



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

WALTHER XANTHOPULO

**LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES APLICADA À
CONTINUIDADE DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

**PALMAS - TO
2022**

WALTHER XANTHOPULO

**LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES APLICADA À
CONTINUIDADE DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau de bacharel em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Kaison Teodoro de Souza

Coorientador: Prof. Marcio Augusto Tamashiro

**PALMAS - TO
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

X2l Xanthopulo, Walther
 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES
 APLICADA À CONTINUIDADE DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE
 INDUÇÃO TRIFÁSICO / Walther Xanthopulo. – Palmas, TO, 2022.
 50 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Me. Kaison Teodoro de Souza
Coorientador: Dr. Márcio Augusto Tamashiro

1. motor de indução trifásico. 2. lógica paraconsistente anotada de dois valores. 3. controle e automação. I. de Souza, Kaison Teodoro. II. Tamashiro, Márcio Augusto. III. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

WALTHER XANTHOPULO

**LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES APLICADA À
CONTINUIDADE DE OPERAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

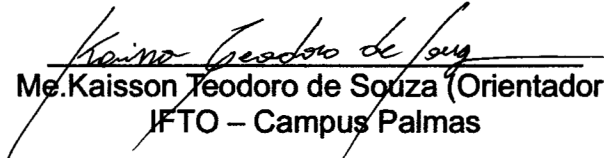
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau de bacharel em engenharia elétrica.

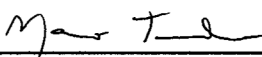
Orientador: Prof. Kaison Teodoro de Souza

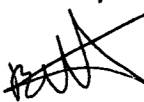
Coorientador: Prof. Marcio Augusto Tamashiro

Aprovado em: 12/12/2022

BANCA AVALIADORA


Me. Kaison Teodoro de Souza (Orientador)
IFTO – Campus Palmas


Dr. Marcio Augusto Tamashiro (Coorientador)
IFTO – Campus Palmas


Me. Felipe Tozzi Bittencourt
IFTO – Campus Palmas


Dr. Elcio Precioso de Paiva
IFTO – Campus Palmas

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Nathalia e ao meu pai Walter pela paciência, esforço, contribuição e incentivo por me trazer até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Kaison Teodoro de Souza e Márcio Augusto Tamashiro pela confiança e conhecimento compartilhado neste trabalho.

Agradeço ao coordenador da Engenharia Elétrica Celivan F. Vieira por toda a paciência que teve comigo durante o curso.

Agradeço aos professores, em ordem alfabética, Élcio P. de Paiva, Felipe T. Bittencourt, Fabio L. de Albuquerque, Marcos B. Alvarenga, Marcus A. P. Oliveira, Maxwell M. Costa, Valci F. Victor, Wallysonn A. de Souza pelos momentos e ensinamentos.

Agradeço ao Instituto Federal de Ciência Tecnologia e Educação do Tocantins pela estrutura proporcionada para o desenvolvimento pessoal e profissional.

Veni, Vidi, Vici
Júlio César - Imperador Romano

RESUMO

O domínio dos diferentes tipos de energia permitiu o desenvolvimento humano de forma acelerada. A conversão eletromecânica de energia fez o surgimento de máquinas como o motor de indução trifásico. O MIT é largamente utilizado na sociedade e seu controle é fundamental para a indústria em geral. Neste trabalho há uma proposta do uso da lógica paraconsistente anotada de dois valores para que o MIT continue operando mesmo em sobrecarga, gerando um sinal de aviso para o que o operador, humano ou não, tome o conhecimento da situação evitando a parada repentina do motor. A parada inesperada de qualquer equipamento no processo produtivo causa perdas, atrasos e provoca gastos desnecessários. O sistema aqui proposto permite a avaliação local e imediata das condições de operação do MIT, diferentemente de sistemas atuais que consistem em análises de *big data*.

Palavras-chave: motor de indução trifásico, lógica paraconsistente anotada de dois valores, controle e automação

ABSTRACT

The mastery of different types of energy allowed human development in an accelerated way. Electromechanical energy conversion made the emergence of machines such as the three-phase induction motor. MIT is widely used in society and its control is fundamental for the industry in general. In this work, there is a proposal to use the paraconsistent logic annotated with two values so that the MIT continues operating even in overload, generating a warning signal so that the operator, human or not, becomes aware of the situation, avoiding the sudden stop of the motor. . The unexpected stop of any equipment in the production process causes losses, delays and causes unnecessary expenses. The system proposed here allows for a local and immediate assessment of MIT's operating conditions, unlike current systems that consist of big data analysis.

Key-words: three-phase induction motor, two-value annotated paraconsistent logic, control and automation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Recorte da classificação dos motores elétricos	17
Figura 2 - Componentes do MIT	18
Figura 3 - Campo magnético girante se mantém constante	22
Figura 4 - Automação de processo	25
Figura 5 - Reticulado da LPA2v	25
Figura 6 - Análise da LPA2v	26
Figura 7 - Quadrado Unitário no Plano Cartesiano	28
Figura 8 - Fluxograma do algoritmo da LPA2v	30
Figura 9 - Diagrama do fluxo de potência no MIT	31
Figura 10 - Placa de dados do MIT utilizado neste trabalho	33
Figura 11 - Disco (e) posicionado no eixo do MIT (d)	34
Figura 12 - Gráfico para extração da evidência favorável	34
Figura 13 - Gráfico para extração da evidência desfavorável	35
Figura 14 - Gráfico da Tabela 1	38
Figura 15 - Regiões dos resultados da LPA2v	39

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Valores limites para os estados lógicos extremos	28
Tabela 1 - Simulação de valores obtidos pelos sensores	37

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Elétrica Alternada
CC	Corrente Elétrica Contínua
GB	Gigabyte
LP	Lógica Paraconsistente
LPA2v	Lógica Paraconsistente Anotada de 2 valores
MIT	Motor de Indução Trifásico
QUPC	Quadrado Unitário do Plano Cartesiano
RPM	Rotações por minuto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	15
2.1 Justificativa	15
3 MIT ASSÍNCRONO	17
3.1 Componentes	18
3.2 Princípios de funcionamento	19
3.3 O campo magnético girante	22
4 LÓGICA PARA CONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES	24
5 DESENVOLVIMENTO	31
5.1 Metodologia	32
5.2 Aplicação da LPA2v	34
6 DISCUSSÃO	37
7 CONCLUSÃO	42
8 REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE A - Código fonte da LPA2v para este trabalho	45

1 INTRODUÇÃO

O Universo, enquanto ente aglutinador de toda a matéria e elementos químicos, conhecidos ou não, se manifesta sempre na forma de Energia, que é definida, cientificamente, como: “potencial inato para executar trabalho ou realizar uma ação” (ELETRONUCLEAR, [s.d.]), ou seja, a energia é inerente à matéria.

Desde o surgimento do Universo há matéria. Havendo matéria há interação. Havendo interação há energia. Essa interação constante independe do conhecimento ou autorização humana, cabendo-a apenas, à primeira vista, suportar tal fenômeno entre as diferentes matérias: erupções solares, efeito das marés, movimento das placas tectônicas, estações do ano, atmosfera, ciclo da água, variações de temperatura ou o simples efeito do bater de asas de uma borboleta.

Mentes brilhantes tiveram a percepção para estudar essas interações e energias: Isaac Newton, Georg Simon Ohm, André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss, Gustav Robert Kirchhoff, James Clerk Maxwell, Michael Faraday, Marie Curie, Ernest Rutherford, Albert Einstein e tantos outros.

Cada um deles tratou as diferentes apresentações da energia de forma independente, porém extremamente especializadas. A especialização é fruto da divisão do trabalho (SMITH, 1996) em que cada parte realiza seu trabalho, aplica seu conhecimento e contribui para o todo: a evolução do conhecimento humano.

Maxwell gravou seu nome na história da humanidade com suas famosas equações. O brilhantismo de Maxwell está na compreensão e reunião de trabalhos de diversos - e tão brilhantes quanto - autores, em especial Faraday, Ampère e Gauss, que explicam a eletricidade e o magnetismo em separado. Tais equações agrupadas “conseguem explicar matematicamente fenômenos elétricos e magnéticos, que, anteriormente, não eram bem entendidos e explicados” (COMB, 1998 *apud* PASSOS; DE OLIVEIRA; GOMES, 2019).

A compreensão das equações de Maxwell permitiu uma rápida evolução do domínio dos fenômenos eletromagnéticos: telecomunicações, linhas de transmissão, transformadores e motores (PASSOS; DE OLIVEIRA; GOMES, 2019), pois tudo é a mesma coisa dentro do eletromagnetismo vistos de pontos diferentes.

Uma vez dominados os conceitos e a possibilidade de controle da energia eletromagnética, foi possível a conversão eletromecânica dessa energia. Isso

demonstra que independente da forma em que se apresenta é a mesma energia. A conversão está na maneira em que a sociedade aplica e utiliza tal energia

A variação de fluxo magnético induz a força eletromotriz (equiparada à diferença de potencial), campo magnético e corrente elétrica na Lei de Faraday (KHAN ACADEMY, [s.d.]). O sentido da corrente induzida se opõe ao fluxo magnético que a gera aplicando o princípio da conservação de energia na Força de Lenz (KHAN ACADEMY, [s.d.]a). A força criada pela corrente induzida de forma constante pela Lei de Lorentz (KHAN ACADEMY, [s.d.]b).

Tendo os três conceitos supracitados, compreendidos e controlados foi possível o desenvolvimento do motor de indução, máquina que recebe energia elétrica e a converte em energia mecânica (movimento) na saída.

O Motor de Indução Trifásico (MIT) superou o teste do tempo e se tornaram máquinas de confiança e importância no processo industrial. Há 20 milhões dessas máquinas elétricas no Brasil, estando presente em quase tudo ao redor: ventiladores, esteiras, escadas rolantes, elevadores (WEG, 2019) e tantos outros equipamentos de uso corriqueiro dentro da sociedade.

Fica claro que uma parada inesperada de um motor pode prejudicar toda a cadeia de produção de um parque industrial, fazendo-se necessário conhecer o momento de parar a operação do MIT, identificando a sobrecarga e se essa sobrecarga traz riscos à saúde da máquina elétrica.

O avanço tecnológico tornou possível tomar - ou ao menos auxiliar - a decisão se o MIT, mesmo em sobrecarga, ou seja, acima das condições nominais de operação, deve continuar funcionando. É nesse ponto que entra a lógica paraconsistente anotada de dois valores (LPA2v).

A lógica paraconsistente se difere da clássica por não ser binária. É possível que duas afirmações sejam verdadeiras e não excludentes simultaneamente. Tome-se como exemplo os temperos agri doces: amargos e doces ao mesmo tempo, ou seja, duas afirmações verdadeiras simultaneamente.

Na lógica clássica isso não seria possível, pois algo ou é amargo ou é doce, não podendo ser os dois. Na lógica paraconsistente pode ser os dois sabores, pois considera que ambos são verdadeiros. É assim nas relações humanas.

A LPA2v é aplicada de forma sucinta assim: tem-se uma proposição a ser respondida; duas afirmações validam a proposição; as duas afirmações são

verdadeiras e não excludentes. Graus de certeza e contradição são aplicados às afirmações.

DA SILVA FILHO (1999) criou, em sua tese de doutorado, um algoritmo para tratar situações em que a lógica clássica não produziria um bom resultado. Ao final do algoritmo, um estado da LPA2v é reportado na saída, quantificando as certezas e incertezas de cada afirmação para a proposição.

Neste trabalho, a LPA2v é usada para responder se o MIT deve continuar operando mesmo estando em sobrecarga (proposição) com a leitura de dados de sensores de velocidade do eixo e temperatura interna (afirmações verdadeiras e não excludentes). Uma sendo grau de certeza e outra sendo grau de contradição.

O trabalho é dividido em três partes: a primeira conceituando o MIT, a segunda introduzindo a LPA2v e a terceira (objetivo deste trabalho) aplicando a LPA2v para interpretar as características do motor e auxiliar na continuidade da operação em sobrecarga, ou seja, acima de valores nominais.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma aplicação que utiliza a lógica paraconsistente anotada de dois valores para indicar se, mesmo em sobrecarga, o motor de indução trifásico poderá continuar operando.

Em específico, avaliar se a velocidade do eixo e a temperatura interna do MIT são bons indicativos de sobrecarga e bons valores para a LPA2v.

2.1 Justificativa

O autor considera os seguintes fatos como relevantes e fundamentais no desenvolvimento desde a 1ª Revolução Industrial na Inglaterra no século XVIII até os dias atuais com uso em escala da informação:

- Relevante “maquinização” para as antigas manufaturas no séc. XVIII;
- Conceituação, por Adam Smith (1996), de que o trabalho pode e deve ser dividido em quantas partes forem necessárias e essa divisão gera uma especialização de cada etapa da produção;
- Controle dos fenômenos eletromagnéticos no séc. XIX;
- Invenção dos motores elétricos também no séc. XIX;
- Controles de produção desenvolvidos por Ford, Taylor e Toyota já no início do séc. XX;
- A eletrônica incorporada na indústria em meados do séc. XX;
- Eletrônica robusta, confiável e parte fundamental da produção;
- Informação disponível o tempo todo em qualquer lugar.

Essas considerações trazem a razão de existir deste trabalho: um próximo passo no monitoramento industrial, esse focado no motor de indução trifásico. Já explicado sua importância em qualquer atividade, independente do ramo, tamanho e processos, o MIT está presente.

Atualmente o monitoramento de MIT, em escala comercial, é focado na preemptividade (antecipação) e preditividade (previsão por informações anteriores), porém esse monitoramento é baseado no que é conhecido por *big data*. O *big data* é, na computação moderna, “dados com maior variedade que chegam em volumes crescentes e com velocidade cada vez maior” (ORACLE, [s.d.]).

Em linhas gerais, big data consiste em (Oracle, [s.d.]):

- Integrar: dados recebidos de diversas fontes em *terabytes* (1 mil GB) ou *petabytes* (1 milhão de GB);
- Gerenciar: armazenamento é a chave do *big data*. Dados constantes de diversas fontes precisam ser guardados;
- Analisar: a tomada de decisão baseada nos dados. Análises com IA e informações gerenciais

Há soluções comerciais que utilizam o *big data* como Tractian e WEG Motor Scan. Ambos se valem de sensores com tecnologia proprietária que colhem informações do equipamento, em especial motores trifásicos de indução, e armazenam tais dados em nuvem para análise. Com a modelagem desses dados é possível a identificação de “sintomas” de mau funcionamento das máquinas e previsão para manutenção.

A proposta neste trabalho difere nesse quesito: não faz análise baseado em conjunto de dados dos equipamentos para aplicação no parque fabril. Os dados coletados, em tempo real, são para análise no mesmo equipamento da coleta com resposta em tempo real também.

A presente metodologia aplica-se no tratamento das informações da própria máquina em análise. Pode-se utilizar inteligência artificial, atualmente encontrada em nuvem e com acesso facilitado pelas *big tech*? Sim, mas não é requisito, pois objetiva-se que o operador do motor de indução trifásico tenha acesso direto ao comportamento da máquina e seu estado de operação. A aplicação em nuvem ou ainda com inteligência artificial pode ser utilizada para controle do parque industrial como um todo, já em nível gerencial. A proposta deste trabalho é em nível operacional.

O fluxo de trabalho aplicado pela LPA2v aqui é para antecipação de danos imediatos no MIT com análise de dois valores específicos e normalizados como entrada e um resultado na saída e não análise de grandes volumes de dados - normalizados ou não - de diferentes fontes.

3 MIT ASSÍNCRONO

A utilização de motores elétricos faz parte do avanço tecnológico da sociedade, sendo o “coração das máquinas modernas” (WEG, [s.d.]). Essa afirmação possibilita aferir que a sociedade é dependente dos motores elétricos.

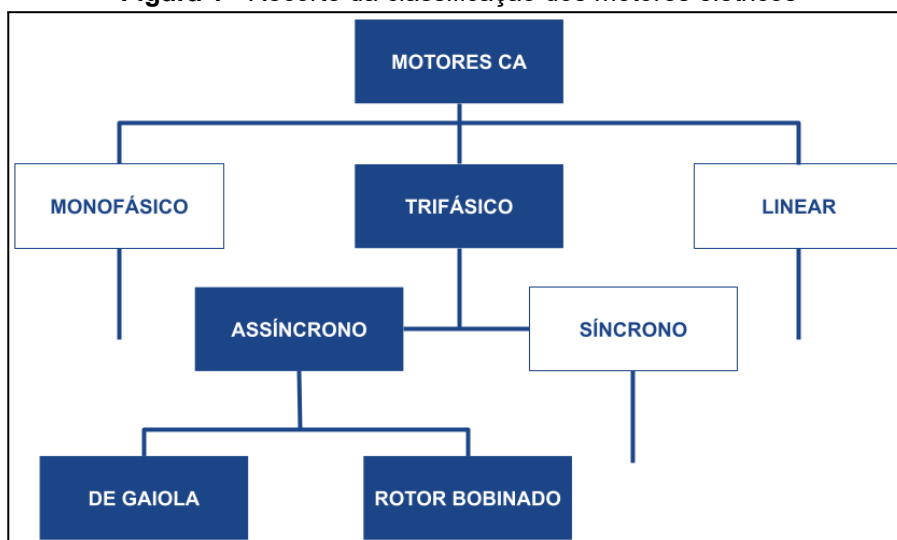
Segundo Fontes (2021), a indústria foi responsável por 36% do consumo de energia elétrica no Brasil de agosto de 2020 a agosto de 2021 o que representa 194,3 milhões de MWh do total consumido no país e, como introduzido, estão presentes em quase todo o processo industrial.

A divisão do trabalho proposto por Smith (1996) que cada atividade deve ser desenvolvida por um trabalhador especializado também se aplica à “maquinização” desses mesmos processos, tendo uma máquina ou conjunto de máquinas realizando alguma tarefa específica.

Tendo cada máquina desempenhando uma função específica dentro da indústria, pode-se imaginar a quantidade de motores presentes nas instalações e o que acontece quando há uma parada inesperada de algumas dessas máquinas, principalmente por sobrecarga durante a operação.

A larga utilização de motores elétricos se dá porque a energia elétrica “fácil de ser transmitida a longas distâncias e fácil de ser controlada” e “não requer ventilação constante nem combustível na forma que é exigida por um motor de combustão interna” (CHAPMAN, 2013).

Figura 1 - Recorte da classificação dos motores elétricos

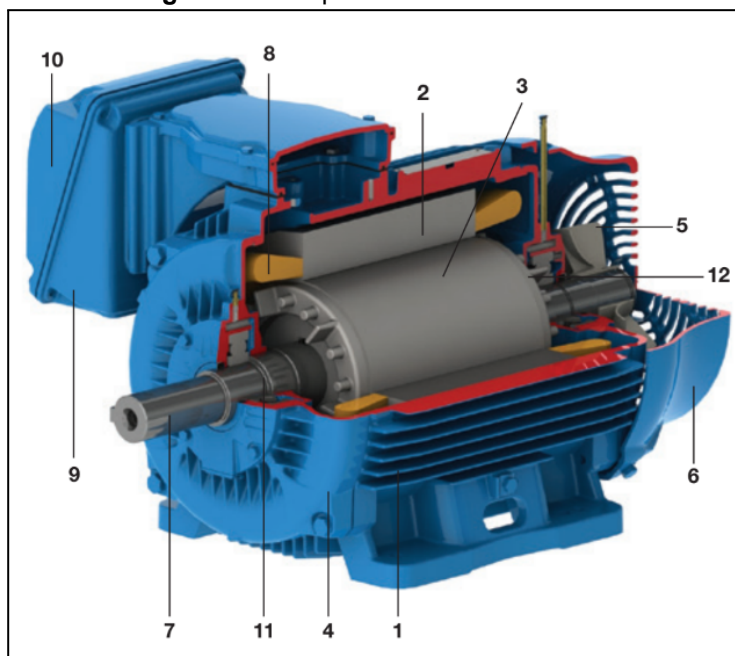


Fonte: WEG, [s.d.].

Os motores elétricos são de CC ou de CA. A Figura 1, adaptação de WEG ([s.d.]) mostra as categorias de motores elétricos CA. Este trabalho usa o MIT assíncrono do tipo gaiola, a ser explicado mais à frente.

3.1 Componentes

Figura 2 - Componentes do MIT



Fonte: WEG, [s.d.].

O MIT “é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor” e tem suas características apresentadas, junto com a Figura 2, por WEG ([s.d.]):

- Carcaça (1): parte externa do MIT em que agrupa e protege todos os componentes. É robusto e resistente às intempéries de clima
- Estator: onde é gerado o campo magnético girante
 - núcleo de chapas de ferro magnético (2)
 - enrolamentos trifásicos (8): três bobinas iguais (uma para cada fase da rede elétrica) presas ao núcleo de chapas
- Rotor: onde se tem a energia mecânica
 - eixo (7): transmissão da potência mecânica gerada
 - núcleo de chapas (3): mesmas características do núcleo do estator
 - barras e anéis de curto-circuito (12)
- Tampa (4)

- Ventilador (5)
- Tampa defletora (6)
- Caixa de ligação (9)
- Terminais (10)
- Rolamentos (11)

3.2 Princípios de funcionamento

O mundo ao redor é feito de grandezas mecânicas: velocidade, massa, espaço, tempo¹ - este ainda indefinido o que seja - e suas variações. As grandezas eletromagnéticas são a tensão, corrente elétrica, campo magnético e suas variações. Como citado na introdução, energias diferentes são manifestações do mesmo fenômeno observadas de forma diferentes, regida pela dualidade onda-partícula (HELERBROCK, [s.d.]).

O princípio de funcionamento do MIT é a conversão da energia eletromagnética em energia mecânica, ou seja, transformar uma energia que se manifesta em ondas em energia que se manifesta em movimento. Enquanto na mecânica tem-se torque e velocidade, na eletricidade tem-se, de forma análoga corrente e tensão. (DEL TORO, 1999).

Segundo Del Toro (1999), o enrolamento presente no estator (parte estacionária) quando alimentada por uma CA gera um campo magnético. Esse fluxo magnético estático passa pelo enrolamento do rotor (parte móvel) e faz um circuito fechado. O sentido do campo magnético segue a regra da mão direita de Flemming.

A corrente elétrica que produz esse campo magnético é variável no tempo, tal campo magnético também será (WEG, [s.d]). Já Del Toro (2019) manifesta que, assim como um ímã, as linhas de fluxo magnético deixam o estator se comporta como pólo norte e as linhas desse mesmo fluxo que entram no estator são comparáveis ao pólo sul.

Uma vez explicados os acontecimentos no estator, foca-se para o rotor. Como exemplifica Del Toro (1999), a bobina do rotor é constituído de dois - a e b - condutores (ou espiras), apesar de poder ter N condutores, em que a está ligado a b, dando “importância a densidade do fluxo magnético presente e não a sua fonte”.E

¹ Este autor tem a crença que o tempo talvez seja a manifestação conjunta e misturada de todas as energias que estudamos em separado.

como demonstra a Lei de Faraday-Lenz (Equação 1), uma tensão induzida equivale a densidade de fluxo magnético no tempo (CHAPMAN, 2013) e é dada por

$$\varepsilon = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

ε é a tensão induzida

$\frac{d\phi}{dt}$ é o diferencial da variação do fluxo magnético no tempo

N é a quantidade de condutores na bobina

Originalmente a Lei de Faraday-Lenz não continha o sinal negativo. Como explica Chapman (2013), o motivo da existência do sinal negativo na expressão foi após Lenz ter constatado que a medida que a tensão induzida aumenta e seus condutores forem colocados em curto-circuito, "então seria produzida uma corrente que causaria um fluxo oposto à variação original de fluxo", ou seja, há uma corrente induzida que provoca um campo magnético contrário ao fluxo externo para se anularem. Isso acontece pelo princípio da conservação de energia.

Um movimento relativo de um condutor também provoca o aparecimento de uma tensão induzida, como demonstra a Equação 2, visto que provoca variação do fluxo magnético no tempo outra equação para tensão induzida em condutores imersos em fluxo magnético é apresentada em Chapman (2013) abaixo

$$\varepsilon = l(v \times B) \quad (2)$$

v velocidade do condutor

B vetor densidade de fluxo magnético

l comprimento do condutor dentro do campo magnético

Caso o fluxo magnético que atravessa os condutores seja não variável no tempo e não tenha movimento relativo entre os condutores (espiras da bobina) e esse mesmo fluxo magnético, não há tensão induzida, o que não gera uma corrente induzida restando nenhuma força atuando nesses condutores e não tendo torque para fazer o movimento de rotação.

Os condutores do rotor do MIT estão em curto-circuito, portanto aparece uma corrente elétrica induzida. Chapman (2013) continua explicando que uma corrente que circula em um condutor na presença de um fluxo magnético externo há uma força com sentido dado pela regra da mão direita atuando nesse condutor:

$$F = i(l \times B) = ilB \quad (3)$$

i valor da corrente no fio condutor

l comprimento do fio, com o sentido de l definido como igual ao sentido da corrente

B vetor densidade de fluxo magnético

Havendo força (Equação 3) atuando nesses condutores se apresenta a possibilidade de haver torque (força que provoca movimento de rotação) na Equação 4 (CHAPAM, 2013).

$$\tau = F \times r = Fr \sin\theta \quad (4)$$

τ torque

F força aplicada

r distância perpendicular

θ ângulo entre F e r

Chapman (2013) continua a demonstração matemática do torque e relaciona o torque com o fluxo magnético do estator com o fluxo magnético no rotor (gerado pela corrente induzida) junto uma constante de construção da máquina como é mostrado na Equação 5.

$$\tau = k B_e \times B_r = k B_e B_r \sin\theta \quad (5)$$

τ torque

k fator que depende da construção da máquina

B_e campo magnético no estator

B_r campo magnético no rotor

θ ângulo entre B_e e B_r

Por várias equações matemáticas e Leis do eletromagnetismo Chapman (2013) e Del Toro (1999) demonstram os princípios de funcionamento das máquinas elétricas de indução em geral. Essas equações são importantes, principalmente a Equação 4 e Equação 5 pois relacionam a intensidade de corrente elétrica demandada pelo MIT em função do torque exigido.

Nesse cenário restam explicados os fenômenos físicos que contribuíram para o surgimento do motor de indução trifásico e demonstrado que o torque na máquina é derivado do movimento relativo entre o campo magnético original (estator) e a corrente elétrica induzida (rotor).

Se o objetivo do MIT é converter energia elétrica em energia mecânica, não faz nenhum sentido exercer uma força mecânica externa para girar o rotor e assim ter esse movimento relativo. Então se faz necessário fazer o campo magnético girar, fazendo com que o fluxo desse campo varie no tempo em relação ao rotor. Esse é o conceito do campo magnético girante no MIT.

3.3 O campo magnético girante

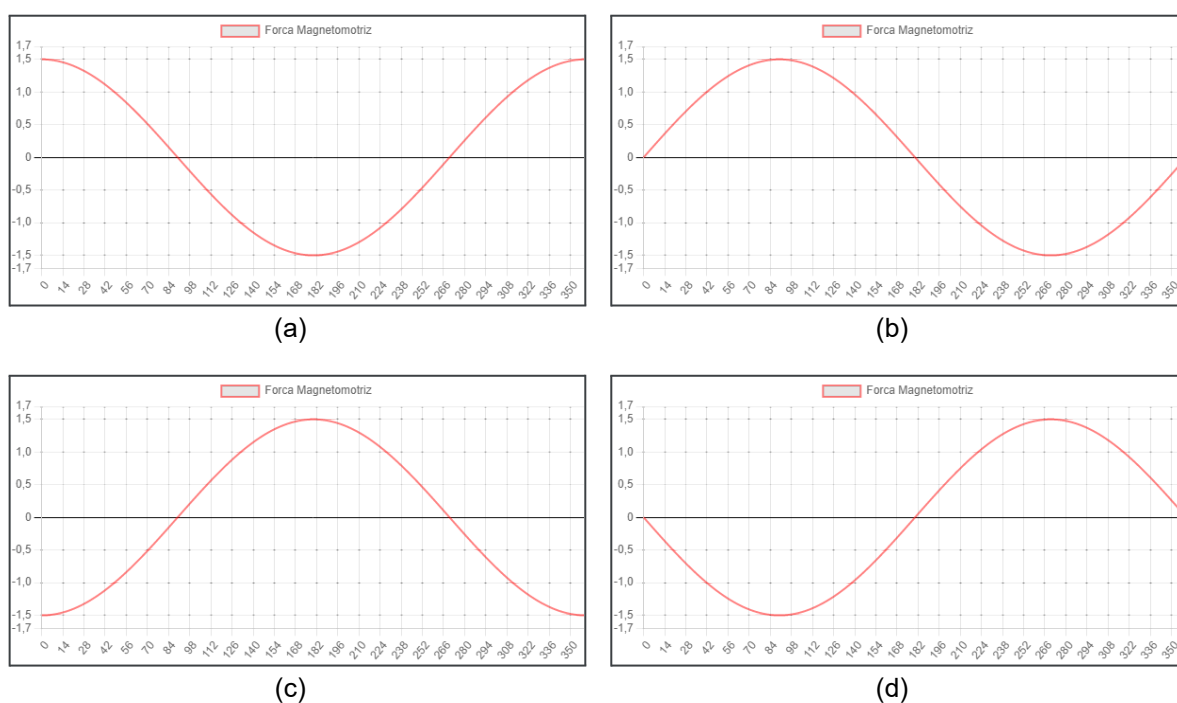
Enquanto campos magnéticos em condutores se comportam como ímãs, com pólos norte e sul, quando há dois campos magnéticos eles tentam se alinhar para que as linhas de campo saem do pólo norte e entram no pólo sul. Essa tentativa de alinhamento provoca um movimento mecânico de rotação no rotor.

A necessidade de manter o movimento constante é necessário que a intensidade do campo magnético gerado no estator seja constante em relação ao rotor, porém com movimento relativo a este. Esse campo é “produzido por contribuições de enrolamentos de fase deslocados no espaço conduzindo correntes deslocadas no tempo” (DEL TORO, 1999).

O deslocamento no espaço dos enrolamentos no estator se dá pela alocação das bobinas distantes 120° entre si, a mesma defasagem, no tempo, das correntes trifásicas.

A sequência de imagens - todas do próprio autor - a seguir mostra o campo magnético girante no deslocamento de espaço a que Del Toro (1999) se refere. Observe que a intensidade do campo magnético gerado pela corrente $i(t)$ se mantém constante no espaço. Intensidade X Ângulo de deslocamento no rotor.

Figura 3 - Campo magnético girante se mantém constante



. Fontes: Autor.

Uma demonstração que o campo magnético girante se torna constante em módulo e variável no espaço fica simples compreender a afirmação de Chapman (2013) de que dois campos magnéticos sempre tentarão se alinhar e para isso surge essa força de movimento rotatório, o torque.

Como o estator produz o campo magnético girante, o campo magnético no rotor sempre tentará se alinhar com ele. Derivado disso surgem termos como velocidade síncrona, assíncrona, escorregamento e a curva característica de torque x velocidade.

4 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE DOIS VALORES

É de conhecimento desde o ensino primário que os gregos foram os pais do pensamento lógico e tal lógica, chamada de clássica, evoluiu para a ideia binária e excludentes: verdadeiro e falso, 0 e 1, preto e branco, positivo e negativo. Mas o mundo não é totalmente binário.

“Na descrição do mundo real é comum o aparecimento de inconsistências e ambigüidades” de modo que a Lógica Clássica não pode ser aplicada totalmente no mundo real (DA SILVA FILHO, 1999). Pela impossibilidade de tratar afirmações verdadeiras e não excludentes se faz necessário novas abordagens.

Essas novas abordagens receberam o nome de Lógica Não-Clássica e “investigam entre outras coisas as regiões excluídas da Lógica Clássica, que são, por exemplo, os valores existentes que diferem do ‘Verdadeiro’ e do ‘Falso’” (DA SILVA FILHO, 1999) e podem ser aplicadas tanto em nível de *software* quanto a nível de *hardware*, mas com necessidade de “adequação para aplicações diretas e melhoradas”, assim como a Lógica Clássica.

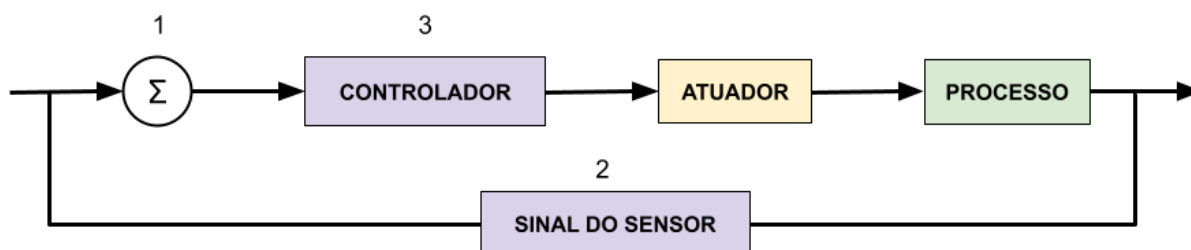
Adaptando os exemplos presentes em DA SILVA FILHO (1999) para demonstrar a situação que motivou este trabalho, tem-se um MIT que tem condições nominais de operação (discutidas mais à frente) e essas são mantidas por determinado período de tempo. Em certos momentos esse MIT se encontra em sobrecarga - operando acima dos valores nominais - e pela Lógica Clássica, qualquer (conjunto de) sobrecarga desligaria o MIT.

Seguindo o exemplo, há condições em que a sobrecarga é temporária ou não tão significativa para a interrupção do funcionamento do MIT. Há também possíveis falhas nas leituras dos instrumentos de medição Como avaliar isso? Quais situações há essa possibilidade? Quais informações qualitativas e quantitativas têm-se disponíveis? Essas perguntas são incertezas pertencentes ao sistema de decisão que se, tomada pela Lógica Clássica, prevê-se o “liga-desliga”. Essa decisão deverá ser tomada de forma (semi) autônoma no processo industrial.

Como colocado por De Carvalho Junior (2018), o emprego das Lógicas Paraconsistentes (LP) dentro dos processos industriais se dá “na comparação de diferentes fontes de informação (1), no tratamento de incertezas e ruídos de sinais (2) ou como parte do processo decisório (3) de uma malha de controle”

demonstrados na Figura 4 adaptada (DE CARVALHO JUNIOR, 2018 *apud* ANG; CHONG; LI, 2005). A LPA2v neste trabalho irá atuar no item no controlador.

Figura 4 - Automação de processo



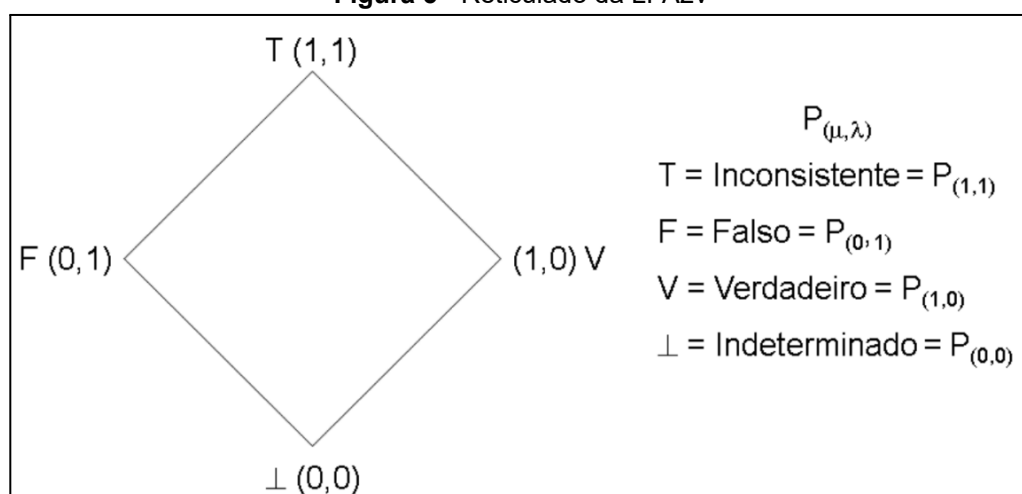
Fonte: DE CARVALHO JUNIOR (2018) *apud* ANG; CHONG; LI (2005).

De Carvalho Junior (2018) resume o conceito da LPA2v aplicada a uma proposição P : P pode ser confirmada pelos graus de evidências favoráveis e desfavoráveis. Como no exemplo dado com MIT em sobrecarga, há evidências favoráveis à continuidade da operação bem como evidências desfavoráveis.

A LPA2v neste trabalho irá atuar no item 3 da Figura 4

Tendo-se a proposição P e dois tipos de evidências (μ para favoráveis e λ para desfavoráveis) então pode-se escrever $P(\mu, \lambda)$ e utilizando o diagrama de Hasse obtém-se o reticulado² da LPA2v na Figura 5 (DE CARVALHO JUNIOR, 2018 *apud* DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES, 2008).

Figura 5 - Reticulado da LPA2v



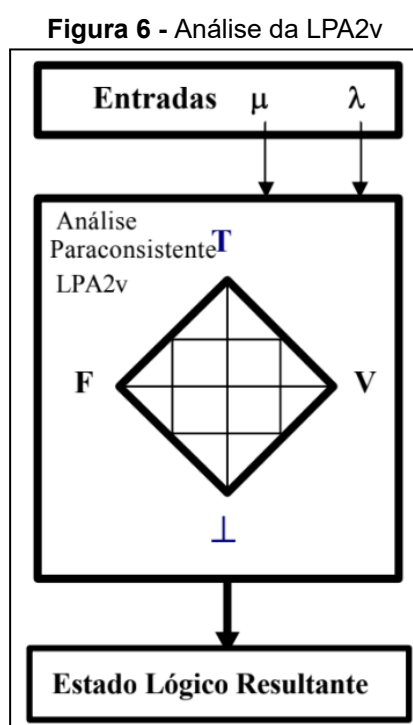
Fonte: DE CARVALHO JUNIOR (2018) *apud* DA SILVA FILHO; ABE; LAMBERT-TORRES (2008).

² Reticulado é uma estrutura matemática em que se tem um conjunto finito de pontos inter-relacionados

É possível observar os estados extremos da LPA2v com destaque para dois resultados possíveis além da Lógica Clássica: inconsistente - $P(1,1)$ - e indeterminado - $P(0,0)$. Como explicado por De Carvalho Junior (2018), esses quatro estados indicam:

- $P(1,0)$: há somente evidência favorável, então P é verdadeira
- $P(0,1)$: há somente evidência desfavorável, então P é falsa
- $P(1,1)$: as duas evidências estão presentes, então P é inconsistente
- $P(0,0)$: nenhuma das evidências presentes, então P é indeterminado

Mario (2006) resume bem o significado do reticulado, sendo a proposição $P(\mu, \lambda)$ interpretada como “creio na proposição p com grau de crença ou de evidência até μ ”³ e continua: o reticulado pode ter quantas partições internas forem necessárias “de acordo com a aplicação”. O tratamento lógico para a LPA2v pode ser visto na Figura 6 em Mario (2006):



Fonte: MARIO (2006).

Adaptando mais uma vez Da Silva Filho (1999), volta-se ao exemplo de como a LPA2v auxilia na tomada de decisão de continuar ou não o funcionamento do MIT

³ no original consta a letra x , porém para adequação à nomenclatura adotada foi utilizado a letra μ

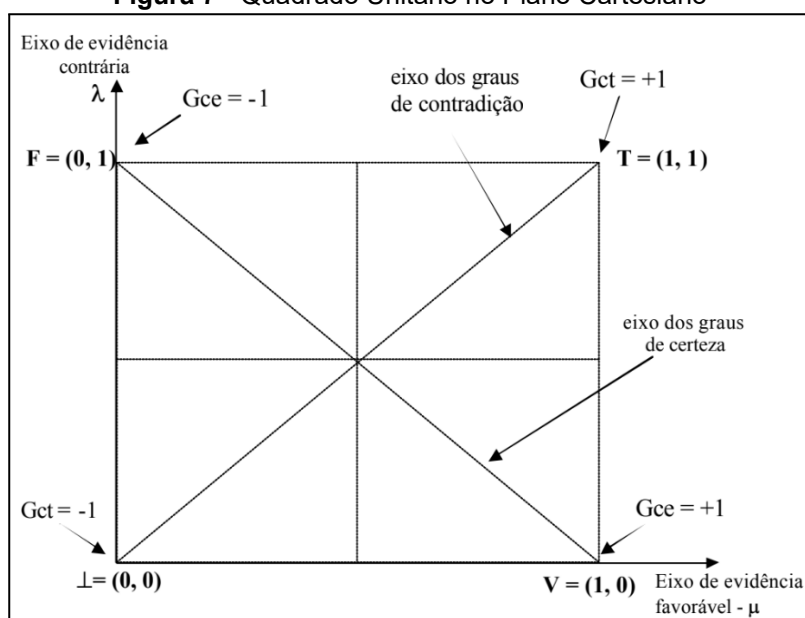
com auxílio de sensores para ler se as condições de operação estão dentro da nominal.

- $P(1,0)$: o motor continua operando (dentro da nominal)
- $P(0,1)$: o motor pára imediatamente (fora da nominal)
- $P(1,1)$: atenção ao motor (um indica dentro e outro fora da nominal)
- $P(0,0)$: nenhuma afirmação pode ser feita (erro ou falta de sinal dos sensores)

Após extensas considerações e demonstrações Da Silva Filho (1999) chegou em valores intermediários da reticulado da LPA2v de modo a ter os seguintes estados:

- Verdadeiro
- Quase Verdadeiro a crença
- Verdadeiro tendendo ao Inconsistente
- Inconsistente
- Quase Inconsistente
- Falso tendendo ao Inconsistente
- Falso
- Quase Falso
- Falso tendendo ao Indefinido
- Indefinido
- Quase Indefinido
- Verdadeiro tendendo ao Indefinido

O Quadrado Unitário no Plano Cartesiano é uma forma de representar o reticulado da LPA2v e introduz o conceito “de grau de certeza (Gce) e grau de contradição (Gct) para a conveniente manipulação das evidências” como mostra a Figura 7 (MARIO, 2006).

Figura 7 - Quadrado Unitário no Plano Cartesiano

Fonte: MARIO (2006).

Faz-se necessário uma delimitação das evidência de certeza e contradição para que a avaliação paraconsistente seja eficiente (XANTHOPULO, 2012 *apud* DA SILVA FILHO e ABE, 2000). Chamados de valores de controle, subdividem o QUPC em 12 regiões com valores intermediários. Nesta parte do conhecimento, os termos “incerteza” e “contradição” são semelhantes na aplicação, sendo a adoção de escolha dos autores aqui citados.

A respectiva nomenclatura e definição encontram-se abaixo como no Quadro 1 (XANTHOPULO, 2012 *apud* DA SILVA FILHO e ABE, 2000). Neste trabalho tais valores de controle serão $-\frac{1}{2}$ e $+\frac{1}{2}$.

Quadro 1 - Valores limites para os estados lógicos extremos

Nome	Abreviação	Descrição
Valor Limite de Verdade	V_v	Se o grau de certeza for maior que este valor, então o resultado é Verdadeiro
Valor Limite de Falso	V_f	Se o grau de certeza for menor que este valor, então o resultado é Falso
Valor Limite de Inconsistência	V_T	Se o grau de contradição for maior que este valor, então o resultado é Inconsistente
Valor Limite de Indeterminação	$V_{\perp}$	Se o grau de contradição for menor que este valor, então o resultado é Indeterminado

Fonte: XANTHOPULO (2012) *apud* DA SILVA FILHO e ABE (2000).

Essa conceituação da LPA2v, ainda que muito superficial, já permite a compreensão do algoritmo para-analisador de Da Silva Filho (1999) apresentado a seguir. Note-se que μ e λ estão normalizados, sendo $0 \leq \mu \leq 1$ e $0 \leq \lambda \leq 1$. O fluxograma do algoritmo abaixo é visto na Figura 8.

/* INÍCIO */

/* Definições do valores */

$L_V = +\frac{1}{2}$ /* Definição do valor superior de controle de certeza - verdadeiro */

$L_F = -\frac{1}{2}$ /* Definição do valor inferior de controle de certeza - falso */

$L_T = +\frac{1}{2}$ /* Definição do valor superior de controle de incerteza - inconsistente*/

$L_{\perp} = -\frac{1}{2}$ /* Definição do valor inferior de controle de incerteza - indeterminado*/

/* Variáveis de entrada */

μ /* evidência favorável à proposição */

λ /* evidência desfavorável à proposição */

/* Variáveis de saída */

resultado /* Resultado da LPA2v*/

sgc /* Saída com grau de certeza */

sgi /* Saída com grau de incerteza */

/* Calcular os graus de certeza e incerteza */

$gc = \mu - \lambda$ /* grau de certeza da proposição */

$gi = \mu + \lambda - 1$ /* grau de incerteza da proposição */

/* Determinação dos estados extremos */

Se $gc \geq L_V$ então resultado = V /* Proposição é verdadeira */

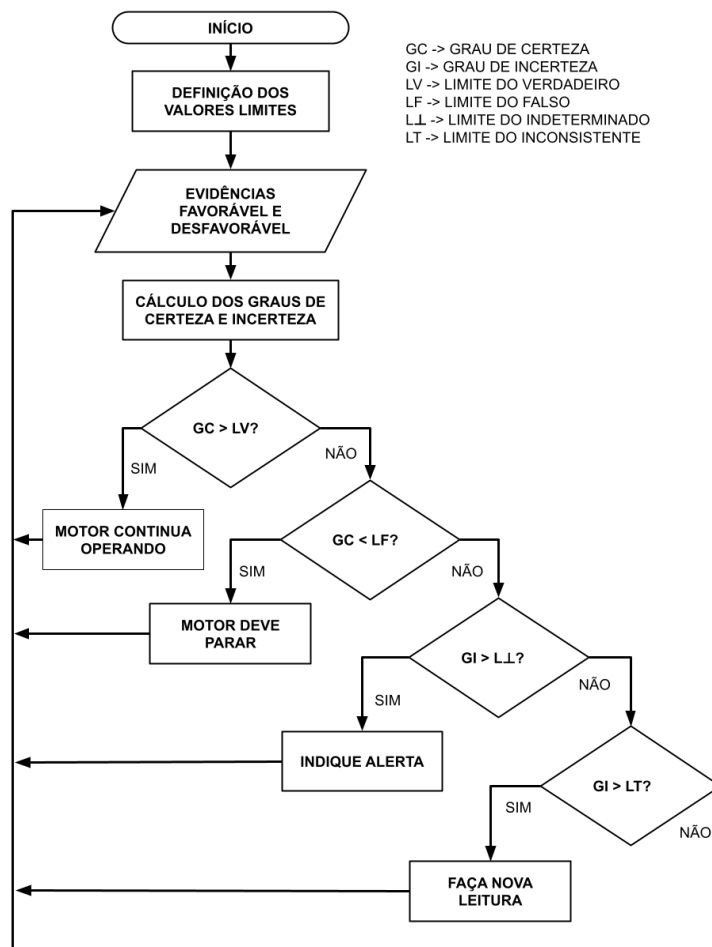
Se $gc \leq L_F$ então resultado = F /* Proposição é falsa */

Se $gi \geq L_T$ então resultado = T /* Proposição é inconsistente */

Se $gi \leq L_{\perp}$ então resultado = $\perp$ /* Proposição é indeterminada */

/* FIM */

Figura 8 - Fluxograma do algoritmo da LPA2v



Fonte: Autor.

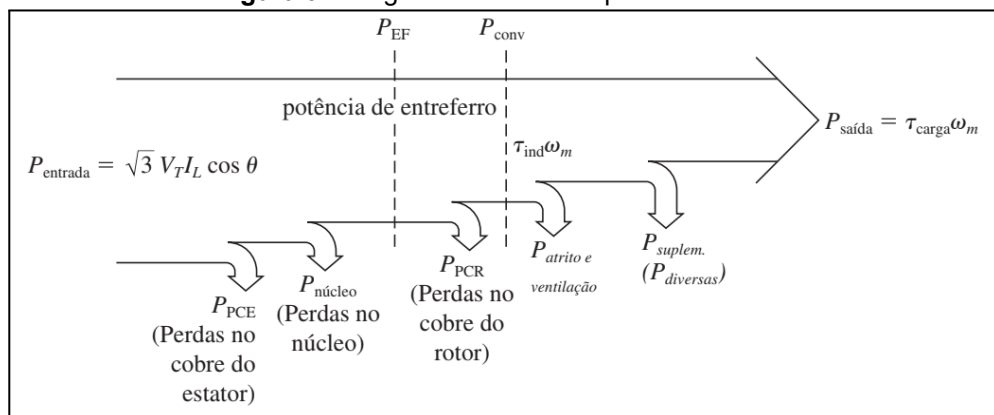
Não serão utilizados resultados intermediários por razões práticas de tratamento dessas saídas.

5 DESENVOLVIMENTO

A lógica paraconsistente anotada de dois valores precisa de uma proposição a ser respondida. Foi definida a seguinte proposição: "a operação do motor de indução trifásico deve continuar". A proposição é a chave do trabalho, pois toda a construção do algoritmo computacional se baseia em respondê-la.

Dois fatores são importantes para a continuidade de operação do MIT: temperatura e velocidade. A Figura 9 mostra o diagrama de fluxo de potência do MIT, tendo a potência elétrica como entrada e a potência mecânica como saída (CHAPMAN, 2013).

Figura 9 - Diagrama do fluxo de potência no MIT



Fonte: CHAPMAN (2013).

Após a potência convertida (P_{conv}) e as perdas mecânicas por atrito, ventilação e suplementares, o torque magnético induzido (Equação 5) é convertido no torque mecânico na carga. Tal torque é inverso a velocidade angular do rotor (ω_m).

Essa proporcionalidade inversa do torque na carga com a velocidade angular do rotor, tem-se que quanto maior exigência mecânica se faz ao MIT, menor sua velocidade de rotação no eixo. Aqui fica justificada a velocidade tomada como uma das entradas para a LPA2v.

O aumento de carga produz um aumento no assincronismo entre o campo magnético girante no estator e o campo magnético induzido no rotor. Esse assincronismo produz uma corrente elétrica maior no rotor (CHAPMAN, 2013). O aumento da corrente nos condutores provoca o efeito Joule. Ver Equação 6 abaixo (HELERBROCK, [s.d.])

$$Q = I^2 R t \quad (6)$$

Q quantidade de calor

I^2 corrente elétrica

R resistência elétrica

t tempo de exposição do condutor a I

Como explicado em WEG ([s.d.]), a vida útil do MIT “depende quase que exclusivamente da vida útil da isolação dos enrolamentos”, tendo a “temperatura suportada pelos materiais isolantes empregados” como “mais importante”. “O aumento de 08 a 10 graus acima da classe de isolação” provoca desgaste gradual da isolação dos enrolamentos, o que causa uma redução de metade da vida útil dos enrolamentos ao longo do tempo, continua WEG ([s.d.]).

Exposto isso, a temperatura é o segundo valor de entrada para a LPA2v apresentada neste trabalho.

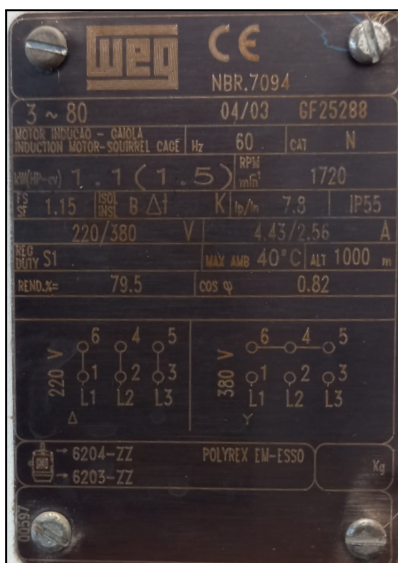
Para este trabalho poderiam ser escolhidas quaisquer outras grandezas do MIT como, por exemplo, o torque mecânico em seu eixo ou a potência elétrica em sua entrada. Poderia-se utilizar a medição da corrente elétrica diretamente em conjunto com a queda de tensão ou aumento da potência (re)ativa consumida.

Decidiu-se essas duas grandezas por serem de fácil compreensão do comportamento do motor de indução trifásico e a medição de tais grandezas é de relativa facilidade, permitindo replicação do método aqui proposto

5.1 Metodologia

Uma vez apresentadas as evidências para a LPA2v responder a proposição de continuidade do motor de indução trifásico, tratar-se-á da aplicação da lógica em si. Como explicado anteriormente, a temperatura é o fator mais importante para a operação do MIT por isso será a evidência de crença, enquanto a velocidade angular é a evidência de descrença para a LPA2v.

Figura 10 - Placa de dados do MIT utilizado neste trabalho



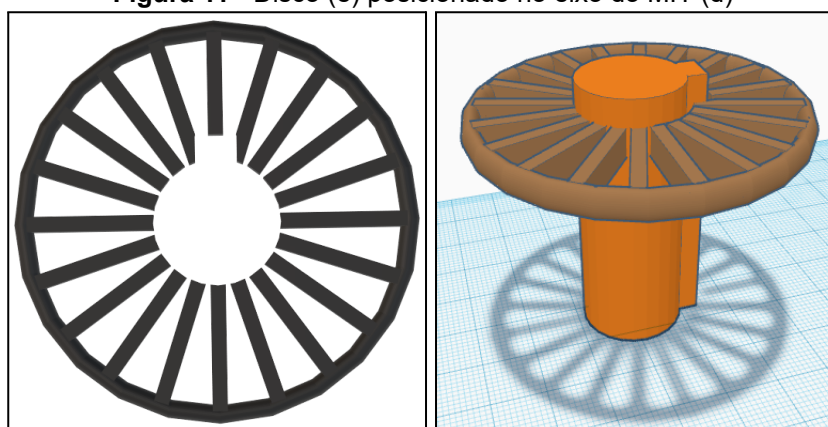
Fonte: Autor.

O MIT escolhido tem as seguintes características fundamentais para este trabalho: NBR 7094, classe de isolamento B, 1.720 rpm de velocidade nominal. Ver Figura 10.

A temperatura interna do MIT é medida com o uso do circuito integrado (CI) MAX 31865, um detector de temperatura com resistência (RTD, em inglês). Este CI conversor digital faz a leitura analógica da temperatura e converte o valor da resistência para um sinal digital com resolução de 15 bits. A saída do MAX 31865 é conectada à entrada digital do Arduino.

A velocidade angular é medida com uso de um disco com espaços equidistantes entre si (Figura 11) em um circuito eletrônico contador. A cada passagem de um espaço, um pulso lógico de nível alto é emitido, assim é possível calcular a velocidade angular do eixo do MIT, o que permite a percepção de variação de carga. A velocidade é a evidência de descrença.

Figura 11 - Disco (e) posicionado no eixo do MIT (d)



Fonte: Autor.

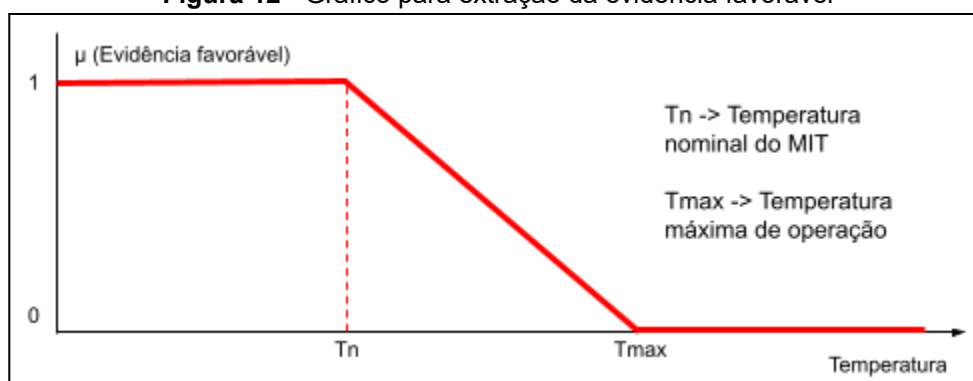
Apesar de serem grandezas contínuas (analógicas), uma vez convertidas, pela eletrônica, em sinais discretos (digitais), o uso como evidências se torna possível (DA SILVA FILHO, 1999).

O tratamento lógico é utilizado o *hardware* de código aberto Arduino UNO e o *software* (código) é escrito em IDE (*integrated development environment*) disponibilizado pelo fabricante do Arduino.

5.2 Aplicação da LPA2v

O funcionamento da LPA2v implica em extrair e normalizar as evidências favorável (μ) e desfavorável (λ) e para tal usa-se as retas nas Figura 12 e Figura 13. Nota-se que as equações para extração das evidências são aplicáveis para quaisquer MIT.

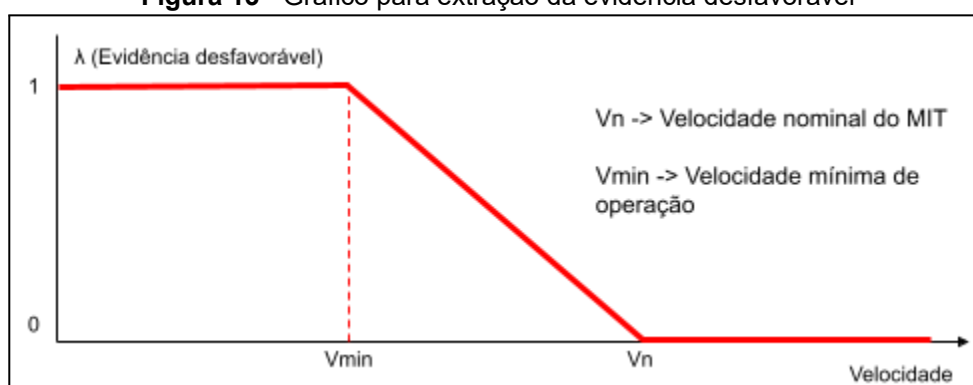
Figura 12 - Gráfico para extração da evidência favorável



Fonte: Autor.

Já explicado acima, a evidência favorável indica que o MIT pode continuar operando normalmente. Até atingir a temperatura nominal, a evidência favorável tem valor igual a 1. Entre a temperatura nominal e a máxima permitida pelo fabricante ou definida com base em outras informações da operação com MIT, esse valor varia de um até zero. Acima da temperatura máxima (provavelmente com carga), a evidência tem valor igual a zero, o que significa que o motor não pode continuar operando.

Figura 13 - Gráfico para extração da evidência desfavorável



Fonte: Autor.

Para melhor compreensão da evidência desfavorável, a analogia da porta lógica não é útil. A evidência desfavorável nega que o MIT deva continuar em operação. Quando o MIT está com velocidade abaixo da mínima definida, a evidência desfavorável recebe valor igual a um, indicando que MIT deve parar. Entre a velocidade mínima e a nominal, a evidência varia de um até zero. Igual ou acima da velocidade nominal (provavelmente a vazio) a evidência é igual a zero, indicando que o MIT pode continuar operando.

As Equação 6 e Equação 7 são do tipo $y = ax+b$ e representam como obter os valores das evidências em função da temperatura para a favorável e em função da velocidade para a desfavorável vistas nos gráficos acima. Preferiu-se não simplificar as equações para a exposição dos termos a e b individualmente.

$$\mu = \frac{-1}{T_{m\acute{a}xima} - T_{nominal}} \cdot temperatura + \frac{T_{m\acute{a}xima}}{T_{m\acute{a}xima} - T_{nominal}} \quad (6)$$

μ é a evidência favorável

temperatura é a temperatura atual do MIT

$T_{m\acute{a}xima}$ é a temperatura máxima para operação do MIT

$T_{nominal}$ é a temperatura nominal do MIT

$$\lambda = \frac{-1}{V_{nominal} - V_{mínima}} \cdot velocidade + \frac{V_{nominal}}{V_{nominal} - V_{mínima}} \quad (7)$$

λ é a evidência desfavorável

$velocidade$ é a velocidade atual do MIT

$V_{nominal}$ é a velocidade nominal do MIT

$V_{mínima}$ é a velocidade mínima nominal do MIT

Sendo as evidências extraídas pelas equações acima, o cálculo dos graus de certeza (as informações recebidas são claras) e incerteza (as informações estão ambíguas) conforme o algoritmo da LPA2v é rapidamente resolvido.

Calculados os graus de certeza e incerteza, seus valores são usados como entrada no algoritmo da LPA2v para encontrar a resposta para a pergunta: o MIT deve continuar em operação?

6 DISCUSSÃO

Sendo a LPA2v uma metodologia matemática que normaliza quaisquer valores, neste trabalho a temperatura e a velocidade do MIT, é possível aplicá-las em qualquer dispositivo que tenha unidade lógica como microprocessadores e microcontroladores.

Uma vez estando com as equações das evidências, a aplicação é puramente computacional e o tratamento das informações de saída da LPA2v podem ser utilizadas da maneira que convém, como exemplo tem-se a abertura do circuito de alimentação do MIT, a transmissão para centro de operações, diminuição da carga aplicada no MIT. Com a informação de saída da LPA2v as possibilidades são tantas quanto o tratamento de um sinal elétrico.

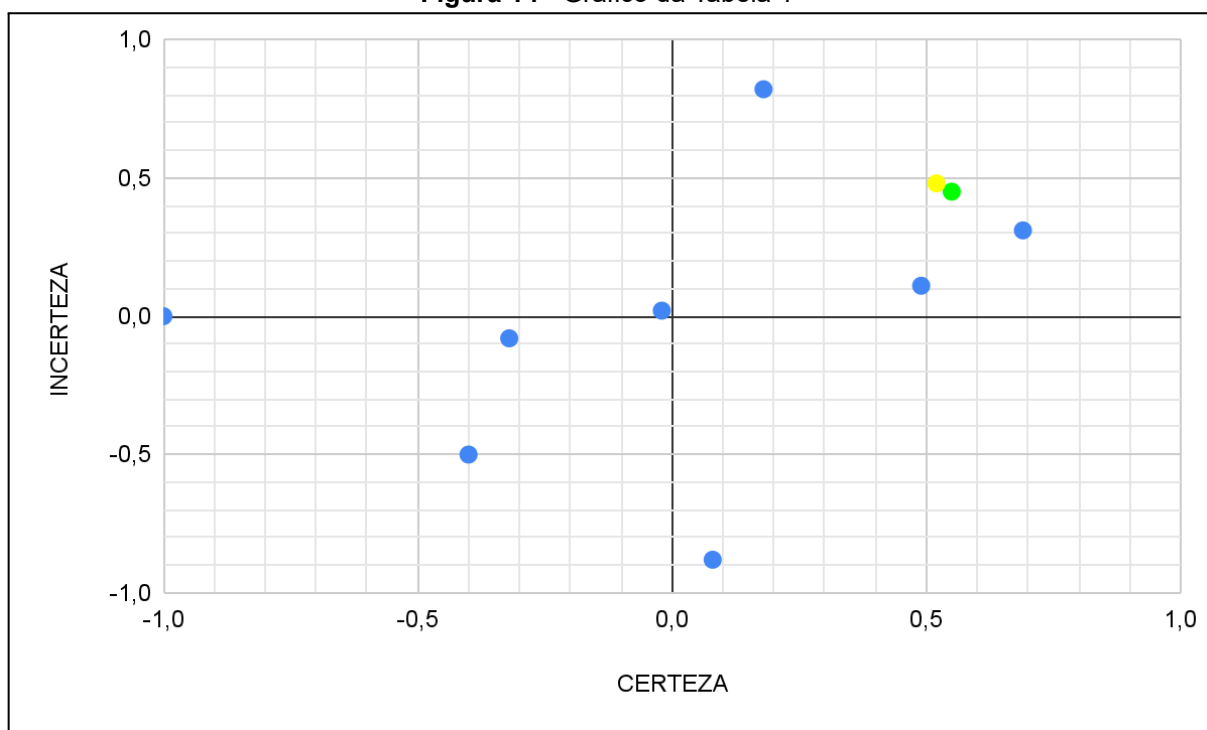
A Tabela 1 mostra valores inseridos em planilha eletrônica e as evidências e graus de certeza e incerteza calculados pelas equações acima. Os valores dos graus de certeza e incerteza são dispostos no gráfico da Figura 14.

Tabela 1 - Simulação de valores obtidos pelos sensores

TEMPERATURA NOMINAL (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	VELOCIDADE NOMINAL (rpm)		VELOCIDADE MÍNIMA (rpm)	
80	100	1720		1620	
VALORES OBTIDOS PELOS SENSORES		EVIDÊNCIAS EXTRAÍDAS PELAS EQUAÇÕES		GRAUS DA LPA2v	
TEMPERATURA (° C)	VELOCIDADE (rpm)	FAVORÁVEL (μ)	DESFAVORÁVEL (λ)	CERTEZA	INCERTEZA
105	1600	0	1	-1	0
75	1689	1	0,31	0,69	0,31
94	1658	0,3	0,62	-0,32	-0,08
84	1689	0,8	0,31	0,49	0,11
78	1638	1	0,82	0,18	0,82
76	1675	1	0,45	0,55	0,45
98	1718	0,1	0,02	0,08	-0,88
79	1672	1	0,48	0,52	0,48
90	1668	0,5	0,52	-0,02	0,02
99	1675	0,05	0,45	-0,4	-0,5

Fonte: Autor.

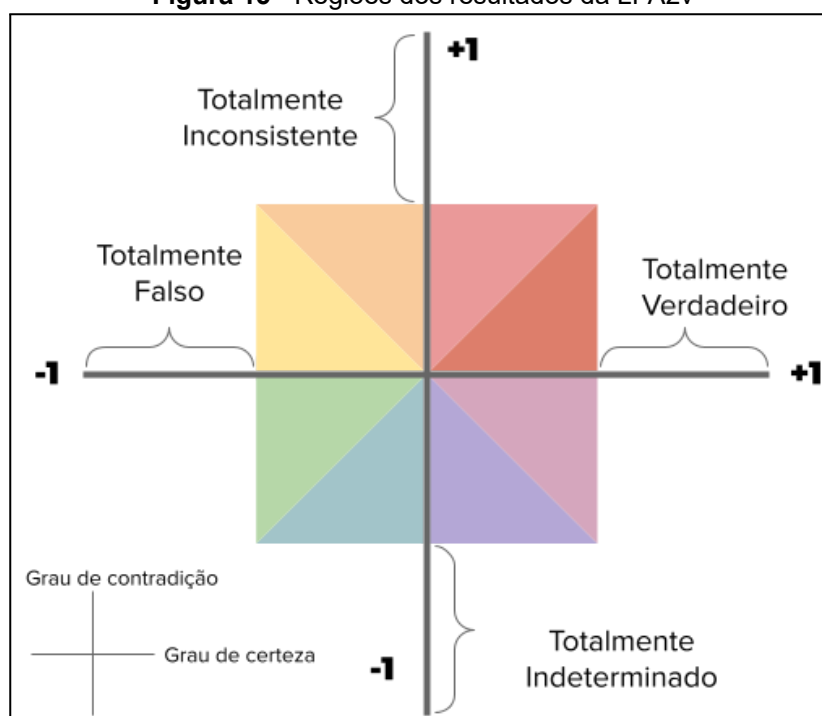
Figura 14 - Gráfico da Tabela 1



Fonte: Autor

Os pontos dentro da região totalmente verdadeira indicam, para a aplicação neste trabalho, que o MIT pode continuar sua operação normalmente. Nota-se que os pontos amarelo e verde estão em região fronteira entre o verdadeiro e o inconsistente, sendo o verde mais verdadeiro que o amarelo.

A Figura 15 a seguir mostra as regiões dos resultados da LPA2v. Os recortes coloridos indicam os resultados intermediários, com tendências. Exemplo: inconsistente tendendo ao verdadeiro ou ainda falso tendendo ao indeterminado. A construção da LPA2v porém, não permite resultados ambíguos como falso tendendo ao verdadeiro ou inconsistente tendendo ao indeterminado. Estes resultados excludentes entre si refletem o mundo real

Figura 15 - Regiões dos resultados da LPA2v

Fonte: Autor.

A simulação dos valores acima é para mostrar que a obtenção dos valores operacionais de temperatura e velocidade para aplicação da LPA2v pode vir de qualquer fonte, servindo inclusive para estudos de quantificação de valores limites para determinadas operações que hora exijam mais torque e consequente redução de velocidade e aumento da corrente elétrica que circula em seus enrolamentos.

Em verdade, a dificuldade em realizar sobrecarga no MIT de forma controlada foi o desafio deste trabalho. Desafio que não pode ser superado. Após diversas tentativas de aplicar esta sobrecarga, decidiu-se que, como as Equação 6 e Equação 7 permitem extrair as evidências de diversos MIT com características diferentes, as condições normais de operação do motor são, para a LPA2v, colocadas como sobrecarga.

A LPA2v neste trabalho não se aplica somente às condições de sobrecarga (acima dos valores nominais). Pode-se definir, ao bem da operação, valores limites abaixo dos de dado de placa para preservação do motor, bastando para tanto ajustar os valores da Equação 6 e da Equação 7. Desse modo espera-se um controle mais refinado e seguro da operação do MIT.

Espera-se que o MIT utilizado para testes tenha rotação de 1.720 rpm com corrente nominal de 2,56 A por fase, como mostram os dados de placa da Figura 10.

Estes valores são em plena carga. Com o motor operando a vazio, tem-se 1.800 rpm e corrente de 1,5 A por fase e temperatura por volta dos 50 °C.

Ao desconectar uma das fases da rede de alimentação, a corrente por fase se aproximou da corrente nominal a plena carga e a temperatura interna dos enrolamentos se estabilizou por volta dos 54 °C enquanto a rotação se manteve em 1.800 rpm.

Estes valores foram utilizados para que o programa desenvolvido neste trabalho de aplicação da LPA2v "entendesse" que o MIT estava em sobrecarga. Tal artifício não prejudica quaisquer resultados pois a extração das evidências podem ser para quaisquer características.

Uma vez conhecidas as equações de extração com os valores supracitados se permitiu realizar testes de forma controlada e a LPA2v operou como todo o exposto neste trabalho, ou seja, operou como o esperado.

Também foram identificadas diversas situações que podem comprometer a correta aplicação da LPA2v, como localização do sensor de temperatura, confiabilidade do dispositivo eletrônico para cálculo da velocidade, fatores externos que dificultam a interpretação lógica do sistema.

A localização do sensor de temperatura neste trabalho está localizado dentro do enrolamento de uma das fases e descobriu-se que, em caso, de falta de corrente nesta fase, a temperatura interna do MIT aumenta de fato, porém a leitura do sensor fica prejudicada, haja visto que não há corrente circulando neste enrolamento.

Uma solução para isto é colocar sensores em cada enrolamento e, externamente à LPA2v, decidir que o maior valor das três leituras seria utilizado como evidência.

No caso da velocidade, não se percebeu ocorrências que afetem diretamente a aplicação da LPA2v como proposta aqui.

Os estados intermediários da LPA2v (tendências) podem auxiliar a tomada de decisão, já que produzem uma saída e permitem a previsibilidade de que o MIT está entrando em sobrecarga crítica. Estes estados intermediários, se repetidos por repetidos intervalos de tempo, permitem, por exemplo, o acionamento de um segundo MIT auxiliar pertencente ao processo produtivo.

Outro fator que se mostrou prejudicado foi o uso de câmeras termográficas. Estas, se de baixa sensibilidade, leem predominantemente a temperatura da

carcaça do MIT, normalmente, nos experimentos neste trabalho, abaixo 10 °C da leitura da temperatura nos enrolamentos.

O tratamento dos resultados da LPA2v depende do processo que se deseja controlar. As saídas mostram um resultado instantâneo das condições do MIT em operação. A tomada de decisão utilizando estas saídas não foram aqui tratadas, pois cada processo produtivo tem suas características próprias: há um segundo MIT para entrar em paralelo e aliviar o primeiro? Aplica-se ventilação forçada para resfriar o MIT? Para-se o MIT?

7 CONCLUSÃO

O mundo real é mais complexo que a lógica binária clássica. O motor de indução trifásico pertence ao mundo real em que as condições de sua operação variam, muitas vezes de forma esperada, porém não totalmente controlada. A LPA2v auxilia para que sistemas automatizados tomem decisões mais próximas do mundo real em que as ambiguidades não são totalmente excludentes.

A redução de velocidade do MIT é um indicativo de sobrecarga ou, ao menos, uma operação mais exigente. A temperatura interna dos enrolamentos indica necessidade de mais torque. Normalmente estas grandezas caminham juntas, porém quando uma ocorre e outra não, que decisão deve ser tomada. A lógica clássica não tem esta resposta. A LPA2v tem.

Sendo de construção puramente matemática, sua aplicação se adapta a qualquer MIT, desde que respeite as equações de extração das evidências e seus consequentes graus de certeza e incerteza, se utilizadas a temperatura e velocidade.

Cada processo tem uma necessidade e várias respostas para as várias perguntas do que deve-se ser feito para preservar o MIT ou processo produtivo. Este trabalho não avançou nestas questões por serem particulares de cada modelo de negócio.

A conclusão deste trabalho, apesar da impossibilidade de teste controlado no MIT, é que o objetivo foi alcançado, sendo a LPA2v uma importante auxiliar na tomada de decisão da continuidade de operação do MIT.

8 REFERÊNCIAS

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5 ed.** Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v com construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo [s.l.] Universidade de São Paulo, 1999.

DE CARVALHO JUNIOR, A. Aplicações Estado Da Arte Da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et Na Indústria 4.0 E Internet Das Coisas. **Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias IFSP – Campus Cubatão**, v. 2, n. 2, p. 38–57, mar. 2018.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Tradução: Onofre de Andrade Martins. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

ELETRONUCLEAR. **O que é Energia.** Disponível em: <<https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/O-que-e-Energia.aspx>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

FONTES, G. Faltam água e luz no Brasil; veja quais os setores mais gastadores do país. **UOL**, 24 out. 2021.

HELERBROCK, R. **Dualidade onda-partícula.** Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/a-natureza-dual-luz.htm>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

KHAN ACADEMY. **O que é a Lei de Faraday? (artigo).** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>>. Acesso em: 10 mar. 2022a.

KHAN ACADEMY. **O que é força magnética? (artigo).** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnets-magnetic/a/what-is-magnetic-force>>. Acesso em: 10 mar. 2022b.

MARIO, M. C. **Modelo de análise de variáveis craniométricas através das Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes.** Tese (Doutorado) - Faculdade de Medicina

[s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.

ORACLE. **Oracle Brasil**. Disponível em:

<<https://www.oracle.com/br/big-data/what-is-big-data/>>. Acesso em: 1 abr. 2022.

PASSOS, M. N. S.; DE OLIVEIRA, A. M.; GOMES, A. K. F. Aplicações das Equações de Maxwell. **Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias Ifsp – Campus Cubatão**, v. 4, n. 4, p. 260–273, fev. 2019.

SMITH, A. **A riqueza das nações: investigação sobre sua natureza e suas causas**. Tradução: Luiz João Baraúna. São Paulo: Nova Cultural, 1996. v. I

WEG. **Motores eficientes geram economia de energia na indústria**. Disponível em:

<<https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghtml>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

WEG. Motores elétricos. **Guia de especificação**, [s.d.].

XANTHOPULO, W. **Aplicação Da Lógica Paraconsistente Anotada No Apoio À Avaliação de Veículos Acidentados**. Trabalho de Conclusão de Curso—[s.l.] Universidade Santa Cecília, 2012.

APÊNDICE A - Código fonte da LPA2v para este trabalho

```

/**
Projeto para aplicar a LPA2v em motor de indução trifásico. Este trabalho é
fruto do TCC em engenharia elétrica do IFTO campus Palmas. São lidos os
valores do PT100 para encontrar a temperatura interna do motor e um encoder de
velocidade do eixo do motor.
Depois de lidos os valores é aplicada a lógica paraconsistente anotada de 2
valores para auxiliar a decidir se o motor deve continuar em operação.
Este trabalho conta com orientação dos professores do IFTO Kaison Teodoro de
Souza e Marcio Augusto Tamashiro

@author Walther Xanthopulo <xanthopulo@gmail.com>
@version 0.1 alpha
*/

/**
* Biblioteca para LCD do Arduino.
* Inicializa os pinos do Arduino para conexão com o LCD
* @see http://www.arduino.cc/en/Tutorial/LiquidCrystal
* @see https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal\_I2C
*/
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

/**
* Biblioteca para temperatura
* Usa o sensor MAX 31865 para leitura do PT100
* Usa SPI do sensor nos pinos: CS, DI, DO, CLK
* @see
https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/arduino-code
*/
#include <Adafruit_MAX31865.h>
Adafruit_MAX31865 max31865 = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);

/**
* Constantes globais
* @var byte PINOINT = 2 Pino de entrada para gerar interrupção do encoder de
velocidade
* @var byte PINOVERDADEIRO = 3 Pino de saída com resultada do LPA2v
* @var byte PINOFALSO = 4 Pino de saída com resultada do LPA2v
* @var byte PINOINCONSITENTE = 5 Pino de saída com resultada do LPA2v
* @var byte PINOINDETERMINADO = 6 Pino de saída com resultada do LPA2v
*/
const byte PINOINT = 2;
const byte PINOVERDADEIRO = 3;
const byte PINOFALSO = 4;
const byte PINOINCONSITENTE = 5;
const byte PINOINDETERMINADO = 6;

/**

```

```

* Variáveis globais
* @var int tempoAntes Tempo antes da interrupção para contagem da rotação
* @var volatile int pulsos Pulsos por volta do disco do encoder de velocidade
dentro da interrupção
* @var byte graus Vetor com 8 posições para desenhar o símbolo ° no LCD
*/
unsigned long tempoAntes = 0;
volatile int pulsos = 0;
float temp = 0;
byte graus[8] = {B11100, B10100, B11100};

/**
* Configuração inicial do Arduino. Obrigatório pela plataforma
* @return void
*/
void setup() {
    //definição de entrada/saída
    pinMode(PINOINT, INPUT);

    // Pinos do resultado extremos da LPA2v
    pinMode(PINOVERDADEIRO, OUTPUT);
    pinMode(PINOFALSO, OUTPUT);
    pinMode(PINOINCONSISTENTE, OUTPUT);
    pinMode(PINOINDETERMINADO, OUTPUT);

    //Teste o buzzer (motor deve parar)
    digitalWrite(PINOFALSO, HIGH);
    delay(1000);

    // Coloca todos os pinos do resultado da LPA2v em 0
    digitalWrite(PINOVERDADEIRO, LOW);
    digitalWrite(PINOFALSO, LOW);
    digitalWrite(PINOINCONSISTENTE, LOW);
    digitalWrite(PINOINDETERMINADO, LOW);

    //inicia o sensor MAX 31865 para PT100 de 3 fios
    max31865.begin(MAX31865_3WIRE);

    //anexa a interrupção para contar os pulsos da rotação
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PINOINT), contaPulsos, FALLING);

    //inicia o lcd e cria o símbolo ° na posição 0
    lcd.init();
    lcd.createChar(0, graus);
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Vamos");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Iniciar");
    delay(1000);
    lcd.clear();

```

```

}

/**
 * Executa o programa do Arduino. Obrigatório pela plataforma
 * @return void
 */
void loop() {
    calculaTempVeloc();
}

/**
 * Imprime uma mensagem no LCD
 */
void imprime(float temperatura, int velocidade) {

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Temp.");
    lcd.write(byte(0));
    lcd.print("C ");
    lcd.print(temperatura);

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Vel.(rpm) ");
    lcd.print(velocidade);
}

/**
 * Utiliza o sensor MAX 31865 para obter a temperatura
 * O método temperatura recebe os parâmetros
 *   RNOMINAL -> resistência nominal (100.0 para PT100)
 *   RREF      -> resistência de referência (430.0 para PT100)
 * @see
 * https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/arduino-code
 */
float temperatura() {
    return max31865.temperature(100.0, 430.0);
}

/**
 * Conta os pulsos do encoder de velocidade
 * @see rpm()
 * @return void
 */
void contaPulsos() {
    pulsos++;
    return;
}

/**
 * Calcula as rotações do disco do encoder de velocidade
 * A cada 1 segundo faz o cálculo de rotação baseado na quantidade de pulsos
 * que o encoder de velocidade gerou pelo disco com 20 ranhuras

```

```

* pulsos é a frequência
* pulsosPorVolta é a quantidade de pulsos dado em uma volta do disco do encoder

* Depois disso reinicia o valor da var pulsos para 0 e atualiza
* a var tempoAntes para a var local tempoAtual
*
* @return void
*/
int velocidade() {
    int rotacao = 0;
    rotacao = (pulsos / 20) * 60;
    pulsos = 0;
    return rotacao;
}

/**
* Faz a aplicação da LPA2v a cada 1 segundo.
*
* Desatacha a interrupção utilizada para cálculo da velocidade do rotor
* para imprimir no display de LCD e aplicar o algoritmo da LPA2v e
* atacha novamente interrupção para recalcular a velocidade e temperatura
*
* tempoAntes é auxiliar para contagem de 1 segundo desejada para aplicação
*
* @return void
*/
void aplicaLPA2v(){
    unsigned long tempoAtual = millis();
    if (tempoAtual - tempoAntes >= 1000){
        detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PINOINT));

        int v = velocidade();
        float t = temperatura();

        imprime(t, v);
        tempoAntes = millis();

        LPA2v(t, v);

        attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PINOINT), contaPulsos, FALLING);
    }
    return;
}

/**
* Normaliza de 0 a 1 os valores de temperatura para ter a evidência favorável
* A evidência favorável determina o quão verdadeira é a proposição
*
* @param float temperatura Valor lido de temperatura
* @return float Valor normalizado
*/

```

```

float favoravel(float temperatura) {
    float tempNominal = 52.0; // Temperatura nominal de operação
    float tempMaxima = 54.0; // Máxima temperatura
    float ret = 0.0;

    if (temperatura >= tempMaxima)
        ret = 0.0;
    else if (temperatura <= tempNominal)
        ret = 1.0;
    else
        ret = -0.5*temperatura + 27;

    return ret;
}

/**
 * Normaliza de 0 a 1 os valores de velocidade para ter a evidência desfavorável
 * A evidência desfavorável determina o quão falsa é a proposição
 *
 * @param float velocidade Valor lido de velocidade
 * @return float Valor normalizado
 */
float desfavoravel(float velocidade) {
    int velocNominal = 1820; // Velocidade nominal de operação
    int velocMinima = 1800; // Velocidade mínima
    float ret = 0.0;

    if (velocidade >= velocNominal)
        ret = 0.0;
    else if (velocidade <= velocMinima)
        ret = 1.0;
    else
        ret = -0.05*velocidade + 91;

    return ret;
}

/**
 * Aplica o algoritmo da LPA2v
 *
 * Os parâmetros da função são as evidência favoravel e desfavoravel da LPA2v
 *
 * @see favoravel
 * @see desfavoravel
 * @param float temperatura Valor lido de temperatura
 * @param float velocidade Valor lido de velocidade
 * @return float
 */
float LPA2v(float temperatura, float velocidade) {

    /* Definições do valores */

```

```

    float limiteVerdadeiro = +0.5;      //Definição do valor superior de controle
de certeza - verdadeiro
    float limiteFalso = -0.5;           //Definição do valor inferior de controle de
certeza - falso
    float limiteInconsistente = +0.5; //Definição do valor superior de controle de
incerteza - inconsistente
    float limiteIndeterminado = -0.5; //Definição do valor inferior de controle de
incerteza - indeterminado

    // Variáveis de entrada - evidências da proposição
    float evidenciaFavoravel = favoravel(temperatura); // evidência favorável à
proposição
    float evidenciaDesfavoravel = desfavoravel(velocidade); // evidência
desfavorável à proposição

    // Calcula os graus de certeza e contradição
    float certeza = evidenciaFavoravel - evidenciaDesfavoravel;      // grau de
certeza da proposição
    float incerteza = evidenciaFavoravel + evidenciaDesfavoravel - 1; // grau de
incerteza da proposição

    // Resultado dos extremos da LPA2v
    if(certeza >= limiteVerdadeiro){
        digitalWrite(PINOVERDADEIRO, HIGH);
        digitalWrite(PINOFALSO, LOW);
        digitalWrite(PINOINCONSITENTE, LOW);
        digitalWrite(PINOINDETERMINADO, LOW);
    }
    else if(certeza <= limiteFalso){
        digitalWrite(PINOVERDADEIRO, LOW);
        digitalWrite(PINOFALSO, HIGH);
        digitalWrite(PINOINCONSITENTE, LOW);
        digitalWrite(PINOINDETERMINADO, LOW);
    }
    else if(incerteza >= limiteInconsistente){
        digitalWrite(PINOVERDADEIRO, LOW);
        digitalWrite(PINOFALSO, LOW);
        digitalWrite(PINOINCONSITENTE, HIGH);
        digitalWrite(PINOINDETERMINADO, LOW);
    }
    else if(incerteza <= limiteIndeterminado){
        digitalWrite(PINOVERDADEIRO, LOW);
        digitalWrite(PINOFALSO, LOW);
        digitalWrite(PINOINCONSITENTE, LOW);
        digitalWrite(PINOINDETERMINADO, HIGH);
    }
}

```