

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

LUCAS BARALDI MAUSBACH

**MÉTODO PARA MONITORAMENTO DE MOTORES
DE CORRENTE CONTÍNUA PARA INTEGRAÇÃO A
REDES DE IOT**

CAMPINAS

2019

LUCAS BARALDI MAUSBACH

**MÉTODO PARA MONITORAMENTO DE MOTORES
DE CORRENTE CONTÍNUA PARA INTEGRAÇÃO A
REDES DE IOT**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Frank Herman Behrens

**PUC-CAMPINAS
2019**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

621.462 Mausbach, Lucas Baraldi.
M459m Método para monitoramento de motores de corrente contínua para
integração a redes de IOT / Lucas Baraldi Mausbach.- Campinas: PUC-
Campinas, 2019.
96 f.

Orientador: Frank Behrens.

Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) –
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de tecnologias, Pontifícia Uni-
versidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Motores elétricos. 2. Internet das coisas. 3. Máquinas - Monito-
ração. I. Behrens, Frank. II. Pontifícia Universidade Católica de Campi-
nas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

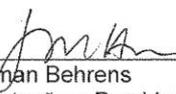
CDD - 18. ed. 621.462

LUCAS BARALDI MAUSBACH

**“MÉTODO PARA MONITORAMENTO DE MOTORES DE
CORRENTE CONTÍNUA PARA INTEGRAÇÃO A REDES
DE IOT”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.
Área de Concentração: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Frank Herman Behrens

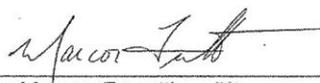
Dissertação defendida e aprovada em 15 de fevereiro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Frank Herman Behrens
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Indayara Bertoldi Martins
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Marcos Ferretti
KARTFLY

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Frank Herman Behrens,

Agradeço por toda a orientação e dedicação para o desenvolvimento desse trabalho, por acreditar na ideia, pelo convite para desenvolvimento da ideia no programa de mestrado e por todo conhecimento passado. Agradeço também pela amizade e pelas boas conversas.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho e Prof. Dra Indayara Bertoldi Martin,

Pelos conselhos e direcionamentos prestados no Exame de Qualificação e todo o conhecimento passado nas aulas.

Aos meus pais,

Por todo conhecimento profissional e pessoal transmitido ao longo de minha vida. Agradeço por toda dedicação, incentivo e acima de tudo por sempre acreditarem no meu potencial. Com certeza as pessoas mais importantes de minha vida.

Ao meu irmão,

Por ser meu melhor amigo e companheiro, pelos ensinamentos sobre apresentações e computação, pelos bons momentos de diversão, e acima de tudo pela pessoa incrível e criativa que me inspira a pensar sempre fora da caixa.

Ao meu amigo André Ulott,

Por tudo que me ensinou sobre motores, eletrônica e por todas as boas conversas e debates que serviram de inspiração para o trabalho.

“Uma viagem de 10 mil milhas
se inicia com um passo.”
(Lao-Tsé)

RESUMO

Mausbach, Lucas Baraldi. Método para monitoramento de motores de corrente contínua integrados a redes de IoT. 2019. 94f Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

O presente trabalho apresenta um método de monitoramento de motores elétricos de corrente contínua com escova e ímã permanente baseado em monitoramento de condição (CM – *condition monitoring*). Esse método emprega um módulo de captura de dados e processamento embarcado capaz de fornecer informações úteis a sistemas de gerenciamento de aplicações através do sensoriamento da corrente consumida e da velocidade de rotação, permitindo assim o acompanhamento das condições de funcionamento do motor. Isso é possível realizando-se uma comparação dos dados medidos pelos sensores com o modelo matemático do motor encontrado na literatura e com um estudo prévio sobre o comportamento do motor quando submetido a diferentes condições de operação considerando variações da tensão de alimentação, carga e temperatura. Os sensores utilizados podem ser embarcados nos motores monitorados juntamente com um processador para criação de um motor inteligente, capacitado não só a transmitir suas condições de funcionamento, mas também a realizar um pré-processamento para detectar o estado de operação do motor, reportar comportamentos incomuns, eventuais desgaste ou falhas, e até mesmo a se autodesligar para proteger a integridade do sistema ao qual está aplicado. Foi desenvolvido um algoritmo para realização das medidas do consumo de corrente e da velocidade de rotação, de forma sincronizada. Esse par de variáveis pode ser analisado com relação à sua posição no plano CxV (corrente x velocidade de rotação). Medidas iniciais de caracterização do motor CC utilizado foram feitas sob condições controladas de operação com vistas a se identificar regiões do plano CxV correspondentes. Dessa forma, foi possível caracterizar uma região de operação normal e regiões de operação anormal com características conhecidas que evidenciam desvios operacionais quanto à tensão de alimentação e carga. Identificaram-se, também, regiões do plano CxV de operação crítica em que podem ocorrer comportamento instável e comprometimento da integridade do motor. Um segundo algoritmo foi desenvolvido para a classificação das variáveis medidas em relação às diversas regiões de operação identificadas na caracterização funcional, visando à identificação de características incomuns e condições de funcionamento. Por fim, realizaram-se testes do sistema de monitoramento e dos algoritmos desenvolvidos por meio de medidas realizadas em diferentes condições de operação, demonstrando-se assim a aplicabilidade do método. Embora este trabalho tenha focado em motores CC, o método pode também ser aplicado a outros tipos de motores elétricos, adaptando-se o modelo matemático utilizado, bem como as variáveis a serem monitoradas. Dessa maneira, espera-se que os motores elétricos funcionem como atuadores e sensores simultaneamente e tornem-se elementos inteligentes capacitados à integração com o amplo ambiente de aplicações em automação residencial, veículos elétricos e autônomos, cidades inteligentes, dentre outras aplicações do contexto de Internet das Coisas (IoT) que necessitem de movimento mecânico.

ABSTRACT

The following work presents a method of monitoring brushed and permanent magnet direct current electric motors based on condition monitoring techniques. This method uses an embedded module responsible for data gathering and processing which is capable of managing the work conditions and send useful information to application's management systems by the measurement of current consumption and rotational speed. This is possible by performing a comparison from the measured data with the motor mathematical model and a study of motor working performance considering different voltage, load and temperature conditions. The sensors and processor used for evaluate and transmit measured data must be embeddable for the creation of an intelligent motor that can send useful and pre-processed information to the management system, detect uncommon behavior, performance deterioration or failures and even turn off the motor to protect system entirety. It has been develop an algorithm to perform the current and rotational speed synchronous measurements. These measurements can be analyzed depending on their position in a CxS graph (Current x Speed). Previous measurements in different controlled conditions have been performed to identify different zones in the CxS graph. The analysis of these different zones in the graph permit to define clusters with either normal or abnormal working conditions depending on the load and voltage applied. It was possible to identify a critical zone where the motor operation and system integrity can be damaged. Another algorithm was developed to classify the measurements considering the defined zones and evaluate whether the motor is working at normal, abnormal or critical conditions. Finally, the measurement system and both algorithms have been tested considering the data collected during different operation conditions to validate the method applicability. Even considering the use of a specific motor type to validate this work, the presented method can be applied for other kinds of motors by adapting the motor mathematical model, as well as the variables to be monitored. One of the important results of the research is the proposal of a motor that can be applied simultaneously as an actuator and a sensor of the system. This motor would be a new intelligent element integrated to a wide range of applications such as autonomous vehicles, smart houses, intelligent cities and other Internet of things (IoT) which need mechanical movement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípio de funcionamento de um motor CC	23
Figura 2. Modelo elétrico de um motor de corrente contínua	25
Figura 3. Exemplo de um gráfico de curvas características de um motor CC.....	28
Figura 4. Modelo de referência de IoT	34
Figura 5. Aplicações de IoT.....	36
Figura 6. Arquitetura de implementação para IoT	37
Figura 7. Integração de uma rede de IoT com um motor elétrico.....	39
Figura 8. Motor de Corrente Contínua da série GBM.....	42
Figura 9. Gráfico de variáveis Corrente e Velocidade de Rotação - Modelo.....	44
Figura 10. Gráfico de potências - Modelo	45
Figura 11. Gráfico de desempenho - Modelo	45
Figura 12. Circuito elétrico para medição de tensão	51
Figura 13. Esquema de ligação dos sensores	52
Figura 14. Fita com superfície reflexiva para sensor óptico	53
Figura 15. Dispositivos utilizados	54
Figura 16. Montagem experimental.....	55
Figura 17. Fluxograma para desenvolvimento do algoritmo	56
Figura 18. Gráfico de variáveis com variação de tensão	58
Figura 19. Gráfico de potências com variação de tensão	59
Figura 20. Gráfico de desempenho com variação de tensão	59
Figura 21. Gráfico de variáveis com variação de temperatura	61
Figura 22. Gráfico de potências com variação de temperatura.....	61
Figura 23. Gráfico de desempenho com variação de temperatura	62
Figura 24. Definição de torque máximo para condições de temperatura	64
Figura 25. Fluxograma do algoritmo de sensoriamento	65
Figura 26. Tempo para realização de medidas	67
Figura 27. Aquisição de dados pelos sensores.....	69
Figura 28. Análise da variação dos parâmetros após desgaste de escovas.....	70
Figura 29. Análise da variação dos parâmetros após desmagnetização do ímã ..	71
Figura 30. Pontos sob condições normais de operação	74

Figura 31. Região de operação normal.....	74
Figura 32. Pontos sob condições normais e anormais de operação.....	78
Figura 33. Agrupamento dos pontos em clusters.....	78
Figura 34. Gráfico com todas as condições medidas e limites.....	79
Figura 35. Determinação de áreas de alerta.....	80
Figura 36. Definição das regiões de operação.....	83
Figura 37. Árvore de decisão para detectar a região de operação.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações fundamentais de um motor CC de ímã permanente.....	28
Tabela 2. Aspectos gerais sobre o monitoramento de condição.....	32
Tabela 3. Condições definidas para a aplicação.....	49
Tabela 4. Medidas experimentais em condições normais de operação.....	72
Tabela 5. Medidas experimentais em condições anormais de operação.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Motor C.C – Motor de corrente contínua.

IoT – Internet das Coisas (*Internet of Things*).

C.C. – Corrente continua.

C.A. – Corrente Alternada.

M.S. – Motor Síncrono.

M.I. – Motor de indução.

S.R.M. – Motor de relutância magnética (*Switched Reluctance Motor*).

P.M. – Imã permanente (*Permanent Magnet*).

B.L. – Motores sem escovas (*Brushless*).

C.M. – Monitoramento de condição (*Condition Monitoring*).

I.M.C. – Monitoramento inteligente de condição (*Intelligent Condition Monitoring*).

M.S.A. – Módulo sensor-atuador.

M.C.D – Módulo concentrador de dados.

S.O.A – Área segura de operação (*Safe Operating Area*).

P.W.M. – Modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivo principal	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Organização do trabalho.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO	19
2.1	Motores elétricos	20
2.2	Modelo de motor de corrente contínua, com escova e ímã permanente	21
2.3	Motores elétricos com monitoramento e controle eletrônico.....	29
2.4	Detecção de falhas em motores.....	30
2.5	Internet das coisas (<i>Internet of Things</i> – IoT).....	32
2.6	Sistemas de gerenciamento.....	38
3	Proposta do trabalho.....	39
4	Materiais e métodos utilizados.....	41
4.1	Avaliação das características elétricas e mecânicas de motores elétricos	42
4.1.1	Avaliação por variação de tensão	46
4.1.2	Avaliação por variação de temperatura	47
4.1.3	Estimação dos dados através do modelo.....	47
4.2	Metodologia de sensoriamento de motores aplicados a sistemas.....	48
4.2.1	Avaliação do motor em condições normais	49
4.2.2	Avaliação do motor em condições anormais	49
4.3	Possibilidade de sensoriamento para um motor inteligente.....	50
4.3.1	Montagem experimental e sensores utilizados.....	50
4.3.2	Software e algoritmo para medição.....	55
4.4	Sensoriamento das variáveis do motor em tempo real.....	56
5	Resultados e Discussão	57
5.1	Caracterização de desempenho de um motor.....	57
5.1.1	Caracterização do motor com variação da tensão de alimentação.....	57
5.1.2	Caracterização do motor com variação de temperatura	60
5.1.3	Análise da eficiência de conversão de potência com temperatura	62
5.2	Sensoriamento do motor.....	65
5.2.1	Algoritmo desenvolvido	65
5.3	Resultados de teste do motor monitorado.....	67
5.4	Análises de variações de comportamento do motor.....	69

5.4.1	Caso de um motor novo comparado a um motor com desgaste quase total das escovas de carvão.....	69
5.4.2	Caso de um motor normal comparado a um motor desmagnetizado.	71
5.5	Análises de dados de um motor aplicado a um sistema.....	71
5.5.1	Dados medidos em condições normais de operação	72
5.5.2	Dados medidos em condições anormais para o sistema.....	76
5.5.3	Motor atuando como sensor para a proteção de um sistema	81
5.5.4	Árvore de decisão e teste das condições	84
6	Conclusão	87
6.1	Comentários gerais.....	87
6.2	Possibilidades de aplicação	89
6.3	Trabalhos Futuros.....	90
	Referências.....	92

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico acentuado dos últimos tempos tem proporcionado um grande aumento da disponibilidade de tecnologias embarcadas para o desenvolvimento de novos produtos e soluções, aproximando cada vez mais suas aplicações às necessidades dos usuários. Isso vem acontecendo em decorrência da produção e disponibilização em larga escala de tecnologias que podem ser integradas para funcionar em conjunto com a infraestrutura de telecomunicações disponível, agregando assim novas possibilidades e mercados. Esses fatos têm aumentado a quantidade de produtos com o objetivo de levar conforto, praticidade e qualidade de vida aos usuários através dispositivos de fácil acesso e controle e que trazem uma grande quantidade de componentes embarcados.

Tal desenvolvimento tecnológico tornou-se possível em decorrência da massificação da produção de sensores, transmissores e microcontroladores, o que viabilizou uma grande quantidade de dispositivos integrados e conectados. Além disso, esse desenvolvimento conta com a aceitação de mercado, tornando-se uma revolução na sociedade e na forma de vida de usuários. Esse ecossistema conectado utiliza-se de uma ampla variedade de produtos com diversas tecnologias integradas, constituindo um grande número de utilidades e opções aos seus usuários. Considerando o aumento da quantidade de pessoas que utilizam aplicativos e se conectam a esse ecossistema, aumenta-se ainda mais a demanda por novos desenvolvimentos e a possibilidade de testar protótipos com novas propostas. Isso tudo aumenta não só a quantidade, mas também a complexidade de soluções criadas para as aplicações.

As complexas aplicações que tem se desenvolvido demandam cada vez mais dispositivos com um alto nível de tecnologia e processamento agregado que tenham também maior autonomia. Esses dispositivos funcionam como ferramentas de fácil utilização e que apresentam as mais variadas funções, podendo tomar decisões, realizar pré-processamento de dados e transmitir informação útil a sistemas gerentes de supervisão e controle. Tendo em vista

isso, aumentaram-se as formas de suprir necessidades que podem aparecer em projetos, abrem-se novas opções para aplicação e desenvolvimento de tecnologias em todas as áreas do conhecimento, e o processamento dos sistemas gerentes passa a ficar mais dedicado à aplicação, sem gastos para tratamento dos dados. A junção dessas ferramentas, formando um elemento inteligente conectável em rede, configura um objeto ou "coisa" que se integra à rede da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) e pode ser utilizado para solução de problemas mais complexos, garantindo ainda maior confiabilidade.

1.1 Motivação

Os desenvolvimentos de aplicações que necessitam de movimentação mecânica normalmente utilizam motores elétricos como atuadores, estando esses presentes em equipamentos e sistemas eletromecânicos. Exemplos desses sistemas que apresentam grande potencial futuro podem ser encontrados em veículos automotivos, automações residenciais e industriais, controle de processos, agronegócio, dentre outros, e trazem maior valor agregado, inteligência e tecnologia a cada área de aplicação.

Em contrapartida à necessidade citada, o desenvolvimento de sistemas complexos necessita da cooperação de especialistas de áreas como computação, telecomunicações, eletrônica, e para o estudo proposto neste trabalho, um especialista em motores elétricos. Esse trabalho em equipe é essencial para garantir maior qualidade, efetividade, otimização e segurança das soluções desenvolvidas tornando-as mais robustas e confiáveis aos seus usuários. Devido a essa demanda crescente por aplicações com motores, e a inerente dificuldade de utilização, surge a motivação deste trabalho, que busca tornar a aplicação de motores algo mais fácil e intuitivo aos desenvolvedores de sistemas, de modo que esses não tenham necessidade de conhecimento especializado na área, para utilização e gerenciamento de motores elétricos em seus sistemas e aplicações. Além do controle e gerenciamento, o trabalho também tem como motivação utilizar o motor não apenas como um atuador, mas também como um sensor de informações características do sistema em que esteja instalado, capacitando-o a transmitir informações pré-processadas para outros sistemas

gerentes e tornando-o utilizável por qualquer usuário sem a necessidade de um conhecimento específico sobre motores elétricos.

1.2 Objetivos

As seções 1.2.1 e 1.2.2 descrevem o principal objetivo do trabalho, e os objetivos mais específicos necessários para que o principal seja atingido.

1.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo principal propor um método de monitoramento para processar e extrair informação útil dos dados capturados através do sensoriamento de um motor elétrico, através de uma eletrônica embarcada a ele, de modo a possibilitar uma avaliação do estado de operação do motor, prevendo-se desgastes e possíveis falhas. Além disso, o trabalho propõe a utilização do sensoriamento de motores elétricos para obtenção de informações sobre o sistema ao qual estejam aplicados. Isso é possível tendo em vista que o motor está a todo o momento sentindo a reação do sistema através do torque mecânico que ele desenvolve, tornando-se assim não apenas um atuador, mas também sensor do sistema. Embora desenvolvido para um tipo específico de motor de corrente contínua, o método poderá ser aplicável a qualquer tipo de motor elétrico.

1.2.2 Objetivos específicos

Constituem objetivos específicos deste trabalho:

- Determinar quais grandezas devem ser sensoriadas e como instrumentar um motor elétrico para a realização desse sensoriamento.
- Propor uma forma de se identificar e avaliar as informações relativas ao sistema obtidas através do sensoriamento do motor.
- Avaliar quais informações podem ser obtidas com o processamento dos dados e qual a utilidade delas para um sistema de gerenciamento.

- Avaliar como a degradação funcional do motor pode ser diagnosticada pelo sensoriamento de variáveis.
- Avaliar como o sensoriamento de variáveis pode permitir a detecção de falhas de forma preditiva.
- Propor um motor "coisa" para aplicações na área de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT).
- Propor a aplicação do motor como sensor e atuador em sistemas eletromecânicos.
- Elaborar um método genérico de gerenciamento que seja aplicável a qualquer outro tipo de motor elétrico.

1.3 Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação teórica na qual este trabalho se baseia, cobrindo os conceitos sobre Motores Elétricos com foco em motores de corrente contínua, Internet das Coisas e Sistemas de Gerenciamento.

O Capítulo 3 apresenta a Proposta de Trabalho desenvolvida nessa dissertação.

O Capítulo 4 detalha a Metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema de monitoramento, bem como os experimentos a serem realizados.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos.

As conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 6, bem como as perspectivas de Aplicação e de Trabalhos Futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO

O trabalho que será desenvolvido se inspira em estudos e desenvolvimentos relacionados a motores elétricos e suas aplicações. Dentre os principais assuntos sobre motores elétricos, o motor inteligente é uma tendência que vem sendo tratada desde antes do ano 2000, como pode ser constatado em (DISCENZO et al., 1999) onde apresenta-se uma proposta de nove níveis de inteligência de motores, que consideram dar ao motor capacidades como se auto monitorar, controlar, realizar análises, prever problemas dentre outras. A implementação prática desses níveis de inteligência, no entanto, requerem um estudo aprofundado sobre técnicas de predição de falhas como as propostas por (BONALDI et al., 2000) e (MILJKOVIĆ, 2015).

Além disso, são necessárias técnicas de controle quando se tratam de motores sem escova (Brushless), pois esses só funcionam através de um controle eletrônico e podem apresentar valores de eficiência superiores a 80%, como encontrado em (BOSCH *EC motors for engine cooling fans*). As duas características citadas anteriormente, por sua vez, dependem de um sensoriamento e processamento de variáveis para serem embarcadas e se comunicarem com sistemas de gerência externos. Isso é um fator que dificultou a implantação de inteligência embarcada em motores por limitações tecnológicas e alto custo dos componentes, o que torna o produto caro ao mercado.

No entanto, essas barreiras vêm sendo vencidas e os motores já apresentam características de inteligência como é o caso do motor FED da BOSCH que pode possuir uma eletrônica embarcada capaz de realizar o controle, realizar funções de proteção e diagnóstico como pode-se constatar em (BOSCH *EC motors for engine cooling fans*) e (BOSCH *Wiper Direct Actuator WDA*). A aplicação desses motores tem como foco o mercado automotivo, mas pode ser encontrada também em sistemas de aplicações voltados a áreas de saúde como apresentado em (GNATUS) que tem como exemplo a aplicação de motores para controle de altura e inclinação de cadeiras odontológicas, áreas de agronegócio (SEEDER) que utilizam motores para controlar a quantidade de sementes plantadas e o espaçamento entre cada uma delas, dentre outras. Todas essas aplicações abrem espaço para desenvolvimento, implementação e aplicações de técnicas mais avançadas como é o caso de redes neurais utilizadas para

detecção de falhas de motores (CHOW; SHARPE; HUNG, 1993). Isso tudo ganha ainda mais força com a disponibilidade de soluções embarcáveis que podem conectar motores à *internet* com o objetivo disponibilizar dados através de uma plataforma que pode ser adaptada de acordo com a tecnologia desejada, como proposto por (WAPLES, 2015), (MEDINA-GARCÍA, 2017) e (SHAIKH M.; SHAIKH N., 2016).

A seguir, são apresentados conceitos sobre Motores Elétricos de corrente contínua atuais existentes no mercado, explicando seu princípio de funcionamento e modelo elétrico. Discute-se também a Internet das Coisas e seu modelo de referência, concluindo-se com as características essenciais de Sistemas de Gerenciamento de aplicações.

2.1 Motores elétricos

Os motores elétricos são elementos que proporcionam movimento a uma grande quantidade de aplicações, que têm sido desenvolvidas e adaptadas ao longo dos anos. Existem diferentes modelos de motores elétricos com características construtivas distintas, o que resulta em variadas características eletromecânicas, mesmo que baseados nos mesmos princípios físicos.

Dentre todos os tipos de motores, as principais características que os definem são relacionadas à sua forma de alimentação, que pode ser de corrente alternada (C.A.) ou contínua (C.C.), e à técnica de geração de campo, que pode ser apenas por indução ou com uso de ímãs permanentes. Dentre todas essas características destacam-se os motores de passo, motores de indução (M.I.), servo-motores, motores de relutância magnética (ou *Switched Reluctance Motor* - S.R.M.), motores síncronos (M.S.), motores com escovas, motores com ímã permanente (*Permanent Magnet* – P.M.) e os motores sem escovas, denominados *Brushless* (B.L.), que têm sido altamente pesquisados atualmente. Esses motores têm suas características apresentadas e discutidas em (YILDIRIM; POLAT; KURUM, 2014) e (IONEL, 2010).

No que diz respeito às características de um motor elétrico, essas devem ser avaliadas para cada aplicação específica. A título de exemplo, é possível citar o artigo (YILDIRIM; POLAT; KURUM, 2014), o qual faz uma

avaliação comparativa de alguns tipos de motores elétricos, para classificar aquele que melhor se encaixa em uma aplicação para veículos elétricos. O referido artigo também apresenta uma tabela de um levantamento estatístico, demonstrando que existem muitos tipos de motores elétricos com aplicações em varias áreas.

Além disso, vale ressaltar que existem outras aplicações de motores, em sistema de ventilação, bicicletas motorizadas, bombas de água, refrigeradores, máquinas de limpeza, limpadores de para-brisa, janelas automatizadas, as quais são provenientes de sistemas automotivos ou casas automatizadas, como se verifica em (IONEL, 2010), (MORIMOTO; TAKEDA; MURAKAMI, 2014), que apresentam análises de características e aplicações de motores utilizados em residências, e em (ULRICH, 2005) que aborda aplicações voltadas à mobilidade.

Segundo um fabricante nacional de motores elétricos (WEG, 2018), motores de corrente contínua permitem o controle preciso da velocidade de rotação numa ampla faixa, apresentam uma baixa relação peso/potência, alta eficiência, baixo nível de ruído, construção robusta e alta resistência a vibrações.

Podem ser fabricados motores com tensões de 110 a 1000 volts, potências de até 10.000 kW e torques de 2 a 200.000 N.m,. Normalmente são aplicados em aplicações industriais diversas, como por exemplo:

- Máquinas operatrizes em geral;
- Bombas a pistão;
- Tornos;
- Bobinadeiras;
- Máquinas de moagem;
- Máquinas têxteis e de papel;
- Guinchos, guindastes e elevadores;
- Veículos de tração;
- Prensas e laminadores.

Para aplicações automotivas pode-se encontrar motores CC que funcionam com alimentação de 12 V ou 24 V e torques de 40 N.cm até 60 N.m. como

apresentado no catálogo (BOSCH I-Buisness E-Motoren 2017 Catalogue, 2017). Para esses casos algumas das aplicações mais comuns são:

- Sistema de arrefecimento de motor;
- Sistema de ventilação de ar condicionado;
- Sistemas limpadores de para-brisa dianteiro e traseiro;
- Sistema de controle de vidro;
- Sistema de abertura de teto solar;
- Freios ABS.

Considerando todas essas características de motores elétricos, um tipo que vem sendo empregado atualmente em aplicações distintas e que apresenta potencial para diversas aplicações futuras são os motores de corrente contínua com escova e ímã permanente (BOSCH *I-Buisness E-Motoren 2017 Catalogue*, 2017). Esses motores apresentam como principais características sua grande variedade de modelos, tamanhos e potência, forma de construção robusta e simples, baixo custo e simplicidade de controle. São muito utilizados no mercado automobilístico em aplicações em limpadores de para-brisa, freios ABS, controle de vidro, sistema de arrefecimento, ar condicionado, teto solar, ajuste de espelhos e bancos.

2.2 Modelo de motor de corrente contínua, com escova e ímã permanente

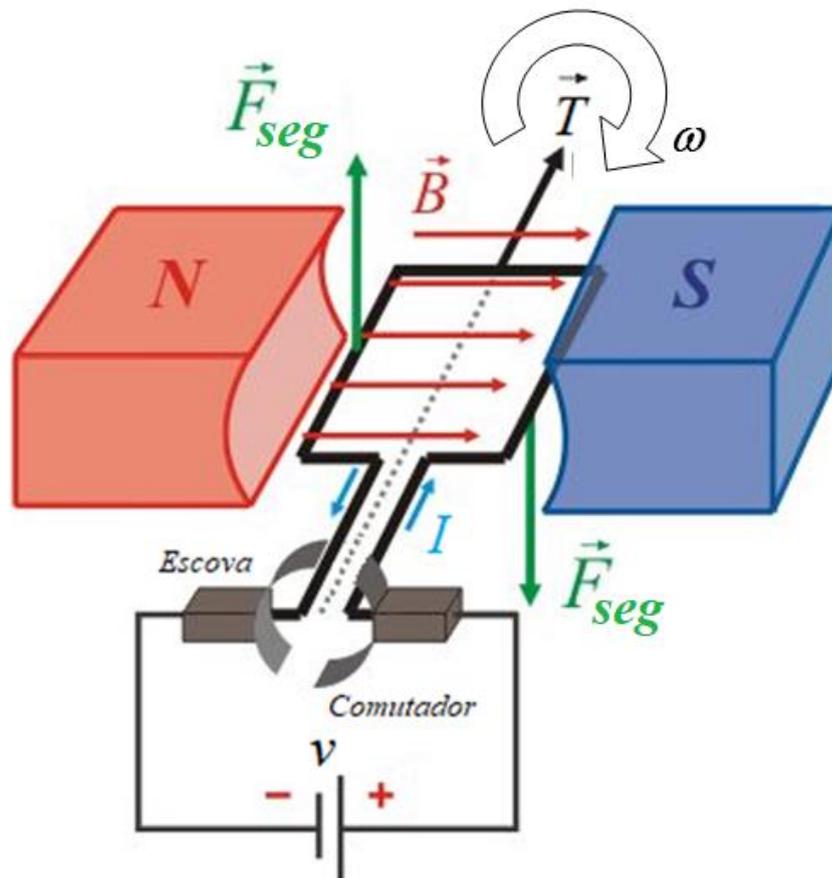
Os motores de corrente contínua utilizados neste trabalho têm como princípio de funcionamento a geração de movimento rotativo através das forças de atração e repulsão causadas numa espira de fio condutor percorrido por uma corrente elétrica em relação ao campo magnético criado por um ímã permanente.

Na Figura 1 é ilustrada a construção básica de um motor de corrente contínua. Os polos magnéticos **N** e **S** do ímã permanente situado no estator criam um campo magnético **B**. Uma espira do rotor, construída por um fio condutor de comprimento total **L** está imersa no campo magnético **B**, e é percorrida por uma corrente elétrica **I**, alimentada por uma fonte de tensão externa **v**.

Sobre a espira define-se uma força magnética **F_{seg}** em cada segmento da mesma que esteja perpendicular ao campo magnético, em sentidos

opostos, ou seja, define-se um binário de forças. Entretanto, como a espira é construída de forma a rodar em torno do eixo pontilhado indicado na Figura 1, o binário de forças **F_{seg}** resulta num movimento rotacional até que o plano da espira esteja perpendicular à posição mostrada na figura, situação em que a resultante de força se anula. Por inércia, a espira continua a rodar além da posição perpendicular, e nessa situação, os contatos elétricos da fonte de alimentação são permutados pelo conjunto comutador e escovas, de modo que a direção da corrente seja invertida bem como seja definida um novo binário de forças que mantenha a espira em rotação de forma contínua, com velocidade de rotação ω . O torque **T** desenvolvido no eixo de rotação da espira é determinado pelo produto da força resultante **F** , de valor duas vezes **F_{seg}** , e a distância **r** do segmento linear da espira em relação ao eixo de rotação.

Figura 1. Princípio de funcionamento de um motor CC



Fonte: (Imagem1) modificada pelo autor.

As equações desenvolvidas a seguir seguem um roteiro adaptado à descrição de um motor de corrente contínua com escovas e ímã permanente, e foram baseadas em (HUGHES; DRURY, 2013).

Cada segmento de comprimento $L/2$ deste condutor, submetido à ação do campo magnético B , experimenta uma força F_{seg} dada por:

$$F_{seg} = B \cdot l \cdot \frac{I}{2} \quad (\text{Eq. 1})$$

que contribui com um torque T_{seg} de valor:

$$T_{seg} = F_{seg} \cdot r = N \cdot B \cdot l \cdot r \cdot \frac{I}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde r é a distância do segmento $L/2$ da espira ao eixo do rotor.

Como cada espira tem dois segmentos de comprimento $L/2$, os valores da força F e do torque T resultantes são dobrados.

$$F = 2 \cdot F_{seg} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$T = 2 \cdot T_{seg} \quad (\text{Eq. 4})$$

Construindo-se rotores com bobinas de N espiras com o objetivo de intensificar a força exercida e, portanto, aumentar o torque, obtém-se:

$$T = N \cdot B \cdot l \cdot r \cdot I \quad (\text{Eq. 5})$$

$$T = Kt \cdot I \quad (\text{Eq. 6})$$

Portanto, observa-se na Eq. 6 uma dependência linear crescente entre o torque e a corrente consumida pelo motor. Define-se a constante Kt , denominada constante de torque do motor:

$$Kt = N \cdot B \cdot l \cdot r \quad (\text{Eq. 7})$$

Resolvendo a Eq. 6 para I :

$$I = \left(\frac{1}{Kt} \right) T \quad (\text{Eq. 8})$$

Quando os condutores da bobina do rotor se movem através do magnético campo do estator, uma força contra-eletromotriz ou tensão é gerada.

Cada espira de comprimento de comprimento L produz uma tensão E de polaridade contrária à tensão externa aplicada à bobina:

$$E = B \cdot l \cdot u \quad (\text{Eq. 9})$$

$$u = r \cdot \omega \quad (\text{Eq. 10})$$

onde a Eq. 10 é a velocidade tangencial do condutor. Assim, a tensão ou força contra-eletromotriz total produzida por N espiras vale:

$$E = N \cdot B \cdot L \cdot r \cdot \omega \quad (\text{Eq. 11})$$

$$E = K_e \cdot \omega \quad (\text{Eq. 12})$$

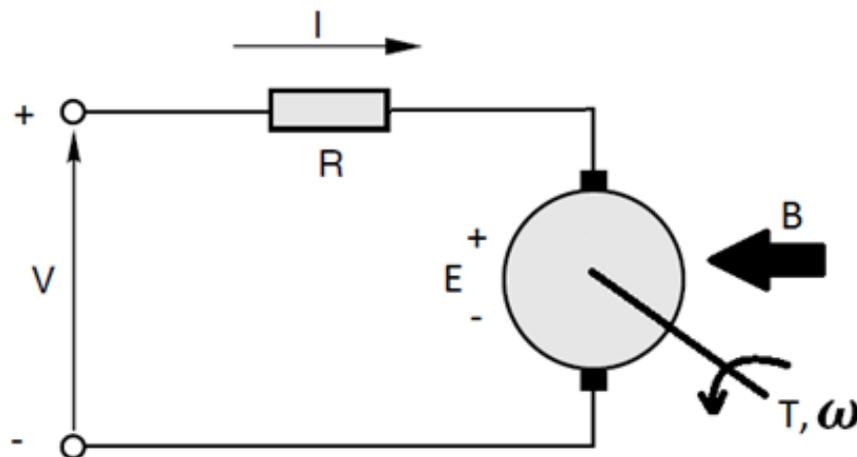
Define-se K_e como a **constante de força contra-eletromotriz**:

$$K_e = N \cdot B \cdot l \cdot r \quad (\text{Eq. 13})$$

Observa-se que K_t (Eq. 7) e K_e (Eq. 13) apresentam a mesma dependência de variáveis e possuem, portanto, o mesmo valor.

Os motores de corrente contínua (motores C.C.) e ímã permanente podem ser modelados pelo circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 2, proposto no capítulo 3 de (HUGHES; DRURY, 2013), que permite a definição de equações que relacionam o comportamento das variáveis elétricas e mecânicas do motor.

Figura 2. Modelo elétrico de um motor de corrente contínua



Adaptado de Austin Hughes e Bill Drury (2013)

Nesse modelo, a tensão aplicada aos terminais do motor está representada por v , R representa a resistência equivalente do motor englobando as resistências dos contatos, escovas, comutadores e enrolamento, B o campo magnético do ímã permanente, I a corrente que passa pelo motor e E a força contra eletromotriz gerada pelo motor em decorrência da velocidade de rotação ω . Como consequência da ação conjunta dessas variáveis, o motor apresenta o torque T .

Baseado no modelo da Figura 2 pode-se definir as equações de funcionamento do motor. Para isso, assume-se que o motor esteja funcionando em regime permanente com rotação constante, desconsiderando-se os transitórios de partida e alterações dinâmicas no valor das variáveis.

Dessa forma, aplicando-se a **Lei de Kirchhoff das Tensões** (LKT) no circuito da Figura 2 obtém-se:

$$v = R \cdot I + E = R \cdot I + K_e \cdot \omega \quad (\text{Eq. 14})$$

Resolvendo para I :

$$I = \frac{(v-E)}{R} = \frac{(v-K_e \cdot \omega)}{R} \quad (\text{Eq. 15})$$

Substituindo-se a Eq. 15 na Eq. 6 obtém-se:

$$T = K_t \cdot I = K_t \cdot \frac{(v-K_e \cdot \omega)}{R}$$

Rearranjando os termos:

$$T = -\left(\frac{K_t \cdot K_e}{R}\right) \cdot \omega + \left(\frac{K_t \cdot v}{R}\right) \quad (\text{Eq. 16})$$

$I = v / R$ é a corrente consumida quando $\omega = 0$, ou seja, quando o motor estiver parado, e é chamada de corrente de bloqueio, correspondendo ao seu valor máximo.

O torque produzido com o motor parado, $T = K_t \cdot v / R$, é chamado de torque de bloqueio (ou *stall torque*). Observa-se, portanto, uma dependência linear decrescente entre o torque e a velocidade de rotação motor (Eq. 16).

Resolvendo para a velocidade de rotação ω :

$$\omega = -\left(\frac{R}{K_t K_e}\right) \cdot T + \left(\frac{v}{K_e}\right) \quad (\text{Eq. 17})$$

A potência elétrica consumida pelo motor (potência de entrada) é dada por:

$$P_e = v \cdot I \quad (\text{Eq. 18})$$

A potência mecânica desenvolvida pelo motor (potência de saída) pode ser calculada como:

$$P_m = T \cdot \omega \quad (\text{Eq. 19})$$

A eficiência de conversão de energia η é a razão entre a potência de saída pela potência de entrada:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \quad (\text{Eq. 20})$$

Para as equações apresentadas, **K_t** e **K_e** representam respectivamente as constantes de torque e da força contra eletromotriz, que são características de um determinado motor. Essas constantes têm valores específicos dependendo do campo magnético do ímã permanente e das características construtivas do motor. Neste trabalho, **K_t** e **K_e** são denominadas **constantes características do motor CC**.

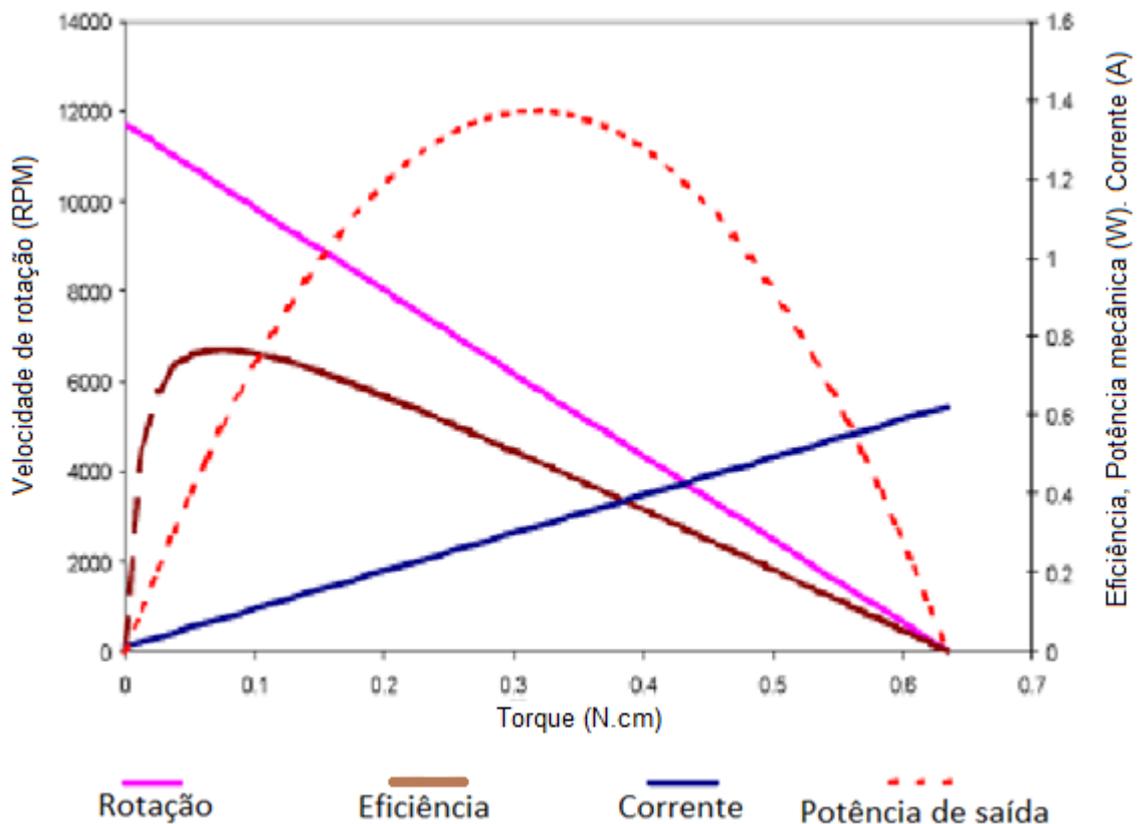
As constantes características podem ser determinadas através da medida das variáveis elétricas de entrada do motor (tensão e corrente) e das variáveis mecânicas de saída do motor (torque e rotação). Para medida dessas variáveis, pode-se utilizar uma bancada de ensaios semelhante à apresentada por (SILVA; KLEIN; BRUSAMARELLO, 2010), ou utilizar metodologias como a proposta por (BASILIO; MOREIRA, 2001) ou (RASMUSSEN; RITCHIE, 1997).

São apresentados na Figura 3 os gráficos típicos de desempenho de um motor CC em função da variável torque (eixo horizontal), onde a corrente consumida esta representada pela linha azul (Eq. 8), a velocidade rotação pela linha de cor rosa (Eq. 17), a potência mecânica é pela curva vermelha pontilhada (Eq. 19) e a eficiência pela curva de cor marrom (Eq. 20).

Tabela 1. Equações fundamentais de um motor CC de ímã permanente.

Relação entre torque e corrente consumida	$I = \left(\frac{1}{Kt}\right) T$
Relação entre torque e velocidade de rotação	$\omega = -\left(\frac{R}{Kt \cdot Ke}\right) \cdot T + \left(\frac{v}{Ke}\right)$
Relação entre torque e potência mecânica	$Pm = T \cdot \omega$
Relação entre torque e eficiência	$\eta = \frac{Pm}{Pe}$

Figura 3. Exemplo de um gráfico de curvas características de um motor CC

Adaptado do *white paper* da (Micromo,2018)

O conjunto de equações resumidas na Tabela 1, apresentadas graficamente na Figura 3, definem o funcionamento do motor e representam as informações que normalmente são descritas nos manuais técnicos de motores de corrente contínua comerciais, tais como os encontrados em (MICROMO, 2018) e (BOSCH *I-Buisness E-Motoren 2017 Catalogue*, 2017).

Pode-se encontrar na literatura modelos ainda mais detalhados e precisos sobre motores elétricos, como apresentado por (SINCERO et al., 2010), onde se encontra uma modelagem mais focada em características do coletor de motores. Pode-se citar como exemplo também o trabalho proposto por (SHIN; LEE, 2010), onde se apresenta uma proposta mais refinada para modelagem considerando-se características das escovas dos motores e suas variações de acordo com o desgaste.

2.3 Motores elétricos com monitoramento e controle eletrônico

Devido à necessidade de controle dos motores elétricos e a necessidade de estabilidade para desenvolvimento de sistemas mais complexos buscando a melhor eficiência para todas as condições de operação possíveis, diversos estudos envolvendo o projeto de circuitos eletrônicos e algoritmos com finalidade de controle têm sido desenvolvidos atualmente. Tais estudos podem ser exemplificados por (DUMA, 2012) e (ALMEIDA; FERREIRA; BOTH, 2005), que buscam diferentes formas de controle para diferentes motores, com *hardwares* que podem ser embarcados nos motores diminuindo a necessidade e complexidade dos sistemas externos que os utilizam.

Esses motores com controle eletrônico embarcado já foram desenvolvidos e estão sendo comercializados. Embora mais caros por serem elementos mais complexos, eles já possuem maior maturidade sobre a melhor forma de controle em relação a uma aplicação específica, e são mais fáceis de serem aplicados, já que o controle pode ser realizado pelo envio de comandos por protocolos de comunicação, isentando o usuário da necessidade de conhecimento do processo de controle.

Para fechar a malha de controle, é necessário o sensoriamento de motores. Esse sensoriamento possibilita a medição de corrente, tensão,

temperatura, velocidade de rotação e torque. Exemplos de sensoriamento de motores podem ser encontrados em (PRETZ, 2014), (MACMINN et al., 1992) e (INFINEON).

2.4 Detecção de falhas em motores

O estudo de métodos de manutenção preventiva e preditiva para motores é algo que vem sendo pesquisado há muito tempo e de extrema importância para sistemas que precisam de confiabilidade e segurança para evitar riscos aos usuários, danos aos equipamentos e perdas financeiras.

Devido a essa importância, diversos métodos de detecção de falha e análise de riscos estão sendo desenvolvidos com a utilização de novas tecnologias ou seguindo novas tendências, como por exemplo, inteligência artificial (A.I.) e *Big Data analytics*.

Dentre esses métodos existem estudos de assinatura de corrente como descritos em (BONALDI et al., 2000) e (MILJKOVIĆ, 2015), que permitem detecção de falhas muito específicas através de análises do sinal de corrente, como exemplificado em (THOMSON; FENGER, 2001); SINGH; KUMAR; KUMAR, 2014) e que demandam processamento para realização dos cálculos e análises.

O monitoramento de condição, também conhecido como *Condition Monitoring* - CM, pode ser definido como uma técnica ou um processo de monitoramento das características operacionais de uma máquina de tal forma que alterações de valor ou mudanças de tendência das características monitoradas podem ser usadas para estimar a sua "saúde", ou mesmo prever a necessidade de manutenção antes que ocorra uma deterioração funcional ou avaria grave. (HAN, SONG, 2003).

Um sistema CM deve ser capaz de monitorar o funcionamento de máquinas, prevendo a necessidade de manutenção antes de uma deterioração operacional grave ou da ocorrência de avaria que cause paralisação, identificando e localizando os defeitos em detalhes e até mesmo permitindo a estimativa de vida das máquinas.

Quatro componentes fundamentais devem estar presentes em um sistema CM (HAN, SONG, 2003):

- a) Sensoriamento. Um sensor converte uma grandeza física em um sinal elétrico. Grandezas e fenômenos físicos podem ser monitorados de modo que os valores de uma variável ou suas mudanças sejam detectáveis para revelar falhas em estágios iniciais muito antes de se tornarem catastróficas. A escolha dos sensores adequados dependerá do método de monitoramento e do grau de conhecimento sobre os possíveis mecanismos de falha da máquina. Comumente, os sensores devem ser adequados para a medição em tempo real. Sensibilidade adequada, baixo custo e a característica são requisitos chave de sensores para aplicações de CM.
- b) Aquisição de dados. Um módulo de aquisição de dados é necessário para realizar a amplificação, filtragem e pré-processamento dos sinais elétricos analógicos providos pelos sensores, com posterior conversão analógico-digital. Deve dispor de armazenamento em memória local de dados e alguma forma de comunicação externa, cabeada ou sem fio.
- c) Detecção de falha. O objetivo principal é descobrir se há uma falha em estágio inicial aparecendo na máquina monitorada, para que alguma forma de alarme possa ser dada e a seguir uma análise mais profunda seja realizada. Existem dois métodos para detecção de falhas, o método referenciado por modelo e o método de extração de características. O primeiro detecta falhas comparando os resultados das medidas com as previsões de um modelo. Para a maioria dos métodos de extração de características, as tecnologias de processamento de sinal nos domínios do tempo e da frequência são usadas para se obter "assinaturas" que sejam características de um desempenho normal ou defeituoso.
- d) Diagnóstico. Os sinais anormais detectados precisam ser pós-processados de forma a resultar numa prescrição clara para a manutenção. Essa análise costumava ser feita por especialistas humanos e atualmente observa-se uma tendência para implementá-la automaticamente por computador, sem intervenção humana. As

prescrições apresentadas ao usuário devem incluir nome da falha, localização, condições operacionais da máquina nas circunstâncias de falha, sugestões de ações de manutenção, dentre outras.

As tarefas típicas de CM, o processo de implementação e as tecnologias relacionadas estão apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2. Aspectos gerais sobre o monitoramento de condição

Tarefa	Processo	Técnica principal	Característica	Resultado (saída)
Como monitorar variáveis?	Aquisição de dados	Sensoriamento, conversão A/D comunicação.	Tempo real, captura contínua e frequente.	Dados brutos ou pré-processados, com interferências.
Existe um defeito?	Deteção de defeito	Processamento digital de sinais.	Preditiva	Alertas, dados resumidos.
Qual o tipo de defeito e sua localização?	Reconhecimento de padrões, classificação de dados.	Lógica fuzzy, sistemas especialistas, redes neurais.	Tempo real e ação automática	Lista de defeitos, sugestões de ações ou de manutenção, detalhes sobre diagnóstico.
O que deve ser feito?	Assinalamento de estado e tomada de decisão			

Fonte: Traduzido de HAN e SONG, 2003

Percebe-se que o uso de técnicas avançadas de processamento digital de sinais e as tecnologias de inteligência artificial (*fuzzy logic*, redes neurais) são ferramentas poderosas na análise de dados. Como a existência de funções automáticas de interpretação dos dados e de diagnóstico em tempo real são características consideradas importantes em um sistema CM, o monitoramento de condição moderno pode ser denominado como Monitoramento Inteligente de Condição (ICM – *Intelligent Condition Monitoring*) (FABRÍCIO, 2018).

2.5 Internet das coisas (*Internet of Things – IoT*)

A Internet das Coisas é o conceito de uma rede de dispositivos conectados por onde trafegam informações e comandos utilizando-se a Internet. Estes dispositivos são capacitados para realizar processamento local, de modo a realizar comandos através de atuadores, baseando-se em informações obtidas

com os dados coletados através de sensores. Com essa plataforma, torna-se possível aumentar o potencial de monitoramento e controle remoto de uma ampla rede de dispositivos interconectados que compõem sistemas complexos (CISCO, 2014), (ITU, 2005). Ela torna-se ainda mais eficaz quando aplicada sobre a diversificada infraestrutura de telecomunicações disponível atualmente (GUBBI et al., 2013).

As aplicações de IoT podem realizar a comunicação através de uma grande variedade de tecnologias e protocolos. Com isso, torna-se possível a conexão de uma grande quantidade de elementos, sendo esses responsáveis pelo monitoramento e transmissão simultânea das variáveis de interesse relativas aos objetos monitorados, constituindo as redes de IoT. Essas redes devem ser confiáveis e seguras para conectar os usuários aos elementos, independente do ambiente em que seus elementos estão submetidos, fornecendo conectividade de qualidade para os dispositivos que costumam ser mais simples, menores e mais limitados. (conceito *Anytime, Anything, Anywhere*) apresentados por (GUBBI et al., 2013) e (ITU, 2005).

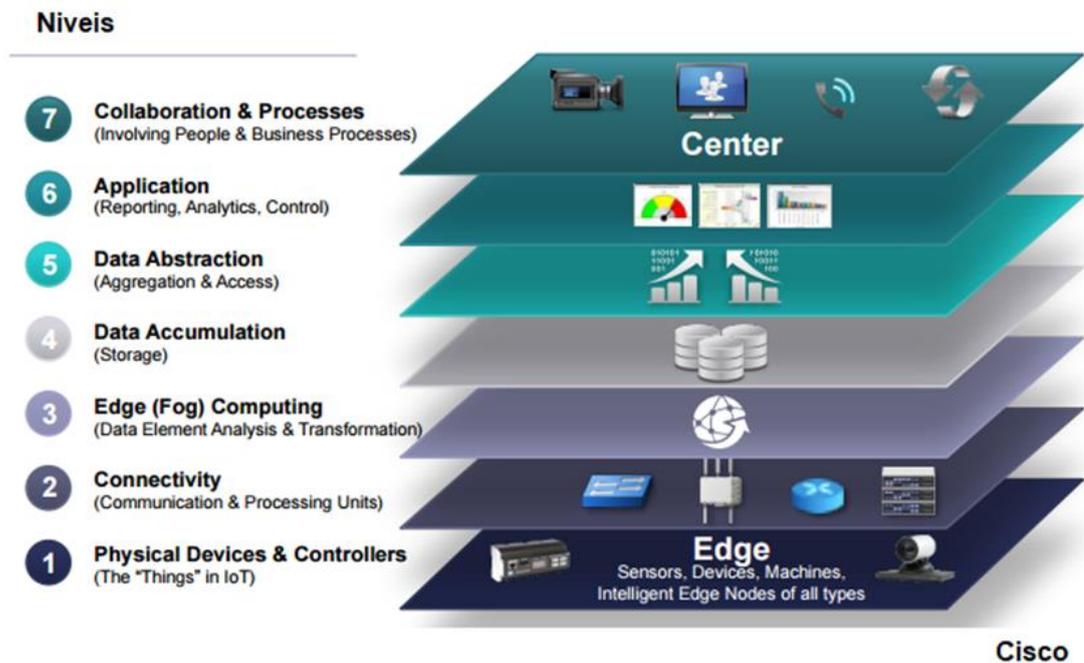
Uma das tecnologias utilizada que tem disseminado aplicações de IoT são as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) ,que tem como principais características a simplicidade, facilidade de aplicação e integração em conjunto com as redes para estabelecimento de pontos de monitoramento e atuação (GUNGOR; HANCKE, 2009).

Na Figura 4 é apresentada uma proposta de modelo referência para IoT sugerido pela (CISCO, 2014).

Este modelo divide as necessidades para implementação de lot nos seguintes níveis:

Nível 1 – **Physical** – Definido por todos os sensores, transdutores ou componentes específicos que captam sinais do ambiente e os transformam em variáveis elétricas proporcionais de corrente ou tensão.

Figura 4. Modelo de referência de IoT



Fonte: (CISCO, 2014)

Nível 2 – **Connectivity** – Refere-se ao processo de comunicação dos dados através de redes de comunicação como, por exemplo as RSSF.

Nível 3 – **Edge** – Trata-se da conexão com a Internet, onde se realiza o fluxo dos dados disponibilizando-os para a nuvem.

Nível 4 – **Data Accumulation** – É o nível onde ocorre o armazenamento em massa dos dados que também é conhecido como *Big Data*, caracterizada por uma grande quantidade de dados provenientes várias fontes.

Nível 5 – **Data Abstraction** – Nível onde se realiza um processamento de alto nível dos dados com o intuito de extrair e classificar informações.

Nível 6 – **Application** – É onde ocorre a análise da informação de acordo com a aplicação específica em questão, utilizando-se de técnicas modernas de *Data Analytics*.

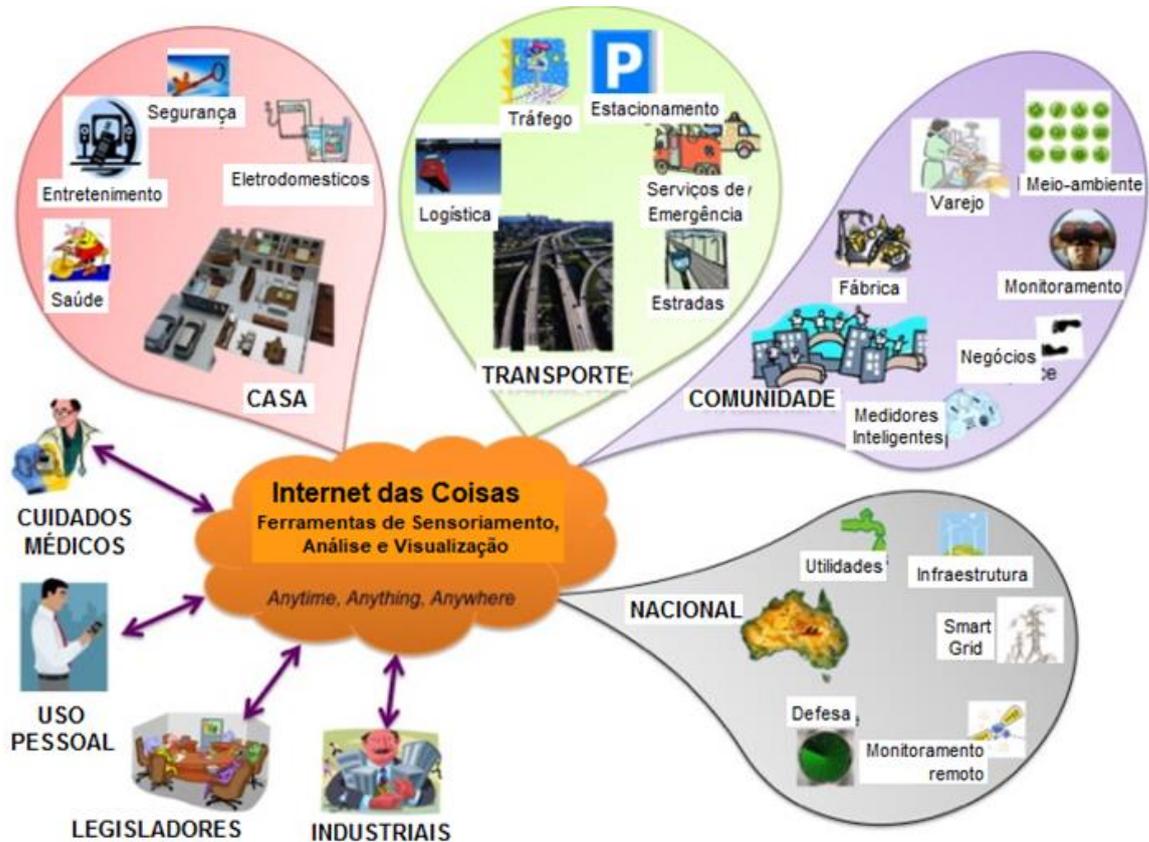
Nível 7 - **Collaboration & Processes** – O último nível do modelo onde ocorre a interação dos usuários e processos com a “coisa” monitorada, bem como o compartilhamento de informações entre processos, com dados não necessariamente relacionados.

A Internet das Coisas tem sido aplicada a diversas áreas, onde se tem como exemplos: processos de produção fabril como proposto em (FABRÍCIO, 2018), redes de energia (onde se destacam as redes de *Smart Grid*), monitoramento de saúde, segurança e ambiental, sistemas de transporte, etc. Em todos os exemplos, notam-se aplicações conectadas à Internet que podem ser controladas e monitoradas de qualquer lugar. Essa conectividade configura uma maior quantidade de dados recolhidos a partir de vários lugares onde se tem diferentes utilizações voltadas a aumento de eficiência, segurança e conforto. Isso ocorre com a incorporação de identificadores e dispositivos exclusivos conectados às pessoas, animais ou objetos.

Tendo em vista essa condição, configura-se como “coisa” uma pessoa com um monitor cardíaco para acompanhamento do seu estado de saúde, um animal com um GPS que monitora sua localização em uma fazenda ou ainda o monitoramento de uma variável ambiental em localização remota. Ao se analisar o contexto de mobilidade urbana, encontram-se exemplos de automóvel elétrico equipado com sensores para alertar ao condutor quando o nível de energia da bateria o impossibilitará de chegar ao seu destino. Para aplicações industriais, encontra-se o exemplo de monitoramento do motor elétrico de uma máquina de processo produtivo proposto em (FABRÍCIO, 2018). Dessa maneira pode-se considerar qualquer aplicação que realize a transmissão de informação através do sensoriamento e processamento de dados.

Na Figura 5 são ilustradas algumas áreas onde se tem aplicações de IoT que informam os impactos produzidos pelos dados processados (GUBBI et al., 2013). Com isso têm-se como usuários de IoT não apenas indivíduos isolados, mas também grandes organizações e instituições que desejam atuar de forma ampla em áreas de infraestrutura, utilidades, defesa, serviços públicos, etc.

Figura 5. Aplicações de IoT



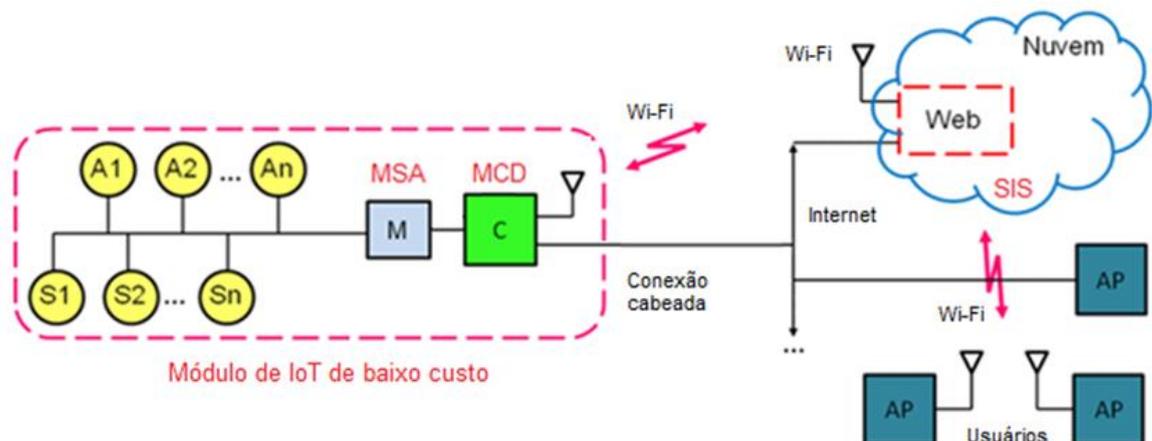
Fonte: traduzido de [GUBBI]

A Computação em Nuvem (ou *Cloud Computing*) é um paradigma referente ao armazenamento de dados, que tem sido desenvolvido recentemente e baseia na tecnologia de armazenamento virtualizado disponibilizado em *data centers* (FERNANDO; LOKE; RAHAYU, 2013). Esta plataforma funciona como um receptor de dados e pode ser utilizada como base para o desenvolvimento de aplicativos específicos ou ambientes de acesso a aplicativos de IoT (TAGO), (THINGSPEAK), (SIEMENS), (IBM), para armazenar, analisar e interpretar dados recebidos. Com isso, pode-se prover ao usuário uma ferramenta de visualização que facilita a compreensão dos dados armazenados e o auxilia na tomada de decisão. Dessa forma, o sensoriamento e processamento ocorrem de forma virtual e invisível ao usuário.

Tendo em vista isso, foi proposta por (BEHRENS; BARBOSA; TEIXEIRA, 2016) uma arquitetura de implementação para IoT, que consiste em um módulo

de IoT de baixo custo e um sistema de nuvem para interface com usuários e armazenamento de dados como ilustrado na Figura 6. Essa arquitetura considera que as conexões entre o módulo de IoT e o sistema pode ser cabeadas ou sem fio. É considerado um módulo de IoT um elemento que possua um microcontrolador (M) que realiza medidas por meio de sensores (S_1, S_2, \dots, S_n), realiza interações com o objeto monitorado através de atuadores (A_1, A_2, \dots, A_n), e possui um módulo de pré-processamento e interface de conexão com a internet (C).

Figura 6. Arquitetura de implementação para IoT



Legenda:

A_n – Atuadores

S_n – Sensores

M – Microcontrolador

C – Concentrador

AP – Aplicação

SS – Sistema de Aplicação

MSA – Módulo Sensor-Atuador

MCD – Módulo Concentrador de Dados

Fonte: (BEHRENS; BARBOSA; TEIXEIRA, 2016)

Um Módulo Sensor-Atuador (MSA) é composto basicamente por um submódulo processador M com capacidade de processamento local, normalmente baseado em um microcontrolador, que realiza interface com diversos sensores S_n e atuadores A_n , e possui também, de forma integrada ou discreta, um (transmissor-receptor) que dá suporte a protocolos de comunicação cabeada ou sem fio, comunicando-se com um Módulo Concentrador de Dados (MCD).

Um MCD coleta os dados capturados por um ou mais MSA's, realiza um tratamento preliminar desses dados visando sua sumarização, e na sequência se

comunica via Internet com um Sistema Supervisório ou de Aplicação (SS) hospedada em um servidor específico ou na nuvem, permitindo o acesso às informações do processo supervisionado por parte de usuários conectados por meio de aplicativos (AP). A aplicação SS realiza a análise final dos dados, mantém o histórico completo das informações coletadas, gera relatórios que facilitem o entendimento da informação de interesse pelos usuários do sistema e é responsável pela comunicação de alarmes nos casos em que as variáveis monitoradas exibam um comportamento fora do seu padrão normal (BEHRENS; BARBOSA; TEIXEIRA, 2016).

2.6 Sistemas de gerenciamento

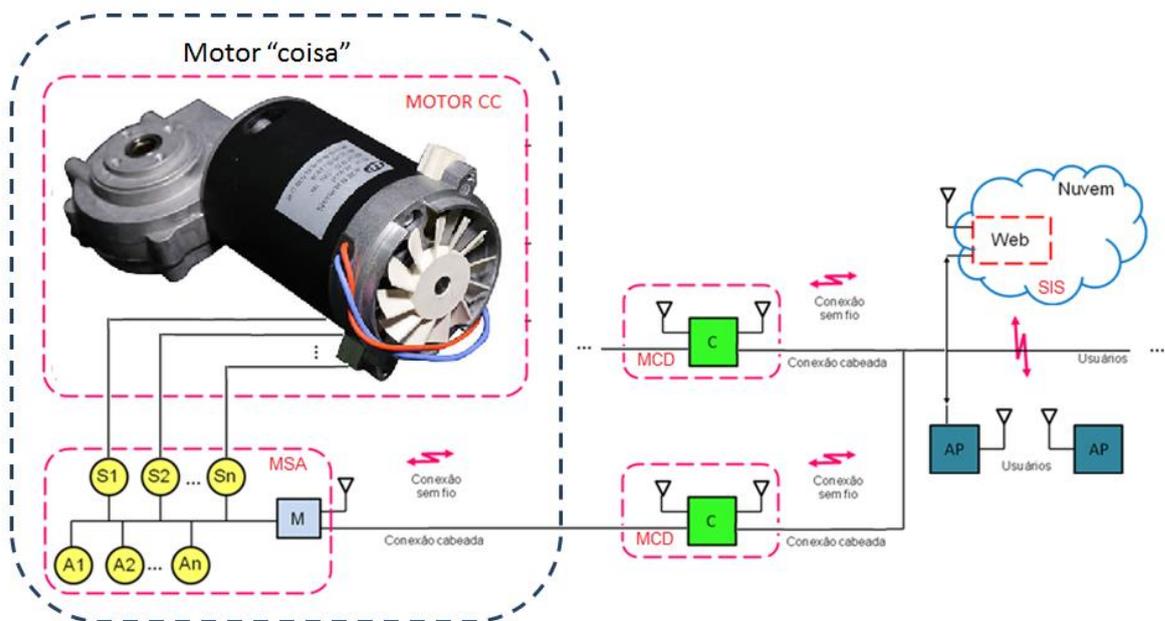
O gerenciamento de um sistema é algo essencial quando as aplicações necessitam de análise de dados ou para aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (*fuzzy logic*, redes neurais) como proposto por (CHOW; SHARPE; HUNG; 1993). Com isso podem-se gerar alertas de falhas e informar em tempo real aos responsáveis sobre problemas ou comportamentos incomuns. O gerenciamento permite também manter um banco de dados de forma organizada para execução de algoritmos de maior complexidade (podendo chegar a uma *big data analysis*), visando estudos de tendências e supervisão de sistemas. Além de tudo, o gerenciamento pode indicar necessidade de manutenção preventiva de componentes para garantir maior eficiência e tempo de vida as máquinas, informações de manutenção preditiva através da análise e detecção de sintomas que possam vir a se tornar problemas em um curto espaço de tempo, detectar mal uso ou sobrecarga do sistema durante aplicações. A proposta de desenvolver um motor elétrico com vários níveis de inteligência e capaz de realizar o diagnóstico da sua situação de operação foi proposta por (DISCENZO et al., 1999).

3 Proposta do trabalho

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um método de monitoramento de motores elétricos de corrente contínua com escovas e ímã permanente, realizado através de um módulo eletrônico agregado ao motor, desenvolvido especificamente para o sensoriamento da corrente consumida, da velocidade de rotação e da temperatura de operação. Conforme discutido na seção 0, essas variáveis se relacionam às constantes características K_e e K_t e às demais variáveis elétricas e mecânicas segundo as Eqs. 8 e 17, sendo portanto suficientes para caracterizar o estado de operação do motor CC, constituindo assim uma abordagem de Monitoramento de Condição tal como descrito na seção 2.4.

O sistema de monitoramento a ser desenvolvido tem como base a arquitetura proposta na Figura 6 da seção 2.5 (BEHRENS; BARBOSA; TEIXEIRA, 2016), que será adaptada conforme mostrado na Figura 7, com vistas à caracterização de um motor “coisa” em aplicações inseridas no contexto da Internet das Coisas.

Figura 7. Integração de uma rede de IoT com um motor elétrico



As variáveis monitoradas pelos sensores S_n do elemento M da Figura 7 devem ser pré-processadas no elemento C de modo a possibilitar o acompanhamento das condições de funcionamento do motor por parte de um

sistema de gerenciamento de aplicação externo SIS, com vistas à implementação de algoritmos de controle, detecção de comportamentos incomuns, detecção de desgastes ou falhas, ou mesmo ações de proteção pelos atuadores An.

Inicialmente, torna-se necessário caracterizar o funcionamento do motor CC em diversas condições de operação quanto à tensão de alimentação, carga submetida (que se reflete diretamente no torque desenvolvido pelo motor) e temperatura. Com base nessa caracterização inicial, torna-se possível definir diversas regiões de operação, sendo uma delas considerada normal, ou seja, a condição na qual as variáveis fundamentais estejam próximas das condições nominais de operação, nas quais o motor opera de forma “saudável”.

Em torno na região de operação normal, será possível o reconhecimento de regiões de operação anormal, associadas a alguma variação apreciável de tensão, carga ou temperatura, que caracterize potencial problema futuro. Dessa forma, será também possível correlacionar problemas conhecidos de degradação funcional às regiões de operação anormal, que modo que tal correlação indique a forma de se diagnosticar precocemente desgastes ou possíveis falhas.

Portanto, espera-se que o método de monitoramento de condição a ser desenvolvido e experimentalmente avaliado possa ser aplicado a qualquer motor elétrico que utilize sensores e microcontroladores embarcáveis e interconectáveis em rede. Além disso, o trabalho propõe a aplicação de um motor não apenas como atuador eletromecânico, mas também com sensor para obtenção de informações sobre o sistema ou aplicação ao qual esteja aplicado. Isso é possível tendo em vista que o motor está a todo o momento sentindo a reação do sistema através do torque que realiza.

4 Materiais e métodos utilizados

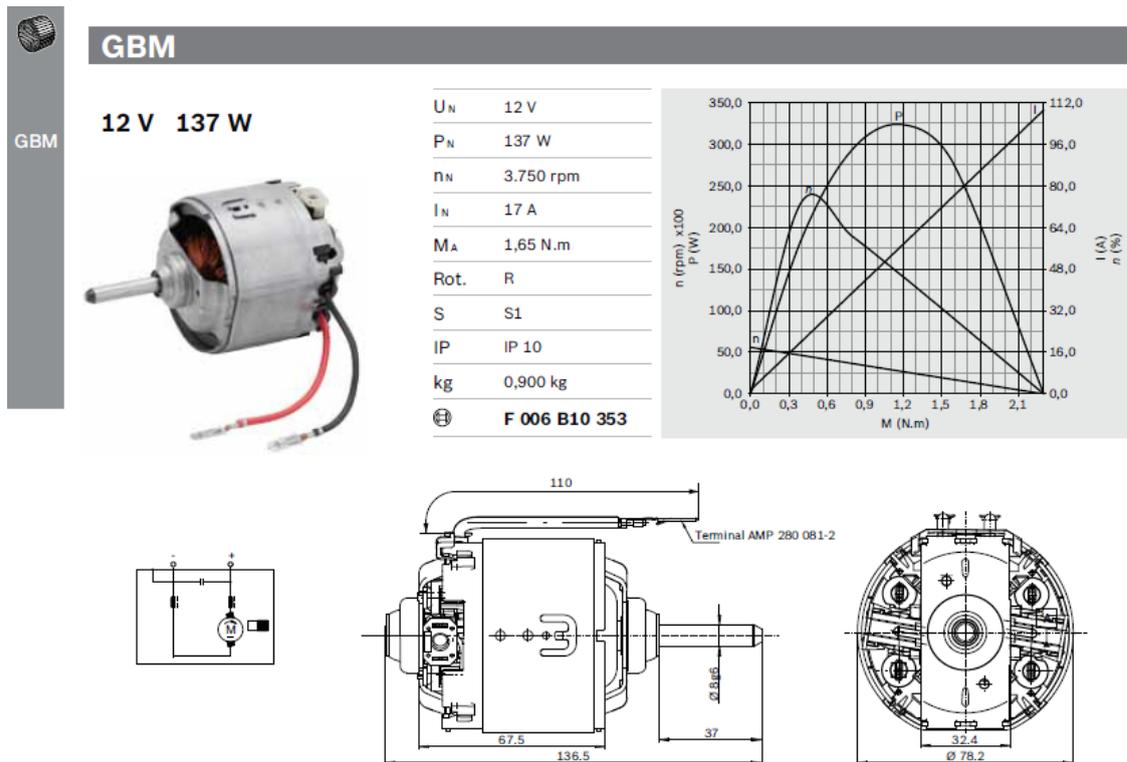
Neste capítulo, descreve-se o método utilizado para monitoramento e análise de motores elétricos de corrente contínua, baseado em técnicas de Monitoramento de Condição (CM) aplicadas a esse tipo de motor, que são utilizadas na avaliação das condições de seu funcionamento em tempo real e na detecção de mudanças de comportamento que possam apontar indícios de desgaste, mal funcionamento ou falhas. O *setup* desenvolvido para a realização das medidas experimentais utilizando o método proposto também é descrito em detalhes.

O método utiliza comparações e análises das variáveis mecânicas e elétricas medidas pelo sistema de monitoramento para identificar variações de comportamento do motor, que são comparadas com as características operacionais informadas pelos dados técnicos (*datasheet*) do mesmo, normalmente disponibilizados pelos fabricantes em formato semelhante aos gráficos da Figura 3.

Essas informações permitem identificar características medidas em momentos distintos ao longo da utilização do motor, para que seja possível analisar alterações e identificar eventos. Essas alterações são percebidas através do sensoriamento de variáveis e aplicação de técnicas de processamento e análise de dados.

Para os testes, foram utilizados motores elétricos de corrente contínua, ímã permanente e escova de carvão devido à grande variedade de produtos com diferentes tamanhos, potências e características físicas disponíveis no mercado. Ademais, são motores que apresentam preços mais acessíveis e são utilizados em diversas aplicações de baixa potência que podem se intensificar ainda mais com integração deles ao contexto de Internet das Coisas. Para realização dos testes, foram utilizados motores de corrente contínua com escova e ímã permanente da série GBM, modelo F 006 B10 353, conforme apresentado na Figura 8 (BOSCH *I-Buisness E-Motoren 2017 Catalogue*, 2017).

Figura 8. Motor de Corrente Contínua da série GBM



Fonte: Catálogo BOSCH. I-Business, 2017

4.1 Avaliação das características elétricas e mecânicas de motores elétricos

Para realização de uma avaliação das características de funcionamento de um motor elétrico, é essencial a medida de quatro variáveis eletromecânicas fundamentais, que são: **corrente**, **tensão**, **velocidade de rotação** e **torque**, agregando ainda a **temperatura** de operação como uma quinta variável fundamental, sendo essa a principal responsável por afetar e alterar parâmetros definidos nas características construtivas do motor.

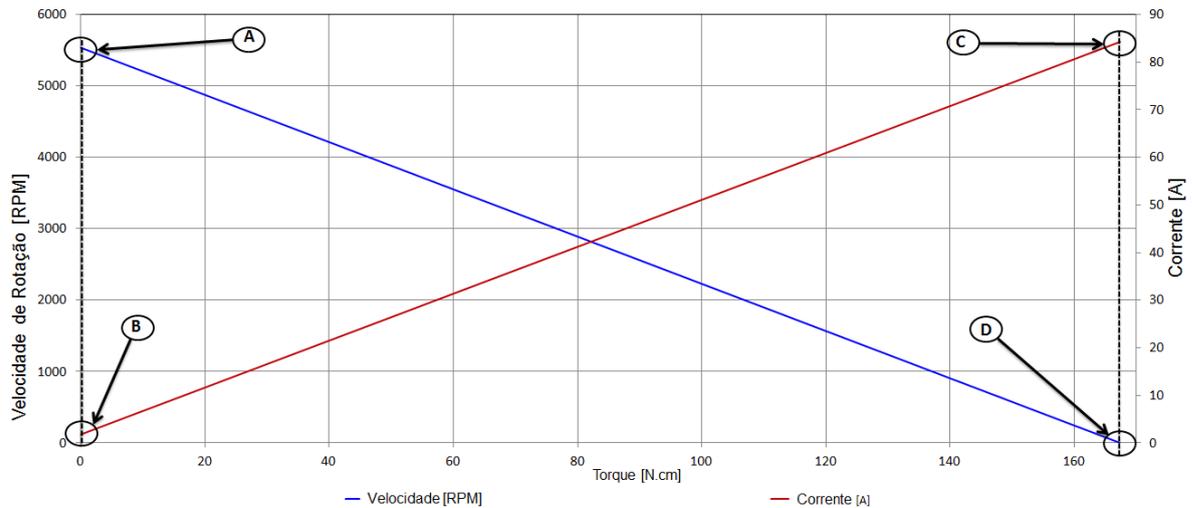
Através da medida dessas variáveis, podem-se estimar curvas como as apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11 que caracterizam o comportamento do motor para diferentes cargas. Essas medidas são usadas também para calcular as constantes características relacionadas à conversão de energia elétrica em mecânica. Isso é possível baseando-se nos conceitos apresentados na seção 0, que permitem uma análise da potência elétrica consumida, da potência mecânica desenvolvida e da eficiência de conversão de energia, além de avaliar o

comportamento geral do motor em tempo real, através de uma correlação dos dados. As curvas dos motores que serão estudadas seguem o modelo matemático através das equações apresentadas na Tabela 1, onde se pode determinar as características representadas pelos pontos demarcados nos gráficos. Essas curvas apresentam a relação entre as variáveis do motor elétrico (corrente, velocidade de rotação, potência e eficiência) em função do torque, que corresponde à força que o motor desempenha para movimentar o sistema. O torque do motor é uma consequência da carga presente no sistema, que pode variar em decorrência das condições de operação. Como exemplo, considera-se um motor elétrico aplicado a um sistema de limpador de para-brisa. O torque desempenhado pelo motor é dado pela carga característica do atrito do vidro com a palheta. Essa carga varia em função das condições da borracha das palhetas e das condições do vidro que pode estar seco ou molhado.

Para o gráfico de variáveis representado na Figura 9, estão marcados o ponto A, que indica a maior velocidade de rotação que o motor atinge, e o ponto B como a mínima corrente que o motor consome. Ambos os pontos A e B são definidos para a condição do motor trabalhando sem carga ou em vazio, como é chamado normalmente, e consome apenas energia para se manter girando sem exercer trabalho. Em seguida, estão marcados o ponto C que representa a maior corrente que o motor consome em uma condição onde a carga aplicada é a máxima e faz com que o motor apresente velocidade de rotação nula (ponto D). O torque necessário para essa condição é conhecido como **torque de bloqueio** (vide Eq. 16 na seção 0) e faz com que o motor se torne um elemento em curto-circuito.

O gráfico de potências apresentado na Figura 10 é constituído por três tipos de potências. A primeira é a potência elétrica que representa a potência consumida pelo motor (potência de entrada ou potência injetada pela fonte de alimentação no motor) em função do torque. A potência perdida é consequência da somatória de toda energia que o motor perde devido ao atrito mecânico entre as partes, aquecimento por efeito Joule nas bobinas, perdas de conversão de energia ou qualquer outro efeito de dissipação. Por fim, tem-se a potência mecânica do motor, ou potência de saída, que realmente é utilizada para realização de trabalho, ou seja, é transformada em movimento e força mecânica.

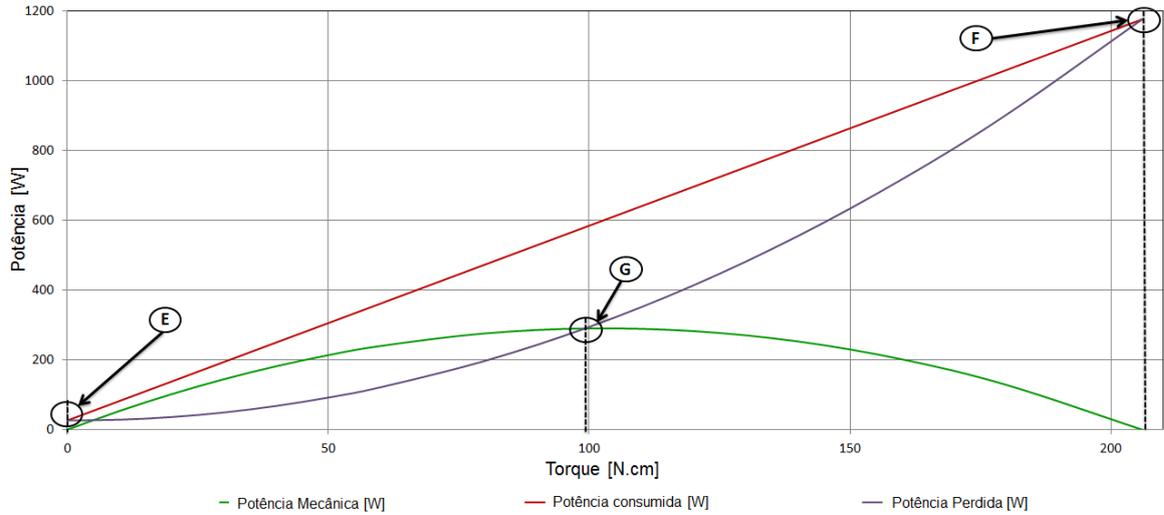
Figura 9. Gráfico de variáveis Corrente e Velocidade de Rotação - Modelo



No gráfico da Figura 10, o ponto E indica a condição de operação onde se tem um baixo consumo energético do motor, no entanto, como não se tem carga aplicada (torque mínimo, quase zero) e a potência mecânica se dá pelo produto da rotação pelo torque, não há realização de trabalho (a realização de trabalho para o caso de motores elétricos é definida pelo produto da força que esse desempenha pela rotação que indica o deslocamento que ele proporciona). O ponto F também representa uma região onde não há realização de trabalho, pois é a condição de torque máximo do motor que causa sua parada e, portanto, sua velocidade de rotação é nula. No entanto, esse ponto caracteriza a condição de maior consumo energético do motor e também o ponto onde a energia elétrica consumida é transformada quase que 100% em energia térmica. Por fim, o ponto G é a região de operação onde se tem a maior potência mecânica desenvolvida pelo motor e onde a eficiência atinge 50%, ou seja, a potência perdida tem o mesmo valor da potência mecânica.

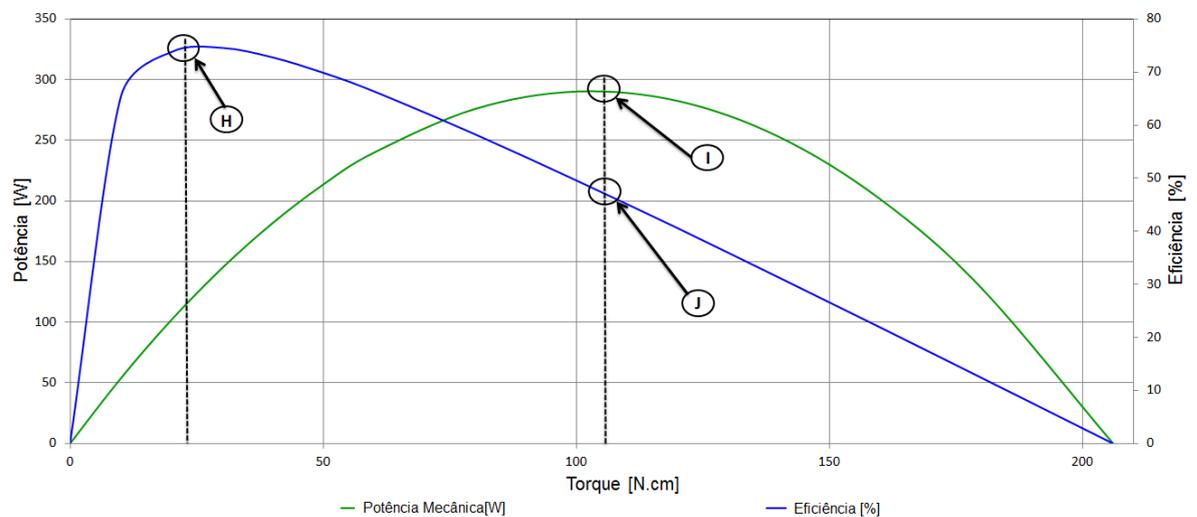
Tendo em vista os pontos da Figura 10, pode-se ressaltar que as três potências se relacionam, pois elas constituem todas as formas de entrada e saída de energia para o motor elétrico utilizado. Isso torna importante o modelo de gráfico proposto na Figura 10, pois através dele pode-se observar quanto da energia injetada no sistema está sendo realmente utilizada ou perdida e também qual a relação entre o aumento de energia injetada necessária para se obter uma certa potência mecânica.

Figura 10. Gráfico de potências - Modelo



O gráfico de desempenho apresentado na Figura 11 ilustra a potência mecânica citada anteriormente e também a curva de eficiência do motor elétrico. Esse gráfico permite estudar as características do motor para diferentes aplicações ou controle com foco em sua eficiência energética e potência mecânica desenvolvida. Nele encontra-se o ponto H, que define a carga com que o motor apresentará sua maior eficiência, o ponto I, que define onde o motor terá maior realização de trabalho e o ponto J que representa a eficiência do motor para esse ponto, idealmente 50%. Dessa forma, observa-se que o ponto de maior potência mecânica não necessariamente coincide com o ponto de maior eficiência.

Figura 11. Gráfico de desempenho - Modelo



Além da análise dos gráficos, utilizando-se as equações da Tabela 1, é possível a detecção de mudanças nas constantes características dos motores e assim, pode-se também identificar a degradação elétrica ou mecânica do motor, estipular limites de funcionamento aos quais o motor tem que atender para garantir segurança e confiabilidade ao sistema, sugerindo ainda intervenções preventivas de manutenção e detecção de falhas.

Com uma análise das cinco variáveis fundamentais (corrente, tensão, velocidade de rotação, torque e temperatura), em tempo real, um sistema de monitoramento pode ajustar o motor para trabalhar no ponto de maior eficiência ou maior potência, controlando para que o mesmo não sofra desgastes e degradação de desempenho devido ao sobreaquecimento, sobrecarga, perda de magnetização do ímã permanente, desgaste prematuro das escovas, etc.

Para estudar o comportamento de todas essas variáveis citadas anteriormente, serão realizados experimentos considerando algumas condições nas quais o motor escolhido (motor de corrente contínua com escova e ímã permanente apresentado na Figura 8) pode ser aplicado.

4.1.1 Avaliação por variação de tensão

O primeiro experimento considera um estudo focado na condição de controle mais empregada para os motores elétricos de corrente contínua, que é através da variação de tensão de alimentação. Esse experimento será realizado aplicando-se valores de torque fixos ao motor que variam na faixa de 0 a 40 N.cm para evitar que o motor sofra danos durante o levantamento de dados (40 N.cm é um valor de torque inferior a 20% do valor de torque máximo indicado pela Figura 8). Para cada valor de torque aplicado serão realizadas medidas de corrente, velocidade de rotação e tensão através da utilização de um sistema de medidas e controle de um freio magnético (MAGTROL, 2019) acoplado ao motor, que mede todas as variáveis fundamentais mencionadas anteriormente. Será utilizada também uma fonte GENESYS 5000 (TDK LAMBDA, 2019) que consegue fazer uma compensação da queda de tensão no cabeamento que conecta seus terminais aos do motor. Serão realizadas medidas das variáveis fundamentais nesse intervalo para que seja possível fazer uma extrapolação do comportamento do motor baseada no modelo apresentado na seção 0 e na Figura 3. Essa

extrapolação é realizada encontrando-se as equações das retas definidas pelos pontos medidos e plotando-as a partir do ponto onde o torque do motor é 0 N.cm até o ponto onde o torque aplicado faz com que a velocidade de rotação do motor seja nula. As condições definidas para estudo consideram 5 níveis de tensão diferentes em temperatura ambiente, esperando-se o resfriamento durante um intervalo mínimo de 120 minutos entre cada medida.

4.1.2 Avaliação por variação de temperatura

O segundo experimento considera as condições térmicas as quais o motor pode ser aplicado, levando em consideração variações de temperatura de operação como consequência do aquecimento ou resfriamento proporcionado pelo local de instalação ou devido à mudanças climáticas. Esse experimento será realizado aplicando-se uma tensão de alimentação fixa e os mesmos valores de torque que no experimento descrito na seção 4.1.1, mantendo-se ainda a medida das demais variáveis eletromecânicas fundamentais. As medidas serão realizadas para 5 níveis de temperatura diferentes, que serão obtidos mantendo o motor em uma câmara climática com controle de temperatura por duas horas para estabilização da temperatura de todos os materiais constituintes.

4.1.3 Estimação dos dados através do modelo

Considerando-se que a velocidade de rotação do motor varia de forma linear em relação à tensão, conforme indicado na Eq. 17 da seção 0, encontrando-se o fator de variação da velocidade de rotação em função da temperatura para um valor fixo de tensão e torque, pode-se estimar as curvas de temperatura para diferentes tensões. Para isso é necessária à realização do procedimento descrito nas seções 4.1.1 e 4.1.2. As curvas de velocidade de rotação e corrente versus torque em diferentes temperaturas serão utilizadas como modelo para estimação de curvas com variação de temperatura e tensão simultaneamente, utilizando o fator de variação de velocidade de rotação calculado com base na caracterização proposta na seção 4.1.1, de modo que se possa definir uma área que caracteriza qualquer condição intermediária para a variação de tensão e temperatura proposta.

A grande vantagem dessa estimativa de cálculo (baseada no modelo do motor) é a obtenção de um algoritmo para ser implementado em um microcontrolador e também uma economia de tempo e recursos diminuindo a quantidade de medidas necessárias para estudo e desenvolvimento de métodos de monitoramento e controle, tendo em vista a disponibilidade dos equipamentos e tempo necessário para condicionamento do motor nas temperaturas desejadas.

4.2 Metodologia de sensoriamento de motores aplicados a sistemas

O experimento que será descrito a seguir tem como objetivo determinar um método capaz de classificar as características de funcionamento de um motor CC considerando-se as condições de aplicação definidas para um sistema.

No geral, todo sistema tem bem definidos os limites e condições que pode trabalhar. Para sistemas com motores elétricos, geralmente se definem limites de variação de torque, tensão e temperatura, que interferem diretamente nos valores de corrente e velocidade de rotação. Para o teste serão feitas aquisições de valores de corrente e velocidade de rotação considerando as condições limites de um sistema hipotético. A realização das medidas utilizará o mesmo sistema de freio magnético Magtrol aplicado nos experimentos da seção 4.1.1 e 4.1.2 devido a precisão de controle de torque aplicado que ele apresenta.

Como método para realização das medidas em cada condição definida, considerando que o sistema Magtrol opera em temperatura ambiente, será realizada a medida de temperatura na carcaça do motor, tolerando-se uma variação máxima de 5 °C da temperatura inicial definida em câmara climática.

A escolha do sensoriamento de temperatura na carcaça deve-se a essa ser o último elemento construtivo que aquece e a principal região de dissipação térmica do motor. A tolerância de 5°C garante que o motor medido não sofrerá uma grande variação térmica, mesmo considerando o tempo para amaciamento das escovas, do mancal e aquecimento do chicote que energiza a escova, o que produz uma estabilização de desempenho no motor. O amaciamento do motor faz referência ao alinhamento da bucha com o induzido e um alisamento da superfície de contato das escovas em relação aos coletores do motor.

Para estabilização térmica em diferentes temperaturas, o motor será armazenado por no mínimo 2 horas em uma câmara com controle climático. Esse tempo será respeitado como intervalo entre cada medida e determinado para garantir estabilização térmica de 100% dos materiais presentes no motor elétrico. Durante o período em que o motor permanecerá armazenado na câmara climática, o mesmo será mantido desligado para evitar o aquecimento por atrito mecânico, efeito Joule, dentre outros fenômenos que interferem na temperatura durante operação.

4.2.1 Avaliação do motor em condições normais

Para o desenvolvimento do trabalho, foi proposto um sistema hipotético ao qual o motor seria aplicado. Dessa forma, foram definidos valores nominais de torque, tensão e temperatura baseados nos valores nominais do motor escolhido. Foram considerados também limites de variações aceitáveis em relação aos nominais que representam variações causadas por pequenas diferenças nos sistemas. Portanto, assumiu-se um torque nominal de funcionamento de 40 N.cm com tolerância de 5 N.cm para mais ou para menos, uma tensão nominal de 12 Volts com tolerância de variação de 11 a 13 Volts, e a temperatura ambiente em 23°C podendo variar de 0 a 60 °C. Além disso, serão consideradas condições normais qualquer combinação das variáveis acima desde que se enquadre dentro dos limites estipulados, resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Condições definidas para a aplicação

Parâmetro	Valor nominal	Valor Máximo	Valor mínimo
Torque [N.cm]	40	45	35
Tensão [V]	12	13	11
Temperatura [°C]	23	60	0

4.2.2 Avaliação do motor em condições anormais

Serão consideradas condições anormais para o sistema qualquer condição que ultrapasse os limites estipulados na Tabela 3. Dentre essas

condições, serão avaliadas situações onde se aplicam torques e tensões maiores e menores que os estipulados para o sistema, com o intuito de se identificar qualquer alteração de comportamento do motor.

4.3 Possibilidade de sensoriamento para um motor inteligente

Após o desenvolvimento da metodologia que será aplicada, serão realizados testes de sensoriamento de motores com sensores de fácil acesso e disponibilidade no mercado para se aplicar e comprovar a metodologia.

4.3.1 Montagem experimental e sensores utilizados

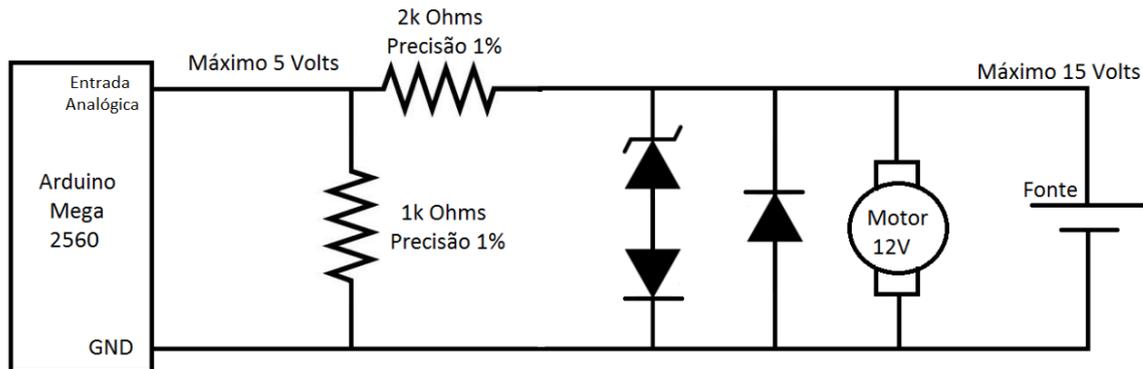
Para aplicação de técnicas de Monitoramento de Condição em motores elétricos, serão medidas a tensão e a corrente (variáveis referentes à energia elétrica aplicada ao motor), a velocidade de rotação e o torque (variáveis referentes à energia mecânica desenvolvida pelo motor) e a temperatura (variável relacionada ao ambiente em que o motor é utilizado e que se altera em função da dissipação de energia), conforme apresentado na seção 0.

A medida de tensão será realizada utilizando um divisor resistivo com proteções contra surtos de tensão, desenvolvido especificamente para essa aplicação conforme o esquema elétrico da Figura 12. Para esse sensor, a relação de escala da tensão medida para a tensão real aplicada é de 1V medido para cada 3V aplicados. A medida será realizada diretamente nos terminais do motor para se obter o valor que chega efetivamente a ele conforme o esquema de ligações da Figura 13.

Para a medida da corrente será utilizado o sensor de efeito hall ACS714 mostrado na Figura 15, que pode medir correntes de até 30A em ambos os sentidos e apresenta um fator de conversão de 66 mV/A.

A medida de temperatura será realizada com o sensor LM35, que apresenta uma sensibilidade de 10 mV/°C. O sensor de temperatura que está mostrado na Figura 15, foi fixado no mancal do motor próximo da bucha onde se tem atrito com o eixo.

Figura 12. Circuito elétrico para medição de tensão



Para a medida de torque do motor, será utilizada uma metodologia de cálculo através das curvas características como apresentado na Figura 9 e das equações apresentadas na Tabela 1.

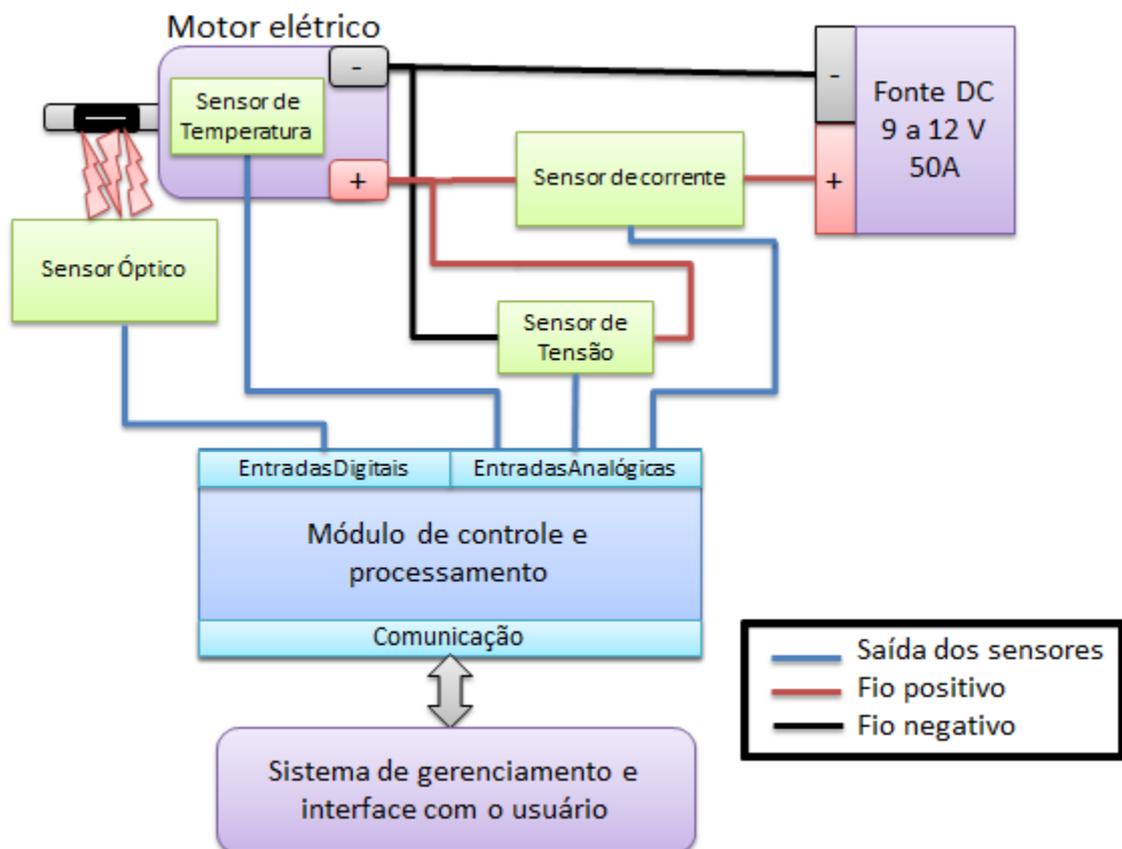
Para aplicação dessa técnica, determina-se a reta que melhor se aproxima do comportamento do motor, calcula-se sua equação para definição dos seus coeficientes e, através da substituição da medida da corrente ou da velocidade de rotação, é possível se calcular aproximadamente o torque dinâmico do motor pelas Eq. 6 e Eq. 16 apresentadas na seção 0.

O método utilizado foi escolhido devido à dificuldade técnica de aplicação e aferição de sensores de torque disponíveis atualmente. Além disso, os sensores de torque não são dispositivos que podem ser facilmente embarcados a motores. Alguns estudos estão propondo e desenvolvendo sensores de toque dinâmicos de baixo custo e que podem ser embarcados, como por exemplo, (PFISTER; PERRIARD, 2010), (BENOIT; PAGES; CLAEYSSSEN, 2010), (BRANDL; HAAS; MARIK, 2009) e (BORGES, 2017).

A medida da velocidade de rotação será realizada utilizando-se o sensor óptico TCRT5000 (VISHAY), que gera um sinal de saída digital pulsado de 5V quando detecta uma reflexão e 0V quando não recebe retorno do sinal óptico emitido. Esse sinal será capturado por uma entrada digital do módulo microprocessador com um temporizador para sincronizar e detectar mudanças de estado da porta e, dessa forma, realizar a medida do intervalo de tempo entre pulsos consecutivos, ou seja, do período de rotação, permitindo assim o cálculo da velocidade rotação do motor. Para reflexão do sinal de luz emitido pelo sensor,

será colada uma fita no eixo do motor conforme está ilustrado na Figura 14, composta por uma superfície preta que não reflete a luz e uma pequena faixa branca onde a luz será refletida e detectada pelo receptor do sensor óptico (MAUSBACH; BEHRENS, 2017).

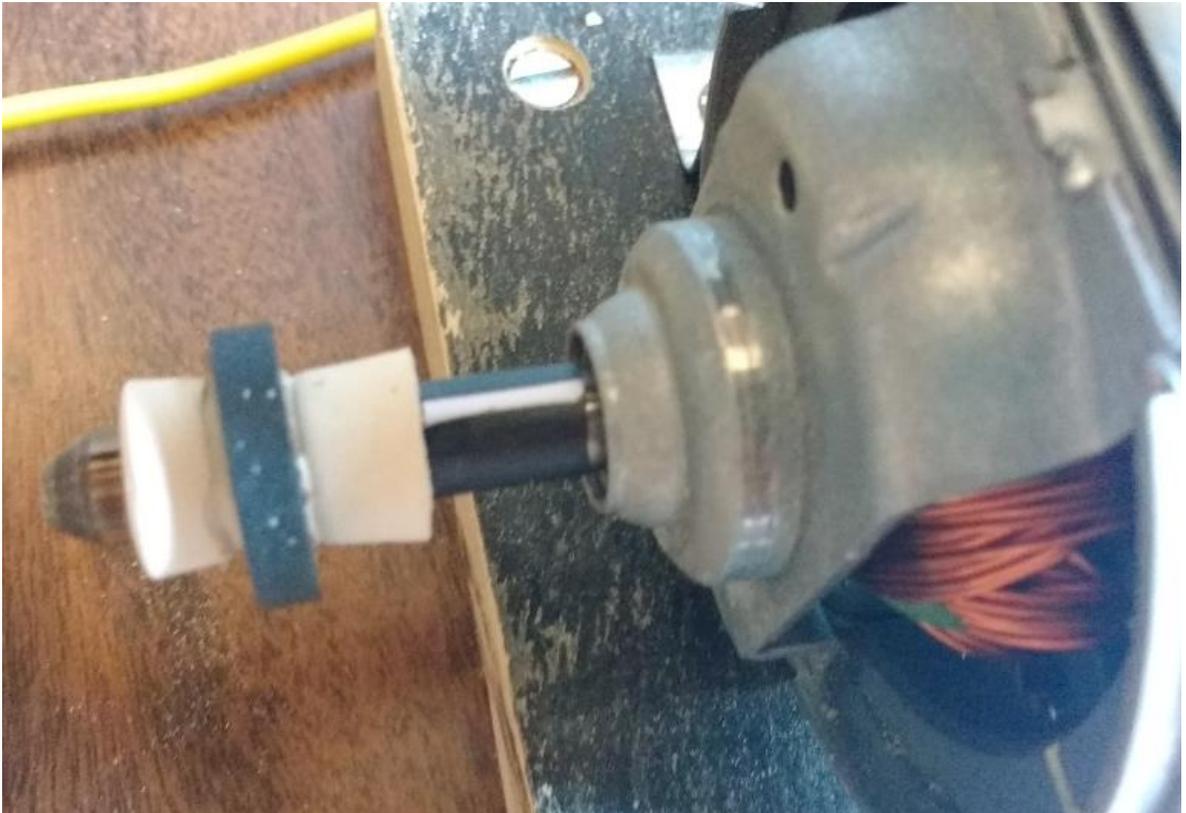
Figura 13. Esquema de ligação dos sensores



Os sensores de corrente, tensão e temperatura proveem um sinal de saída proporcional à grandeza medida na faixa de 0 a 5 Volts, compatível com os limites do módulo microprocessador, e serão medidos utilizando-se as entradas analógicas de 10 bits (1024 níveis), o que resulta em uma resolução de cerca de 5mV.

Para aferição dos dados medidos, será utilizado um multímetro digital Minipa modelo ET2082D. Para aferição da medida da velocidade de rotação, será utilizado um osciloscópio Keysight modelo DSOX1102A para captura do sinal pulsado e medida dos intervalos de tempo entre pulsos consecutivos e da respectiva frequência.

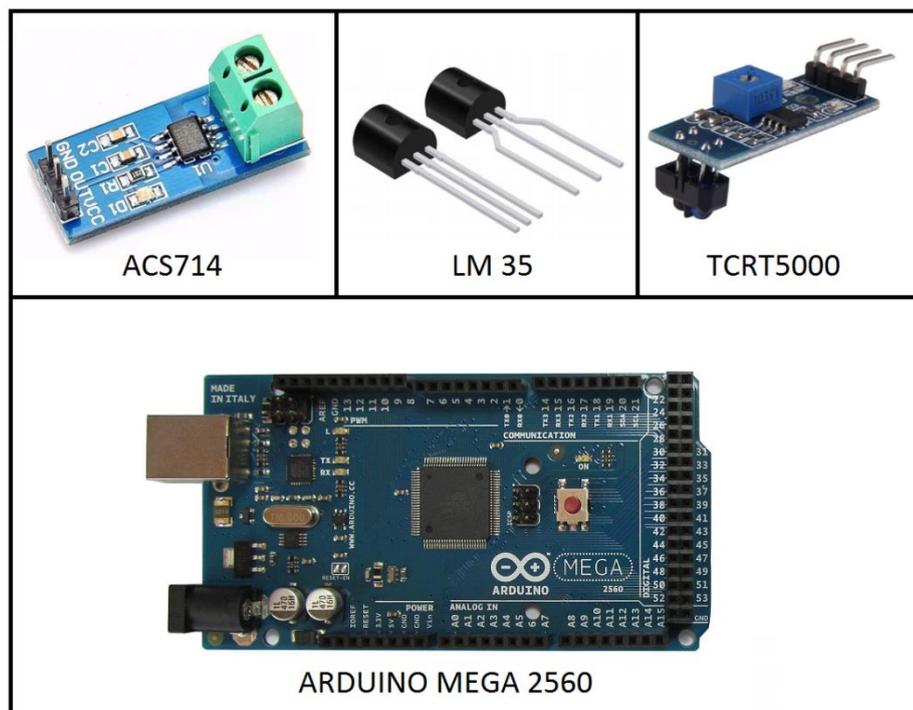
Figura 14. Fita com superfície reflexiva para sensor óptico



Os dados medidos através dos sensores serão utilizados pelo microcontrolador escolhido para cálculos de torque, potência elétrica, potência mecânica, eficiência e outras informações sobre o motor. O Módulo de Controle e Processamento da Figura 13 é o elemento embarcável que realizará todo o processamento, ou seja, a leitura dos dados dos sensores, execução de algoritmos, cálculos para processamento das variáveis e comunicação com o sistema externo (podendo essa ser cabeada ou não), representando assim a inteligência incorporada ao motor. Essa inteligência deve ser capaz de enquadrar o motor em um modelo (vide seção 0) que permita avaliar se ele está atendendo às necessidades da aplicação ou se ele apresenta problemas de desgaste ou falha. Esse motor inteligente é o motor “coisa” apresentado na proposta do trabalho e que poderá ser integrado a redes de IoT como um provedor de informações, capacitado também a tomar algumas decisões visando proteger o sistema.

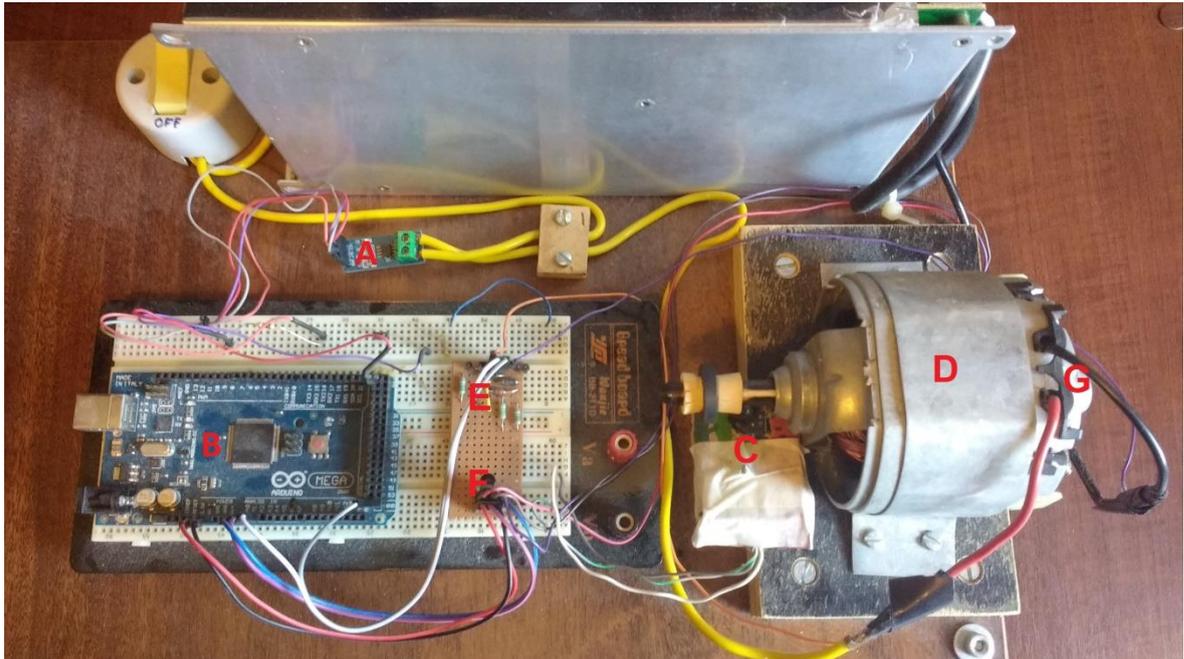
O Módulo de Controle e Processamento escolhido para este trabalho é um módulo microprocessador da plataforma Arduino, versão Mega 2560, baseado no microcontrolador ATmega2560, (ARDUINO) devido à disponibilidade de portas analógicas e digitais e de um conversor analógico-digital de 10 bits, pela grande quantidade de códigos de exemplos, aplicações, variedade de bibliotecas prontas para sensores e baixo custo, o que facilita a prototipagem. Os diversos dispositivos utilizados neste trabalho estão apresentados na Figura 15. Pode-se constatar na Figura 16 uma foto da montagem experimental utilizada para o monitoramento do motor de corrente contínua utilizado neste trabalho.

Figura 15. Dispositivos utilizados para medição



Na Figura 16 pode-se observar marcado com a letra A o sensor de corrente, com B o módulo Arduino Mega, C o sensor óptico de rotação posicionado logo abaixo do eixo do motor, D indica o motor elétrico utilizado, E o circuito do sensor de tensão apresentado na Figura 12, F o sensor de temperatura que mede temperatura ambiente e por fim marcado pela letra G o sensor de temperatura posicionado na carcaça do motor.

Figura 16. Foto da montagem experimental



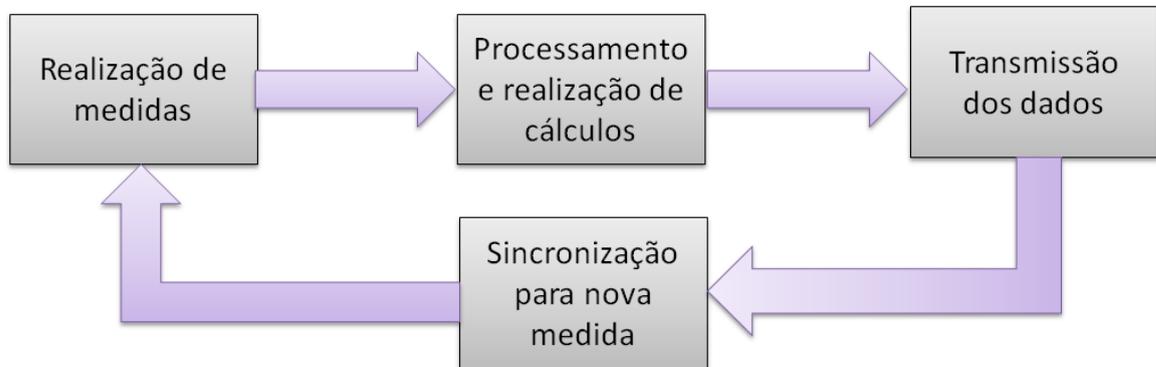
4.3.2 Software e algoritmo para medição

O desenvolvimento do software para detecção dos sensores foi dividido em duas partes complementares. A primeira constitui o desenvolvimento de sub-rotinas para leitura de cada sensor com a finalidade de auxiliar na aferição dos sensores e no desenvolvimento do algoritmo final de aquisição. A segunda parte do software tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo capaz de sincronizar as medidas dos diferentes sensores de modo que elas sejam realizadas no menor intervalo de tempo possível e possam ser transmitidas para um sistema de gerenciamento de forma coerente.

Para realizar a sincronização das medidas de corrente, tensão e temperatura que são realizadas em microssegundos, com medidas de velocidade de rotação realizadas em milissegundos, foi utilizada como referência de sincronização a medida do período de rotação. Devido ao processo de detecção, cálculo e transmissão dos dados ser lento, é necessário uma volta completa do eixo do motor após cada medida para sincronização do sensor óptico com o ponto inicial da marcação no eixo.

O fluxograma apresentado na Figura 17 representa as funções que devem ser realizadas pelo algoritmo e a ordem em que devem ser realizadas.

Figura 17. Fluxograma para desenvolvimento do algoritmo



4.4 Sensoriamento das variáveis do motor em tempo real

Para levantamento de dados com os sensores, teste dos cálculos de torque e produção de dados para estimação das curvas características, será realizado um experimento de variação de torque através do atrito mecânico aplicado ao eixo do motor. O experimento avalia os dados obtidos nos primeiros momentos após a energização do motor e depois de 30 minutos de funcionamento, ambos os casos para aplicação de torque ao motor energizado com quatro tensões diferentes. A temperatura será medida no mancal onde fica fixada a bucha traseira de apoio do eixo e, para sincronismo de dados, a medida do período de rotação será utilizada como referencia por depender do tempo necessário para o motor completar uma volta.

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados obtidos pelos testes realizados.

5.1 Caracterização de desempenho de um motor

Os dados medidos foram utilizados na plotagem dos gráficos mostrados nas seções a seguir, conforme o procedimento apresentado na seção 4.1.

5.1.1 Caracterização do motor com variação da tensão de alimentação

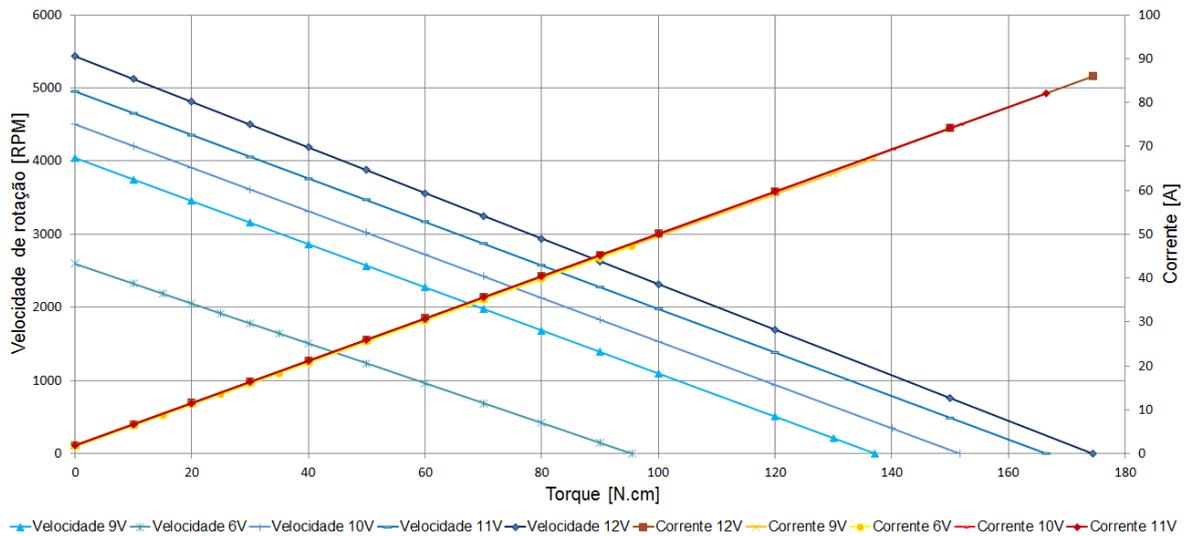
Foram aplicados valores de tensão de 6, 9, 10, 11 e 12 Volts aos terminais do motor. Os valores de torque aplicado ao eixo do motor foram controlados pelo sistema de freio magnético Magtrol conforme descrito na seção 4.1.1. A temperatura foi mantida constante, no valor da temperatura ambiente (20°C).

As curvas obtidas estão apresentadas nas Figuras 18, 19 e 20. Pode-se perceber pela análise da Figura 18 que, ao se alterar a tensão aplicada aos terminais do motor, a relação “velocidade de rotação versus torque” define um conjunto de retas paralelas. Por outro lado, a mesma alteração citada não causa mudança quanto ao comportamento da relação “corrente versus torque” como previsto pela Eq. 8 (na verdade, existe um conjunto de retas que praticamente se sobrepõem). A única mudança é no valor da corrente máxima que está relacionada com o torque de bloqueio, que diminui de acordo com a queda da tensão. Nota-se também que a rotação máxima decresce de forma proporcional à diminuição da tensão, de acordo com o previsto na Eq. 17.

Ao se analisar a Figura 19, é possível notar um aumento da potência injetada (potência de entrada) no motor decorrente do aumento de tensão. Isso ocorre devido à potência de entrada ser o produto da tensão (condição variada no teste) pela corrente (praticamente constante para todas as condições propostas). Nota-se também que a potência perdida apresenta um comportamento crescente

em relação ao aumento da potência de entrada enquanto a potência mecânica apresenta um valor limite máximo no ponto intermediário de sua curva.

Figura 18. Gráfico de variáveis com variação de tensão



O ponto de intersecção representa a região onde a energia convertida em trabalho equivale à energia perdida internamente, o que representa uma eficiência de cerca de 50% já que metade da energia injetada é desperdiçada.

O excesso de energia perdida leva ao aquecimento de componentes do motor, o que causa variações no desempenho do motor. O modelo matemático discutido na seção 2.2, cujas principais equações são resumidas na Tabela 1, não considera a temperatura como variável. Efeitos de temperatura podem modificar as constantes características K_t e K_e .

Em casos mais extremos ou não controlados, esse aquecimento pode levar a danos irreversíveis ao motor como, por exemplo, perda de isolamento, alterações magnéticas no ímã permanente e desgastes mecânicos, podendo causar a descaracterização da curva de desempenho definida para o mesmo.

Em relação ao gráfico da Figura 20, nota-se que o ponto de máxima potência mecânica do sistema decresce com a diminuição da tensão, variando de forma diretamente proporcional ao valor de torque com qual o motor estará desempenhando sua potência máxima. Por outro lado, o torque do ponto de maior eficiência se mantém praticamente fixo para as tensões mais altas (de 9 a 12

Volts). Para a tensão de 6 Volts, nota-se que o motor começa a apresentar um decréscimo no valor de eficiência máxima.

Figura 19. Gráfico de potências com variação de tensão

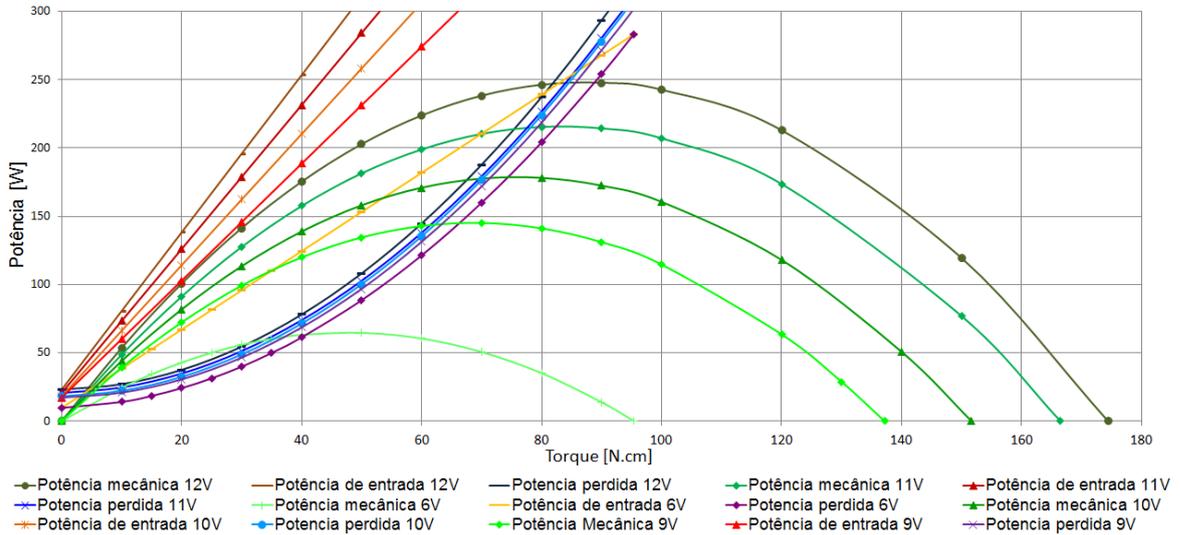
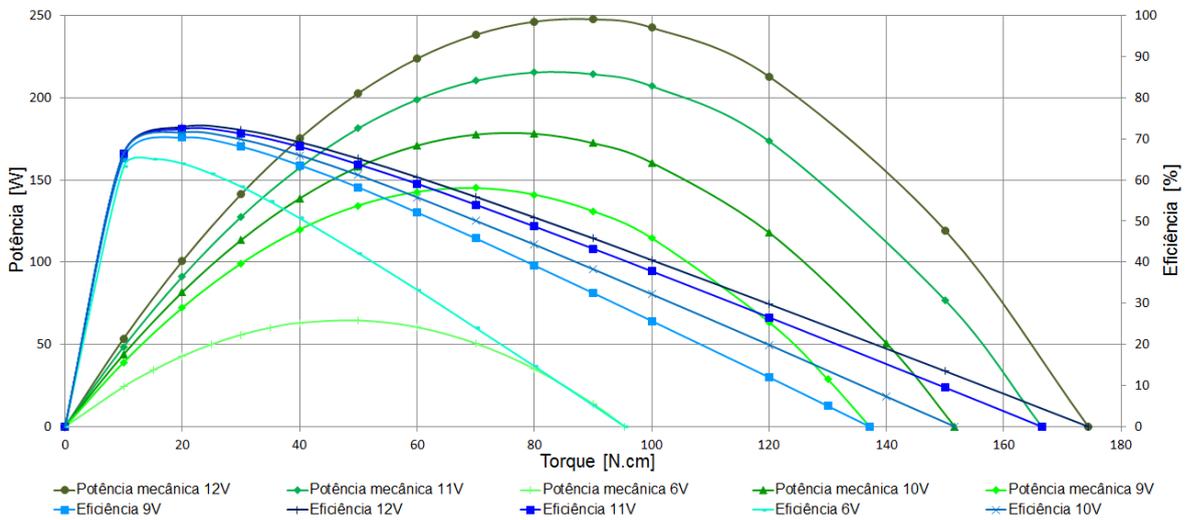


Figura 20. Gráfico de desempenho com variação de tensão



Esses resultados validam a aplicabilidade do modelo proposto na seção 0, que descreve a relação linear entre torque e corrente, bem como a relação linear entre torque e velocidade de rotação para um dado valor de tensão, ou uma família de retas paralelas quando as medidas são tomadas para diferentes valores de tensão.

A partir desses resultados, as constantes características K_t e K_e podem ser calculadas utilizando-se as medidas realizadas pelos sensores quando se conhece o torque ou através de uma análise gráfica. A inclusão de um sensor de torque permitiria a definição e cálculo das constantes em tempo real o que permitiria identificar falhas no motor.

5.1.2 Caracterização do motor com variação de temperatura

Foram aplicadas as temperaturas de -20, 0, 20, 40 e 60 °C ao motor por 2 horas para climatização de todos seus componentes. Os valores de torque aplicado ao eixo do motor foram controlados pelo sistema de freio magnético Magtrol conforme descrito na seção 4.1.2. A tensão de alimentação foi mantida constante, no valor de 12 volts.

As curvas obtidas estão apresentadas nas Figuras 21, 22 e 23. Pode-se perceber pela análise da Figura 21 que ao se aumentar a temperatura do motor para valores acima de 0°C, a corrente aumenta levemente para um mesmo valor de torque. O comportamento é diferente para temperaturas inferiores a 0°C, onde a corrente se mantém praticamente constante. Conforme se aumenta a temperatura para valores acima de 0°C, nota-se um aumento da velocidade de rotação sem carga e uma diminuição do valor de torque de bloqueio. Para valores inferiores a 0°C, verifica-se que o ponto de velocidade de rotação sem carga praticamente se mantém, mas o coeficiente angular das retas diminui quanto mais baixa é a temperatura, podendo assim atingir torques de bloqueio maiores.

Portanto, nota-se que o efeito da temperatura não é linear em relação às variáveis do motor, pois afeta diferentemente a resistência dos fios, o campo magnético dos ímãs, dentre outros fatores.

No gráfico da Figura 22, nota-se que o motor apresenta um leve aumento na potência injetada, causado por um pequeno acréscimo no valor de corrente constatado no gráfico da Figura 21. Em relação à potência mecânica, nota-se que o ponto máximo aumenta com o decréscimo da temperatura. Para a mesma situação considerada, observa-se que a energia perdida apresenta um crescimento menos acentuado para temperaturas mais baixas. Isso leva a

concluir que o motor funciona mais eficientemente em temperaturas baixas como pode ser constatado no gráfico de desempenho da Figura 23.

Figura 21. Gráfico de variáveis com variação de temperatura

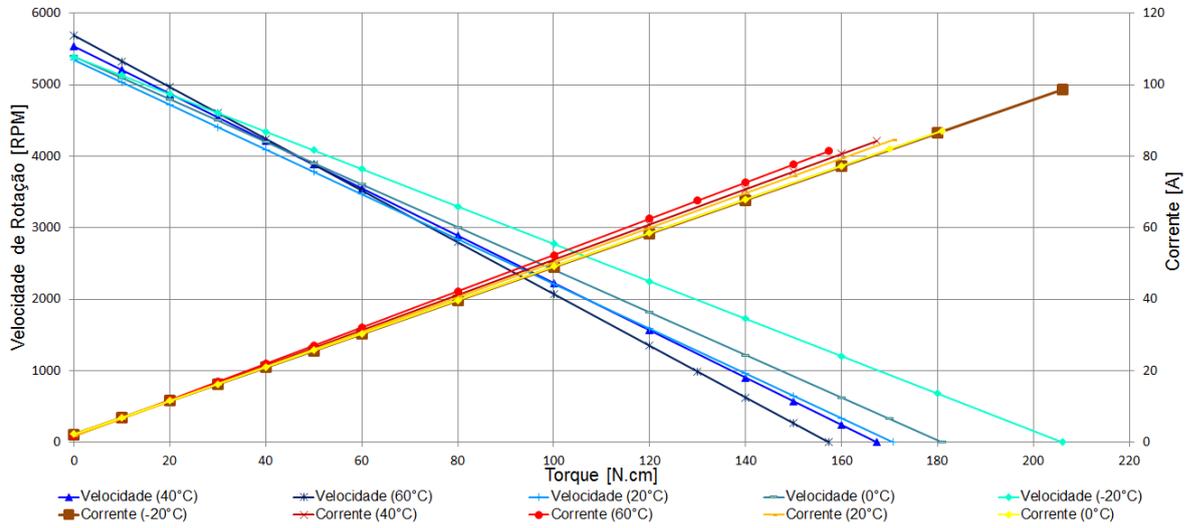
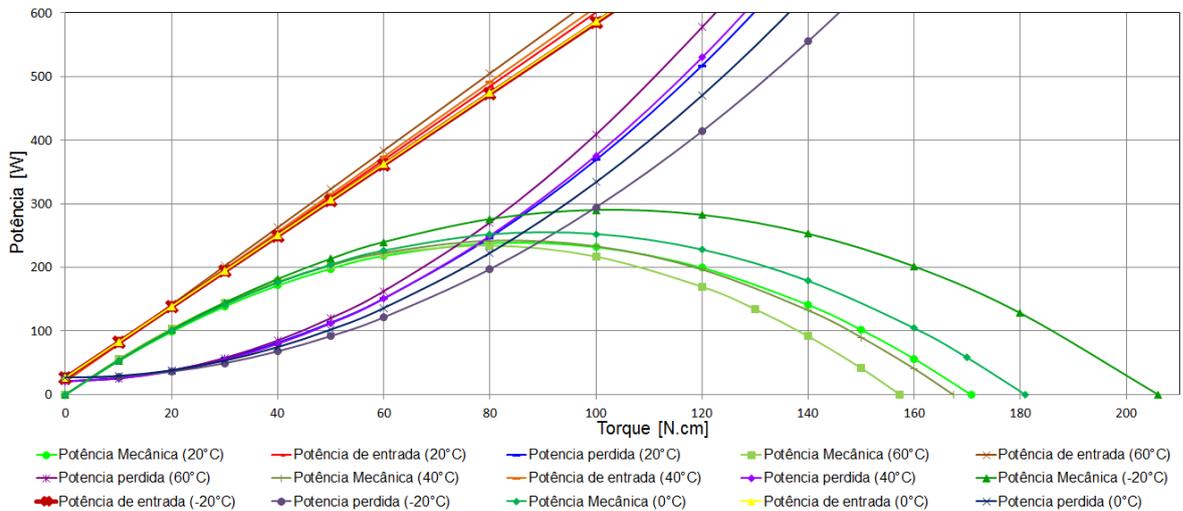


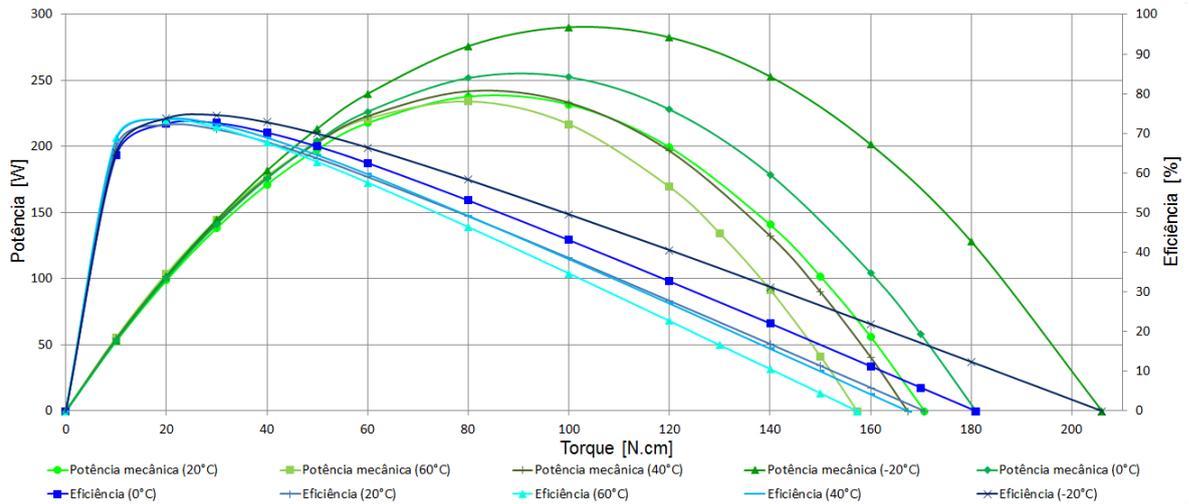
Figura 22. Gráfico de potências com variação de temperatura



Ao realizar a análise do gráfico da Figura 23 observa-se que a eficiência do motor decai de forma menos acentuada com o decréscimo da temperatura, o que confirma a análise feita para o gráfico de potência. No entanto, nota-se também que o ponto de máxima eficiência do motor se mantém praticamente o mesmo independente da temperatura. Observando-se os pontos

máximos da potência mecânica, nota-se que há um aumento considerável no valor do torque e da máxima potência decorrente da queda de temperatura.

Figura 23. Gráfico de desempenho com variação de temperatura



Tendo em vista a variação do ponto de máxima potência mecânica, eficiência e variações não lineares da corrente e da velocidade de rotação com a temperatura, que foram identificadas, torna-se relevante um estudo do comportamento do motor para garantir que ele não trabalhe nos pontos de máxima potência, ou pontos onde a potência perdida seja maior que potência mecânica. Isso porque tal circunstancia implicaria no motor trabalhando em seu extremo e com aquecimento acentuado de seus componentes elétricos devido ao excesso de energia convertida em calor, o que é prejudicial ao desempenho e também a sua integridade.

5.1.3 Análise da eficiência de conversão de potência com temperatura

Após a caracterização dos motores em relação à tensão e temperatura, foi realizada uma análise para definição da melhor região de operação do motor considerando todas as condições definidas nos gráficos de variáveis, de potências e de desempenho (conforme definido na seção 4.1).

Com isso, definiu-se que as situações de torque para as quais a potência perdida é maior que a potência mecânica devem ser evitadas por

apresentarem baixa eficiência, alto consumo de energia e principalmente por levarem o motor a uma condição de sobreaquecimento, podendo assim causar danos irreversíveis ao mesmo.

Foi observado experimentalmente que a operação além dessa condição limite faz com que o motor apresente um comportamento instável, levando-o a perda de rotação quando aplicado em condições de torque acima do ponto de máxima potência. Com isso, torna-se importante definir uma condição limite de aplicação para o motor.

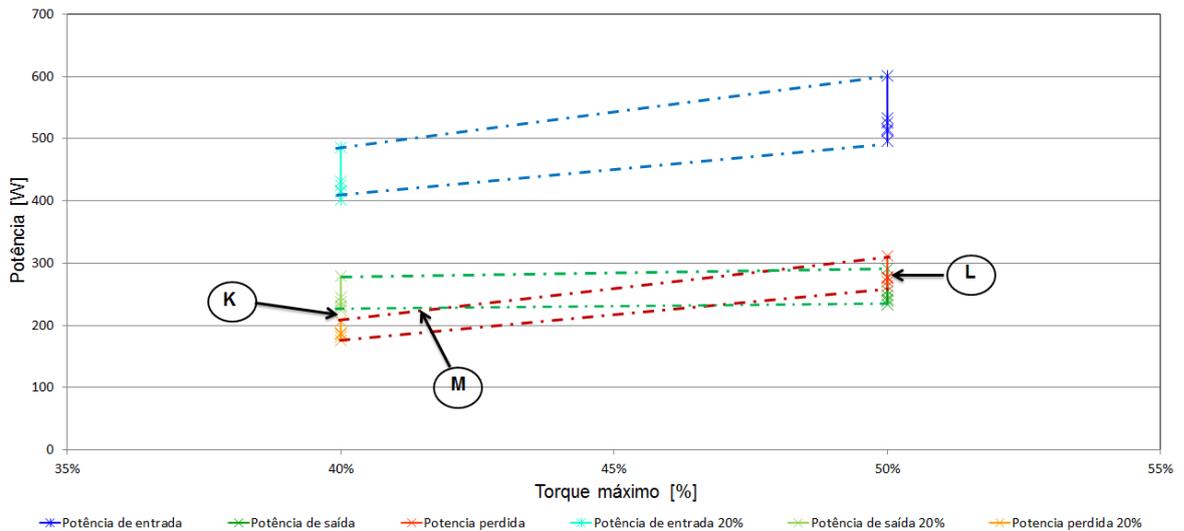
Em seguida, realizou-se um estudo dos gráficos de potência, para definição de qual valor de torque poderia ser considerado como condição limite para o motor, tendo em vista que o ponto de máxima potência mecânica decai com o aumento de temperatura. Como resultado da análise, definiu-se como torque máximo que o motor pode ser aplicado o valor referente a 40% do seu valor de bloqueio ou 20 % a menos do seu torque do ponto de máxima potência mecânica.

O resultado está demonstrado no gráfico da Figura 24 que tem plotados os valores de potência citados anteriormente considerando todas as diferentes condições de temperatura medidas. Com isso nota-se que para o limite de torque definido, garante-se que a potência perdida será sempre inferior à potência mecânica, para qualquer valor de temperatura dentro dos limites definidos para a aplicação. Situações com valores de torque superiores a esse limite, mas que ainda se mantenham inferior ao torque do ponto de máxima potência mecânica podem ocorrer, no entanto devem durar curtos intervalos de tempo e com baixa frequência de ocorrência, para que a desempenho do motor e aplicação dos métodos que serão apresentados posteriormente não sejam comprometidos.

A Figura 24 é um gráfico dos valores máximos de potência mecânica encontrados versus um percentual do torque de bloqueio, que é o máximo torque conforme apresentado na seção 0 quando se considera velocidade de rotação nula para a Eq.16.

Para esse gráfico foram plotados os valores de potência em todas as condições apresentadas na Figura 22, considerando 40% do torque de bloqueio (ou 20% menor do que o torque de potência mecânica máxima) como margem de segurança e 50% do torque de bloqueio como limite para aplicação.

Figura 24. Definição de torque máximo para condições de temperatura



Em seguida, estimou-se através das retas pontilhadas regiões de variação das potências considerando diferentes condições e foi possível identificar as características destacadas. Dentre essas, K indica a não intersecção entre as regiões para a condição de 40% do torque máximo, considerando todas as variações de temperatura aceitáveis para a aplicação.

Dessa forma, pode-se concluir que partindo desse ponto para valores percentuais menores do torque máximo (inferiores a 40%), a potência de saída (potência mecânica) será sempre maior que a potência perdida. Em M pode-se notar o ponto onde ocorre a primeira intersecção entre os valores de potência, o que indica que para determinadas temperaturas, a eficiência poderá chegar a 50%. Para a condição de 50% do torque máximo, L indica uma região onde pode-se ter a potência de saída ou a potência perdida maior dependendo da temperatura.

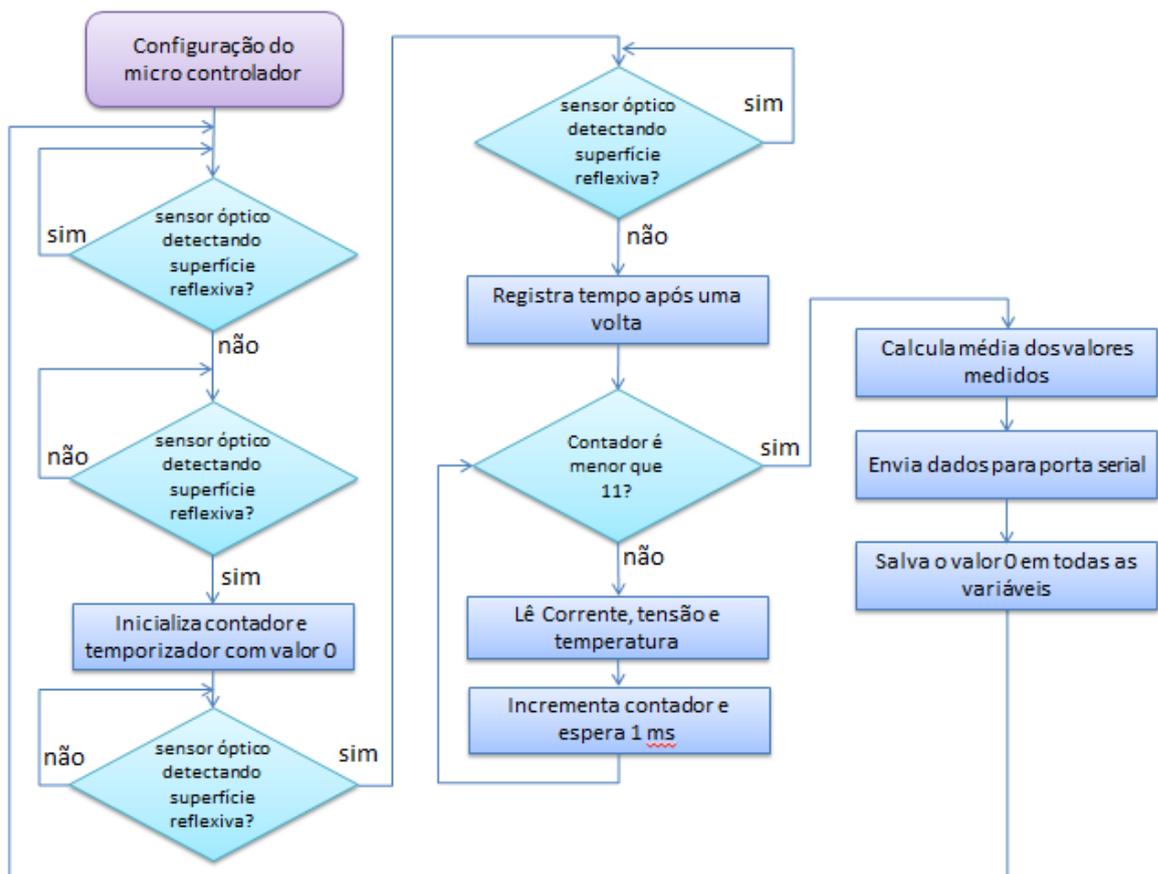
5.2 Sensoriamento do motor

Esta seção trata das características de sensoriamento que foram aplicadas ao motor.

5.2.1 Algoritmo desenvolvido

O algoritmo desenvolvido para realização das medidas está representado na Figura 25.

Figura 25. Fluxograma do algoritmo de sensoriamento



Primeiramente, o algoritmo aguarda para detectar se o sensor óptico está detectando a superfície reflexiva conforme explicado na seção 4.3.1. Em seguida, aguarda-se a detecção da superfície não reflexiva. Esse procedimento é realizado para sincronizar o ponto de início da temporização de uma volta do eixo do motor com um ponto de transição específico da fita reflexiva. Então é iniciado um temporizador e o procedimento é repetido para cálculo do tempo de uma volta completa. Após isso, é realizada a medida de 10 valores dos sensores de tensão,

corrente e temperatura. Por fim é calculada a média dessas medidas, calculada a velocidade de rotação com base no período de uma volta do eixo do motor e, finalmente, é feita transmissão de todos os dados por comunicação serial.

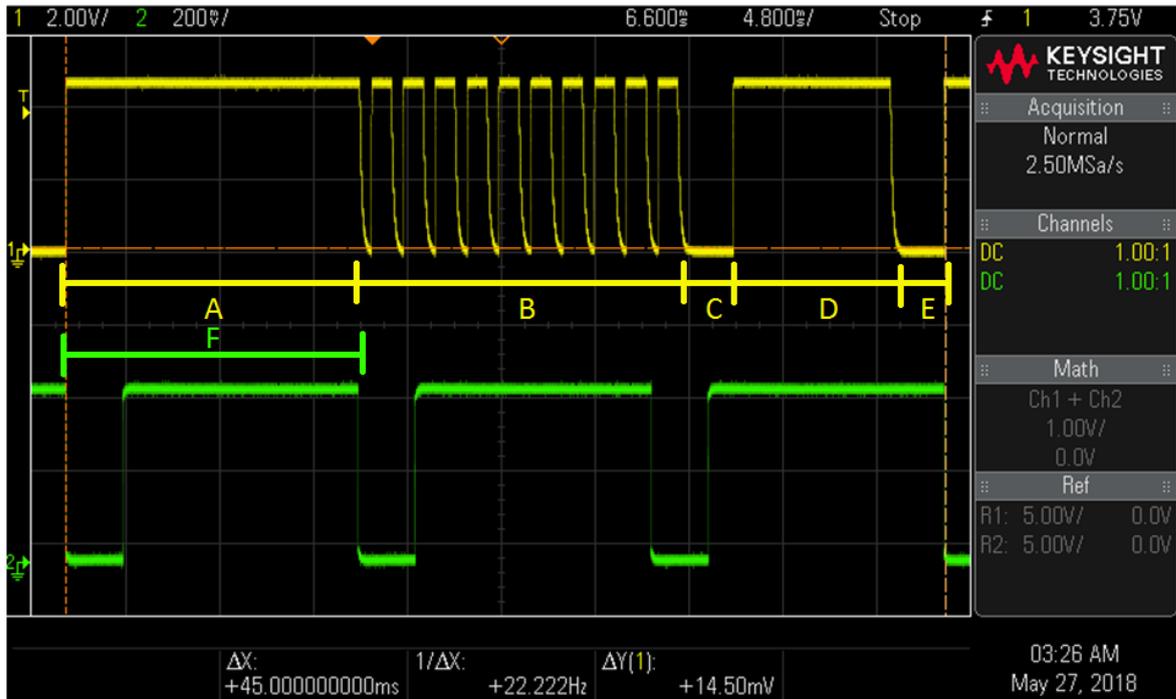
Como esses processos demandam tempo de processamento, a sincronização para a próxima medida só é possível após o motor completar uma volta adicional. Através deste algoritmo, cada dado transmitido pode levar o tempo de duas ou mais voltas dependendo do período de rotação do motor. Para avaliação do tempo de processamento gasto pelo módulo Arduino Mega, foi realizado um teste comparando o tempo de cada processo com o período de rotação do motor.

Os dados obtidos foram levantados com o motor alimentado com 9 V rodando a 4000 rotações por minuto, conforme mostrada na Figura 26, onde a forma de onda verde corresponde ao sinal elétrico de saída do sensor óptico e a forma de onda amarela corresponde a um pino digital auxiliar configurado para pulsar a cada evento interno de processamento do microcontrolador. Nessa figura, o intervalo A representa o tempo gasto para realização da medição de um período de rotação, que coincide exatamente com o tempo de uma volta representado por F. O intervalo B representa o tempo despendido para realização das medidas de tensão, corrente e temperatura pelo Arduino Mega com uma espera de 1 ms e repetição por 10 vezes. Em C está representado o tempo necessário para cálculo das médias das 10 medidas de cada variável e transmissão dos dados. A região D representa um delay de espera do microprocessador para demarcar o fim do período de transmissão dos dados. Esse delay pode ser ajustado dependendo da taxa de transmissão serial e do tempo necessário para processamento dos dados garantindo-se assim a eficiência da comunicação. Em E tem-se o tempo de espera para a sincronização e início da próxima medida.

Dentre os períodos citados, A, D, E e F são variáveis e dependem da velocidade de rotação do motor enquanto B e C são fixos e dependem exclusivamente do microprocessador que está sendo utilizado. Para a situação de medida ilustrada na Figura 26, o tempo entre cada amostra transmitida é de 45 ms e equivale a uma medida a cada 3 voltas. Com isso, o sistema executa uma

medida a cada 45 ms, o que equivale a uma frequência de amostragem de 22,22 Hz.

Figura 26. Tempo para realização de medidas



5.3 Resultados de teste do motor monitorado

Os resultados das medidas sequenciais do motor, utilizando-se a montagem experimental da Figura 16 e o algoritmo descrito na seção 5.2.1, estão apresentados na Figura 27, onde se tem um gráfico (sequencial) do número da medida (eixo das abcissas) em relação aos valores obtidos dos sensores de tensão, corrente e óptico, e um segundo gráfico onde se pode fazer uma comparação dos valores de torque calculados através da corrente e da velocidade de rotação, a fim de observar seu comportamento durante a estabilização térmica. O intervalo de cada medida varia de acordo com a rotação do motor decorrente do algoritmo apresentado na seção 5.2.1.

O torque foi calculado através da corrente e da velocidade de rotação utilizando as constantes características do motor, calculadas a partir da curva característica obtida do manual do fabricante conforme descrito na seção 0 As fórmulas para cálculo do torque utilizadas estão representadas a seguir.

$$T = \frac{(5386,5 * Tensão[V]) - Rotação[RPM]}{29,32} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$T = \frac{Corrente [A] - 1,8}{0,48} \quad (\text{Eq. 22})$$

Dessa maneira, torna-se possível determinar por medida direta ou cálculo, as quatro variáveis fundamentais de um motor, e a partir delas calcular informações de potência elétrica e eficiência em tempo real, detectar alertas de sobrecarga, sobreaquecimento ou anomalias operacionais tais como o travamento do motor.

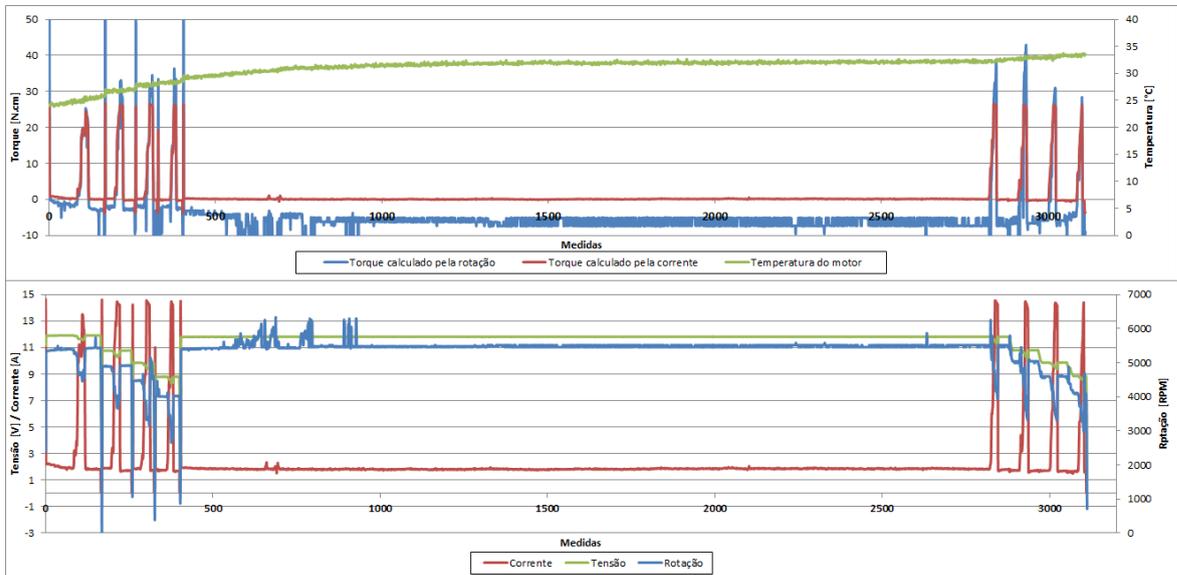
Pode-se perceber no gráfico superior da Figura 27 que a variação de temperatura causa uma variação na velocidade de rotação do motor, o que prejudica o resultado do cálculo do torque pela medida de rotação, já que o modelo escolhido não tem a temperatura como um de seus parâmetros. Já o torque calculado pela medida de corrente condiz com o valor de torque estimado pelo gráfico do *datasheet* do motor apresentado na Figura 8.

Os picos e vales causados pelo efeito de energização e desligamento do motor podem ser identificados no gráfico inferior da Figura 27 e utilizados como referência para detecção do ponto onde foram realizadas as alterações, sendo essas de tensão ou torque.

A aplicação de torque para o teste citado foi realizada através do pressionamento de uma placa de madeira gerando atrito com o eixo do motor. Por conta disso, não se observa uma característica com repetibilidade nos gráficos. A presença de picos no início dos gráficos da Figura 27 são referentes à aplicação do torque logo após o motor ser ligado. Já os picos que aparecem ao final são consequência da repetição de aplicação de carga, porém em uma condição onde o motor já havia atingido uma estabilidade térmica após aproximadamente 30 minutos de funcionamento contínuo e sem carga. Esses picos podem ser utilizados para identificação de eventos anormais ao longo do funcionamento de um motor em uma aplicação caracterizada por pouca variação de torque. Podem ser encontrados picos semelhantes no momento em que o motor parte ou muda o sentido de giro.

As medidas de corrente apresentaram uma relação direta e muito próxima com o torque, conforme previsto na Eq. 6 do modelo descrito na seção 0. No entanto, o cálculo utilizando as medidas de velocidade de rotação (Eq. 16 também apresentada na seção 0) apresenta uma variação no valor de torque que é atribuída à variação de temperatura e assentamento mecânico das regiões de atrito do motor como, por exemplo, buchas e escovas.

Figura 27. Aquisição de dados pelos sensores



5.4 Análises de variações de comportamento do motor

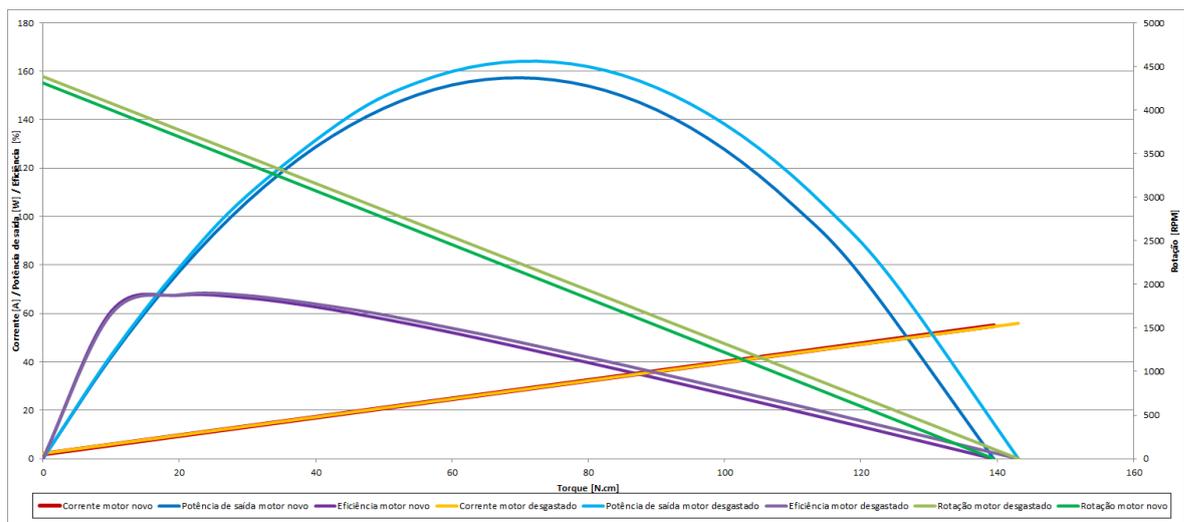
As análises de variações de comportamento do motor foram realizadas através de estudos de caso. Foram considerados dois casos, o primeiro referente à mudança de comportamento frente ao desgaste das escovas do motor. O segundo caso avaliou o impacto no comportamento com relação à desmagnetização do ímã permanente.

5.4.1 Caso de um motor novo comparado a um motor com desgaste quase total das escovas de carvão.

Estão representadas na Figura 28 as medidas de um motor GBM novo apresentado na Figura 8 comparada com medidas do mesmo motor após um

desgaste quase total das escovas de carvão. As escovas de carvão realizam o contato elétrico entre alimentação externa e as bobinas do rotor, sofrendo fricção mecânica contra os segmentos do coletor devido à rotação, que pode atingir ou mesmo superar 5000 rotações por minuto (RPM). Portanto, após algum tempo de utilização, mesmo que em condições normais de trabalho do motor, as escovas sofrem desgaste diminuindo suas dimensões mecânicas, devido ao atrito com o coletor do motor durante o movimento de rotação. Com isso, ocorre uma diminuição da resistência elétrica da escova devido à diminuição de seu comprimento. Como esse motor costuma ser aplicado com correntes superiores a 5 Amperes, pela lei de Ohm ($Tensão = corrente * resistência$), uma diminuição de 0,1 ohm no valor da resistência implicaria em um aumento na tensão de 0,5 V. Esse efeito interfere diretamente nas Eqs. 15 e 17 gerando um aumento da corrente, e também da rotação do motor.

Figura 28. Análise da variação dos parâmetros após desgaste de escovas



O efeito citado anteriormente foi constatado pelas medidas utilizadas para gerar o gráfico da Figura 28 onde nota-se um aumento da velocidade de rotação do motor e do consumo de corrente para um mesmo valor de torque, causado pelo desgaste de escova, para um mesmo valor da tensão de alimentação (12 volts). O comportamento observado resulta de um aumento da tensão efetivamente aplicada às bobinas (para uma dada tensão de alimentação externa mantida constante), devido a uma diminuição da resistência de contato da escova com o coletor, até a cordoalha que liga a escova aos terminais do motor.

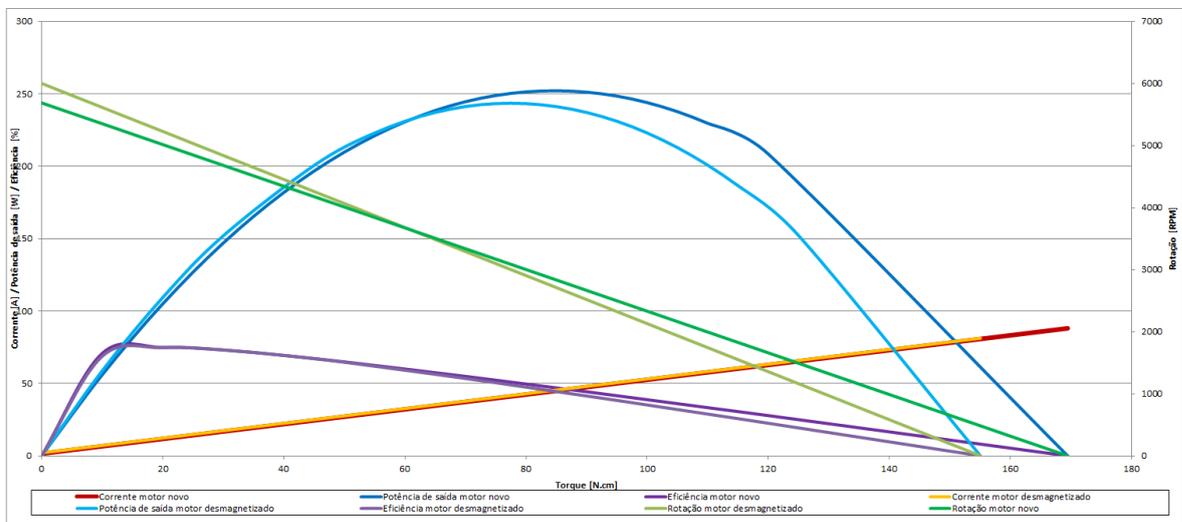
Nota-se também que não ocorre um aumento da eficiência, mas sim um aumento da potência de entrada e de saída.

5.4.2 Caso de um motor normal comparado a um motor desmagnetizado.

São apresentadas na Figura 29 as medidas de um motor normal comparado com outro motor de mesmo modelo que sofreu desmagnetização do ímã permanente. A desmagnetização é decorrente de uma variação no campo magnético do ímã, ou seja, configura uma mudança na intensidade do campo magnético B apresentado na Figura 1.

Pode-se perceber que a desmagnetização causa um aumento da velocidade de rotação sem carga do motor, mas também diminui seu torque máximo de bloqueio. Ela causa também um pequeno aumento na potência de entrada devido ao aumento da corrente, porém não apresenta um aumento considerável de eficiência e nem de potência de saída.

Figura 29. Análise da variação dos parâmetros após desmagnetização do ímã



5.5 Análises de dados de um motor aplicado a um sistema

Serão apresentados nesta seção os dados medidos e suas análises considerando uma aplicação para o motor que funciona dentro dos limites apresentados na Tabela 3 da seção 4.2.1.

5.5.1 Dados medidos em condições normais de operação

Foram realizadas medidas experimentais de dados nas condições indicadas na Tabela 4, que considera combinações diferentes dos valores de tensão, carga aplicada (torque) e temperatura respeitando os limites da Tabela 3. Essas condições consideram os limites definidos para a aplicação hipotética considerada e relacionam combinações das condições nominais e limites.

Tabela 4. Medidas experimentais em condições normais de operação.

Temperatura [°C]	Tensão [V]	Carga aplicada [N.cm]	Condição
20	12	35	Mínima carga
20	12	45	Máxima carga
20	12	40	Condição nominal da aplicação
20	11	40	Mínima tensão
20	13	40	Máxima tensão
0	12	35	Mínima temperatura e carga
0	12	45	Mínima temperatura e máxima carga
0	12	40	Mínima temperatura
0	11	40	Mínima temperatura e tensão
0	13	40	Mínima temperatura e máxima tensão
60	12	35	Máxima temperatura e mínima carga
60	12	45	Máxima temperatura e carga
60	12	40	Máxima temperatura
60	11	40	Máxima temperatura e mínima tensão
60	13	40	Máxima temperatura e tensão

Além das condições citadas na Tabela 4, realizou-se uma medida considerando estabilização térmica após 2 horas do motor funcionando na condição nominal da aplicação. Realizaram-se também medidas com outros 2 motores adicionais de mesmo modelo (GBM - F006.B10.353) considerando a condição nominal citada.

Considerando-se que as Eqs. 8 e 17 da seção são interdependentes para condições fixas de temperatura, tensão de alimentação e torque, pode-se considerar o par de equações abaixo como um sistema de equações:

$$\begin{cases} I = \left(\frac{1}{Kt}\right) T \\ \omega = -\left(\frac{R}{Kt.Ke}\right) \cdot T + \left(\frac{v}{Ke}\right) \end{cases} \quad (\text{Eq. 23})$$

Para um dado valor de torque e mantidas as demais variáveis constantes, o par (I, ω) fica determinado e constitui uma coordenada no plano Corrente x Velocidade de Rotação (doravante denominado plano CxV), que vai ocupar uma posição diferente nesse plano em função da condição de operação.

Desse modo, o conjunto de pontos (I, ω) caracteriza geometricamente a forma como ocorre as variações operacionais do motor. Com isso, os dados de todas as combinações experimentadas da Tabela 4 podem ser plotados num gráfico tal como apresentado na Figura 30.

Observa-se na Figura 30 que os pontos relativos a diversas medidas de cada condição da Tabela 4 se agrupam de forma próxima, sugerindo que é possível delimitar uma região geométrica que os contenha.

Na Figura 31 esta apresentada a superposição de uma área retangular inclinada, delimitada por 4 retas, que engloba os pontos nas condições definidas como normais pela Tabela 4 seguindo os limites indicados na seção 4.2.1.

Figura 30. Pontos sob condições normais de operação

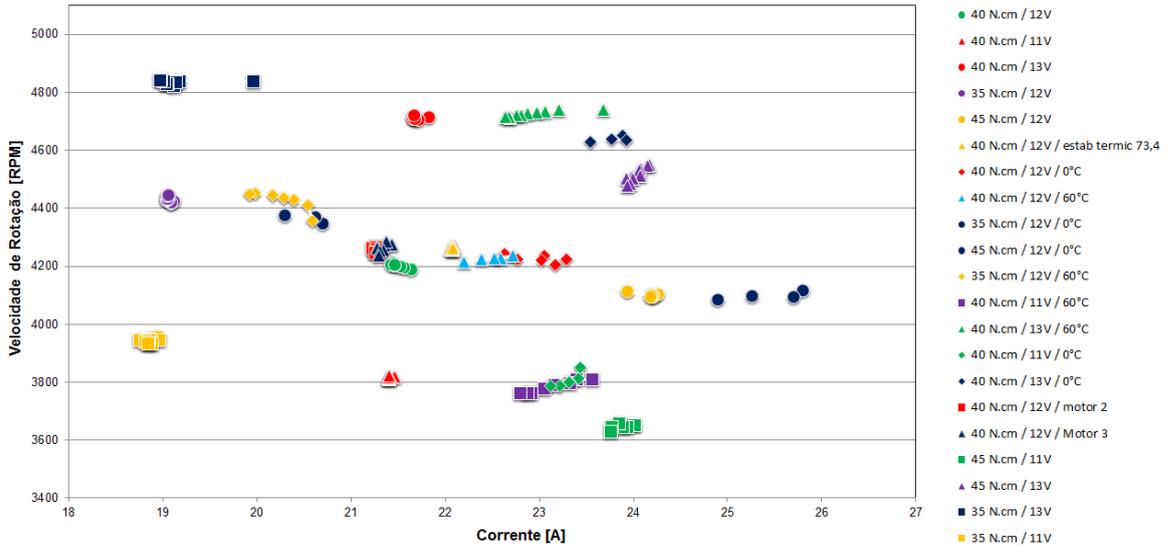
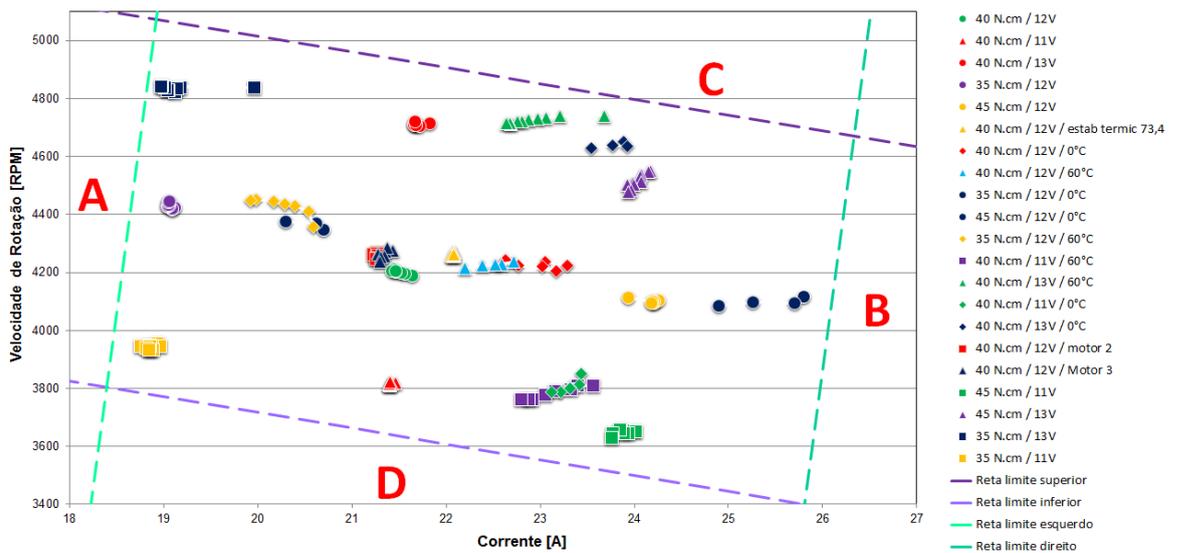


Figura 31. Região de operação normal



As retas que limitam a região de operação normal foram definidas calculando-se um par retas medianas que representam as direções principais em que os dados se distribuem, a primeira considerando apenas os pontos na direção A-B com variação de torque (incluindo os pontos com variação de temperatura), e a segunda considerando apenas os pontos na direção C-D com variação de tensão (sem incluir os pontos com variação de temperatura). As equações das retas medianas são:

- Reta mediana na direção A-B:

$$\text{Velocidade de rotação[RPM]} = (-54,5 \times \text{Corrente [A]}) + 5434,5 \quad (\text{Eq.24})$$

- Reta mediana na direção C-D:

$$\text{Velocidade de rotação[RPM]} = (2413,2 \times \text{Corrente [A]}) - 49874 \quad (\text{Eq.25})$$

Em seguida, deslocou-se a reta mediana A-B , considerando os pontos limites superior (de maior velocidade de rotação e inferior (de menor velocidade de rotação), acrescidos em 1% de tolerância, para garantir que os pontos limite também estivessem incluídos. O mesmo cálculo foi realizado para a mediana C-D, considerando o limite mais à esquerda (de menor consumo de corrente) e o limite mais à direita (de maior consumo de corrente), acrescidos de 1% de tolerância. O deslocamento das retas acima descrito preserva os respectivos coeficientes angulares, ajustando apenas o coordenada de intersecção com o eixo vertical. As equações das retas são:

- a) Reta limite superior na direção A-B - identifica tensão alta:

$$\text{Velocidade de rotação [RPM]} = (-54,5 \times \text{Corrente [A]}) + 6104,6 \quad (\text{Eq.26})$$

- b) Reta limite inferior na direção A-B - identifica tensão baixa:

$$\text{Velocidade de rotação [RPM]} = (-54,5 \times \text{Corrente [A]}) + 4806,9 \quad (\text{Eq.27})$$

- c) Reta limite à esquerda na direção C-D - identifica torque baixo:

$$\text{Velocidade de rotação [RPM]} = (2413,2 \times \text{Corrente [A]}) - 58889 \quad (\text{Eq.28})$$

- d) Reta limite à direita na direção C-D - identifica torque alto:

$$\text{Velocidade de rotação [RPM]} = (2413,2 \times \text{Corrente [A]}) - 40581 \quad (\text{Eq.29})$$

Dessa maneira, qualquer ponto localizado internamente à área retangular definida pelas retas de limite superior, inferior, esquerdo e direito (Eqs 26 a 29), caracteriza uma condição normal de operação do sistema. Pontos externos a essa área estão fora dos limites como normais, caracterizando uma condição anormal de operação.

Pontos externos a área podem ocorrer por consequência de alguma variação paramétrica do motor, que pode estar relacionada a algum dano ou falha futura, ou ainda a algum problema com a carga conectada ao seu eixo, fazendo com que esse não tenha mais o comportamento esperado.

5.5.2 Dados medidos em condições anormais para o sistema

Após a realização de experimentos analisando pontos dentro dos limites definidos para a aplicação, as mesmas variáveis foram controladas novamente, mas desta vez em condições externas aos limites determinados. As condições reproduzidas estão identificadas na Tabela 5.

Assim como na seção 5.5.1, foram realizadas medidas considerando-se estabilização térmica após 2 horas do motor funcionando em cada condição da aplicação considerada anormal segundo a Tabela 5. Os dados de todas as combinações experimentadas nesta tabela foram plotados no gráfico da Figura 37, juntamente com os dados da Tabela 4, para comparação.

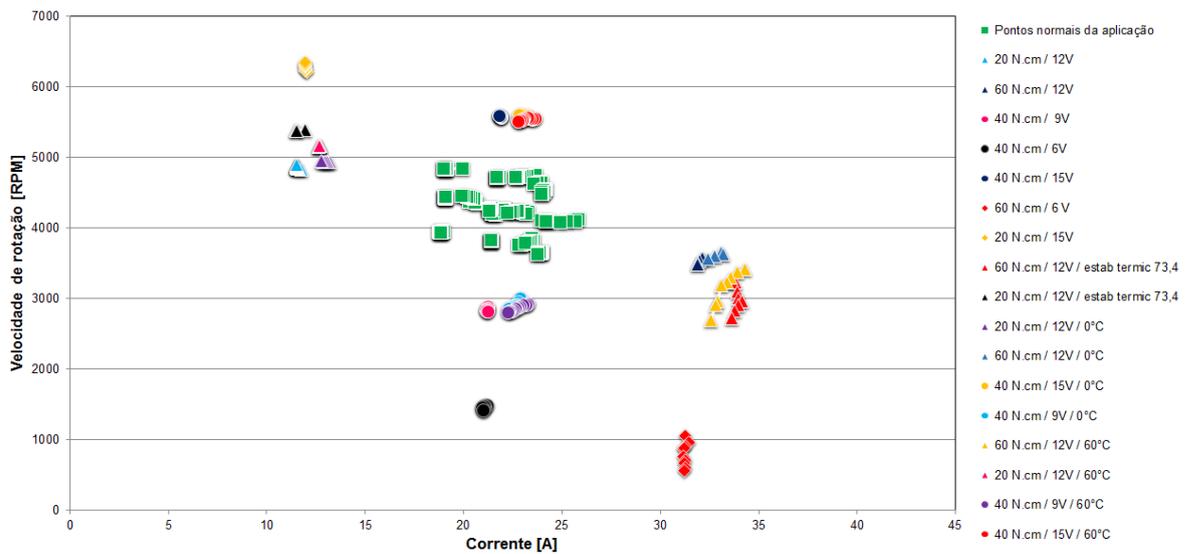
Observa-se na Figura 33 que os pontos relativos a diversas medidas de cada condição das Tabelas 4 e 5 se situam de forma próxima, formando diversos agrupamentos de dados, denominados clusters, conforme mostrado na Figura 33. Por exemplo, os pontos considerados como “condições nominais” na Tabela 4 (quadrados verdes na parte central da Figura 33) constituem um *cluster* circundado por uma elipse.

Dessa forma, ao se variar o torque, a tensão de alimentação e a temperatura, a posição geométrica dos pontos (I, ω) percorre o plano CxV mantendo-se dentro de um determinado *cluster*, ou ainda mudando para um *cluster* vizinho que caracteriza uma alteração de alguma variável de operação, associado a alguma característica, tal como tensão mais alta, torque um pouco menor, etc. Ou seja, a operação do motor CC analisado, sob qualquer condição de operação, pode ser visualizada como um ponto do plano CxV interno ou próximo a um *cluster* identificado.

Tabela 5. Medidas experimentais em condições anormais de operação

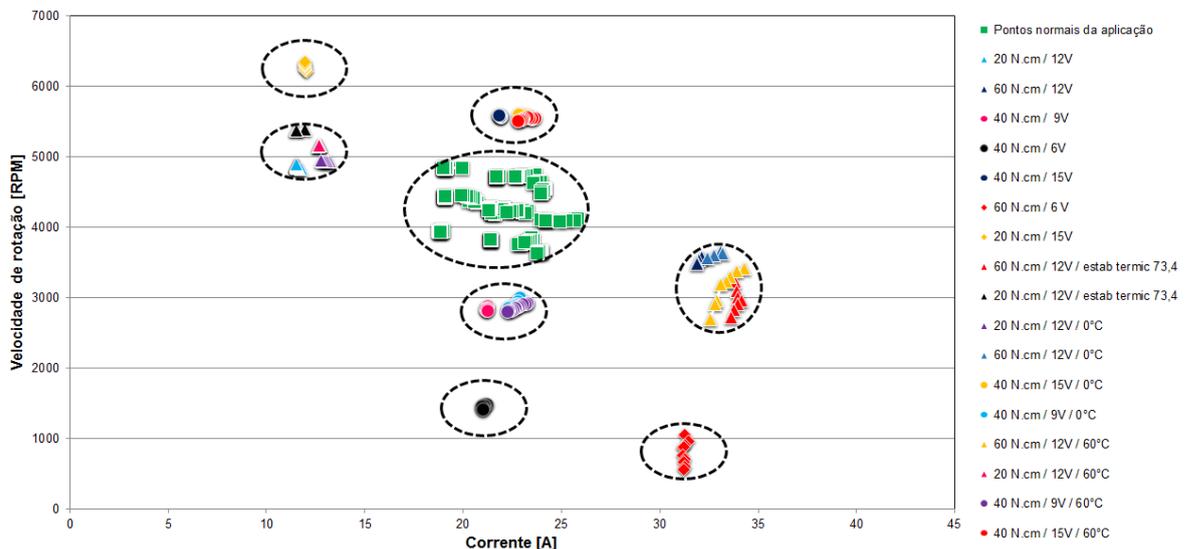
Temperatura [°C]	Tensão [V]	Carga aplicada [N.cm]	Condição
20	12	20	Carga menor que o limite
20	12	60	Carga maior que o limite
20	6	40	Tensão muito abaixo do limite
20	9	40	Tensão abaixo do limite
20	15	40	Tensão acima do limite
20	15	20	Tensão acima e carga abaixo dos respectivos limites
20	6	60	Tensão muito abaixo e carga acima dos respectivos limites
0	12	20	Mínima temperatura e carga abaixo do limite
0	12	60	Mínima temperatura e carga acima do limite
0	9	40	Mínima temperatura e tensão abaixo do limite
0	15	40	Mínima temperatura e tensão acima do limite
60	12	20	Máxima temperatura e carga abaixo do limite
60	12	60	Máxima temperatura e carga acima do limite
60	9	40	Máxima temperatura e tensão abaixo do limite
60	15	40	Máxima temperatura e tensão acima do limite

Figura 32. Pontos sob condições normais e anormais de operação



Todos os *clusters* identificados na Figura 33 correspondem a diferentes condições de operações com variações de parâmetros específicos.

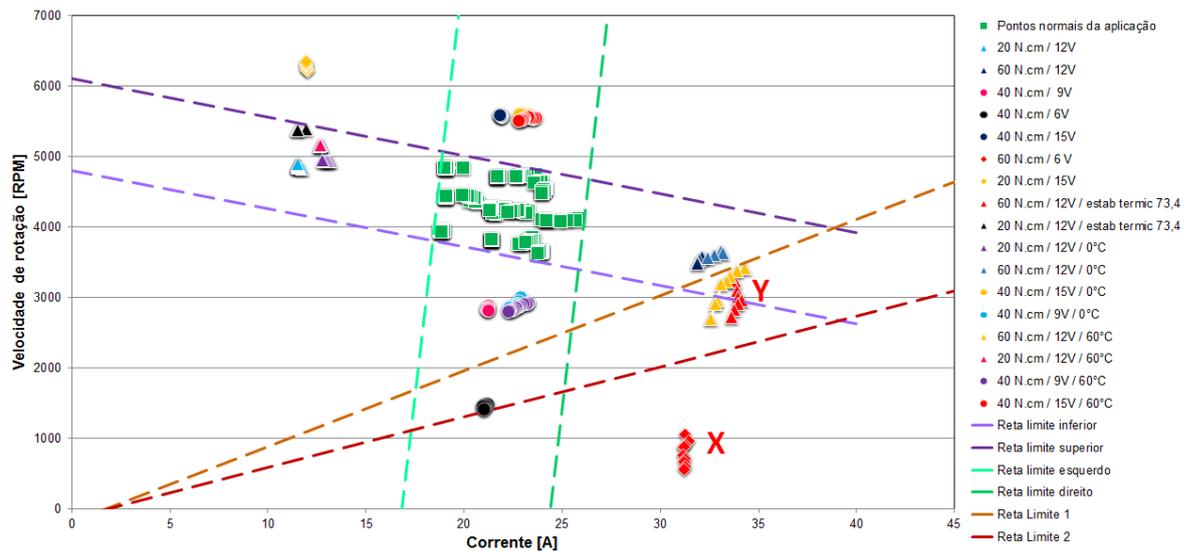
Figura 33. Agrupamento dos pontos em clusters



As retas definidas para delimitar a área de operação normal da Figura 31 foram estendidas para separar regiões onde ocorre a alteração de valor de uma das variáveis, conforme mostrado na Figura 34. Pode-se notar que a variação de tensão, temperatura e torque geram agrupamentos de pontos em

regiões diferentes do gráfico. Uma análise relacionada às diversas regiões definidas será apresentada em mais detalhes na seção 5.5.3.

Figura 34. Gráfico com todas as condições medidas e limites



Em uma das condições medidas, foi identificada a presença de fumaça na região do induzido do motor (ponto X), iniciando-se o teste a partir da condição de temperatura como 20°C, tensão de 6 V e carga de 60 N.cm. Essa condição foi considerada uma situação de colapso, pois o motor começa a sobreaquecer de forma acentuada, podendo assim sofrer com a queima de suas bobinas. Ao avaliar uma mesma região de operação no gráfico de caracterização do motor (Figura 18), pode-se notar que ela está além da região de máxima potência mecânica (região a ser evitada, pois a potência perdida passa a ser maior que a potência mecânica como demonstrado na seção 5.1.2).

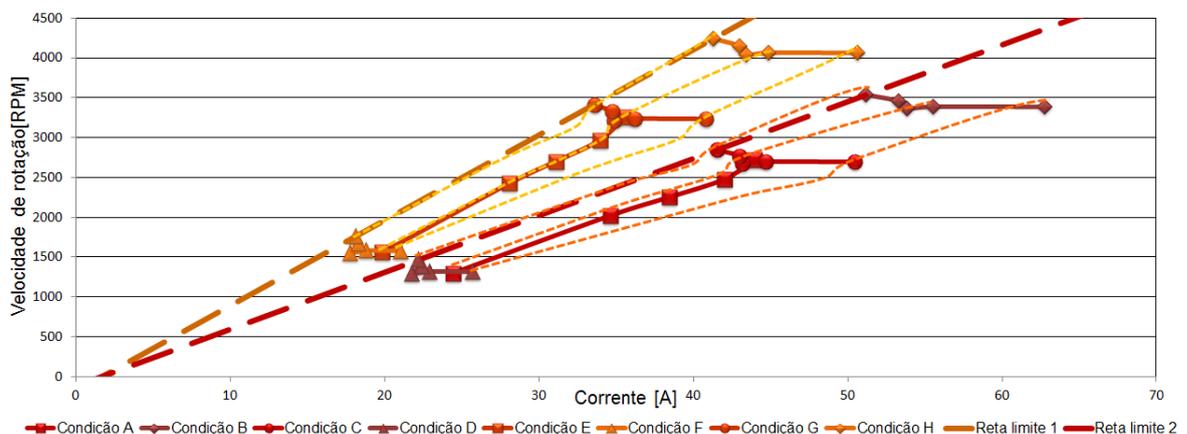
Além disso, os pontos medidos para condições caracterizadas por tensão de 12 V e carga de 60 N.cm (ponto Y na Figura 34), apresentaram um comportamento incomum de diminuição acentuada da velocidade de rotação. Essa característica demonstra instabilidade de funcionamento do motor e pode levá-lo a atingir situações de trabalho similares a da região onde houve sobreaquecimento apresentado anteriormente.

Tendo em vista o fenômeno observado, identificou-se a necessidade da definição de retas para delimitar regiões onde o funcionamento do motor deve ser evitado ou até mesmo interrompido, de modo a garantir que o sistema não perca sua funcionalidade. Para essa definição, aplicaram-se as condições determinadas na seção 5.1.3 e as equações do modelo do motor CC apresentado na seção 0, para se estimar os dados de temperatura para as condições de tensão de 6 V e 15 V, considerando os pontos de máxima potência mecânica e 20% abaixo desse valor.

Os pontos limites permitem a determinação de duas regiões de alerta de funcionamento do motor, como demonstrado na Figura 35, onde se encontra as condições A, C, E e G como os pontos medidos considerando-se as caracterizações de tensão e temperatura para as condições de máxima potência mecânica (A e C) e as condições 20% abaixo da máxima (E e G). Já as condições B, D, F e H são as calculadas através da aplicação do modelo, conforme descrito anteriormente, considerando-se variações de tensão e temperatura simultaneamente.

Com isso, ligando-se os pontos identificados como pior caso (temperatura alta), define-se a Reta Limite 1 (em linha tracejada laranja), que delimita uma região de alerta para o colapso, e a Reta Limite 2 (em linha tracejada vermelha), que delimita a região de operação de colapso onde o motor pode se destruir devido ao superaquecimento. As retas limites citadas e os pontos para cada condição também estão representados no gráfico da Figura 34.

Figura 35. Determinação de áreas de alerta



As equações das retas que delimitam a região de alerta ao colapso e a região de colapso são:

- Reta Limite 1 - identifica situação de alerta ao colapso:

$$\text{Velocidade de rotação[RPM]} = (107,12 \times \text{Corrente [A]}) - 181,66 \quad (\text{Eq. 30})$$

- Reta Limite 2 - identifica situação de colapso:

$$\text{Velocidade de rotação[RPM]} = (71,42 \times \text{Corrente [A]}) - 121,09 \quad (\text{Eq. 31})$$

5.5.3 Motor atuando como sensor para a proteção de um sistema

Após todos os estudos descritos nas seções 5.5.1 e 5.5.2 procurou-se integrar todos os métodos e características identificadas a fim de elaborar uma solução de monitoramento e sensoriamento de sistemas que possuem motores integrados. Baseado nisso, levantou-se a proposta de aplicar o motor não apenas como um atuador mecânico, mas também como uma forma de sensoriamento do sistema visando sua proteção.

Para isso, foi feita uma análise exploratória dos dados, estudando-se todos os pontos e situações apresentados na Figura 34, para se identificar padrões que permitissem a identificação de informações sobre o sistema. Os padrões encontrados permitiram a definição de 11 regiões diferentes, ilustradas na Figura 36. As regiões foram delimitadas pelas retas limites determinadas nas seções 5.5.1 e 5.5.2, porém acrescentando um estudo que vincula as medidas realizadas às variações de características que o motor esteja submetido.

As características identificadas para cada região são:

Região 1: É a região que contempla todas as condições definidas como normal para o sistema dentro dos limites de variação de torque, tensão e temperatura estipulados na Tabela 3. Essa região não apresenta riscos ao motor, pois foi definida dentro dos limites de trabalho para os quais o motor foi desenvolvido. Todos os pontos da Tabela 4 estão inclusos nessa região.

Região 2: É a região que considera variações de torque dentro do especificado para a aplicação, porém com tensões de alimentação superiores ao

limite definido. Nesse caso, considera-se que o motor está sendo submetido a uma sobretensão, o que pode interferir no desempenho do sistema.

Região 3: É a região que considera variações de torque dentro do especificado para a aplicação, porém com tensões de alimentação inferiores ao limite definido. Nesse caso, o motor do sistema está submetido a uma subtensão, podendo assim comprometer seu funcionamento e o do sistema.

Região 4: Encontra-se nessa região, as condições onde o torque aplicado ao motor é inferior ao limite mínimo definido, sem que haja uma variação de tensão fora do especificado. Pontos encontrados nessa região caracterizam uma falta de torque do sistema que pode ser gerada por problemas no acoplamento do motor (motor girando em falso) ou a aplicação não está solicitando a atuação do sistema como projetado.

Região 5: Para essa região, repete-se a condição de tensão da região 4, mas a situação do torque é a contrária, ou seja, os pontos encontrados nessa região tem um torque maior que o limite máximo definido. Com isso, quando as condições do motor se enquadram nessa região, conclui-se que o motor está trabalhando com sobrecarga, que pode ser causada por um desalinhamento do motor ou devido à aplicação estar exigindo mais força do que o sistema foi projetado para trabalhar.

As regiões 6, 7, 8 e 9 são definidas por combinações da tensão e torque que extrapolam os limites estipulados para a aplicação sendo definidas por:

Região 6: Torque abaixo e tensão acima dos respectivos limites.

Região 7: Torque e tensão acima dos respectivos limites.

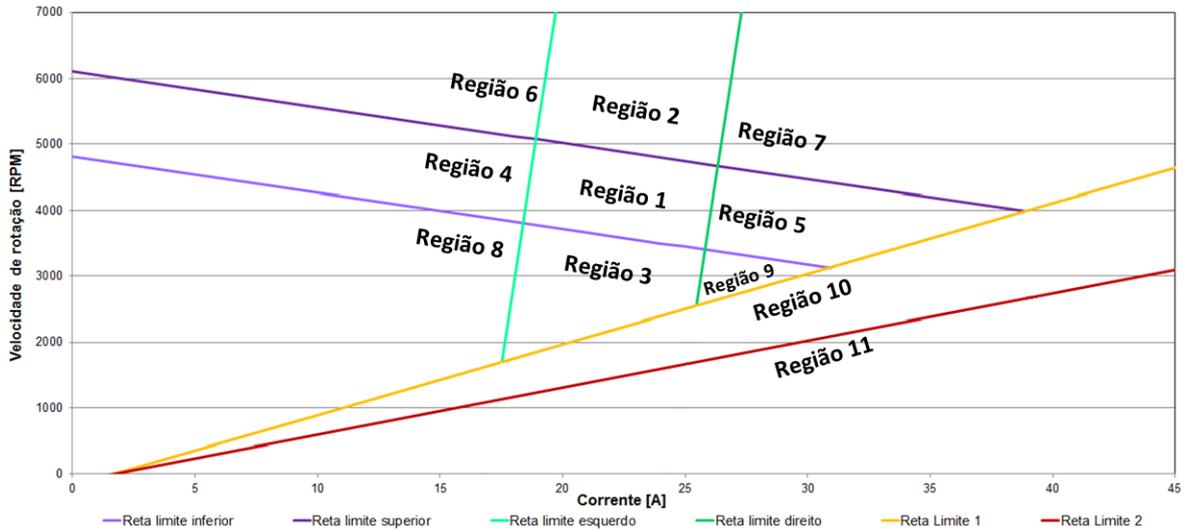
Região 8: Torque e tensão abaixo dos respectivos limites.

Região 9: Torque acima e tensão abaixo dos respectivos limites.

Com exceção da região 1, todas as outras caracterizam situações consideradas anormais para funcionamento do sistema e foram denominadas como regiões de alerta. Dentre essas condições anormais, definem-se mais duas

regiões que, além de serem anormais para o sistema, devem ser evitadas, pois são críticas ao motor.

Figura 36. Definição das regiões de operação



Região 10: Essa região caracteriza as condições em que o motor começa a perder o equilíbrio de funcionamento, sofrendo um aquecimento anormal causado pela queda de eficiência e excesso de potência perdida. Ela é denominada **região de tendência ao colapso** já que o motor poderá se manter em funcionamento por um curto intervalo de tempo, pois o mesmo começa a esquentar gradativamente sem estabilizar, fato que causa um efeito cascata diminuindo progressivamente a velocidade de rotação. Essa é uma região em que o sistema não pode atuar por muito tempo, já que seu comportamento será comprometido devido à instabilidade e possibilidade de danos.

Região 11: Por fim temos a região 11 foi classificada como a mais crítica para o motor, pois ao funcionar nessa região, seu comportamento será instável e comprometerá sua integridade, mesmo que por curtos intervalos de tempo. O motor nessa região poderá sofrer grandes danos devido a um aquecimento acentuado, causando perda de isolamento de suas bobinas ou alteração do campo magnético do ímã permanente.

Após a definição das regiões de operação conforme apresentado na Figura 36, e considerando a proposta de enquadramento das variáveis (I , ω) no plano CxV discutida na seção 5.5.3, torna-se evidente que o *hardware* e *software*

embarcados junto ao motor realize as medidas de corrente, velocidade de rotação com vistas ao monitoramento do mesmo, juntamente com um pré-processamento desses dados visando detectar a região de operação, bem como executar eventuais ações de sinalização e proteção.

Essas ações levam em consideração o par de medidas (consumo de corrente e velocidade de rotação) que caracterizam o ponto de operação e as condições nas quais o motor está sendo submetido. Para a região 1, o motor deve apenas informar que sua situação está dentro do esperado e os dados medidos sendo armazenados localmente para serem transmitidos apenas se houver solicitação pelo sistema gerenciador da aplicação.

Considerando-se as regiões de 2 a 9, o motor deve informar ao sistema que não está mais trabalhando dentro dos limites definidos e informar qual característica anormal está apresentando. No entanto, o motor ainda funcionará apenas como um sensor do sistema e informará os dados medidos apenas se o sistema gerenciador solicitar. Para as regiões 10 e 11, o sistema de monitoramento embarcado deve ter autonomia para se autoprotoger e enviar um alerta solicitando manutenção, garantindo assim que o motor e a aplicação não sejam comprometidos e que possam ser religados assim que a problema for identificada e corrigida.

5.5.4 Árvore de decisão e teste das condições

Considerando-se as possibilidades de detecção apresentadas na seção 5.5.3, foi desenvolvida a árvore de decisão apresentada na Figura 37, que determina o algoritmo que deve ser implementado ao processador que será embarcado no motor, considerando prioridades e a forma de identificação da região em que os pontos medidos se enquadram.

A prioridade das checagens inicia pelo teste que avalia se os dados estão localizados na região 11 (teste A). Em seguida, a segunda prioridade é checar se estão incluídos na região 10 (teste B). Tendo checado as duas regiões mais críticas para o motor, e as únicas em que sistema de monitoramento pode atuar, por exemplo, desligando-se para proteger a integridade da aplicação e o motor, inicia-se a checagem das regiões de alerta. Dentre essas, avalia-se

primeiramente se o motor apresenta um torque acima do especificado, e se apresenta também tensões anormais (testes C, D e E respectivamente). Em seguida, será checado se o motor apresenta torque abaixo do especificado e também se está submetido a tensões anormais (testes F, G e H respectivamente).

Caso o motor não apresente torques anormais, checa-se se ele apresenta tensão acima (teste I) ou abaixo (teste J) do especificado. Se, e somente se, nenhuma das situações anteriores for verdadeira, pode se concluir através desse algoritmo que o motor esta funcionando em sua área de funcionamento definida como normal.

Esse algoritmo foi elaborado e testado para todos os pontos das tabelas 4 e 5, utilizando-se as equações de retas definidas nas seções 5.5.1 e 5.5.2. Para checagem dos resultados obtidos através da aplicação do algoritmo, esses foram comparados com os resultados definidos pelos estudos.

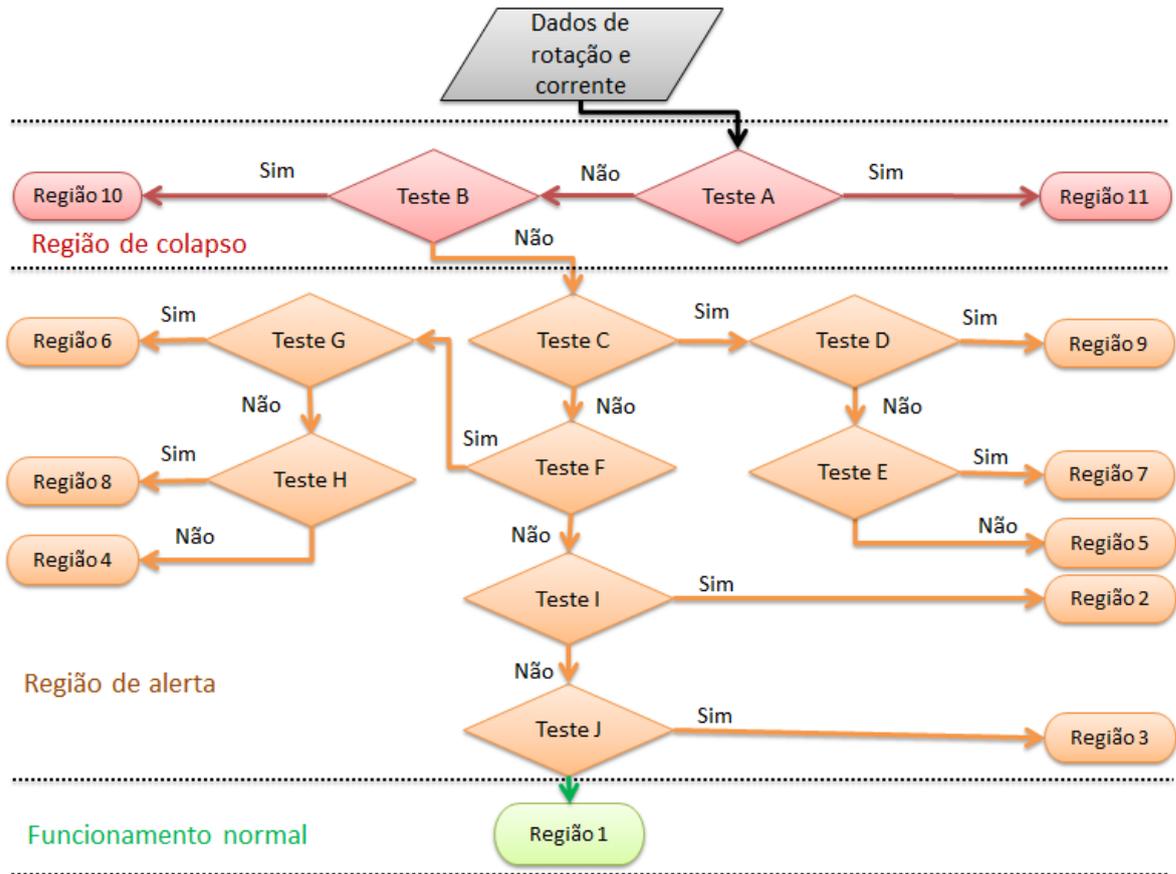
Todas as conclusões referentes às características determinadas pelo algoritmo da árvore de decisão coincidiram com as definidas pelo estudo. Para identificação da região em que cada ponto se enquadra, é feita uma substituição de um dos valores medidos nas equações de retas limites, e o valor obtido é comparado com o outro valor medido. Recomenda-se a substituição de valores de velocidade de rotação para detecções de variação de torque e substituição de valores de corrente para detecções de variação de tensão.

Essa sugestão busca reduzir o número de casas decimais a serem comparadas no processador, já que as retas apresentam inclinações bem distintas.

Como exemplo prático da comparação, considere-se um ponto que se encontra no interior da região 11. Ao se substituir o valor de velocidade de rotação medido para esse ponto na equação da reta, obtém-se o valor de corrente contido na reta da linha limite. Com isso compara-se o valor obtido pela equação com o valor medido. Caso esse seja igual, o motor esta trabalhando exatamente sobre a linha limite entre as regiões 10 e 11. Se o valor medido for maior que o valor calculado, o ponto encontra-se abaixo da reta e portando dentro da região 11. Por fim, se o valor medido for menor que o valor calculado, conclui-se que o motor

não esta trabalhando na região 11. Para essa ultima conclusão, no entanto, não se pode afirmar que a condição enquadra-se na região 10 sem que se faça a comparação com a equação da reta limite definida para a região 10.

Figura 37. Árvore de decisão para detectar a região de operação.



Caso a comparação ainda não resulte em um resultado conclusivo, os cálculos devem ser repetidos para as demais equações das retas limite das regiões 1 a 10, obedecendo-se a ordem de testes definida na árvore de decisão da Figura 37, de modo que ao final do processo se tenha um diagnóstico conclusivo do estado de operação do motor (ou seja, a identificação da região de operação segundo indicado na Figura 36) e, conseqüentemente do estado de operação do sistema.

6 Conclusão

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho que foram divididas em três partes. A primeira parte apresenta as conclusões gerais do trabalho relacionadas aos objetivos apresentados na seção 1.2. A segunda parte apresenta as possibilidades de aplicação da metodologia proposta no trabalho. A terceira parte comenta sobre os trabalhos futuros e vertentes que podem dar continuidade ao trabalho.

6.1 Comentários gerais

Através do sensoriamento da tensão, corrente, velocidade de rotação, torque e temperatura foi possível o cálculo das **constantes características (K_t e K_e)** do motor de corrente contínua utilizado nesse trabalho e a caracterização de seu funcionamento para cinco condições de tensão e seis condições de temperatura.

Foi feito também um levantamento de resultados experimentais que demonstram a utilização do conjunto de variáveis selecionado, comprovando que essas são suficientes para avaliar o estado inicial de operação de um motor de corrente contínua, bem como detectar desvios funcionais ao longo do tempo, que estejam relacionados a problemas eletromagnéticos ou estruturais, tal como evidenciado pelos dois estudos de caso analisados nas seções 5.4 e 5.5. Além disso, o sensoriamento de todas essas variáveis permite identificar alterações nas constantes características do motor decorrentes de falhas mais graves e que afetam características construtivas do motor, como por exemplo, a desmagnetização dos ímãs permanentes.

Foi possível também realizar a análise do sensoriamento das variáveis do motor de corrente contínua, escova e ímã permanente, desenvolvendo mediante a isso, um método de processamento e utilização das medidas para determinar características de funcionamento do motor e do sistema ao qual esse foi aplicado. Os sensores utilizados podem ser embarcados ao motor juntos a um processador para a implementação de técnicas de monitoramento de condição que enviam e recebem dados através de um canal de comunicação. Esses dados podem ser pré-processados pelo sistema embarcado para garantir uma menor

necessidade de processamento por parte do sistema de gerenciamento remoto, normalmente hospedado na nuvem como parte de uma plataforma de IoT, deixando-o assim livre para trabalhar apenas com informações e executar algoritmos mais complexos.

Além disso, o trabalho comprovou que através do sensoriamento da corrente e velocidade de rotação de um motor de corrente contínua com escovas e ímã permanente, pode-se definir características do sistema ao qual esse motor esteja sendo aplicado, de modo que esse passe a funcionar como um sensor que fornece informações sobre a aplicação, como foi constatado nas seções 5.5.1 e 5.5.2. Isso ocorre devido ao fato do motor estar a todo momento sofrendo os efeitos da aplicação através do torque que esse aplica ao sistema. Foi proposto também um algoritmo que permite identificar, através da medição de duas variáveis (corrente consumida e velocidade de rotação), a identificação e classificação das características as quais o sistema está submetido e se é necessária uma intervenção ou alerta decorrente de condições adversas. Em complemento a isso, foi definida uma região segura de operação (SOA - *Safe Operating Area*), onde o motor apenas informa o seu estado de operação e provê dados eventuais ao sistema de monitoramento. Fora dessa região segura, o motor terá autonomia para se autodesligar evitando assim que sofra danos e impacte a funcionalidade da aplicação.

Embora desenvolvido para um tipo específico de motor de corrente contínua, o método pode, em princípio, ser aplicado a qualquer outro tipo de motor elétrico realizando-se apenas uma adequação no modelo elétrico equivalente do motor, com relação às equações que dele derivam, adaptando-se também as caracterizações experimentais necessárias.

Com relação aos objetivos específicos propostos pode-se concluir:

- Através da medição das variáveis propostas é possível se realizar uma análise de falha e estipular limites para funcionamento do motor, garantindo a esse maior durabilidade.
- Comprovou-se que é possível obter informações úteis como valor de torque, consumo energético, eficiência, variações de tensão de alimentação, bem como avaliar as constantes características do motor e

detectar efeitos de desmagnetização de ímãs através de um pré-processamento de dados, realizados de forma embarcada junto ao motor. Mais especificamente, com relação ao torque e à tensão de alimentação, é possível se identificar quando estão acima ou abaixo do aceitável através da medida de corrente e da velocidade de rotação.

- Pode-se aplicar o motor como um sensor do sistema ao qual esteja integrado. A análise dos dados medidos permite verificar se o motor e sua aplicação estão atuando em condições normais, anormais ou em colapso. Com isso, pode-se atribuir um maior grau de robustez e confiabilidade proporcionado por um motor que possui sensores e inteligência embarcada, e que seja capaz de transmitir informação sobre o seu estado de operação a sistemas de gerenciamento. Isso caracteriza o conceito de motor “coisa” proposto neste trabalho, no contexto da Internet das Coisas.
- Comprovou-se que através da análise do motor e comparação com o seu modelo matemático, podem-se definir limites que garantem a utilização correta do motor, além de detectar variações de comportamento em relação ao previsto pelo modelo, que sejam decorrentes da degradação ou mudança das condições de aplicação.
- Elaborou-se uma metodologia que pode ser aplicada a outros tipos de motores para se obter informações com aplicação de técnicas de Monitoramento de Condição.

6.2 Possibilidades de aplicação

A definição de um modelo que permite detecção do desempenho utilizando diferentes tensões de alimentação permite o monitoramento de um motor de corrente contínua em aplicações com controle da velocidade de rotação do motor por PWM (*Pulse Width Modulation*) ou de forma analógica.

A definição de um modelo que permite estimar as variações de desempenho causadas por alterações de temperatura permite definir um modelo de análise do motor após estabilizações térmicas e em diferentes temperaturas e ambientes.

A aplicação e integração dos métodos através de um *hardware* embarcado e conectável a internet configura o motor “coisa” proposto pelo trabalho. Motores com essas características permitem a produção de dados sobre sistemas para estudo e desenvolvimentos de novas funções e aplicações, pois podem ser aplicados como atuadores e sensores.

Os métodos de monitoramento estudados neste trabalho, integrados a um motor, podem ser usados para garantir maior confiabilidade a sistemas e aplicações, de modo que o motor detecte o seu mal uso e registre informações importantes sobre o histórico de uso na aplicação.

Os métodos citados podem ser adaptados e aplicados a outros tipos motor elétrico.

6.3 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros e possibilidades de continuação desse trabalho, há segmentos em diversas áreas, como por exemplo:

- Aprimoramento do método proposto, considerando a existência de um sensor de torque embarcado ao motor.
- Integração de um sensor de torque de baixo custo que possa ser embarcado a motores elétricos visando adicionar uma nova variável de medida direta.
- Aprimoramento do algoritmo proposto na Figura 25 utilizando recursos de interrupção de *hardware* e acrescentando um parâmetro de tempo máximo (*time-out*) para identificar a parada do motor sem parar o código. Essas melhorias utilizarão melhor o *hardware* disponível, evitarão que o *software* fique parado quando o motor estiver desligado (o que é essencial pensando na integração com outros sistemas) e também deixarão o algoritmo mais robusto e fácil de ser aprimorado para trabalhos futuros.
- Acrescentar um capacitor em paralelo com a entrada do micro-controlador no circuito de medida de tensão da Figura 12. Esse capacitor deve ser dimensionado para funcionar como um filtro passa-baixas para remoção do

ruído gerado pela comutação de corrente nos contatos entre escovas e coletores, de modo a melhorar a qualidade da medição de tensão.

- Desenvolvimento de aplicações que utilizam as técnicas de monitoramento de motores estudadas neste trabalho, aplicadas individualmente ou em conjunto, como elementos de sistemas visando soluções mais abrangentes.
- Integração das eletrônicas e técnicas de controle com as de gerenciamento desenvolvida no trabalho, para obtenção de um motor com ainda mais funcionalidades e maior robustez.
- Implementação de um controle de qualidade capacitando o motor de se auto avaliar e indicar se esta dentro do padrão esperado, não apenas antes de sair da fábrica, como também durante toda a sua vida útil.
- Avaliação de garantia armazenando os dados de utilização ao longo da vida útil do motor, que permitem identificar se houve uso indevido do mesmo.
- Avaliação de motores ao longo de toda sua vida útil permitindo detecção de novos fenômenos que causam alterações nos mesmos, por meio da análise de dados históricos coletados.
- Aplicação de metodologias de inteligência artificial e aprendizado de máquina a sistemas através dos dados produzidos pelo motor.
- Desenvolvimento de novos motores e aplicações buscando garantir maior automação e confiabilidade a sistemas.

Referências

- ALMEIDA, A. T. D.; FERREIRA, F. J. T. E.; BOTH, D. *Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems*. v. 41, n. 1, 2005.
- ARDUINO Mega 2560. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>. Acesso em: 30/01/2019.
- BASILIO, J. C.; MOREIRA, M. V. *Experimentos para Estimação dos Parâmetros de Motores de Corrente*. Cobenge, 2001.
- BEHRENS, F.; BARBOSA, K. G.; TEIXEIRA, I. T. T. *Monitoramento da Eficiência de Conversão de Energia de Painéis Fotovoltaicos*. In: Proceedings of the Brazilian Technology Symposium. Campinas, SP, 2016.
- BENOIT, C.; PAGES, A.; CLAEYSSEN, F. *Contactless Torque Sensor based on shaft torsion measurement, compatible with existing shafts*. Cedrat Technologies, Disponível em: https://www.cedrat-technologies.com/fileadmin/user_upload/CTEC/Publications/Publications/2010/09/Contactless_Torque_Sensor_SENSOR_2010_V11.pdf Acesso em: 30/01/2019.
- BONALDI, E. L. et al. *Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors*, IEEE 2000, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/48045>>.
- BOSCH *I-Buisness E-Motoren 2017 Catalogue*, 2017. Disponível em: <http://www.bosch-ibusiness.com/products/dc-motors.html> Acesso em: 30/01/2019.
- BOSCH *Wiper Direct Actuator WDA*. Disponível em: <http://www.bosch-motorsport.de/media/catalog_resources/Wiper_Direct_Actuator_WDA_Datasheet_51_en_2785939211pdf.pdf> Acesso em: 25/02/2019.
- BOSCH *EC motors for engine cooling fans*. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/thermal-management-for-combustion-engines/ec-motor/> Acesso em: 25/02/2019.
- BRANDL, M.; HAAS, F.; MARIK, R. *Contactless Torque Sensor, Mechatronic Principle and Prototype Development for Automotive Applications*. ICINCO 2009, Proceedings of the 6th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Intelligent Control Systems and Optimization, Milan, Italy, July 2-5, 2009.
- BORGES, J. C. S. et al. *New Contactless Torque Sensor Based on Hall Effect*. IEEE Sensors Journal, v. 17, n. 16, August 2017.
- CHOW, M.-Y.; SHARPE, R. N.; HUNG, J. C. *On the application and design of artificial neural networks for motor fault detection. II*. IEEE Transactions on industrial electronics, v. 40, n. 2, pp. 189-196, 1993.

CISCO, *The Internet of Things Reference Model*. 2014. Disponível em: <http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf>. Acesso em: 30/01/2019.

DISCENZO, F. M. et al. *Self-diagnosing Intelligent Motors: A Key Enabler for Next Generation Manufacturing Systems*. IEE Colloquium on Intelligent and Self-Validating Sensors, Oxford UK, 1999.

DUMA, R. et al. *Embedded Control of Electrical Motors*, 16th International Conference on System Theory, Control and Computing, 2012.

FABRÍCIO, M. A. Monitoramento de Equipamentos Elétricos Industriais Utilizando IoT. 2018. 73 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) — PUC-Campinas, Campinas.

Disponível em:

<http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/handle/tede/1059>.

Acesso em: 30/01/2019.

FERNANDO, N.; LOKE, S. W.; RAHAYU, W. *Mobile cloud computing: A survey*. Future Generation Computer Systems, v. 29, pp. 84-106, Elsevier, Janeiro 2013.

GNATUS.

Disponível em:

<http://www.gnatus.com.br/site/por/produtos_show.php?id=101&cat=1&scat=odontologia>. Acessado em: 24/02/2019

GUBBI, J. et al. *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future Generation Computer Systems, v. 29, pp. 84-106, Elsevier, Janeiro 2013.

GUNGOR, V. C.; Hancke, G. P. *Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 10, p. 4258 – 4265, 2009.

HAN, Y.; SONG, Y. H. *Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey*. IEEE Transactions on Power Delivery. v. 18, n. 1, p. 4-13, 2003.

HUGHES, A.; DRURY, B. *Electric Motors and Drives*, Elsevier Newnes, 4a. ed., 2013, 439 pp.

IBM. *BlueMix*. Disponível em: <<https://www.ibm.com/cloud-computing/bluemix/pt>>. Acesso em: 30/01/2019.

IMAGEM1, *Principios de funcionamiento del motor de corriente continua*, <https://automatismoindustrial.wordpress.com/motores/1-3-5-motores-de-corriente-continua/1-3-5-2-principios-de-funcionamiento/> Acesso em: 30/01/2019.

INFINEON. *Sensor Solutions for Automotive, Industrial and Consumer Applications*. Disponível em: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Sensor+Solutions+for+Automotive,+Industrial+and+Consumer+Applications-ABR-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46250cc1fdf01516335e36c3e01.

Acesso em: 30/01/2019.

IONEL, D. M. *High-efficiency variable-speed electric motor drive technologies for energy savings in the US residential sector*. In: 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010.

ITU *Internet Reports - The Internet of Things*. Disponível em: <https://www.itu.int/net/wsis/tunis/newsroom/stats/The-Internet-of-Things-2005.pdf>.

Acesso em: 30/01/2019.

MACMINN, S. R. et al. *Application of Sensor Integration Techniques to Switched Reluctance Motor Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 28, n. 6, pp. 1339-1344, 1992.

MAGTROL. 2019. Disponível em: <<https://www.magtrol.com/>>. Acesso em: 30/01/2019.

MICROMO. *DC Motor Calculations*. 2018. Disponível em: <https://www.micromo.com/technical-library/dc-motor-tutorials/motor-calculations>
Acesso em: 30/01/2019.

MAUSBACH, L. B. BEHRENS, F. H. *Medição indireta de velocidade de motores elétricos de corrente contínua com escova*. BTSYM 2017 Proceedings. ISSN 2447-8326. Disponível em: <http://lcv.fee.unicamp.br/index.php/2-uncategorised/224-btsym-17-proceedings-table-content-of-full-articles>
Acesso em: 30/01/2019.

MEDINA-GARCÍA, J. et al. *A wireless sensor system for real-time monitoring and fault detection of motor arrays*. Sensors, v. 17, n. 3: pp. 469-491, 2017.

MILJKOVIĆ, D. *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*. HDKBR INFO Magazin, v.5, n.1, p.14-26, 2015. Available from:< <https://hrcak.srce.hr/148715>>.
Acesso em: 30/01/2019.

MORIMOTO, S.; TAKEDA, Y.; MURAKAMI, H. *Electric Motors for Home Applications – Development of Environment-Friendly Electric Motors*. EPE Journal European Power Electronics and Drives, v. 14, n. 1, Fevereiro 2014.

PFISTER, P.; PERRIARD, Y. *Very High Speed Slotless Permanent Magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design and Torque Measurement Methods*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 57, n. 1, pp. 296-303, 2010.

PRETZ, K. *Smarter Sensors* - IEEE - The Institute, Março 2014. Disponível em: <http://theinstitute.ieee.org/technology-topics/internet-of-things/smarter-sensors> Acesso em: 30/01/2019.

RASMUSSEN, C. B.; RITCHIE, E. *A Magnetic Equivalent Circuit Approach for Predicting PM Motor Performance*. In: *IEEE Industry Applications Society - Annual Meeting*. New Orleans, 1997.

SEEDER. Disponível em: <<http://www.cx6smartseeder.com/tech-specs>>. Acessado em: 24/02/2019

SHAIKH, M. ; SHAIKH N. *Embedded system for online monitoring of induction motors*. IJCSN, International Journal of Computer Science and Network, v. 5, n. 2, pp. 261-265, 2016.

SILVA, A.; KLEIN, J. D.; BRUSAMARELLO, V. *Bancada para Identificação Automática de Parâmetros de uma Máquina Elétrica*, Lume, UFRGS, 2010. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/46706/Poster_5826.pdf?sequence=2 Acesso em: 30/01/2019.

SIEMENS *MindSphere*. Disponível em: <<https://www.siemens.com/global/en/home/products/software/mindsphere.html>>. Acesso em: 30/01/2019.

SINCERO, G. C. R et al. *Collector Model for Simulation of Brush Machines*, Mathematics and Computers in Simulation 81, Science Direct, pp. 340-353, 2010.

SHIN, W. G.; LEE, S. H. *An analysis of the main factors on the wear of brushes for automotive small brush-type DC motor*. Journal of Mechanical Science and Technology. Springer, Janeiro 2010, Volume 24, Issue 1, pp 37–41, 2010.

SINGH, S.; KUMAR, A.; KUMAR, N. *Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems*. Science Direct, 3rd International Conference on Materials, Processing and Characterization, Procedia Materials Science 6, pp. 171-177, 2014.

TAGO *Plataform*. Disponível em: <<https://tago.io/>>. Acesso em: 30/01/2019.

TDK LAMBDA, 2019.

Disponível em: https://www.us.tdk-lambda.com/hp/pdfs/Product_manuals/83515000.pdf. Acesso em 30/01/2019.

THINGSPEAK, *IoT Plataform with Matlab Analytics*. Disponível em: <<https://thingspeak.com/>>. Acesso em: 30/01/2019.

THOMSON, W. T.; FENGER, M. *Current signature analysis to detect induction motor faults*. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, issue4, pp. 26-34, 2001.

ULRICH, K. T. *Estimating the technology frontier for personal electric vehicles*. Science Direct, Transportation Research Part C, 13, pp. 448-462, 2005.

VISHAY. *TCRT5000L - Reflective Optical Sensor with Transistor Output*. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>>. Acesso em: 30/01/2019.

WAPLES, S. *Monitoring System for Electric Motors*. 2015. Disponível em: https://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/107. Acesso em: 30/01/2019.

WEG, *Motores de corrente contínua*, 2018.
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h19/h74/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf> Acesso em: 30/01/2019

YILDIRIM, M.; POLAT, M.; KURUM, H. *A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Turquia, 2014

