade de operação da máquina cc para cada condição e carga. Esta medição foi realizada utilizando-se o tacômetro TD-812 INSTRUTHERM digital portátil óptico. Ressaltando que a potência da máquina, é obtida utilizando-se valores de tensão e corrente medidos com multímetros durante a realização dos ensaios.

3.1.2 Célula de Carga

As células de carga são dispositivos utilizados em muitas aplicações para medição de “peso” em balanças ou para medição do torque em máquinas elétricas, neste último é necessário realizar calibrações da célula antes de acoplamento na máquina. O conjunto de máquinas acopladas do laboratório possui uma célula de carga instalada na carcaça da máquina cc, conform mostrado na Figura 32, com a respectivo informação mediu-se o diâmetro da carcaça da máquina com um paquímetro e determinou o raio (r) que é a distância da força para obtenção do torque. Com estas informações o trabalho realiza a medição do torque sensibilizado pela célula de carga e adequa este valor para a unidade N.m, unidade típica de torque para o estudo das máquinas elétricas. Este valor medido é processado pelo arduino e apresentado em um *display*.

Figura 32 - Localização da célula de carga na máquina CC.

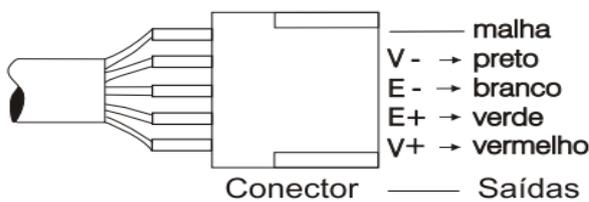


Fonte: Acervo próprio autor (2018).

Para calibração da célula de carga, utiliza-se uma balança digital e são realizadas três medições. Apesar de possuírem a mesma configuração de fábrica, podem ocorrer variações de uma célula para outra, por isso, sempre que substituir o dispositivo é importante à calibração do mesmo.

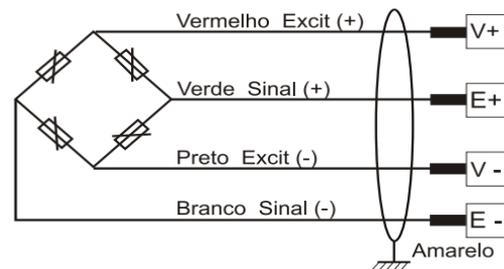
Além disso, é necessário que elas sejam ligadas corretamente conforme as especificações da Figura 33 e Figura 34.

Figura 33 - Conector de ligação.



Fonte – Extraído de (IWM, 2015)

Figura 34 - Cabos de ligação.



Fonte – Extraído de (IWM, 2015)

A célula de carga presente no Laboratório de Máquinas é do tipo Single Point (SPL-40 kg) e possui algumas especificações técnicas importantes que devem ser seguidas conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Especificações nominais da célula de carga.

ESPECIFICAÇÃO	GRANDEZA	DESCRIÇÃO
Marca	-	IWM
Sensibilidade	mV/V	2,0 +/- 10%
Resistência de isolamento	MΩ	>2000/50VDC
Impedância de entrada	Ω	410 +/- 30
Impedância de saída	Ω	350 +/- 3
Tensão recomendada	V	6 ~10
Tensão máxima	V	15
Tamanho da plataforma	mm	350 x 350
Material do corpo	Alumínio anodizado	-
Tipo do cabo	Redondo de PVC com malha interna contra EMI. Fios #AWG 22	

Fonte – Extraído de (IWM, 2015)

Assim, para a calibração da célula de carga, utiliza-se uma balança digital presente no Laboratório de Máquinas e alguns pesos de liga de latão com padrão de massa. Assim, é possível realizar a calibração da célula de carga, adicionando pesos à balança na Figura 35 e à célula de carga na Figura 36 até que o valor da balança seja mostrado no *display* LCD conforme ilustra na Figura 37. Fez-se uso de três medições para calibração.

Figura 35 - Pesos na balança



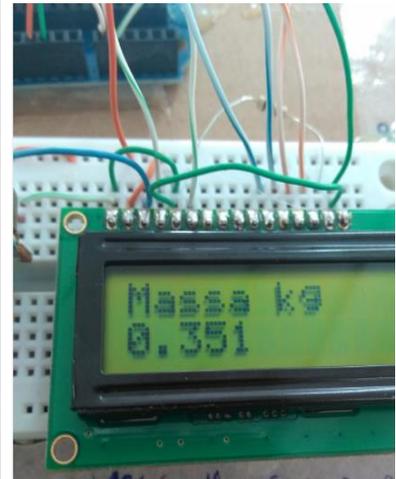
Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Figura 36 - Peso na célula de carga



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Figura 37 - Ajuste para o *display* LCD



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

3.1.3 Módulo HX711

O módulo HX711, comprado já pré fabricado, é um conversor (A/D) e amplificador de sinal e é utilizado para amplificar o sinal de saída da célula de carga, melhorando a perspectiva das amostras. Tendo a célula de carga sensibilidade de 2mV/V e sabendo-se que a resolução do arduino é de 4,9 mV, sem o módulo, o valor máximo de amostragem seria de 6 amostras, conforme Equação 14, porém ao ampliar o sinal existe uma sensibilidade maior para processamento do arduino.

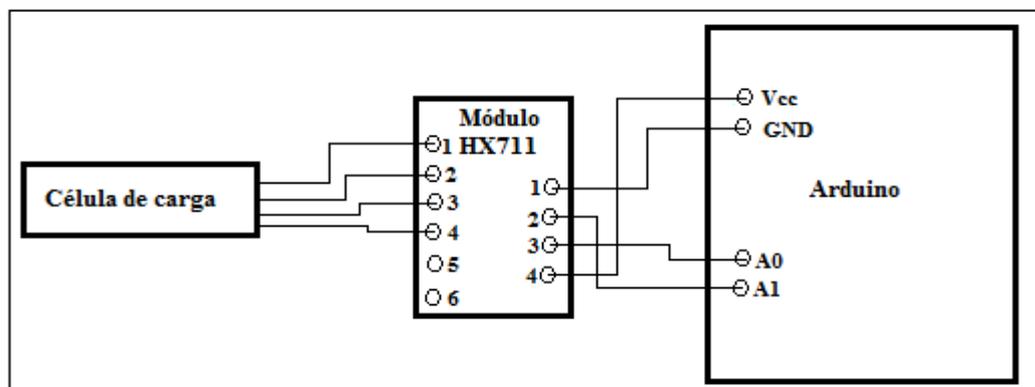
O módulo possui quatro pinos de interligação com o Arduino e seis pinos de interligação com a célula de carga. Os pinos que interligam a célula podem ser conectados ao canal A ou B. O canal A proporciona um ganho de 126 ou 64 *bits* correspondentes a 20mV ou 40mV, depende exclusivamente do parâmetro definido no momento da programação. Já o canal B possui um ganho fixo de 32 *bits* e requer que a conexão seja realizada nos pinos de B+ e B-. Para interligação da célula ao módulo e o módulo ao Arduino, os pinos de conexão são descritos no Quadro 5 e a forma de ligação na Figura 38.

Quadro 5- Dados do módulo HX711.

	PINO FIGURA	PINO DATASHEET	DESCRIÇÃO
Arduino	1	GND	Terra
	2	DT	Saída serial de dados
	3	PD_SCK	Entrada de desligamento de energia e <i>clock</i>
	4	Vcc	Tensão 5V
Célula de carga	1	E+	Alimentação carga (2.6~5.5V)
	2	E-	Alimentação Terra
	3	A-	Canal A (entrada negativa)
	4	A+	Canal A (entrada negativa)
	5	B-	Canal B (entrada negativa)
	6	B+	Canal B (entrada positiva)

Fonte - Adaptada do datasheet (SEMICONDUCTOR, 2018).

Figura 38 - Ligação do Módulo HX711



Fonte - Adaptada do *datasheet* (SEMICONDUCTOR, 2018).

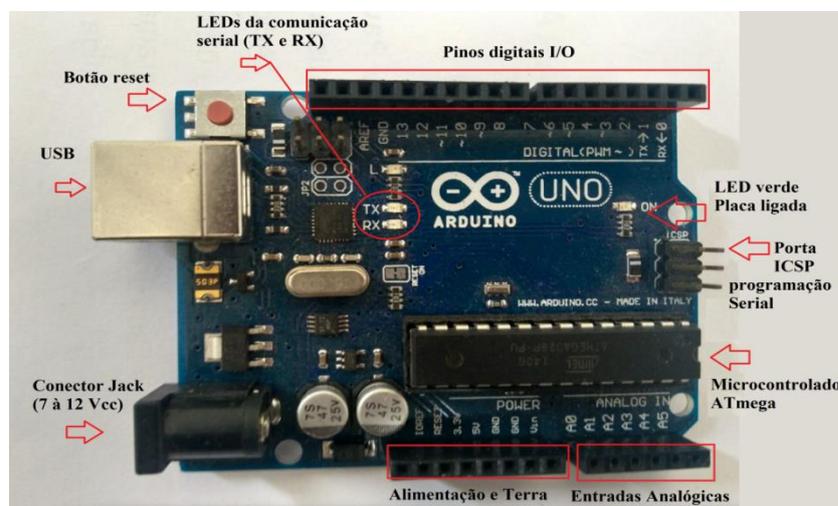
3.1.4 Arduino UNO

A plataforma Arduino escolhida é a UNO, esta escolha é justificada pelo número reduzido de entradas e saídas a ser controlada. Além disso, possuem entrada USB para se comunicar com dispositivos como computadores e *notebooks* com *software* de fácil instalação e utilização. A plataforma arduino é utilizada para processar o sinal proveniente do torque da máquina, que sensibiliza a célula de carga e envia sinais ao módulo HX711, responsável por amplificar e converte o sinal de forma analógico para digital e envia ao arduino. O arduino,

além de processar o sinal realiza os cálculos desejados para conversão do sinal de entrada por meio de algoritmos de programação em dado de torque da máquina e envia dados por meio dos pinos de saída ao *display* LCD.

O arduino vem incorporado a uma placa, como mostra a Figura 39. Esta placa possui com um botão de *reset* que reinicia a programação implementada no Arduino, também possui pinos de entrada e saída digital, pinos de entradas analógicas e um microcontrolador *ATmega*, que é responsável pela comunicação com computadores e *notebooks*.

Figura 39 - Plataforma Arduino UNO



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A tensão de funcionamento da placa é de 5V e necessita de uma tensão de entrada de 7 a 12 Vcc (tensão de DC) no conector *Jack*. Valores inferiores ou superiores a este podem ocasionar variação na tensão de funcionamento da placa, para controle dessa tensão existe um regulador de tensão. Através do cabo USB o valor de tensão não necessita de regulação, pois a porta serial já proporciona este intervalo. Tendo assim duas formas de alimentação do dispositivo.

Os conectores de Alimentação e Terra da Figura 39, possuem a alimentação de *Shields*, módulos e circuitos externos que podem ser de 5 volts ou 3,3 volts, além de um conector para botão *reset* externo a placa.

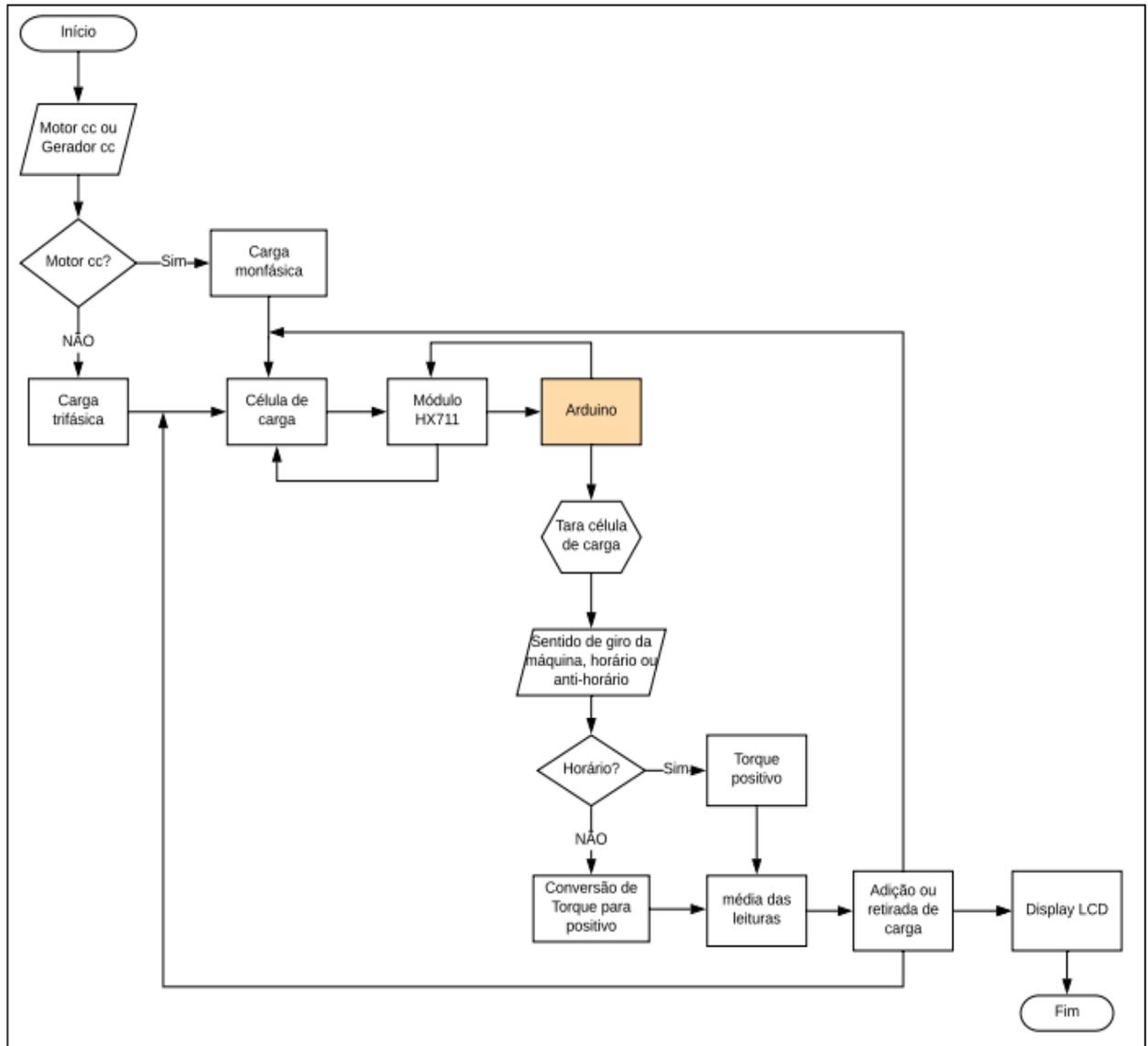
O arduino possui 14 pinos de entradas e saídas digitais, nos quais 6 destes podem ser usados como PWM. Destes quatorze pinos, seis serão utilizados para alimentar o *display* LCD. Além desses pinos, existem seis pinos de entrada analógica, nos quais dois são utilizados neste trabalho para receber os valores da célula de carga.

O processamento do Arduino pode ser mais bem compreendido por meio do fluxograma apresentado na Figura 40.

A Figura 40 descreve o seguinte funcionamento do sistema. O usuário monta a máquina CC como motor ou gerador, caso motor necessita de cargas monofásica se não carga trifásica. A célula de carga será sensibilizada, enviando o sinal ao módulo que amplia o sinal e envia ao arduino. Inicialmente o arduino “tara” o sistema, deve ser feito com tudo desligado e apenas a plataforma energizada. A célula vai detectar se a carcaça esta realizando força no sentido horário ou anti-horário, se horário o torque será positivo, caso contrário o arduino converte o torque em positivo. Realiza-se a média das medidas e um *debouce* para não ter erros na mudança de cargas e por fim mostra no *display* LCD o torque e pode-se adicionar o realizar a retirada de carga que realizará todo processo novamente.

O código que realiza todo o procedimento apresentado no fluxograma é apresentado no Anexo I.

Figura 40 - Fluxograma do processamento do Arduino.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

A determinação do torque da máquina proveniente do arduino baseia-se na Equação 8. Sabendo-se que o valor da força é um dado em Newton e a calibração da célula que é realizada em kgf, existe a necessidade de conversão de unidade. Esta é feita multiplicando o valor do peso em kgf vezes gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), assim determina-se a força da máquina em N. Com o uso de um paquímetro mediu-se o valor do diâmetro da carcaça da máquina, determinou-se o raio de distância entre o eixo de giro e a célula de carga de 0,0085 metros. Desta forma, a variável de dados do arduino recebe o valor do “peso” sobre a célula e realiza os cálculos considerando a gravidade e o raio da máquina, para enfim disponibilizar o torque instantâneo no *display* de LCD.

O sistema possui “tara zero”, ou seja, toda vez que o arduino é desligado, o sistema reinicia as variáveis são novamente zeradas. É importante ressaltar que não se deve desligar o arduino com a máquina ligada, já que o sistema realiza a “tara zero” com o que estiver sobre a superfície da célula de carga, caso exista alguma força ou peso mesmo sobre a carcaça da máquina, o erro de tara levará à erros de leitura do sistema.

3.1.5 Display LCD

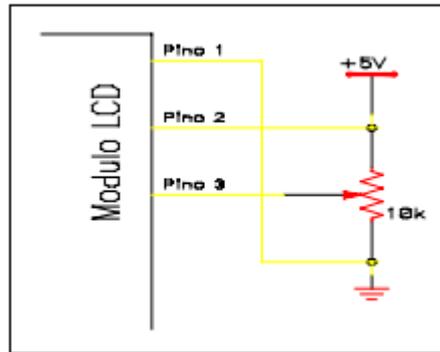
O *Display LCD* utilizado foi o 16x2 por ser um módulo que possui 16 pinos, suas características principais são apresentadas no Quadro 6. Para alimentação da luz de fundo (*backlight*), utiliza-se anodo no pino 15 e catodo no pino 16, com corrente de alimentação de 100 mA. O pino 3 possui regulação de intensidade de luz emitida ou ajuste de contraste, essa configuração pode ser ajustada com um potenciômetro, como mostra a Figura 41. Assim os caracteres aparecerem com maior ou menor intensidade no *display*.

Quadro 6 - Pinagem do Módulo LCD.

PINO	FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
1	Alimentação	Terra ou GND
2	Alimentação	Vcc ou +5V
3	V0	Tensão para ajuste de contraste
4	Rs seleção:	1-Dado, 0-Instrução
5	R/W seleção:	1-Leitura, 0-Escrita
6	E Chip select	1 ou (1 – 0)- Habilita, 0- Desabilita
7	B0 LSB	Barramento de Dados
8	B1	
9	B2	
10	B3	
11	B4	
12	B5	
13	B6	
14	B7 MSB	
15	A (quando existir)	Anodo p/ LED <i>backlight</i>
16	K (quando existir)	Catodo p/ LED <i>backlight</i>

Fonte – Extraído de (BARBACENA,1996).

Figura 41 - Ligação do potenciômetro.



Fonte: Extraído de (BARBACENA,1996).

O sistema é mostrado na Figura 42 em que encontra-se o *display* LCD com a informação do torque no sentido horário ou anti-horário, *plug* de alimentação externa que deve ser ligado em 110V, um botão liga/desliga e a saída para a célula de carga.

Figura 42 - Montagem do *display* com o Arduino no projeto.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de se verificar o funcionamento do modelo proposto, foi realizada uma série de testes, da máquina CC operando como motor e como gerador, para diferentes condições de carga. Simultaneamente, são aferidos valores de tensões, correntes e velocidade angular para o cálculo do torque e validação da medição de torque realizada pela célula de carga.

4.1. Calibração da célula de carga

Os primeiros resultados apresentados estão associados à calibração da célula de carga que se trata da etapa inicial para desenvolvimento do dispositivo.

A célula de carga utilizada é o modelo SPL-40kg. A calibração é realizada utilizando-se valores em kg no *display*, balança digital do laboratório de Máquinas Elétricas e com auxílio dos pesos padronizados. Para garantir a confiabilidade das medições e evitar erros, são realizadas três medições, tanto na balança quanto na célula de carga. Os respectivos dados e gráficos são apresentados na Tabela 1 e no Gráfico 1.

Para cada calibração são adicionados na balança um a um, 17 (dezesete) unidades de mesma massa, com valor de aproximadamente 50 gramas cada uma, quando o valor é registrado na balança os pesos são transferidos à célula de carga, até ambas receberem os 17(dezesete). Os dados coletados nas três calibrações são apresentados na Tabela 1.

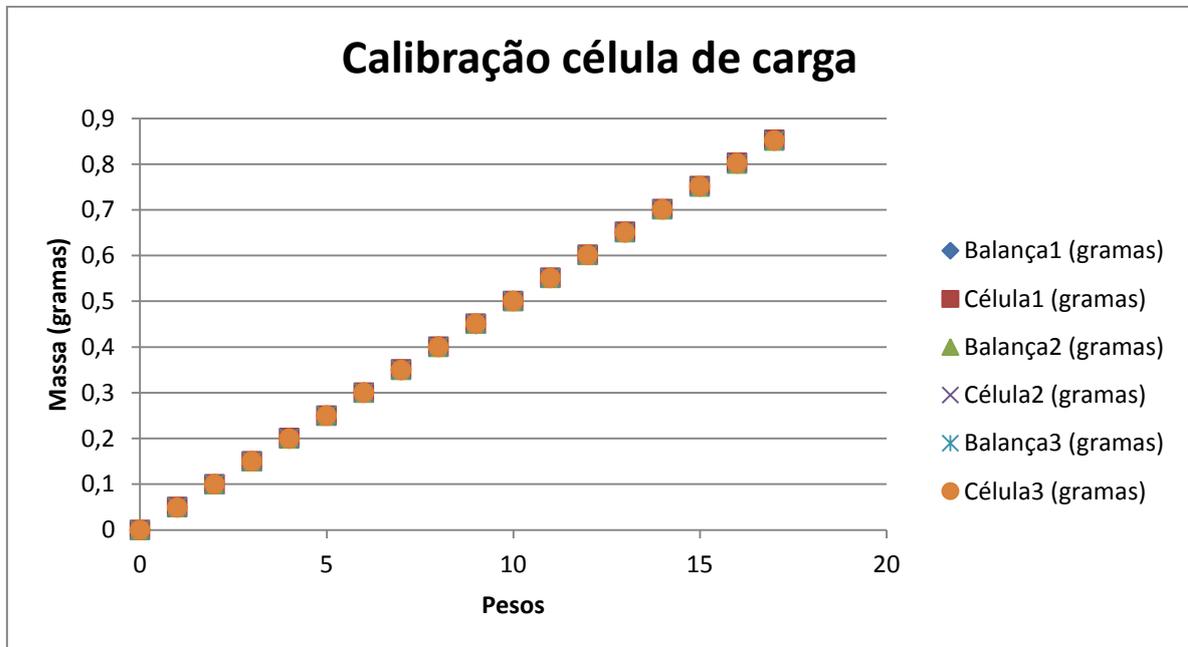
Tabela 1 - Dados coletados da balança e da célula de carga realizado 3 x.

Pesos	1º Calibração da célula de carga			2º Calibração célula de carga			3º Calibração célula de carga		
	Balança1 (gramas)	Célula1 (gramas)	Erro	Balança2 (gramas)	Célula2 (gramas)	Erro	Balança3 (gramas)	Célula3 (gramas)	Erro
0	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00%
1	0,050	0,050	0,00%	0,050	0,049	2,00%	0,050	0,049	2,00%
2	0,100	0,100	0,00%	0,100	0,100	0,00%	0,100	0,100	0,00%
3	0,150	0,150	0,00%	0,150	0,150	0,00%	0,150	0,150	0,00%
4	0,200	0,201	0,50%	0,200	0,199	0,50%	0,200	0,200	0,00%
5	0,250	0,250	0,00%	0,250	0,249	0,40%	0,250	0,250	0,00%
6	0,300	0,300	0,00%	0,300	0,300	0,00%	0,300	0,300	0,00%
7	0,350	0,351	0,29%	0,350	0,350	0,00%	0,350	0,350	0,00%
8	0,401	0,401	0,00%	0,400	0,400	0,00%	0,400	0,400	0,00%
9	0,450	0,451	0,22%	0,451	0,451	0,00%	0,451	0,451	0,00%
10	0,501	0,501	0,00%	0,501	0,501	0,00%	0,501	0,501	0,00%
11	0,551	0,552	0,18%	0,551	0,551	0,00%	0,551	0,551	0,00%
12	0,601	0,602	0,17%	0,601	0,601	0,00%	0,601	0,601	0,00%
13	0,651	0,652	0,15%	0,651	0,651	0,00%	0,651	0,651	0,00%
14	0,701	0,702	0,14%	0,701	0,701	0,00%	0,701	0,701	0,00%
15	0,751	0,752	0,13%	0,751	0,752	0,13%	0,751	0,752	0,13%
16	0,801	0,803	0,25%	0,801	0,802	0,12%	0,801	0,802	0,12%
17	0,851	0,853	0,24%	0,851	0,852	0,12%	0,851	0,852	0,12%

Fonte - Acervo próprio autor (2018).

O Gráfico 1 ilustra a calibração da célula de carga tendo com referência a balança digital.

Gráfico 1 - Calibração da célula de carga

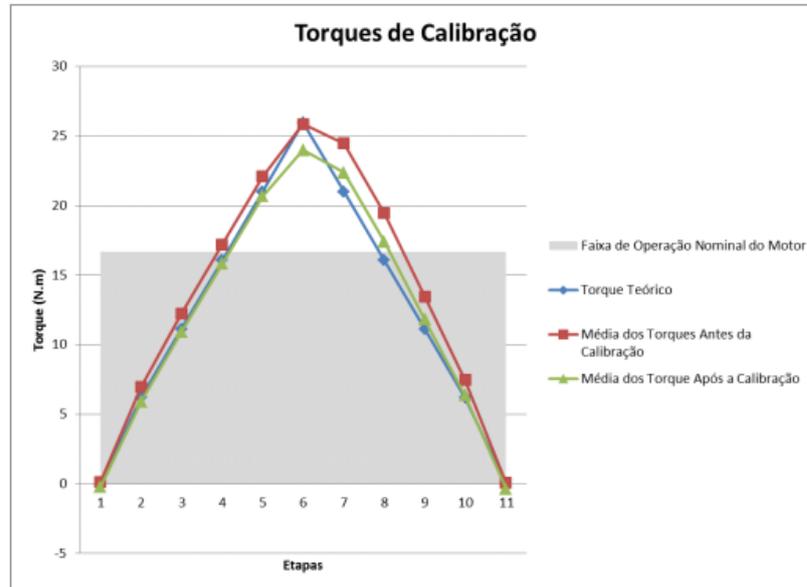


Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Observa-se que os dados coletados da célula de carga estão sobrepostos aos dados registrados pela balança, isso se dá devido ao ajuste fino realizado de massa em massa. De acordo com a Tabela 1, os erros são pequenos da célula em relação à balança. Atendendo a expectativa de determinar a sensibilidade da superfície da célula de carga.

A metodologia para calibração da célula do sistema mencionado acima pode ser comparado com a calibração da célula de carga do Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica apresentado por Souza (2014). Este realiza a calibração do torque do motor adicionando-se carga e retirando-se carga como mostra a Tabela 2, a mesma metodologia é realizada neste trabalho, porém com máquina em estado estacionário e valores determinados em kg.

Gráfico 2 - Calibração da célula de carga de Souza (2014).



Fonte - Extraído de (SOUZA 2014).

Tabela 2 -Dados do Gráfico plotado de Souza (2014).

	Torque Teórico (N.m)	Média do Torque Antes da Calibração (N.m)	Média do Torque Após a Calibração (N.m)
Etapa 1	$0 \pm 0,0002$	$0,15 \pm 0,093$	$-0,23 \pm 0,101$
Etapa 2	$6,19 \pm 0,0248$	$6,96 \pm 0,49$	$5,9 \pm 0,144$
Etapa 3	$11,13 \pm 0,0445$	$12,22 \pm 0,158$	$10,91 \pm 0,159$
Etapa 4	$16,06 \pm 0,0643$	$17,22 \pm 0,482$	$15,81 \pm 0,035$
Etapa 5	$21,01 \pm 0,084$	$22,09 \pm 0,53$	$20,68 \pm 0,182$
Etapa 6	$25,96 \pm 0,1038$	$25,86 \pm 0,286$	$24,01 \pm 0,155$
Etapa 7	$21,01 \pm 0,084$	$24,47 \pm 0,429$	$22,38 \pm 0,306$
Etapa 8	$16,06 \pm 0,0643$	$19,47 \pm 1,661$	$17,4 \pm 0,245$
Etapa 9	$11,13 \pm 0,0445$	$13,47 \pm 1,346$	$11,82 \pm 0,271$
Etapa 10	$6,19 \pm 0,0248$	$7,46 \pm 0,434$	$6,35 \pm 0,142$
Etapa 11	$0 \pm 0,0002$	$0,08 \pm 0,066$	$-0,36 \pm 0,041$

Fonte - Extraído de (SOUZA, 2014).

4.2. Dados do sistema

Após a calibração da célula de carga e com o *display* apresentando os dados em massa (kg), a programação do arduino é alterada para que os valores de torque sejam expressos em

N.m, que é a unidade do Sistema Internacional (SI) para tal grandeza, levando em consideração a gravidade e a distância, conforme apresentado na metodologia.

No início, a proposta do trabalho era utilizar o *kit De Lorenzo* com a máquina de corrente contínua e a máquina síncrona, ambas trabalhando como motor e gerador. Porém ao iniciar os procedimentos de ligação destas, percebeu-se que a máquina síncrona não podia ser operada como motor, fato confirmado ao entrar em contato com o fornecedor. A utilização do motor síncrono como força motriz para o gerador cc seria uma opção melhor, pelo fato de não existir alteração na velocidade do mesmo. Assim, diante da impossibilidade de ligação da máquina como motor a opção foi a utilização do motor de indução trifásico para este fim.

Observou-se que a leitura da célula de carga emitia dados positivos quando o MIT estava no sentido horário e leituras negativas no sentido anti-horário. Assim, foi necessário um ajuste matemático no arduino para conversão do sistema em valores positivos.

Conforme dito anteriormente, a máquina de corrente contínua é excitada de forma independente, tendo-se o cuidado de obedecer ao valor nominal da máquina, presente no Quadro 1. Desta forma existe a garantia de que, a adição ou diminuição de carga não interfere na tensão e corrente de excitação, desta forma a queda de tensão está unicamente relacionada à corrente da carga. Para a medição do sistema com outras configurações devem ser analisados já que o valor das perdas *shunt* interfere nos dados calculados, porém não limita o sistema de funcionar. Sendo indicado como trabalhos futuros estes estudos.

4.3. Resultados da máquina cc

A seguir são apresentados os resultados relacionados à operação da máquina cc como gerador e como motor respectivamente.

4.3.1 Máquina de corrente contínua como gerador CC

A Tabela 3 apresenta todos os dados de medição realizados com a máquina operando como gerador CC no sentido horário.

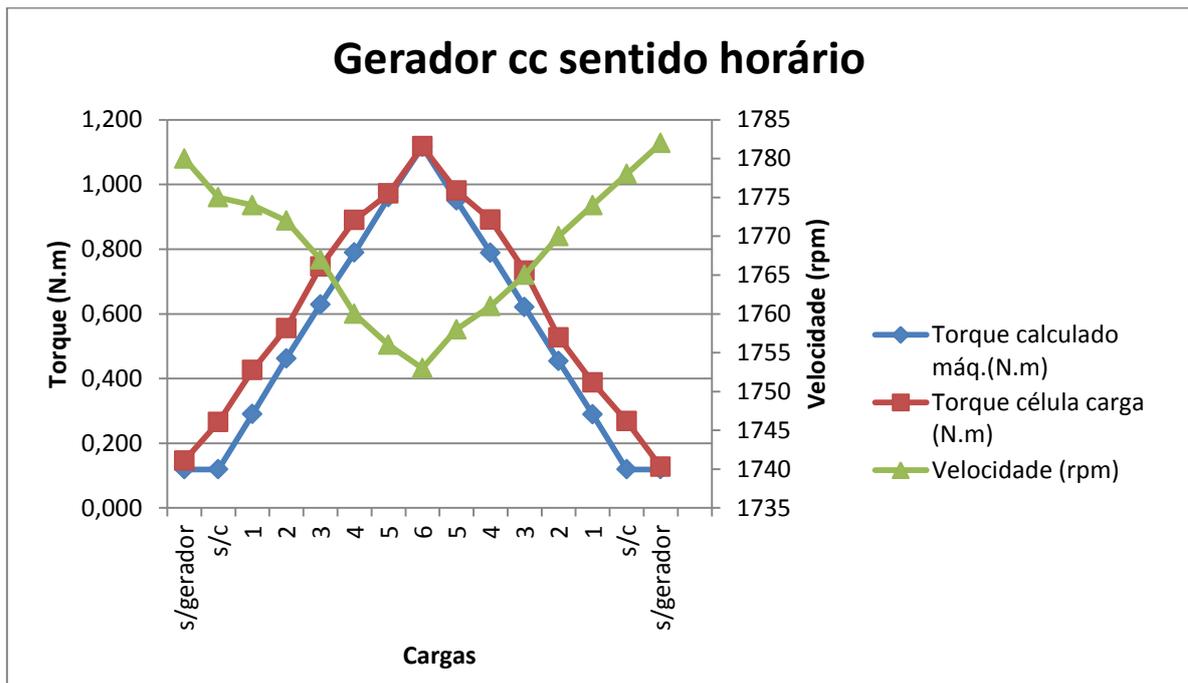
Tabela 3 - Dados Gerador cc operando no sentido horário.

	If (A)	Vf (V)	Ia (A)	Vt (V)	Velocidade máquina (rpm)	Perdas armadura (W)	Perdas magnetização (W)	Potência entrada (W)	Torque calculado (N.m.)	Torque célula carga (N.m)
s/gerador	0,00	0,00	0,00	12,40	1780	0,00	22,17	22,17	0,119	0,146
s/c	0,4	112,60	0,00	132,40	1775	0,00	22,11	22,11	0,119	0,265
1	0,39	112,60	0,24	130,70	1774	0,38	22,10	53,85	0,290	0,426
2	0,39	112,40	0,48	129,40	1772	1,54	22,07	85,73	0,462	0,556
3	0,39	112,40	0,71	128,00	1767	3,37	22,01	116,27	0,629	0,746
4	0,39	112,20	0,93	126,50	1760	5,79	21,92	145,36	0,789	0,89
5	0,39	112,50	1,16	125,50	1756	9,01	21,87	176,47	0,960	0,972
6	0,39	112,30	1,37	124,40	1753	12,57	21,83	204,84	1,116	1,118
5	0,39	112,00	1,15	125,40	1758	8,86	21,90	174,97	0,951	0,981
4	0,39	112,00	0,93	126,50	1761	5,79	21,93	145,37	0,789	0,891
3	0,38	112,90	0,7	127,80	1765	3,28	21,98	114,73	0,621	0,733
2	0,38	118,80	0,47	128,80	1770	1,48	22,05	84,06	0,454	0,527
1	0,38	111,80	0,24	130,20	1774	0,38	22,10	53,73	0,289	0,388
s/c	0,38	117,00	0,00	131,80	1778	0,00	22,15	22,15	0,119	0,268
s/gerador	0,00	0,00	0,00	12,700	1782	0,00	22,20	22,20	0,119	0,127

Fonte – Acervo próprio autor (2018).

Para melhorar a visualização dos resultados, o Gráfico 3 apresenta os dados de torque e velocidade. A curva em vermelho apresenta os dados de torque medidos pela célula de carga já convertidos em N.m e a curva em azul, mostra os resultados de torque calculado utilizando-se os valores de corrente, tensão e velocidade medidos a Equação 3. A curva verde, apresenta a variação da velocidade da máquina para cada condição de carga.

Gráfico 3 - Gráfico gerador cc no sentido horário.



Fonte - Acervo próprio autor (2018)

Observa-se por meio do Gráfico 3 que, a adição da carga provoca por consequência uma elevação da corrente de armadura do sistema e consequentemente da potência e do torque. Nesta situação observa-se uma diminuição da velocidade. Com a retirada das cargas acontece o processo inverso. Este comportamento está em concordância com o comportamento de geradores cc encontrados na literatura, tanto os valores de torque quanto os valores de velocidade.

A diferença entre os valores medidos e calculados pode estar associada a erros e medição inerentes à precisão e resolução de instrumentos de medição. Também considerar-se erro de aproximação nos cálculos das potências de entrada, saída e perdas.

Para determinar o desvio padrão do erro do sistema utilizou-se a Equação 15:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i - M_a}{n}} \quad 15$$

No qual:

DP é o desvio padrão;

\sum símbolo de somatório. Indica a soma dos termos, desde a primeira posição ($i=1$) até a posição n ;

X_i é o valor na posição i no conjunto de dados;

M_a é a média aritmética de dados;

n é o número de dados;

Para determinar a média aritmética usa-se a Equação 16:

$$M_a = \frac{\sum_{i=1}^n n}{n} \quad 16$$

Assim é possível determinar o valor de desvio padrão do erro entre a curva do torque calculada da máquina e do torque medido pela célula de carga. Com os dados inseridos na Tabela 3, realiza-se a equação de erro no excel e em seguida utiliza-se a Equação 16 e Equação 15 e determinou-se a média de erro e desvio padrão do gerador cc no sentido horário, sendo um dado em porcentagem de 18,79% e 0,1655.

Para o cálculo dos valores de torque, considera-se que as leituras de medição de corrente e tensão são realizadas na saída do gerador, logo os dados de leitura são potência elétrica de saída. Utilizando-se o diagrama de potência apresentado na Figura 8 determina-se que o torque de saída pode ser calculado pela divisão da potência de saída pela velocidade correspondente, em rad/s.

Ao realizar as medições observa-se, através da Tabela 3 que a célula de carga registra dois torque iniciais de torque, um apenas com o MIT em funcionamento e com o gerador CC apenas acoplado ao eixo, sem excitação, e a outra com o gerador CC excitado, ou seja trabalhando a vazio. Assim, considera-se que a diferença entre o valor registrado na célula de carga sem a excitação do campo do gerador e com a excitação do campo, com as perdas do gerador cc a vazio. Este valor corresponde a aproximadamente 22 Watts (W) de potência. Ao adicionar carga é importante ressaltar que existem perdas elétricas da armadura, que também são levados em consideração. Assim, a leitura da célula de carga é o dado mecânico de

entrada da máquina e o dado medido por corrente e tensão de são dados elétricos de saídas. Para determinar os valores calculados levou em consideração o diagrama de potência do gerador cc, em que são adicionadas as perdas do gerador cc para obtenção do torque de entrada, comparado-o com os dados obtidos pela célula de carga.

Para avaliar a sensibilidade do dispositivo desenvolvido, duas fases do MIT são invertidas para que o mesmo gire no sentido anti-horário. Os resultados são apresentados na Tabela 4, e o gráfico com os resultados de torque medido, torque calculado e velocidade no Gráfico 4. Neste caso, o gerador cc opera com excitação independente e no sentido anti-horário.

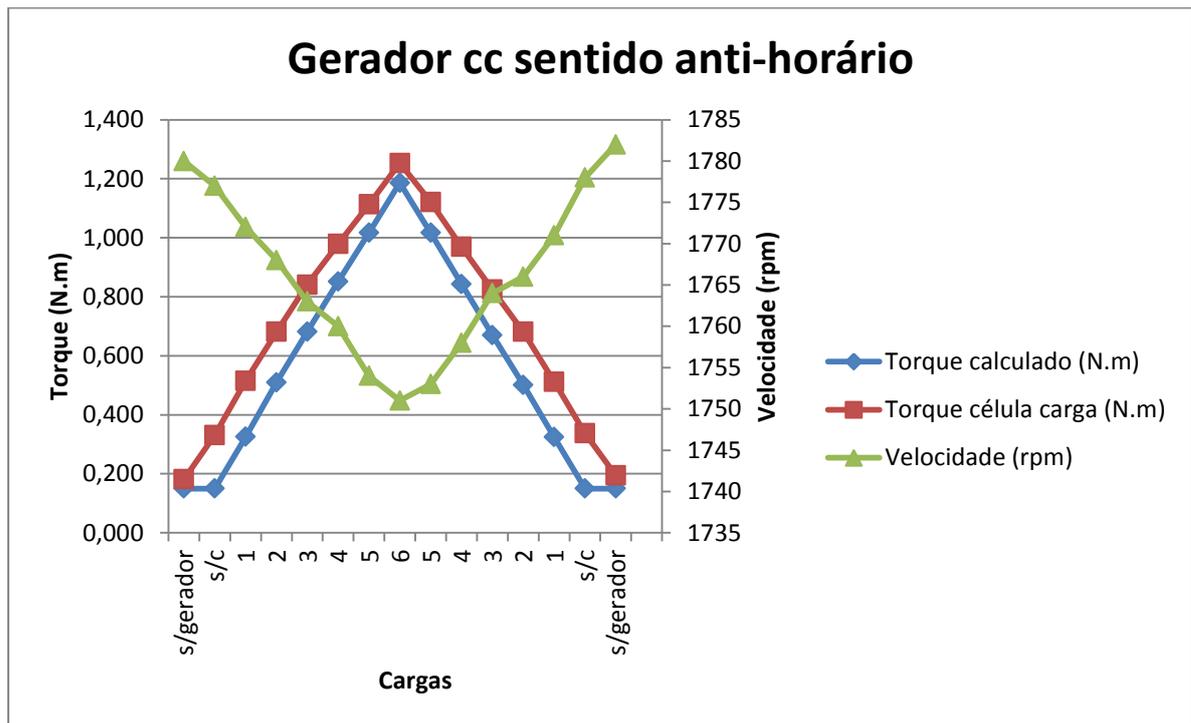
Tabela 4 - Dados do gerador cc operando no sentido anti-horário.

	If (A)	Vf (V)	Ia (A)	Vt (V)	Velocidade Máquina (rpm)	Perdas armadura (W)	Perdas Magnetização (W)	Potência entrada (W)	Torque calculado (N.m)	Torque célula carga (N.m)
s/gerador	0,00	0,00	0,00	12,80	1780	0,00	27,95	27,95	0,150	0,181
s/c	0,40	115,80	0,00	135,40	1777	0,00	27,90	27,90	0,150	0,331
1	0,40	115,70	0,24	133,70	1772	0,38	27,82	60,29	0,325	0,515
2	0,40	115,90	0,49	132,60	1768	1,60	27,76	94,34	0,510	0,681
3	0,40	115,90	0,72	131,30	1763	3,47	27,68	125,69	0,681	0,841
4	0,40	115,80	0,95	129,60	1760	6,04	27,63	156,80	0,851	0,979
5	0,40	116,00	1,17	128,20	1754	9,17	27,54	186,70	1,017	1,113
6	0,40	116,00	1,39	127,30	1751	12,94	27,49	217,38	1,186	1,253
5	0,40	116,00	1,17	128,10	1753	9,17	27,52	186,57	1,017	1,121
4	0,40	116,00	0,94	129,40	1758	5,92	27,60	155,16	0,843	0,969
3	0,40	116,10	0,71	130,50	1764	3,37	27,69	123,73	0,670	0,824
2	0,40	116,20	0,48	131,90	1766	1,54	27,73	92,58	0,501	0,681
1	0,39	115,90	0,24	132,80	1771	0,38	27,80	60,06	0,324	0,512
s/c	0,39	115,90	0,00	134,50	1778	0,00	27,91	27,91	0,150	0,337
s/gerador	0,00	0,00	0,00	12,70	1782	0,00	27,98	27,98	0,150	0,195

Fonte - Acervo próprio autor (2108).

Para melhorar a visualização dos resultados, o Gráfico 4 apresenta os dados de torque e velocidade no sentido anti-horário, mostrando que o sistema não se limita a um sentido de giro. Assim como nos geradores, a curva em vermelho apresenta o torque da célula de carga, a azul, o torque da máquina calculado com dados medidos pelo multímetro e a verde, a velocidade da máquina medido pelo tacômetro.

Gráfico 4 - Gerador cc sentido no anti-horário.



Fonte – Acervo próprio autor (2018).

No sentido anti-horário, a célula de carga realiza leituras de tração e os dados são emitidos pelo arduino com valores positivos e o *display* mostra que os dados estão no sentido anti-horário. A diferença entre os valores se justifica devido à célula realizar leitura de tração e como a calibração aconteceu para as leituras sentido horário. Assim, os resultados no sentido horário são mais confiáveis. Desta forma, a orientação é que, no momento de elaborar as práticas utilizando o *kit* didático deve-se realizar a energização da máquina motriz sempre no sentido horário.

A mesma informação de erro e desvio padrão foi retirado das Equações 15 e 16, agora utilizando a Tabela 4, obtendo-se a média de erros 24,17% e 0,1508.

Ainda com o objetivo de validar o sistema desenvolvido, os valores de torque gerados pela célula de carga são plotados em função da corrente de carga no *software* MATLAB versão 2009 disponível no IFMG-Campus Formiga.

Segundo Chapman (2013), para geradores cc com excitação independentes, a corrente de armadura é igual a corrente de linha, de carga. Logo a corrente gerada na armadura pode ser determinada por meio da Equação 17.

$$I_l = I_a \quad 17$$

Na qual:

I_l é a corrente de linha, em (A);

I_a é a corrente de armadura, em (A);

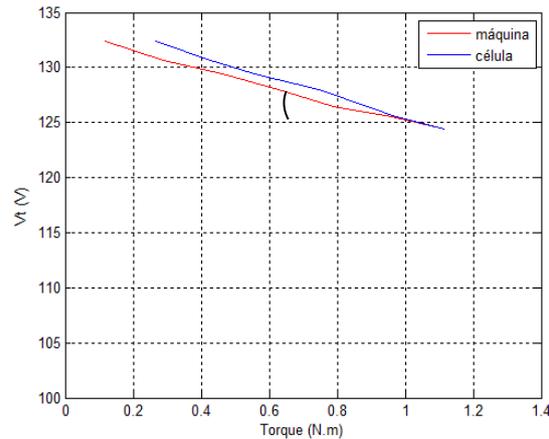
Assim a corrente medida na saída do gerador é a própria corrente de armadura.

Outra equação que deve ser levada em consideração para a curva característica dos geradores cc é a Equação 2, que relaciona o torque com o fluxo magnético e com a corrente de armadura. No caso do gerador cc com excitação independente o fluxo é considerado constante, desta forma pode-se relacionar o torque diretamente proporcional com a corrente de armadura conforme a Equação 18, uma vez que, conforme a Equação 3, k é uma constante que depende de aspectos construtivos da máquina.

$$T \propto I_a \quad 18$$

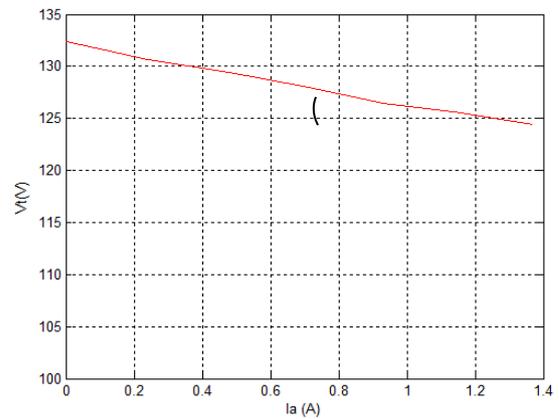
Assim, a relação estabelecida por meio da Equação 18, permite a obtenção do Gráfico 5 que relaciona torque por tensão terminal. A intenção ao avaliar este resultado é comparar as relações estabelecidas de torque comparando com as relações de tensão terminal, que são relações típicas na análise de geradores cc. Assim, Gráfico 6 foi plotado para verificar a inclinação das curvas práticas do torque e a curva de corrente de linha por tensão. Observa-se que a inclinação entre as curvas é a mesma.

Gráfico 5 – Torque por tensão terminal



Fonte: Acervo próprio autor (2018).

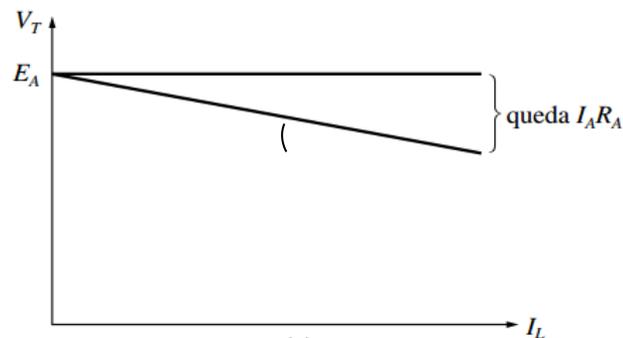
Gráfico 6 - Corrente da carga por tensão terminal.



Fonte: Acervo próprio autor (2018).

Observa-se semelhança entre o Gráfico 6 e o comportamento de tensão terminal de geradores cc típicos, ilustrado no Gráfico 7. Esta análise fortalece a validação dos resultados, uma vez que a curva apresentada no Gráfico 7 corresponde a uma curva típica de regulação de tensão encontrada nas literaturas.

Gráfico 7 - A característica de terminal de um gerador CC de excitação independente.



Fonte: Adaptado de (CHAPMAN, 2013).

4.3.2. Máquina de corrente contínua como motor

A seguir são apresentados os resultados da operação da máquina CC como motor. Neste caso o motor CC é acoplado ao gerador síncrono no qual são inseridas cargas trifásicas, conforme apresentado no capítulo 3- Materiais e Métodos. Para determinar a potência a vazio no motor CC, o mesmo é energizado isoladamente das outras máquinas acopladas. Isso se faz necessário, pelo fato de que as outras máquinas funcionam como carga em seu eixo, mesmo

estas estando energizadas. A Tabela 5 apresenta os resultados de medição do motor cc operando à vazio com velocidade 1800 rpm (188,4 rad/s), valor nominal, nos sentido horário e anti-horário.

Tabela 5 – Dados do motor cc à vazio e suas perdas.

Sentido	Tensão motor cc à vazio (V)	Corrente motor cc à vazio (A)	Torque calculado entrada (N.m)	Célula de carga (N.m)	Diferença torque entrada e saída (N.m)	Perdas magnetização (W)
Horário	127,80	0,63	0,427	0,138	0,289	54,51
Anti-horário	128,80	0,64	0,437	0,117	0,321	60,39

Fonte - Acervo próprio autor.

Com os dados coletados da Tabela 5 é possível determinar as perdas totais do motor, como sendo a diferença entre a potência de entrada e a potência de saída. Este procedimento está de acordo com o diagrama de potência apresentado na Figura 9 em que o valor das perdas do motor cc é a diferença entre a potência de entrada, Equação 13, com a potência de saída .

Desta forma, os dados são coletados e preenchidos na Tabela 6 para o motor cc no sentido horário.

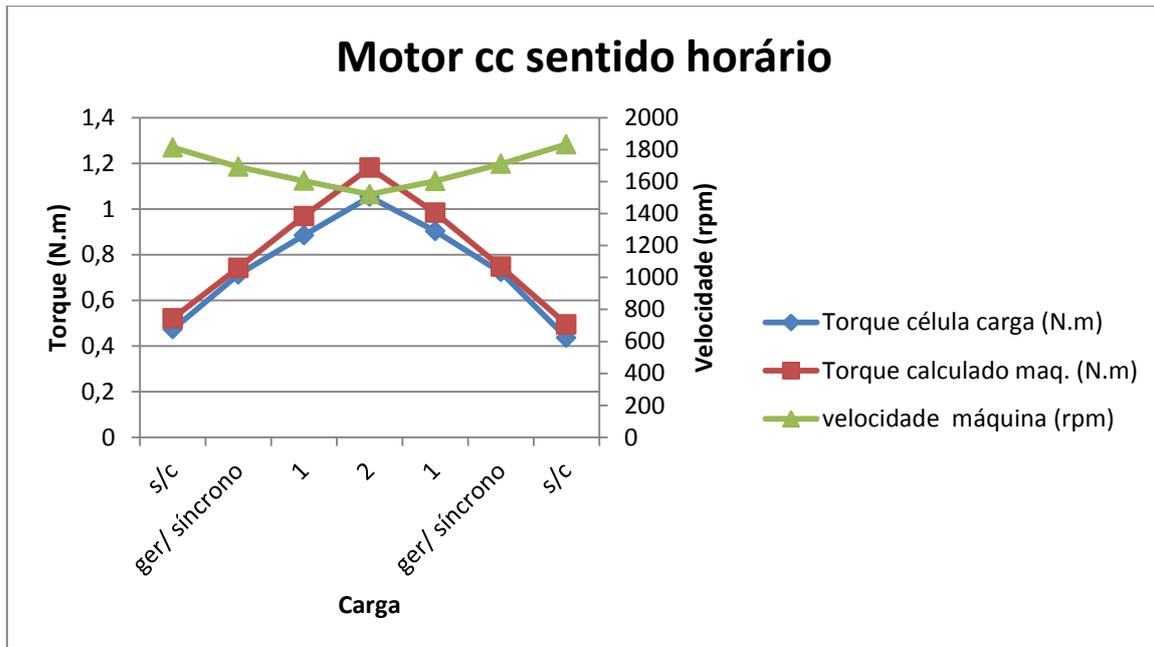
Tabela 6 – Dados do motor cc sentido horário.

	If (A)	Ia (A)	Vf (V)	Vt (v)	Velocidade da Máquina (rpm)	Motor cc a vazio (N.m)	Perdas (W)	Potência saída (W)	Torque célula carga (N.m)	Torque calculado máquina (N.m)
s/c	0,37	1,13	108,80	135,80	1813	0,289	54,51	98,94	0,473	0,521
gerador síncrono	0,37	1,45	109,10	128,20	1692	0,289	54,51	131,38	0,713	0,742
1	0,37	1,77	109,30	122,70	1604	0,289	54,51	162,66	0,885	0,969
2	0,37	2,05	109,30	118,20	1530	0,289	54,51	187,80	1,053	1,173
1	0,37	1,78	109,40	123,30	1603	0,289	54,51	164,96	0,903	0,983
Gerador síncrono	0,37	1,45	109,70	129,80	1710	0,289	54,51	133,70	0,723	0,747
s/c	0,37	1,08	109,60	138,40	1833	0,289	54,51	94,96	0,436	0,495

Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Para melhorar a visualização, com os valores apresentados na Tabela 6, é possível plotar o Gráfico 8 do motor cc sentido horário. Sendo os valores de torques calculados, em azul, o torque medido pela célula de carga em vermelho e a velocidade em verde.

Gráfico 8 - Motor cc no sentido horário.



Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Percebe-se, que os resultados medidos e calculados são próximos e que quanto maior o torque menor é a velocidade. Este resultado pode ser justificado pela Equação 3 e esta de acordo com os resultados encontrados na literatura.

Com as mesmas Equações 15 e 16 calculo-se a média do erro e o desvio padrão no gerador, foram utilizadas para o motor CC no sentido horário utilizando a Tabela 6 e os valores foram 7,99% e 0,0305. Neste caso para o motor horário o projeto foi ainda mais satisfatório.

Assim como para o gerador cc, o sentido de funcionamento do motor é invertido. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

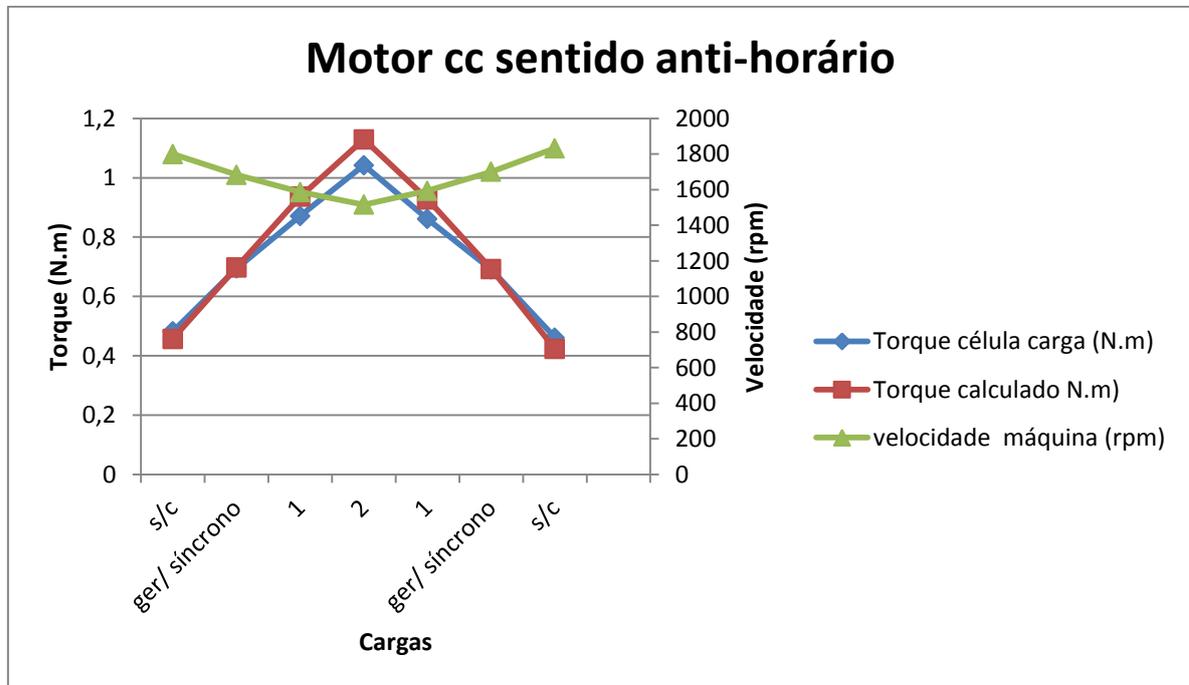
Tabela 7 - Motor cc operando no sentido anti-horário.

	If (A)	Ia (A)	Vf (V)	Vt (V)	Velocidade Máquina (rpm)	Motor cc a vazio (N.m)	Perdas (W)	Potência de saída (W)	Torque célula de carga (N.m)	Torque calculado motor (N.m)
s/c	0,38	1,07	109,70	136,90	1800	0,321	60,39	86,09	0,482	0,457
gerador síncrono	0,38	1,42	109,80	129,10	1683	0,321	60,39	122,93	0,694	0,698
1	0,38	1,75	19,90	123,30	1586	0,321	60,39	155,39	0,871	0,936
2	0,38	2,02	109,50	118,60	1516	0,321	60,39	179,18	1,042	1,129
1	0,37	1,74	109,60	123,60	1594	0,321	60,39	154,67	0,861	0,927
gerador síncrono	0,37	1,41	109,60	130,20	1700	0,321	60,39	123,19	0,691	0,692
s/c	0,37	1,02	109,80	138,70	1832	0,321	60,39	81,08	0,461	0,423

Fonte - Acervo próprio autor (2018).

Para facilitar a visualização os dados da Tabela 7 são plotados no Gráfico 9, cujos valores de torque medidos estão em azul, o calculado em vermelho e a velocidade em verde.

Gráfico 9 - Motor CC no sentido anti-horário.



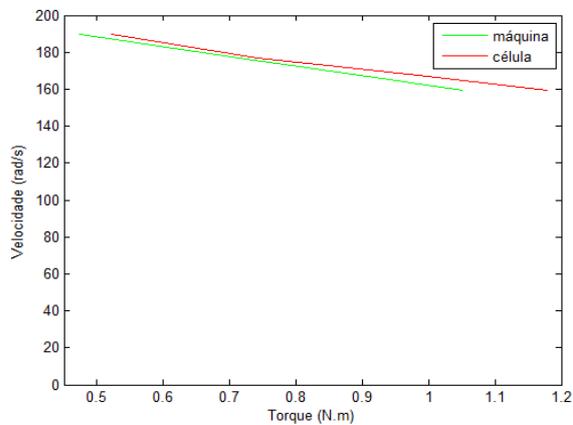
Fonte - Acervo próprio autor.

Nesta situação, o Gráfico 9 representa o motor CC no sentido anti-horário e, neste caso, arduino carrega as características similares à medição realizada no sentido anti horário do gerador cc, realizando as devidas correções. Assim, o valor de torque no *display* informa que a medição foi realizada em sentido anti-horário. Como a célula realiza as medições por tração, assim como nos geradores, é aconselhável energizar o motor CC no sentido horário para garantir maior confiabilidade às medições.

O mesmo cálculo foi realizado para a média de erro e o desvio padrão utilizando as Equações 16 e 15 e a Tabela 7 obteve-se 5,29% e 0,0326. No caso do motor, o número de medidas foram menores e desta forma obteve-se menos erro e conseqüentemente desvio padrão.

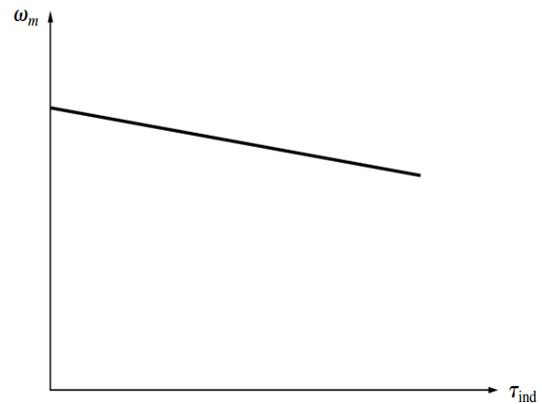
Com os respectivos dados da Tabela 6, caracterizando o motor CC no sentido horário, foi realizado a plotagem do Gráfico 10 (torque x velocidade), com aumento de carga para comparação com a literatura do Gráfico 11. O gráfico deste trabalho é obtido utilizando-se o *software* MATLAB versão 2009 presente disponível no IFMG –Campus Formiga.

Gráfico 10 - Torque x velocidade do motor cc no sentido horário prático.



Fonte: Acervo próprio autor.

Gráfico 11 - Característica de conjugado versus velocidade de um motor CC em derivação ou de excitação independente presente na literatura.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

O motor CC possui como curva característica torque (τ_{ind}) em N.m por velocidade (ω_m) em rad/s da máquina.

Observa-se a semelhança entre as curvas obtidas neste trabalho, Gráfico 11, e a curva típica encontrada em Chapman (2013).

Ainda para validação dos resultados obtidos, é testada uma metodologia para obtenção de torque por meio de medições, apresentada por Salomon (2014). O autor realiza o cálculo usando a corrente da máquina a vazio, corrente de trabalho e corrente nominal, conforme Equação 19. Em Salomon (2014), a metodologia é aplicada aos motores de indução trifásicos, mas como o cálculo é realizado utilizando dados de medição, a intenção aqui é avaliar se esta metodologia pode ser aplicada também aos motores de corrente contínua.

$$P_{mec} = P_N \left(\frac{I_T - I_0}{I_N - I_0} \right)$$

19

Na qual:

P_{mec} é a potência mecânica da máquina, em (W);

P_N é a potência nominal da máquina, em (W);

I_T é a corrente de trabalho medido da máquina, em (A);

I_0 é a corrente à vazio da máquina, em (A);

I_N é a corrente nominal da máquina, em (A);

Os dados nominais acima podem obtidos a partir do Quadro 1 e os dados à vazios podem ser retirados na Tabela 5.

Assim para obter-se o torque utiliza-se a Equação 20.

$$T_t = \frac{P_{mec}}{W_t} \quad 20$$

T_t é o torque de trabalho, em (N.m);

P_{mec} é a potência mecânica calculado da máquina, em (W);

W_t é a velocidade angular de trabalho da máquina, em (rad/s);

A metodologia apresentada permite o cálculo do torque de trabalho no sentido horário como sendo 0,391 N.m. Esse resultado é comparado com o valor lido pela célula de carga, qual seja 0,473 N.m. Este valor está apresentado na Tabela 6 (coluna 10 (dez) linha 2 (dois)). A aplicação desta metodologia para as máquinas de corrente contínua deve ser avaliada criteriosamente, mas os resultados encontrados aqui sinalizam uma possibilidade de aplicação da mesma.

4.4 Custo do projeto

Para obtenção deste trabalho os custos dos mesmo foi adicionado na Tabela 8. O *kit* presente no laboratório foi realizado licitação e o mesmo já possui adicionado a célula de carga.

Tabela 8 - Custo do projeto

Componentes	Valores R\$
Arduino UNO	59,90
Módulo HX711	9,14
<i>Display</i> LCD -16 x 2	42,27
Potenciômetro 10 kΩ	0,82
Caixa madeira	13,00
Botão liga/desliga	2,34
Total	127,47

Fonte: Adaptado de (ELETRODEX, 2018)

4.5 *Trabalhos futuros*

A medição do torque nas máquinas CC de configurações diferentes como derivação, série e composta. Assim como também realizar a investigação se a Equação 19 é válido para as máquinas de corrente contínua. Além dessa proposta de trabalhos futuros pode-se utilizar a célula de carga para determinar o torque das demais máquinas presentes no *kit*, síncrona e assíncrona, desta forma, pode obter maiores descrições e determinações das mesmas para práticas laboratoriais.

5 CONCLUSÃO

O torque é uma das grandezas mais importantes para o estudo das máquinas elétricas, operando como motor ou como gerador. Assim, a medição e o cálculo de tal grandeza são fundamentais para análise de desempenho da máquina rotativa para diferentes condições de carga e para operação segura de tais equipamentos.

As célula de carga presente nos *kits* de Máquinas Elétrica acopladas no IFMG Campus Formiga era um equipamento desconhecido para uso nas práticas laboratoriais, não sabia como realizar utilização desta e nem como realizar medições através dela. Assim, com o presente trabalho foi possível realizar medições do torque da Máquina Elétrica de corrente contínua, foi escolhido a mesma pois a célula de carga estar diretamente acoplado a sua carcaça e outra opção é a facilidade de modelagem das equações destas para a condição de excitação independente. Assim com o arduino foi possível processar o sinal proveniente da célula de carga e mostrar esta informação em um *display* LCD informando o torque em N.m. e o sentido de funcionamento da máquina.

A medição do torque pode se realizada com a máquina operando como motor ou como gerador. Os resultados são validados por meio gráficos que comparam os valores de torque calculados com base nos diagramas de potência e valores aferidos de corrente e tensão de armadura com o torque medido na célula de carga. Além disso os resultados são comparados com curvas típicas presentes na literatura.

O dispositivo desenvolvido pode ser utilizado como recurso para melhoria da qualidade das aulas de máquinas elétricas, introduzindo análises de torque e velocidade das máquinas de corrente contínua para diferentes condições de carga

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBACENA, Ilton L.; FLEURY, Claudio Afonso. **Display LCD**. 1996. Disponível em: <<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/ea079/complementos/Lcd.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2018.

BLUM, Jeremy. **Explorando o Arduino: Técnicas e ferramentas para mágicas de engenharia**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016. Pg. 24.

BORGES, Jacques Cousteau da Silva et al. **Métodos e técnicas de medição de torque diretamente em eixos rotativos**. *Principia*, Paraíba, p.121-129, dez. 2015. Disponível em: <periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/download/494/337>. Acesso em: 10 set. 2018.

CAVALCANTE, Michelle M. et al. **A Plataforma Arduino para fins didáticos: Estudo de caso com recolhimento de dados a partir do PLX-DAQ**. In: XXXIV congresso da sociedade brasileira de computação, 2014, Paulo Afonso – Ba. **WEI-Workshop sobre Educação em Computação**. Paulo Afonso – Ba: Csbcc, 2014. p. 1687 - 1697. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wei/2014/0037.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico]**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013. 698 p. Anatólio Laschuk. Disponível em: <<http://www.elt2014.com.br/materiais/2-2016/EEL047-37/Caderno/Fundamentos%20de%20Maquinas%20Elétricas%20Chapman.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice-Hall do Brasil: LTC, 1994.

DEVITTE, Willian. **Desenvolvimento de um sistema para medir o conjugado de um motor de indução**. 2012. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle de Automação, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário Univates, Lajeado, 2012. Cap. 5.

ENERGIA, Ministério de Minas e. **Aneel estimula troca de motores elétricos para promover eficiência energética:** Objetivo é reduzir o consumo de eletricidade, substituindo motores antigos por equipamentos modernos e mais eficientes. 2015. Portal Oficial do Governo Federal. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2015/11/aneel-estimula-troca-de-motores-eletricos-para-promover-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 20 set. 2018.

ELETRODEX. **Módulo de Pesagem com HX711.** Disponível em: <<http://www.eleto.dex.com.br/modulo-de-pesagem-com-hx711.html>>. Acesso em: 13 set. 2018.

FAPERJ. Apoio à ciência , tecnologia e inovação no Estado do Rio de Janeiro. **Projeto de UFRJ cria museu virtual sobre as principais máquinas elétricas.** Disponível em: <<http://www.faperj.br/?id=1827.2.7>>. Acesso em: 30 agosto 2018.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen. **Máquinas elétricas:** com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GEDDES, Mark. **Manual de Projetos do Arduino:** 25 projetos práticos para começar. São Paulo: Novatec, 2016. 287 p. Cláudio José Adas.

GITHUB. **HX711.** Disponível em: <<https://github.com/bogde/HX711>>. Acesso em: 19 set. 2018.

GOUVEIRA, Rosimar. **Toda matemática:** Desvio Padrão. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/desvio-padrao/>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

IWM. **SPL – Célula de carga tipo single point.** 2015. Disponível em: <<http://www.iwm-brasil.com.br/spl-celula-de-carga-tipo-single-point/>>. Acesso em: 15 ago. 2018.

KOLLROSS, Adriano. **Construção de dinamômetro para medição de torque e potência de mci de pequeno porte.** 2016. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Departamento de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Cap. 5.

KOSOW, Irving I. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Tradução de Felipe Luiz Riberio Daielle e Percy Antônio Pinto Soares. 15. ed. São Paulo: Globo, 2005. Cap. 1. p. 1-32.

LORENZO, de. **Guia do Usuário-Teóricos e Práticos: Máquinas Elétricas**. Brasil: de Lorenzo, 2014. 32 p.

MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec, 2011. 456 p. Rafael Zanoli.

MULTILÓGICA-SHOP. **Arduino: Guia Iniciante**. 2. ed. São Paulo: Multilógica-shop, 2018. 150 p. Disponível em: <https://multilogica-shop.com/download_guia_arduino>. Acesso em: 19 set. 2018.

NUNES; MARCÍLIO; LARISSA. **Sensores e transdutores**: Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas. Universidade de São Paulo – Escola Politécnica Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas. 2017. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/8/89/Aula_1_-_Sensores.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018.

PENA, Rodolfo F. Alves. **Fontes de Energia do Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/fontes-energia-brasil.htm>>. Acesso em: 19 set. 2018.

SALOMON, Camila Paes. **Estimação da Eficiência de Motores de Indução Considerando apenas as Grandezas Elétricas**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014. Cap. 7.

SEMICONDUCTOR, Avia. **24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**: Datasheet. Disponível em: <https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf>. Acesso em: 13 set. 2018.

SILVA, Marielle Jordane da. **Avaliação das características e do desempenho das máquinas de corrente contínua com e sem a utilização dos enrolamentos de interpolos.** 2016. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFMG-Campus Formiga, Formiga, 2016.

SILVA FILHO, Sebastião Alves da. **Física - movimento circular uniforme: PARÂMETROS.** 2014. Disponível em: <<http://sofstica.com.br/mcu-teoria.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2018.

SIEMENS. **Motores de corrente contínua:** Guia rápido para uma especificação precisa. 2016. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_CC_ind1.pdf>. Acesso em: 04 set. 2018.

SOUZA, Sara Maria de Souza Vale e. **Projeto de calibração de célula de carga para aplicação em dinamômetro hidráulico com medição de curva de torque e potência em motor otto.** 2014. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TEIXEIRA, Gabriel Ramos. **Desenvolvimento de sistema microcontrolado para redução de perdas associadas ao processo de refrigeração do leite em pequenas propriedades.** 2018. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFMG-Campus Formiga, Formiga, 2018. Cap. 5.

VILLAR, Gileno José de Vasconcelos. **Geradores e Motores cc:** Máquinas de Corrente Contínua. 2006. cefetrn - centro federal de educação tecnológica do rn. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc-1>>. Acesso em: 06 set. 2018.

VILLATE, Jaime E. **Física 1: Dinâmica.** Porto Alegre: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2012. 269 p. Disponível em: <http://www.villate.org/doc/fisica1/fisica1_20120307.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2018.

WOHLGEMUTH, Augusto; ROSA, Mauricio Kusbick da. **Aprimoramento de uma bancada automatizada de um freio de foucault utilizada para ensaios de motores de**

indução. 2012. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2012. Cap. 6.

ANEXO I

ANEXO I

```
//Programação para medição do torque de máquinas elétricas
//Trabalho de conclusão de curso do curso Bacharelado de
Engenharia Elétrica.
//IFMG-Campus Formiga
//Aluna: Andreza Patrícia Batista
//Orientadora: Msc. Mariana Guimarães dos Santos

#include "HX711.h"
#include <LiquidCrystal.h> //Inclui a biblioteca
para no programa

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); //Informamos a
biblioteca quais serão os
// pinos do arduino
serão ligados aos
// pinos do display

// HX711.DOUT - pin #A1
// HX711.PD_SCK - pin #A0

HX711 scale(A1, A0); // o parâmetro "ganho"
é omitido; o valor padrão 128 é usado pela biblioteca
float calibration_factor = 107208.000; //este fator de
calibração é ajustado de acordo com minha célula de carga
float units; //variável de leitura
float valorVelho=0; //variável de
comparação
float valorPrintar; //variável de comparação

float debounce(float valor_atual) //função de debounce
{

    float valorNovo=scale.get_units(); // valor de leitura
    float diferenca=valor_atual-valorNovo; //diferença de
valores a ser comparados

    if(valorNovo<0) //sentido da fase
trocadas, valor inverso
```

```

        { lcd.clear(); //limpar lcd
          lcd.print("Torq ant/hor N.m"); //sentido
anti-horário
          if(diferenca<0.065 || diferenca>-0.065) //retirada
de debounce
            {
              return (valorNovo*(-1)); //recurso matemático
para valor ficar positivo
            }
          else
            {
              return (valor_atual*(-1)); //recurso
matemático para valor ficar positivo
            }
        }
    else //sentido direto
    { lcd.clear(); //limpar lcd
      lcd.print("Torq hor N.m"); //sentido horário
      if(diferenca<-0.065 || diferenca>0.065) //retirada de
debouce
        {
          return valorNovo;
        }
      else
        {
          return valor_atual;
        }
    }
} //Fim da função

void setup() {
  Serial.begin(9600); //velocidade de
leitura
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset a escala para
0

  long zero_factor = scale.read_average(); //Obter uma
leitura de linha de base
  Serial.println("HX711 Demo"); //print no serial
computador

```

```

Serial.println("Antes de configurar a escala:"); //print no
serial computador
Serial.print("ler: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.read()); // imprimir uma
leitura bruta do ADC
Serial.print("ler média: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.read_average(20)); // imprimir a
média de 20 leituras do ADC
Serial.print("obtem valor: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.get_value(5)); //imprimir a média
de 5 leituras do ADC menos o peso da tara (ainda não definido)
Serial.print("obtem unidade \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.get_units(5), 1); // imprimir a média
de 5 leituras do ADC menos o peso de tara (não definido)
dividido
// pelo parâmetro
SCALE (ainda não definido)
scale.set_scale(2280.f); // este valor é
obtido calibrando a balança com pesos conhecidos; veja o
README para detalhes
scale.tare(); // reset a escala
para 0
Serial.println("Depois de configurar a escala:");
Serial.print("ler: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.read()); // imprimir uma
leitura bruta do ADC
Serial.print("ler média: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.read_average(20)); // imprimir a média
de 20 leituras do ADC
Serial.print("obtem valor: \t\t"); //print no serial
computador
Serial.println(scale.get_value(5)); // imprime a média de
5 leituras do ADC menos o peso da tara, definido com tara ()
Serial.print("obtem unidades: \t\t");
Serial.println(scale.get_units(5), 1); //imprimir a média

```

```

de 5 leituras do ADC menos o tara, dividido
// pelo conjunto de
parâmetros SCALE com set_scale
Serial.println("Leituras:"); //print no serial
computador
lcd.begin(16, 2); //Inicializo o LCD
informando que ele é de 16 caracteres e duas linhas
}
void loop() {

scale.set_scale(calibration_factor); //Ajuste para o
fator de calibração
// Serial.print("Reading: ");
units = debounce(units); //chama
função debounce e verifica se recebe valor atual ou antigo
valorPrintar=units*9.81*0.08005; //cálculo
para o Torque da máquina
Serial.print((valorPrintar),3); //Em caso de
uso do serial
Serial.print(" N.m"); //Em caso de
uso do serial
Serial.print(" calibration_factor: "); //Em caso de
uso do serial
Serial.print(calibration_factor); //Em caso de
uso do serial
Serial.println(); //Em caso de
uso do serial
lcd.setCursor(0,1); //Posiciono o
cursor para a coluna 0 da linha 1, note
// que a
contagem de linhas e colunas começa no
0
lcd.print((valorPrintar),3); //Agora escrevo
o tempo que esta sendo contado pela
// função
"millis()" dividido por 1000, como a função
// conta em
milissegundos o resultado será em segundos.
delay(2000); //tempo de delay
para registro da leitura
if(Serial.available()) //para realização

```

```
da calibração da célula de carga
{
    char temp = Serial.read();
    if(temp == '+' || temp == 'a')           //aumenta um no
fator calibração
        calibration_factor += 1;
    else if(temp == '-' || temp == 'z')     //diminui um no
fator calibração
        calibration_factor -= 1;
}
}
```