

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Santana Porto

**Desenvolvimento de Bancada para
Determinação de Mapa de Rendimento de
Motores Elétricos e Inversores**

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Santana Porto

**Desenvolvimento de Bancada para Determinação de Mapa
de Rendimento de Motores Elétricos e Inversores**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

UFRGS

Orientador: Paulo Roberto Eckert

Porto Alegre

2023

Guilherme Santana Porto

Desenvolvimento de Bancada para Determinação de Mapa de Rendimento de Motores Elétricos e Inversores

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Alexandre Balbinot
Chefe do Departamento de Engenharia Elétrica (DELET) - UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Igor Pasa Wiltuschnig
UFRGS

Me.Eng. Gabriel Behling da Silveira
UFRGS

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert
Orientador - UFRGS

Aprovado em 21 de fevereiro de 2024.

Agradecimentos

Agradeço em especial apoio da minha família e amigos durante meu período na graduação. À UFRGS por me possibilitar conhecimento e experiências, que vão além do grande aprendizado acadêmico, através de projetos de extensão, voluntariado, iniciação científica. Agradeço ao meu orientador, os professores e integrantes do LMEAE pelo auxílio no preparo e execução desse trabalho.

*O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância,
é a ilusão do conhecimento.*

Stephen Hawking.

Resumo

Este trabalho tem como motivação a busca por métodos para avaliação experimental da eficiência energética de motores elétricos e inversores e, portanto, propõe o desenvolvimento de uma bancada para determinação de mapas de rendimento destes equipamentos. A descrição da bancada é subdividida em três etapas ou sistemas. O primeiro constitui a montagem mecânica do experimento; o segundo os sistemas de acionamento utilizados, e o terceiro é o sistema de aquisição de dados. Além da descrição da elaboração da bancada também é descrita a metodologia aplicada para o desenvolvimento dos experimentos para determinação do mapa de rendimento, incluindo as restrições no seu desenvolvimento. A bancada desenvolvida foi utilizada para o ensaio de um motor de indução e um inversor de frequência e os resultados apresentaram comportamento das linhas de contorno de eficiência energética coerentes com o esperado para os equipamentos. Para calibração foi imposta a condição nominal de operação no motor e o resultado em termos de rendimento foi semelhante ao valor nominal de placa, com diferença percentual na ordem de 1% em relação ao valor nominal especificado pelo fabricante. Alguns pontos da grade de torque por velocidade, elaborada para determinação do mapa de rendimento, não foram ensaiados para respeitar o limite de sobrecorrente e devido a limites impostos pelo método de controle utilizado pelo inversor de frequência. Por fim, pode-se concluir que a bancada desenvolvida é uma importante ferramenta de análise experimental para ambientes laboratoriais que visam caracterizar máquinas elétricas e inversores de frequência em uma ampla região de operação dos equipamentos.

Palavras-chave: Eficiência energética, Inversores de frequência, Mapa de rendimento, Motores Elétricos.

Abstract

This work is motivated by the search for methods for experimental evaluation of the energy efficiency of electric motors and inverters and, therefore, proposes the development of a test bench for determining efficiency maps of these equipment. The bench description is subdivided into three stages or systems. The first constitutes the mechanical assembly of the experiment, the second is the drive systems used, and the third is the data acquisition system. In addition to describing the preparation of the test bench, the methodology applied to develop the experiments to obtain the efficiency map is also described, including the restrictions on its development. The developed test bench was used to conduct experiments with an induction motor and a frequency inverter, and the results showed the behavior of the energy efficiency contour lines consistent with what was expected for the equipment. For calibration, the rated operating condition was imposed on the motor, and the result in terms of efficiency was similar to the rated value, with a percentage difference of 1% compared to the rated value specified by the manufacturer. Some points on the torque-by-speed grid, prepared to determine the efficiency map, were not tested to respect the overcurrent limit and due to limits imposed by the control method used by the frequency inverter. Finally, it can be concluded that the test bench developed is an important experimental analysis tool for laboratory environments that aim to characterize electrical machines and frequency inverters in a wide region of equipment operation.

Key-words: Efficiency map, Electric Motors, Energy efficiency, Frequency Inverters.

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de mapa de eficiência de motor elétrico.	18
Figura 2 – Diagrama de blocos para o experimento aplicado a motor PMSM. . . .	19
Figura 3 – Bancada de experimentos aplicado a motor PMSM.	19
Figura 4 – Setup da bancada criada para comparação de rotores IM e SynRM. . .	20
Figura 5 – Resultado para mapas de rendimento de sistemas de acionamento para rotores de topologia IM e SynRM.	21
Figura 6 – Comparação da diferença entre mapas de rendimento de motores IPMSM e SRM.	22
Figura 7 – Modelos para 4 ciclos de condução veicular.	22
Figura 8 – Metodologia para geração de pontos que formam o mapa de rendimento. .	23
Figura 9 – Layout do diagrama em blocos de bancada de experimentos automatizada. .	24
Figura 10 – Bancada de experimentos automatizada.	24
Figura 11 – Fluxo de perdas em máquinas elétricas para operação motor.	30
Figura 12 – Ilustração da sobreposição entre corrente e tensão em uma chave estática durante a transição de estado de bloqueio para condução.	32
Figura 13 – Layout representativo da estrutura mecânica montada.	35
Figura 14 – Fotografia da estrutura mecânica montada.	35
Figura 15 – Layout representativo do acionamento da carga mecânica variável. . . .	37
Figura 16 – Painel e IHM do controlador CTW-900.	38
Figura 17 – Layout representativo do acionamento motor de indução.	40
Figura 18 – Interface IHM SEW.	40
Figura 19 – Instrumentos e pontos de medição.	41
Figura 20 – Sistema de aquisição de dados portátil HBM Genesis®.	42
Figura 21 – Cartão de entradas diferenciais de 6 canais.	43
Figura 22 – <i>eDrive Setup</i> do software <i>Perception</i> ®.	43
Figura 23 – HBM <i>Perception</i> ® configuração dos canais.	44
Figura 24 – <i>Setup</i> customizado de visualização de dados.	46
Figura 25 – Layout da bancada com sistema de aquisição de dados.	47
Figura 26 – Bancada criada com todos os sistemas montados.	48

Figura 27 – Grade de pontos ponto formada para criação de mapa de rendimento. .	52
Figura 28 – Mapa de rendimento do motor.	57
Figura 29 – Mapa de rendimento do inversor.	57
Figura 30 – Mapa de rendimento global.	58
Figura 31 – Corrente de fase para conjugado constante.	59
Figura 32 – Corrente de fase para rotação constante.	59
Figura 33 – Curva de calibração de torque.	64
Figura 34 – Curva de calibração de rotação.	65

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros da máquina CC.	37
Tabela 2 – Parâmetros motor de indução.	39
Tabela 3 – Legenda para os campos dos <i>displays</i> numéricos.	47
Tabela 4 – Parâmetros para criação da grade de pontos.	51
Tabela 5 – Resultados obtidos para condição nominal.	55
Tabela 6 – Comparação entre dados de identificação nominais e resultados da operação nominal do motor.	56
Tabela 7 – Parâmetros para calibração do torquímetro.	64
Tabela 8 – Valores corrigidos de conjugado.	64
Tabela 9 – Parâmetros para calibração do tacômetro	65
Tabela 10 – Valores corrigidos de velocidade.	65

Lista de abreviaturas

CA	<i>Corrente Alternada</i>
CC	<i>Corrente Continua</i>
EMI	<i>Eletromagnetic Interference</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
IM	<i>Induction Motor</i>
IPMSM	<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
LMEAE	<i>Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia</i>
MI	<i>Máquina de indução</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
MTPA	<i>Maximum Torque per Ampere</i>
MTPV	<i>Maximum Torque per Voltage</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
SynRM	<i>Synchronous Reluctance Motor</i>
SRM	<i>Switched Reluctance Motor</i>

Lista de Símbolos

θ Ângulo elétrico entre tensão e corrente ($^{\circ}$)

θ_1 Ângulo elétrico entre a componente fundamental da tensão e corrente de fase ($^{\circ}$)

I_{Lrms1} Componente fundamental da corrente de fase (A)

V_{Lrms1} Componente fundamental da tensão de fase (V)

τ_{eixo} Conjugado no eixo do motor (Nm)

$I_T(t)$ Corrente de armadura instantânea (V)

I_{rms} Corrente eficaz(A)

I_{Lrms} Corrente eficaz de linha (A)

I Corrente elétrica que circula nos condutores (A)

$i_{cc}(t)$ Corrente instantânea no barramento (A)

$i_{ca}(t)$ Corrente instantânea CA da rede (A)

I_{cc} Corrente no barramento CC (A)

$\eta_{inversor}$ Eficiência no inversor (%)

η_{motor} Eficiência no motor (%)

η_{total} Eficiência total do sistema (%)

R_{DSon} Impedância no estado de condução chave estática (Ω)

P_{cond} Perdas por condução (W)

T Período (s)

P_{inv} Potência consumida no inversor (W)

P_{perdas} Potência da soma de perdas no motor (W)

$P_{inv-entrada}$ Potência de entrada no inversor (W)

- $P_{inv-entrada-cc}$ Potência de entrada no inversor com alimentação CC (W)
- $P_{inv-entrada-ca-mono}$ Potência de entrada no inversor com alimentação monofásica (W)
- $P_{inv-entrada-ca-tri}$ Potência de entrada no inversor com alimentação trifásica (W)
- P_{ele} Potência dissipada nos condutores (W)
- P_{motor} Potência elétrica média no motor (W)
- P_{mec} Potência mecânica média de saída no motor (W)
- $P_{motor-entrada-cc}$ Potência média na máquina de entrada CC da máquina (W)
- $P_{motor-entrada-ca-mono}$ Potência na máquina de entrada CA monofásica (W)
- $P_{motor-entrada-ca-tri-sen}$ Potência na máquina de entrada CA trifásica senoidal (W)
- $P_{motor-entrada-ca-tri-inv}$ Potência na máquina de entrada CA trifásica pelo inversor (W)
- R Resistência nos condutores (Ω)
- $V_T(t)$ Tensão de armadura instantânea (V)
- V_{rms} Tensão eficaz (V)
- $V_{Lrms}(t)$ Tensão eficaz de linha (V)
- $V_{Lrms1}(t)$ Tensão eficaz de linha (V)
- $v_{cc}(t)$ Tensão instantânea no barramento CC (V)
- $v_{ca}(t)$ Tensão instantânea CA da rede (V)
- V_{cc} Tensão no barramento CC (V)
- $\omega_{mec}(t)$ velocidade angular instantânea no eixo do motor (rad/s)
- ω_{mec} velocidade angular no eixo do motor (rad/s)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Mapas de rendimento e aplicações	17
2.1.1	Metodologia aplicada a um motor PMSM	18
2.1.2	Comparação entre rotores de máquinas IM e SynRM	20
2.1.3	Comparação entre IPMSM e SRM para uma aplicação automotiva	21
2.1.4	Metodologia automatização da criação prática de mapas de rendimento	23
2.2	Eficiência em motores elétricos	25
2.3	Máquinas elétricas e perdas	27
2.4	Conversores estáticos	30
2.4.1	Eficiência em inversores	31
2.4.2	Perdas por comutação	32
2.4.3	Perdas por condução	33
3	DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	34
3.1	Montagem mecânica da bancada	34
3.2	Sistemas de acionamento	36
3.2.1	Acionamento como carga mecânica variável	36
3.2.2	Acionamento da máquina a ser ensaiada	38
3.3	Sistema de aquisição de dados	41
3.3.1	Instrumentos	41
3.3.2	HBM <i>Genesis</i> [®] e <i>Percepition</i> [®]	42
3.3.2.1	<i>Hardware</i>	42
3.3.2.2	Configuração do <i>eDrive Setup</i>	43
3.3.2.3	Configuração dos canais do cartão de entradas	44
3.3.2.4	Cálculos em tempo real	45
3.3.2.5	Visualização em tempo real	46
3.4	Sistema completo e bancada montada	47
4	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	49
4.1	Procedimentos realizados	49
4.1.1	Controle da carga variável	49
4.1.2	Controle do motor de indução	50
4.2	Implementação da grade de pontos	51
4.2.1	Partida do sistema	52
4.2.2	Alteração do ponto de operação	53
4.3	Limitações	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Verificação do desenvolvimento da bancada	55
5.2	Apresentação dos mapas de rendimento	56
5.3	Zonas não lineares e restrições	58

6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS	64
	APÊNDICE B – REAL-TIME FORMULAS	66

1 Introdução

A busca incessante por eficiência energética impulsiona o avanço tecnológico, resultando na exploração contínua de novos métodos, técnicas, modelos e ferramentas. As aplicações que abrangem sistemas de acionamento para máquinas elétricas destacam-se, atendendo às demandas por inovações em diversas áreas, como indústria, transporte, geração de energia e eletrodomésticos. No setor de transporte, as aplicações voltadas para a eletromobilidade ganham destaque, guiando o desenvolvimento tecnológico. Uma tendência global que se destaca é a crescente demanda pela eletrificação de veículos.

Em cenários como esse, onde há motivação para o desenvolvimento tecnológico, a avaliação do desempenho de sistemas destinados a aplicações com faixa de operação dinâmica assume uma importância significativa na análise do sistema elétrico, no desenvolvimento de projetos e na comparação com veículos tradicionais movidos a combustíveis fósseis. O rendimento, como indicador motivador, torna-se fundamental para esse trabalho, cujo propósito é desenvolver uma plataforma de testes dedicada à determinação do mapa de rendimento de motores elétricos e inversores de frequência.

Apesar da relevância do tema, a elaboração de uma plataforma ou metodologia para criar mapas de rendimento de motores elétricos ainda é pouco explorada em experimentos práticos. Essa lacuna decorre da complexidade envolvida em desenvolver uma metodologia que possa generalizar os procedimentos a serem realizados. Dentre os desafios enfrentados, destacam-se a necessidade de instrumentos e equipamentos que realizem leituras, análises e tratamentos de dados com acurácia, conferindo confiabilidade ao método. Outro desafio notável é a integração mecânica do experimento.

O presente projeto visa desenvolver uma aplicação destinada aos estudos de eficiência em sistemas de acionamento com motores elétricos, especialmente concebida para operações em que a faixa de operação, em termos de velocidade e conjugado na máquina elétrica, é ampla. Para alcançar esse propósito, é proposta a criação e descrição de uma bancada experimental que permita a obtenção do mapa de rendimento de motores elétricos e inversores de frequência.

A estrutura do projeto será organizada em seis capítulos distintos. No primeiro capítulo, é apresentada a visão global do projeto, destacando sua importância e os objetivos almejados. Em seguida, no segundo capítulo, aborda-se o referencial teórico, dedicando atenção especial aos cálculos de eficiência, descrição das perdas envolvidas no sistema e a apresentação de trabalhos semelhantes desenvolvidos na área.

O terceiro capítulo detalhará a concepção e funcionamento da bancada experimental, assim como os equipamentos utilizados para a obtenção de dados. No quarto capítulo, são descritos os procedimentos adotados, incluindo as etapas experimentais e as limitações identificadas durante a execução dos ensaios.

Na sequência, o quinto capítulo é destinado à apresentação dos resultados obtidos, onde estes são analisados e discutidos de acordo com as metas propostas. Por fim, o sexto capítulo conclui o projeto, consolidando os principais resultados, ressaltando as contribuições e indicando possíveis direções para trabalhos futuros.

Este projeto assume um papel relevante ao descrever detalhadamente a metodologia desenvolvida para a determinação de eficiência em sistemas de acionamento com motores elétricos, oferecendo uma abordagem simples na obtenção experimental do mapa de rendimento. A bancada desenvolvida representa uma importante ferramenta na caracterização experimental de máquinas elétricas e inversores e assim permite aprimoramento de tecnologias relacionadas.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo aborda a descrição de mapas de rendimento e suas aplicações, com destaque para referências relevantes que desenvolveram e empregaram métodos de determinação. O capítulo também trata da definição utilizada nos cálculos de rendimento e de perdas encontradas em máquinas elétricas e dos inversores de frequência. Além disso, é explorada a topologia das máquinas de indução utilizadas no projeto como estudo de caso, proporcionando uma aplicação prática de um sistema que determina a eficiência e o mapa de rendimento de motores elétricos.

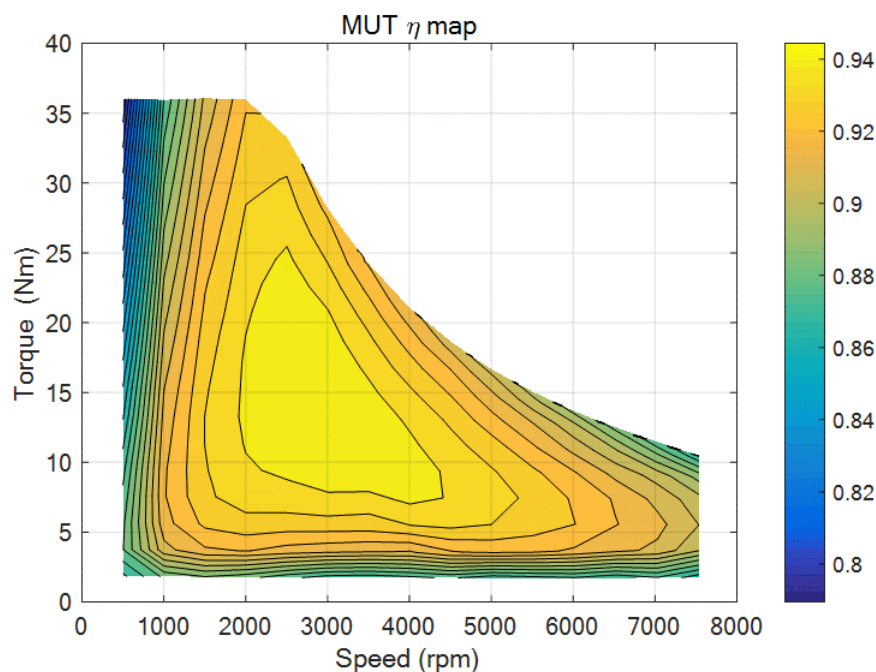
2.1 Mapas de rendimento e aplicações

Em geral, as máquinas elétricas rotativas operam com elevado rendimento, exceto com cargas leves, especialmente quando comparadas, por exemplo, com máquinas à combustão. O rendimento de plena carga de motores médios pode alcançar de 80% a 90%, passando por 90% a 98%, em motores de até poucas centenas de kW.

Para avaliar a performance de máquinas elétricas, dentro de sua região de operação, o mapeamento de eficiência é uma das mais importantes ferramentas gráficas utilizadas. Esse mapa é um gráfico em três dimensões em que o *eixo x* representa a rotação, o *eixo y* representa o conjugado e o *eixo z* representa o rendimento. Alternativamente, utiliza-se gráficos em duas dimensões, substituindo o *eixo z* por uma escala de cores com curva de níveis que delimitam regiões de rendimento. A forma com duas dimensões é a mais utilizada e para o caso experimental é construída a partir de uma malha de pontos que determina para quais condições os ensaios devem ser realizados.

Para representar como é a ilustração de um modelo de mapa de rendimento, ou também chamado de mapa de eficiência, a Figura 1 mostra um exemplo do mapa de um motor elétrico. Podemos observar na Figura 1, que existem regiões para qual não foi plotada a eficiência. Isso ocorre pelo fato delas estarem fora da região delimitada pelos limites de operação no motor e/ou no inversor, geralmente impostos utilizando métodos de acionamento denominados MTPA (*Maximum Torque per Ampere*) e MTPV (*Maximum Torque per Volt*).

Figura 1 – Exemplo de mapa de eficiência de motor elétrico.



Fonte: Bojoi et al., 2016,

Quando a análise é realizada de forma analítica, os limites das regiões de contorno podem ser baseados apenas em algum dos métodos de acionamento citados. Entretanto, quando a determinação é feita de forma experimental, os limites de operação estão sujeitos a diversos outros fatores que podem limitar ou influenciar os limites de operação, tais como, equipamentos de medição, sistema de arrefecimentos, limites da máquina utilizada como dinamômetro, dentre outros fatores.

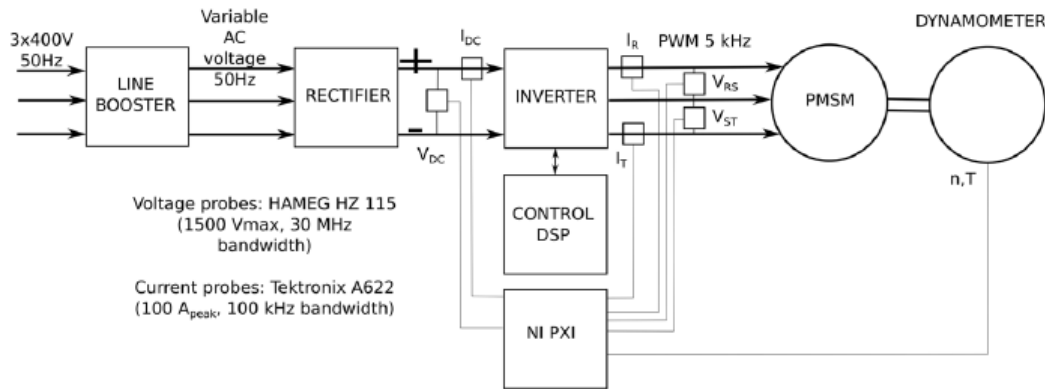
Dada a dificuldade imposta pela determinação analítica, geralmente a avaliação é realizada a partir de simulações. Entretanto, considerando que diversas perdas são difíceis de serem quantificadas apropriadamente por meio de modelos, é relevante realizar a caracterização experimental de um sistema motriz.

2.1.1 Metodologia aplicada a um motor PMSM

O exemplo aplicado para a obtenção de mapa de rendimento para um motor síncrono de ímãs permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Motor* - PMSM) é proposta por (Martim Novak et al., 2017). No trabalho foi desenvolvida uma bancada com o objetivo de medir a potência de entrada e de saída do motor. Cabe destacar que, para reduzir a influência da temperatura no experimento, é proposto manter a máquina operando em condição nominal por um período longo de tempo, até que a máquina atinja a estabilidade

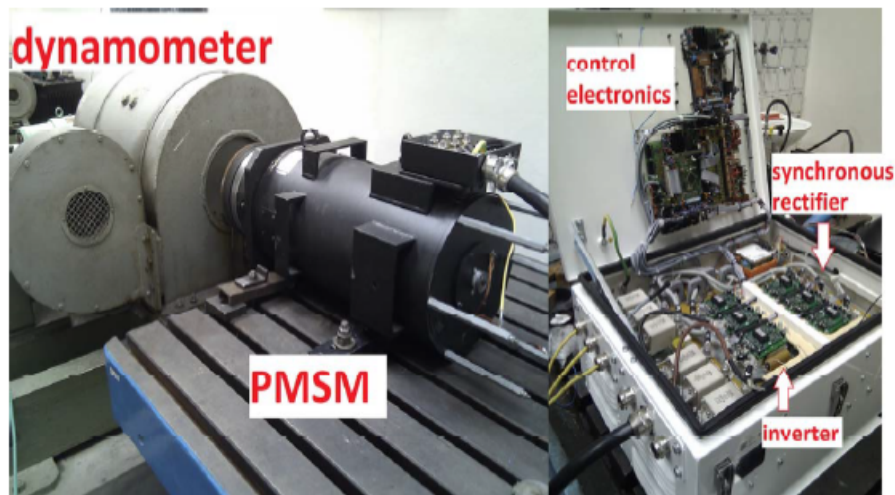
térmica e o efeito da temperatura sobre a eficiência seja considerado. O digrama de blocos para elaboração do experimento é apresentado na Figura 2 e na Figura 3 a bancada e equipamentos utilizados podem ser vistos.

Figura 2 – Diagrama de blocos para o experimento aplicado a motor PMSM.



Fonte: Martim Novak et al., 2017.

Figura 3 – Bancada de experimentos aplicado a motor PMSM.



Fonte: Martim Novak et al., 2017.

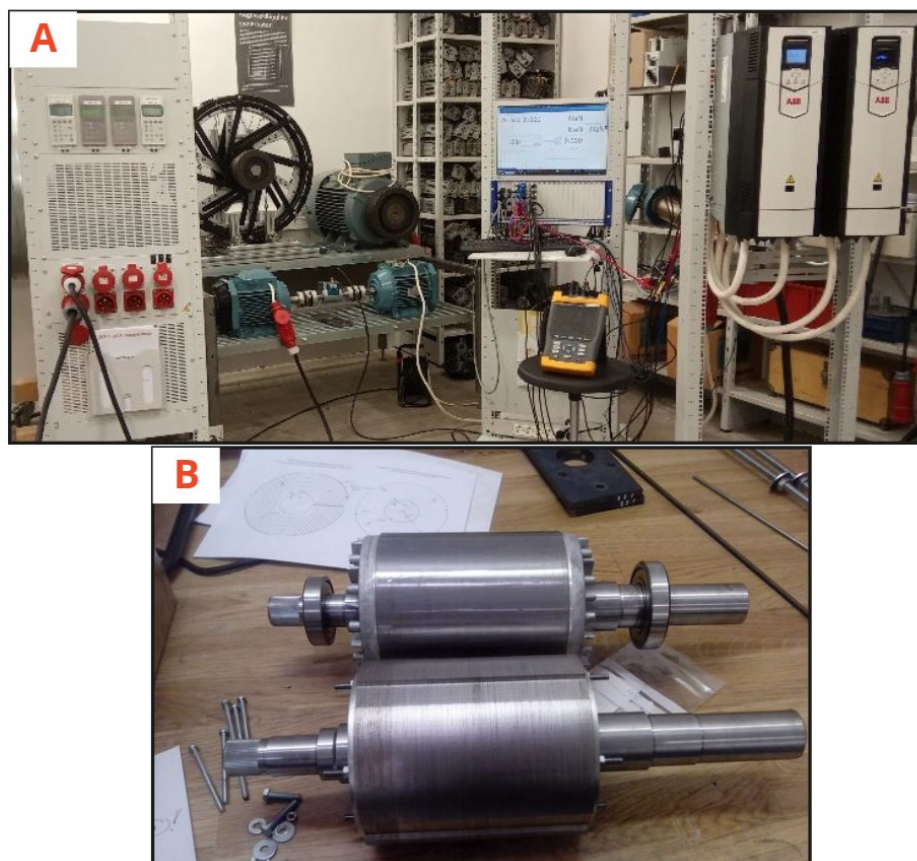
Com essa bancada foi possível criar o mapa de rendimento da máquina em teste. Entretanto, os autores revelam algumas dificuldades para mensurar o conjugado, e para medir a tensão do inversor modulado por PWM (*Pulse-Width Modulation*), devido à necessidade de alta taxa de amostragem para adquirir os sinais de tensão.

2.1.2 Comparação entre rotores de máquinas IM e SynRM

Nesta subseção é reportado um outro trabalho (Rassölkin et al., 2019), onde uma bancada para determinação de mapas de rendimento também é desenvolvida. Nesse é mensurada a eficiência no motor e no inversor e feita a comparação do desempenho entre duas topologias de rotores diferentes com mesmas dimensões físicas, sendo a primeira topologia a de uma máquina de indução (*Induction Machine* - IM) com rotor do tipo gaiola e a segunda uma máquina síncrona de relutância (*Synchronous Reluctance Machine* - SynRM). As máquinas possuem parâmetros nominais de potência, corrente e tensão iguais.

São especificados os pontos da faixa de operação para criação dos mapas de rendimento para rotação entre 300 e 1500 rpm e conjugado entre 5 e 45 Nm. A bancada desenvolvida no contexto desse trabalho é apresentada na Figura 4, na parte superior (identificada como *A*) da figura, e na parte inferior (identificada como *B*), são vistos os rotores analisados.

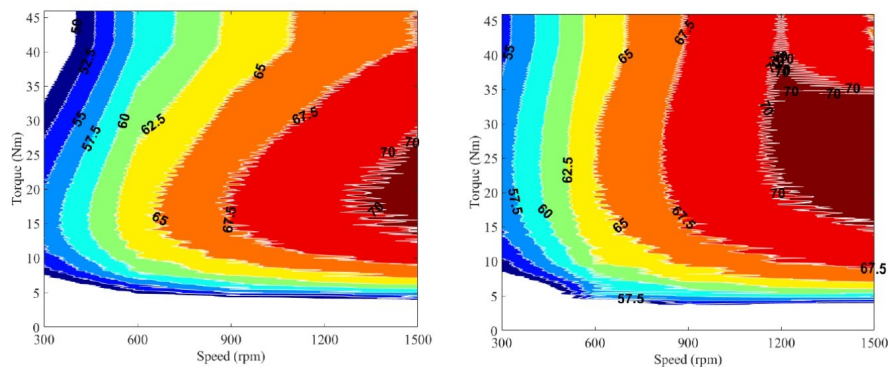
Figura 4 – Setup da bancada criada para comparação de rotores IM e SynRM.



Fonte: Adaptado de Rassölkin et al., 2019.

Nesse trabalho, é feita a análise e comparação dos mapas de rendimento do motor, mapa de rendimento do inversor e mapa geral do sistema completo com motor e inversor para cada topologia. Entretanto, para brevidade, neste trabalho é apresentado apenas o mapa de rendimento criado para avaliar o sistema de acionamento completo para cada topologia, como mostrado na Figura 5, é possível verificar que o *SynRM* possui áreas com rendimento mais elevado em rotações altas.. O objetivo de mostrar essa figura é principalmente o de exemplificar a forma de apresentação de uma mapa de rendimento encontrado na literatura.

Figura 5 – Resultado para mapas de rendimento de sistemas de acionamento para rotores de topologia IM e SynRM.

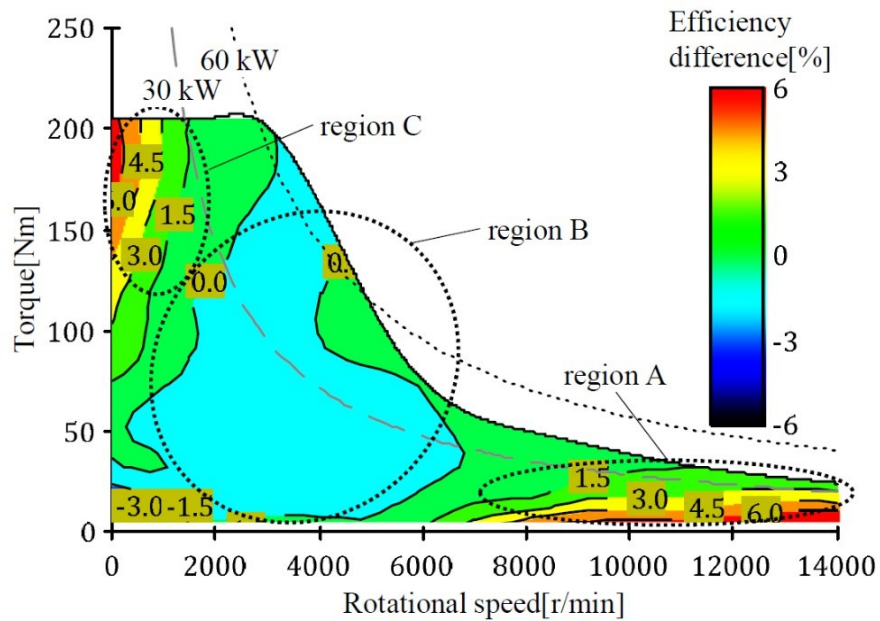


Fonte: Rassõlkin et al., 2019.

2.1.3 Comparação entre IPMSM e SRM para uma aplicação automotiva

Nesta subseção é descrito o trabalho de (Kiyota et al., 2012), onde é realizada uma comparação de desempenho entre um motor síncrono de ímãs permanentes (*Internal Permanent Magnet Synchronous Motor* - IPMSM) e um motor de relutância chaveada (*Switched Reluctance Motor* - SRM) para aplicação veicular. Inicialmente é obtido o mapa de rendimento para cada topologia. Após é feita a comparação entre a diferença na eficiência entre elas para a grade avaliada. O IPMSM foi utilizado como referência nessa análise. A avaliação de desempenho, nessa aplicação, produz três regiões para avaliação onde nota-se distinção de comportamento entre elas. Na Figura 6 é apresentado o gráfico que representa o resultado desse trabalho.

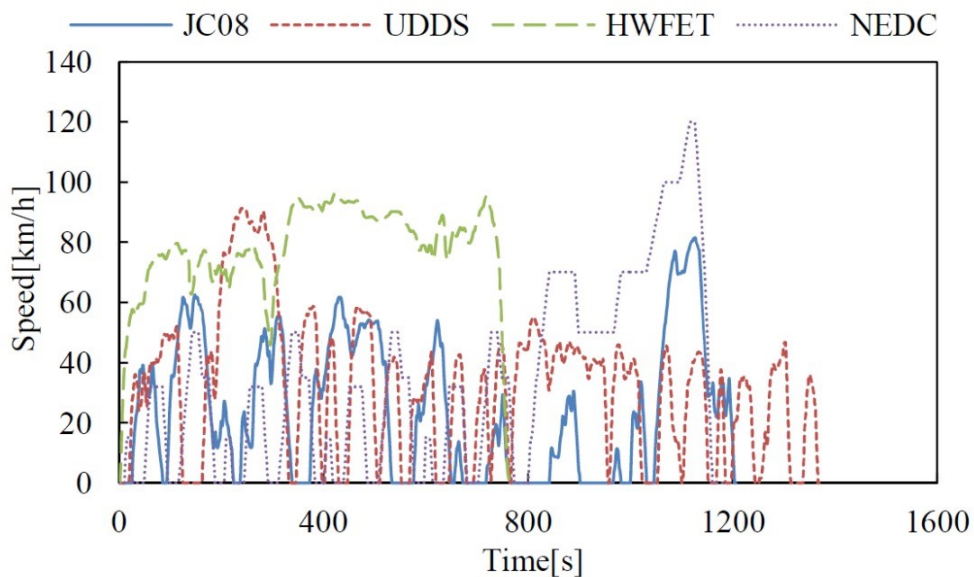
Figura 6 – Comparação da diferença entre mapas de rendimento de motores IPMSM e SRM.



Fonte: Kiyota et al., 2012.

Para complementar o estudo comparativo, os autores realizam a análise em 4 ciclos de condução veicular distintos, conforme apresentados na Figura 7, considerando ainda qual motor possui melhor desempenho para diferentes relações de transmissão. Em resumo, os autores concluíram que o SRM possui melhor desempenho quando trabalha em altas rotações e a preferência pelo SRM também deve-se ao custo reduzido e facilidade de fabricação quando comparado com o IPMSM.

Figura 7 – Modelos para 4 ciclos de condução veicular.



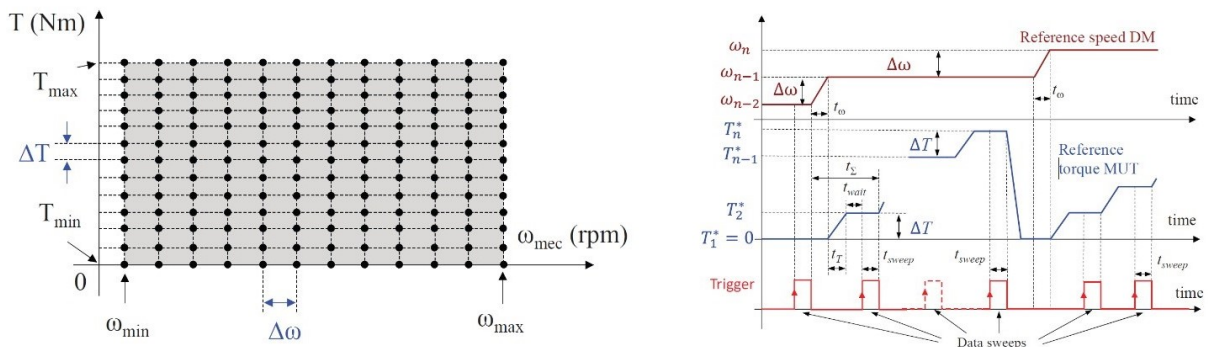
Fonte: Kiyota et al., 2012.

2.1.4 Metodologia automatização da criação prática de mapas de rendimento

Esta subseção destaca os principais aspectos do trabalho de (Bojoi et al., 2016), onde é utilizado o equipamento GEN3i Mapa Recorder da fabricante HBK para elaboração de mapa de rendimento em máquinas de corrente alternada (CA). Nele é proposto um processo automatizado para obtenção experimental do mapa de rendimento.

O trabalho apresenta uma metodologia para criação do grade de pontos de velocidade e torque que utiliza como restrição os métodos MTPA e MTPV. A grade de pontos criada para indicar os pontos de medição é ilustrado na Figura 8, onde é possível verificar que um sinal periódico de *trigger* é utilizado para sincronização da aquisição de dados e alteração entre pontos. Dessa forma, os dados da grade de pontos são coletados e salvos para posterior processamento do cálculo da eficiência e geração de mapas de rendimento.

Figura 8 – Metodologia para geração de pontos que formam o mapa de rendimento.

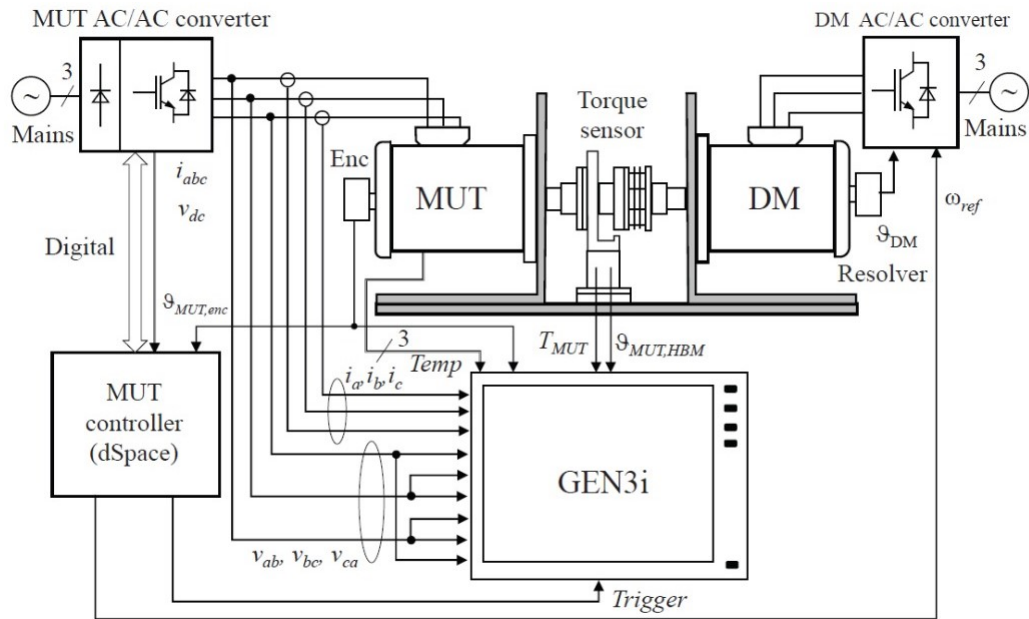


Fonte: Bojoi et al., 2016.

O diagrama em blocos que representam a bancada com os sinais coletados, sistema de aquisição e sistema de acionamento é visualizado na Figura 9. A bancada montada com estes sistemas é apresentada na Figura 10.

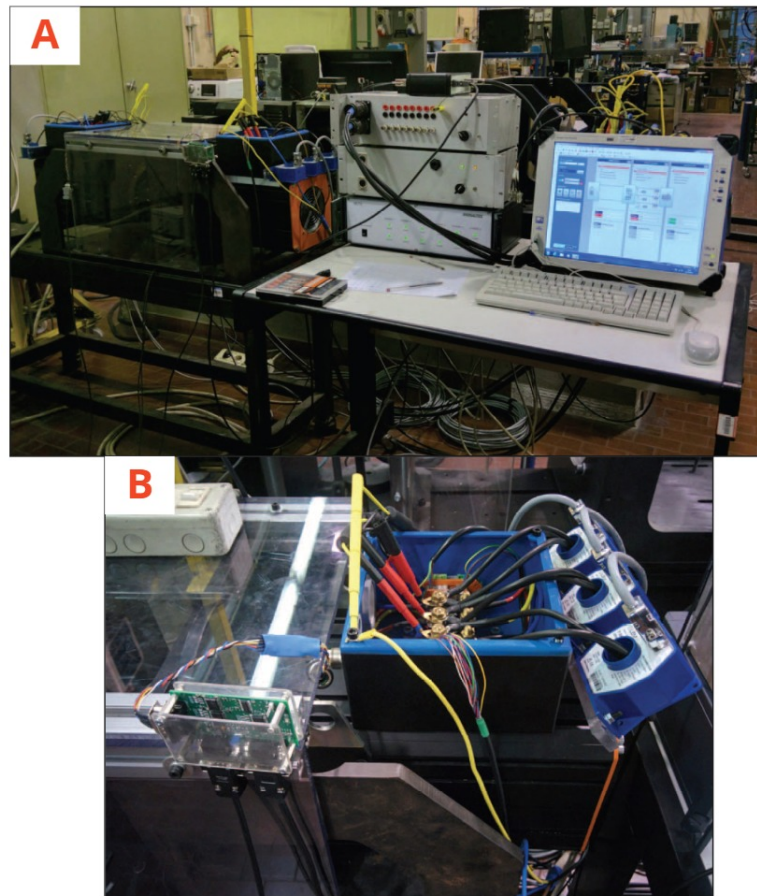
Esse método permite obter de forma ágil os resultados para a criação do mapa de rendimento, visto que, a alteração entre pontos e aquisição de dados é automatizada. Assim, também há maior segurança ao operador que não precisa estar próximo ao experimento. Um resultado obtido com a bancada para o mapa de rendimento de um motor de indução sob teste é aquele já apresentado na Figura 1.

Figura 9 – Layout do diagrama em blocos de bancada de experimentos automatizada.



Fonte: Bojoi et al., 2016.

Figura 10 – Bancada de experimentos automatizada.



Fonte: Bojoi et al., 2016.

2.2 Eficiência em motores elétricos

A eficiência no motor elétrico η_{motor} é a razão entre a potência elétrica média P_{motor} fornecida e a potência mecânica média de saída no motor P_{mec} , ou seja,

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mec}}{P_{motor}}. \quad (1)$$

A potência mecânica no eixo pode ser determinada a partir do produto do conjugado no eixo do motor τ_{eixo} (em Nm) e a velocidade angular no eixo ω_{mec} (em rad/s), quando tanto a potência como a velocidade angular forem constantes, isto é

$$P_{mec} = \tau_{eixo}\omega_{mec}. \quad (2)$$

Entretanto, quando houver oscilação significativa no conjugado ou na velocidade angular durante o intervalo de tempo utilizado para calcular o valor médio, deve-se determinar o valor médio da potência mecânica de saída aplicando a definição de valor médio, da seguinte forma

$$P_{mec} = \frac{1}{T} \int_0^T \tau_{eixo}(t)\omega_{mec}(t) dt, \quad (3)$$

onde $\tau_{eixo}(t)$ e $\omega_{mec}(t)$ são o conjugado e a velocidade instantâneos e T é o período para determinação do valor médio.

A potência média de entrada da máquina elétrica pode ser definida de formas distintas dependendo do sistema elétrica do máquina. Se, por exemplo, a máquina for de corrente contínua de ímãs permanentes o valor médio da potência de entrada será determinado a partir

$$P_{motor-entrada-cc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_T(t)I_T(t) dt, \quad (4)$$

onde $V_T(t)$ e $I_T(t)$ são a tensão e corrente instantâneos nos terminais elétricos da armadura da máquina.

Se, por outro lado, a máquina for de corrente alternada monofásica alimentada por tensão senoidal da rede elétrica, a potência do motor será calculada por meio da seguinte expressão

$$P_{motor-entrada-ca-mono} = V_{rms}I_{rms}\cos(\theta). \quad (5)$$

sendo V_{rms} a tensão eficaz, I_{rms} a corrente eficaz e θ o ângulo elétrico entre a tensão e corrente.

Em uma máquina de corrente alternada trifásica alimentada diretamente da rede, a potência média de entrada pode ser calculada da seguinte forma

$$P_{motor-entrada-ca-tri-sen} = \sqrt{3}V_{Lrms}I_{Lrms}\cos(\theta). \quad (6)$$

onde V_{Lrms} a tensão eficaz de linha, I_{Lrms} a corrente eficaz de linha e θ o ângulo elétrico entre a tensão e corrente em uma fase da máquina.

É importante salientar, no entanto, que este trabalho se concentra na determinação do mapa de rendimento, que, por sua vez, implica em operar em amplas faixas da relação de conjugado por velocidade. Para a máquina poder operar em amplas faixas, é necessário que seja acionada por um conversor estático. No caso de máquinas elétricas trifásicas acionadas por inversores de frequência que utilizam modulação PWM, a tensão aplicada aos terminais da máquina não são mais senoidais e a equação 6 não pode mais ser aplicada para determinar o valor médio da potência de entrada. Cabe salientar que quando as máquinas de corrente alternada trifásicas são acionadas por inversores de frequência, a corrente pode ser considerada aproximadamente senoidal. Isso permite determinar a potência média considerando a componente fundamental da tensão V_{Lrms1} e o ângulo entre a componente fundamental da tensão de fase e a corrente de fase θ_1 da seguinte forma

$$P_{motor-entrada-ca-tri-inv} = \sqrt{3}V_{Lrms1}I_{Lrms}\cos(\theta_1). \quad (7)$$

Quando se deseja determinar a eficiência total η_{total} de um sistema de sistema composto por um inversor de frequência e a máquina elétrica, este pode ser determinado por

$$\eta_{total} = \frac{P_{motor}}{P_{inv}}. \quad (8)$$

onde P_{inv} é a potência de entrada média do inversor, discutida na Subseção 2.4.

Por fim, é importante destacar que a eficiência de um motor pode ser determinado por meio da equação (1). Entretanto, pode ser determinado também a partir das perdas, da seguinte forma

$$\eta_{motor} = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + P_{perdas}}, \quad (9)$$

onde P_{perdas} é a soma das perdas em um motor elétrico. Do ponto de vista da bancada, desenvolvida no contexto deste trabalho, não são realizadas medidas de perdas e a equação (1) é utilizada para determinação. Entretanto, é importante ter conhecimento qualitativo das perdas existentes em um motor elétrico, pois estas têm impacto no rendimento.

2.3 Máquinas elétricas e perdas

As perdas de potência do motor desempenham um papel vital no processo de design do motor, sendo elementos cruciais por diversas razões. Um exemplo altamente significativo é o potencial aumento considerável na temperatura dos enrolamentos, o qual pode comprometer substancialmente as características de desempenho do motor. Destaca-se que a maior parcela dessas perdas de potência convertem-se em energia térmica, demandando, assim, uma eficaz troca térmica do motor para o ambiente circundante. Como resultado, as perdas de potência exercem uma influência substancial na tomada de decisões relativas à escolha dos métodos de resfriamento necessários para assegurar que a temperatura do motor permaneça abaixo do limite máximo permitido e estabilize em regime permanente.

Em máquinas elétricas, a complexidade das perdas se desdobra em quatro categorias distintas: as perdas elétricas, também conhecidas como perdas ôhmicas, as perdas no núcleo, as perdas mecânicas e as perdas suplementares. Cada uma dessas categorias demanda uma abordagem específica no processo de otimização do design do motor, garantindo assim a eficiência global do sistema. Portanto, compreender e gerenciar essas diversas formas de perdas torna-se crucial para o desenvolvimento de motores elétricos de alto desempenho e eficiência.

As perdas elétricas correspondem à dissipação de energia na forma de calor devido à resistência elétrica do condutor em máquinas elétricas. Essas perdas resultam da corrente elétrica que percorre os condutores, enfrentando resistência ao movimento dos elétrons.

A equação fundamental que descreve as perdas elétricas P_{ele} em um enrolamento é dada por:

$$P_{ele} = I^2 R \quad (10)$$

Onde:

- P_{ele} é a potência dissipada nos condutores.

- I é a corrente eficaz que circula nos condutores.
- R é a resistência do condutor.

A relação I^2R destaca que as perdas no cobre aumentam de maneira quadrática com o aumento da corrente. Portanto, minimizar as correntes nos enrolamentos é uma estratégia eficaz para reduzir essas perdas.

Considerações importantes sobre as perdas elétricas incluem a escolha do material do condutor (geralmente cobre devido à alta condutividade), a influência da seção transversal do condutor nas perdas, o impacto da temperatura na resistência elétrica (com sistemas de resfriamento sendo empregados para controlar o aquecimento), o comprimento total do condutor, o design do enrolamento e a consideração das correntes de pico em máquinas. Minimizar as perdas elétricas é crucial para aprimorar a eficiência energética em máquinas elétricas, especialmente em contextos onde a eficiência é uma prioridade.

As perdas no núcleo são as perdas magnéticas e consistem nas perdas por histerese e por correntes parasitas que surgem devido a variação de densidades de fluxo no tempo durante a operação da máquina.

As correntes parasitas, frequentemente indesejáveis, consomem uma quantidade considerável de energia, transformando-a em energia térmica sem realizar trabalho útil. Nos motores elétricos, perda por correntes parasitas ocorre devido a correntes locais circulantes induzidas nos componentes condutivos do núcleo, resultando no aumento da temperatura. As correntes parasitas são influenciadas pela resistência elétrica dos materiais ferromagnéticos nos quais essas correntes circulam. Para reduzir a perda por correntes parasitas, tanto os núcleos do estator quanto do rotor são compostos por uma pilha de lâminas isoladas por materiais não condutores, como verniz ou óxido de metal. Essa estrutura em camadas impede a formação de grandes circuitos de corrente e confina efetivamente as correntes parasitas a pequenos circuitos em camadas individuais. A soma das correntes parasitas individuais em cada peça do núcleo laminado é muito menor do que aquela em um núcleo de ferro maciço. Além disso, a adição do elemento silício ao aço do núcleo aumenta a resistência elétrica, levando a uma diminuição adicional das correntes parasitas.

A histerese magnética ocorre em materiais ferromagnéticos quando um campo magnético externo alternado é aplicado a um material ferromagnético. Quando o campo

magnético muda subitamente sua orientação em relação ao material, os dipolos atômicos precisam se realinhar para acomodar essa mudança. Como o material ferromagnético tende a reter algum grau de magnetização, conhecido como histerese magnética, é necessário uma certa quantidade de energia para superar essa histerese e ajustar os dipolos atômicos de acordo com a mudança do campo magnético externo. As perdas por histerese dependem de vários fatores, incluindo a frequência da densidade de fluxo magnético, a densidade máxima do fluxo magnético, o material do núcleo de aço e a orientação do fluxo magnético em relação à estrutura de grãos do aço.

As perdas mecânicas podem ser definidas como perdas por atrito e ventilação.

Sempre que duas superfícies em contato apresentam movimento relativo, ocorre resistência por atrito entre elas. Essa força de atrito se opõe ao movimento relativo de dois corpos. As perdas por atrito não estão relacionadas à carga, mas dependem da velocidade da máquina.

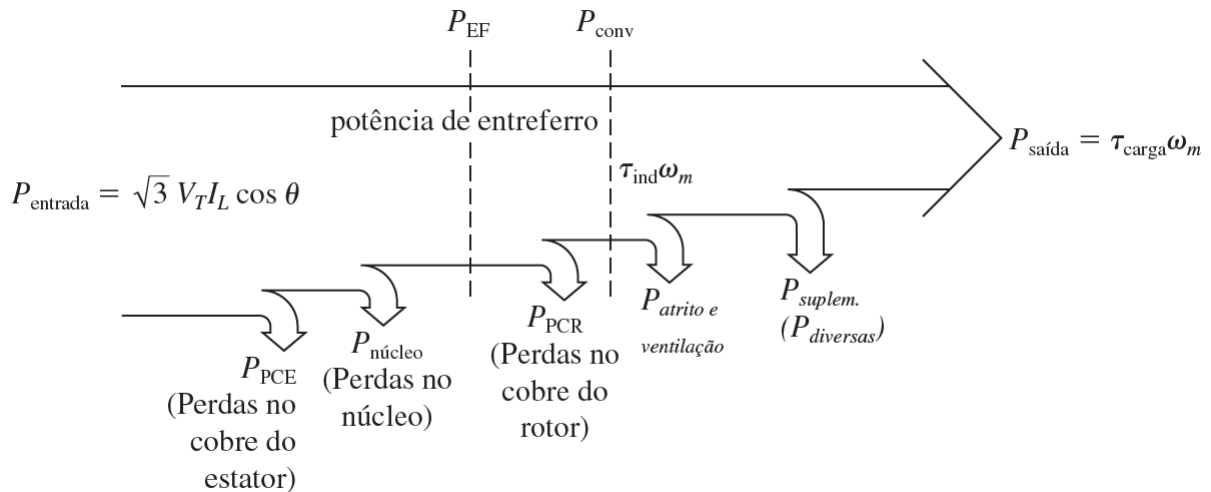
Para melhorar a troca térmica da máquina elétrica com o ambiente, é comumente empregado um sistema de arrefecimento que utiliza uma ventoinha acoplada ao eixo da máquina que força a passagem de ar por aletas na superfície externa do estator. A potência necessária para esse método de arrefecimento é suprido pela fonte elétrica da máquina quando esta opera como motor e isso compõe a principal parcela das perdas mecânicas por ventilação. Existe ainda uma parcela de perdas que é devido ao arrasto aerodinâmico do fluido (geralmente ar) que está no entorno da parte girante da máquina. A resistência ao movimento de um fluido resulta também em perdas de potência.

No caso de um motor com escovas, como um motor de corrente contínua, as escovas mantêm contato com o comutador para conduzir corrente às bobinas. Em geral, as perdas nas escovas compreendem duas partes: a resistência elétrica devido à resistência de contato na interface escova-comutador e a resistência elétrica através das escovas, geralmente de grafite. A perda de potência devido à resistência de contato depende da pressão de contato, área de superfície de contato, suavidade da superfície e condição de contaminação. A perda de potência I^2R é influenciada pelo material da escova e pela temperatura da escova.

As perdas suplementares consistem em perdas que se originam na distribuição não uniforme de corrente nos condutores e em perdas adicionais no núcleo, produzidas no ferro pela distorção do fluxo magnético devido à corrente de carga.

O fluxo de potência de como ocorrem essas perdas para a máquina de corrente alternada com funcionamento em modo motor é ilustrada pela Figura 11.

Figura 11 – Fluxo de perdas em máquinas elétricas para operação motor.



Fonte: Chapman (2013).

Na Figura 11, é visto um diagrama de fluxo que representa um caso geral, onde é considerado que ambos rotor e estator possuem perdas elétricas (identificadas no diagrama como "perdas no cobre" por se tratar do condutor mais comumente utilizado). Isso é comum em máquinas IM, mas as perdas elétricas no rotor não estão presentes em máquinas como PMSM, SynRM e SRM.

2.4 Conversores estáticos

Para o controle de máquinas elétricas de corrente alternada são utilizados conversores estáticos CC-CA ou conversores CA-CA, sendo os mais comumente empregados os conversores CC-CA do tipo fonte de tensão (também conhecidos na literatura como inversores). Estes conversores são formados por um conjunto de dispositivos semicondutores de potência e representados em diferentes configurações para atender a aplicação e requisitos desejados. Os dispositivos semicondutores empregados com maior frequência são os IGBT's (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*) e MOSFET's (*Metal-Oxide Silicon Field-Effect Transistor*).

O rendimento nominal nos conversores estáticos geralmente é alto, acima de 90%. Entretanto, pode variar bastante, especialmente para condições de baixa carga. Para aplicações como a veicular, na qual a operação ocorre em uma ampla faixa de conjugado e

velocidade, é importante ter o conhecimento do rendimento em toda a faixa de operação. O rendimento é afetado principalmente pelas perdas presentes nos dispositivos semicondutores de potência e as perdas podem ser divididas em perdas por condução e perdas por comutação

2.4.1 Eficiência em inversores

A eficiência em inversores é dada pela razão entre a potência de entrada P_{inv} e a potência de saída do inversor, ou seja, a potência de entrada do motor P_{motor} , da seguinte forma:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{motor}}{P_{inv}}, \quad (11)$$

A potência de entrada pode ser fornecida por um barramento CC, quando a fonte de energia é a partir de baterias. Quando se trata de um inversor industrial geralmente é realizada a conversão CA-CC-CA, e pode não se ter acesso para a medida da potência de entrada na conversão CC-CA. Quando este é o caso, pode-se considerar a potência de entrada em corrente alternada da rede elétrica, que geralmente é monofásica ou trifásica. Neste último caso, as perdas da conversão CA-CC (retificação) também são contempladas.

A potência de saída é a potência média fornecida ao motor P_{motor} , discutida na subseção 2.2. Quando a potência de entrada é fornecida por um barramento CC com tensão $v_{cc}(t)$ e corrente $i_{cc}(t)$ a potência de entrada para o cálculo de rendimento é dada pela Equação 12.

$$P_{inv-entrada} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{cc}(t) \cdot i_{cc}(t) dt, \quad (12)$$

onde T é o período utilizado para realizar o cálculo. Caso a tensão do barramento possa ser considerada constante e igual a V_{cc} durante o período T , a potência de entrada pode ser calculada por

$$P_{inv-entrada-cc} = \frac{V_{cc}}{T} \int_0^T i_{cc}(t) dt = V_{cc} \cdot I_{cc}, \quad (13)$$

onde I_{cc} é a corrente média no barramento CC.

Para entrada em corrente alternada monofásica a potência média de entrada do conversor pode ser determinada a partir da tensão $v_{ca}(t)$ e da corrente $i_{ca}(t)$ por meio da equação

$$P_{inv-entrada-ca-mono} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ca}(t) \cdot i_{ca}(t) dt. \quad (14)$$

Considerando que a tensão de entrada não tem distorção harmônica, mas que a corrente pode ter distorção (algo que comumente acontece), a potência média de entrada para o caso monofásico pode então ser determinada por

$$P_{inv-entrada-ca-mono} = V_{rms} \cdot I_{rms1} \cdot \cos(\theta_1), \quad (15)$$

onde V_{rms} é o valor eficaz da tensão senoidal, I_{rms1} é o valor eficaz da componente fundamental e θ_1 é o ângulo entre a tensão e a componente fundamental da corrente.

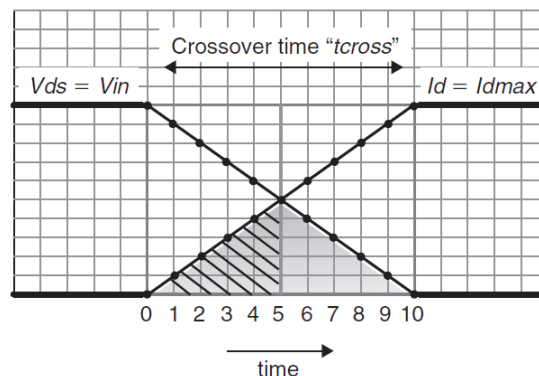
Quando a potência de entrada é a potência da rede elétrica trifásica, com tensão de linha senoidal que apresenta valor eficaz V_{Lrms} e valor eficaz da componente fundamental da corrente de linha I_{Lrms1}

$$P_{inv-entrada-ca-tri} = \sqrt{3} V_{Lrms} I_{Lrms1} \cos(\theta_1) \quad (16)$$

2.4.2 Perdas por comutação

Uma chave estática em estado de bloqueio ou condução tem a tensão ou corrente, respectivamente, através dele aproximadamente igual a zero. No entanto, durante a transição de estado de bloqueio para condução e vice-versa, ocorre sobreposição, ou seja, existe tanto tensão como corrente não nulas. Isso significa que, durante transição, nem a tensão nem a corrente estão simultaneamente próximas de zero. A potência dissipada durante essas comutações são as perdas por comutação. Os tempos em que ocorrem estas sobreposições são proporcionais a cargas e descargas das capacitâncias parasitas. Para ilustração a Figura 12 indica transição de um estado de bloqueio para condução durante o intervalo de tempo denominado "*t_{cross}*".

Figura 12 – Ilustração da sobreposição entre corrente e tensão em uma chave estática durante a transição de estado de bloqueio para condução.



Fonte: Maniktala (2012).

É importante destacar que as perdas por chaveamento são diretamente proporcionais à frequência de operação do dispositivo, pois, ocorrem a cada chaveamento realizado pela chave estática.

2.4.3 Perdas por condução

As perdas por condução ocorrem quando a chave opera no estado de condução, isto é, com tensão praticamente nula e corrente sendo conduzida pela chave. Em chaves estáticas como MOSFETs a impedância do estado de condução pode ser modelada como uma resistência elétrica geralmente denominada R_{DSon} . A potência dissipadas durante a condução podem então ser calculadas pela Equação 17, onde I_{rms} é a corrente eficaz no semicondutor durante o estado de condução.

$$P_{cond} = R_{DSon} I_{rms}^2 \quad (17)$$

As perdas por condução não dependem da frequência, mas dependem do ciclo de condução.

3 Descrição da bancada experimental

No presente capítulo é descrita a bancada experimental, desde sua montagem mecânica, passando para o sistema de acionamento até a aquisição de dados, alcançando assim, a possibilidade de avaliar a criação de mapa de rendimento de motores elétricos e inversores.

3.1 Montagem mecânica da bancada

Primeiramente, é necessário reproduzir um sistema mecânico formado por duas máquinas elétricas acopladas eixo-a-eixo com a possibilidade de mensurar o conjugado mecânico exercido entre elas. O setup mecânico deve ser montado para a execução com segurança, de forma robusta e adaptável a diferentes tamanhos de máquinas. Ele deve ser ajustado para que mantenha a integridade física dos equipamentos e instrumentos utilizados, para minimizar a inserção de ruídos mecânicos e vibração mensurados pelos instrumentos de medição e para garantir a integridade do operador.

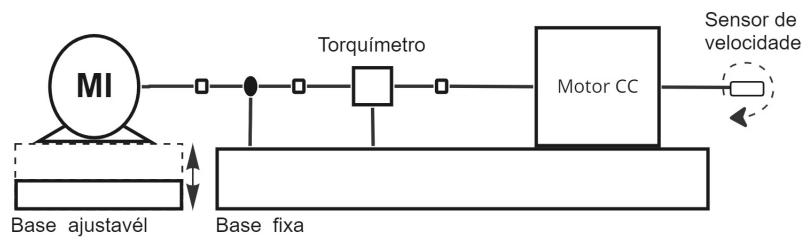
O setup foi montado de acordo com os equipamentos, instrumentos e dispositivos disponíveis no LMEAE. Dessa forma, a montagem mecânica foi realizada conforme ilustra a Figura 13. Os componentes mecânicos utilizados são três acoplamentos mecânicos flexíveis, um mancal com rolamento, torquímetro, máquina CC com sensor de velocidade (tacogerador) acoplado no eixo e bancada fixa, e motor de indução com base ajustável nos três eixos. Para facilitar a compreensão da montagem mecânica pode-se, dividi-la em três conjuntos unificados pelo eixo.

- O primeiro conjunto é a máquina CC com um sensor de velocidade acoplada ao eixo. O tacogerador está acoplado ao eixo desta máquina no lado oposto ao lado ao que está conectado no acoplamento com torquímetro. A máquina CC está presa fisicamente a uma base fixa, para ela possuir robustez para suportar as forças reativas exercidas durante os ensaios;
- O segundo conjunto é composto pelo torquímetro, o instrumento responsável por medir o conjugado mecânico entre os eixos das duas máquinas elétricas acopladas, mancal e acoplamentos. O primeiro acoplamento une a máquina CC ao torquímetro,

o segundo une o torquímetro ao mancal (que funciona como uma espécie de extensor do eixo) e o terceiro acoplamento une então o mancal ao motor de indução;

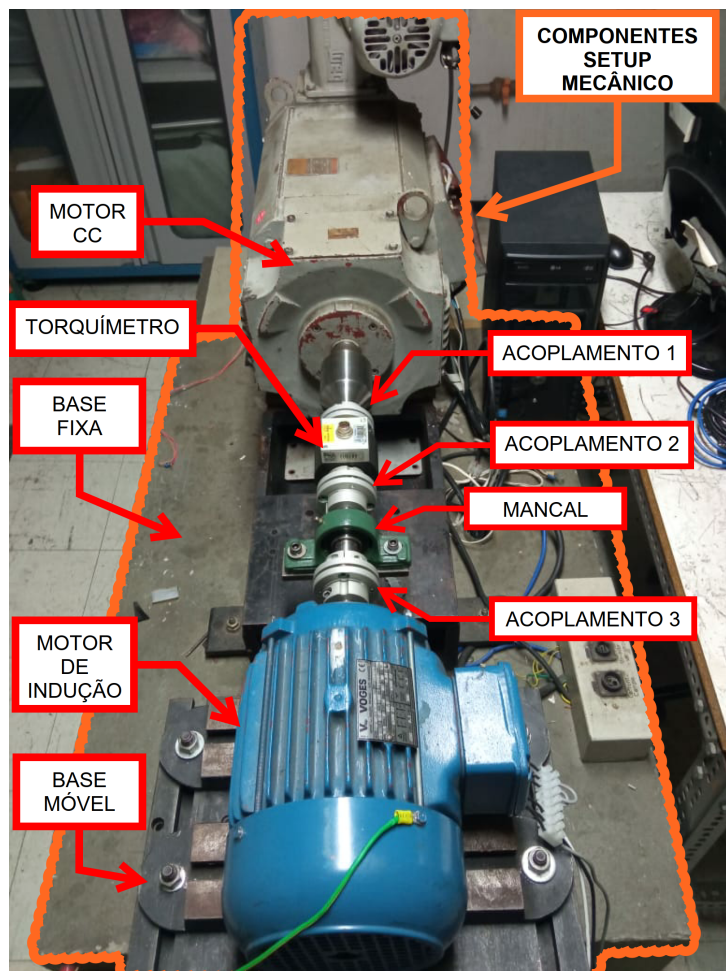
- O terceiro conjunto é o motor de indução com uma bancada móvel ajustável nos três eixos para facilitar a fixação com alinhamento de forma a reduzir vibrações mecânicas durante a realização dos ensaios;

Figura 13 – Layout representativo da estrutura mecânica montada.



Fonte: Autor.

Figura 14 – Fotografia da estrutura mecânica montada.



Fonte: Autor.

Montar este setup possui alguns desafios construtivos mecânicos como o potencial desalinhamento entre os eixos dos componentes e a conseqüente vibração gerada. O aumento do comprimento de centro do eixo, mesmo que com mancalização também potencializa o problema do desalinhamento, mas se fez necessário para possibilitar o acoplamento das máquinas nas suas respectivas bases.

As soluções encontradas para minizar a vibração foi por meio de ajustes de posicionamento do motor de indução na bancada móvel e por meio do uso de acoplamento flexíveis. Os ajustes foram fundamentais para correções de alinhamento e reduzir vibrações. Outro ponto a ser ressaltado, foi o uso de arruelas emborrachadas aos parafusos conectados a bancada fixa que contribuem de forma significativa na redução de vibrações. Para montagens futuras sugere-se minimizar a distância do acoplamento mecânico entre as máquinas.

3.2 Sistemas de acionamento

O experimento possui necessidade do controle de velocidade em uma máquina e de conjugado em outra máquina. Estes controles precisam ser realizados por dois sistemas independentes de acionamento. Um sistema de acionamento atua controlando a máquina CC como carga mecânica variável por meio do controle de conjugado. O outro sistema de acionamento é o da máquina a ser analisada, neste caso, o acionamento de uma máquina de indução que opera com controle de velocidade.

3.2.1 Acionamento como carga mecânica variável

Possuir o controle sobre a carga mecânica no experimento é o que permite trabalhar em diversos pontos da faixa de operação da máquina a ser ensaiada. A carga variável acoplada ao eixo pode ser reproduzida através do controle de conjugado na máquina CC. Esta máquina irá determinar os limites de operação do experimento em função de sua curva de rotação por conjugado. Neste projeto foi escolhido uma máquina CC para desempenhar esta função, cujos parâmetros estão na Tabela 1 .

No acionamento dessa máquina é utilizado o conversor CA/CC modelo CTW-900 da fabricante WEG, que pode realizar o controle nos quatro quadrantes de Conjugado versus Velocidade. A máquina CC utilizada tem excitação independente. O painel visto na Figura 16 ilustra o quadro e o *display* da IHM.

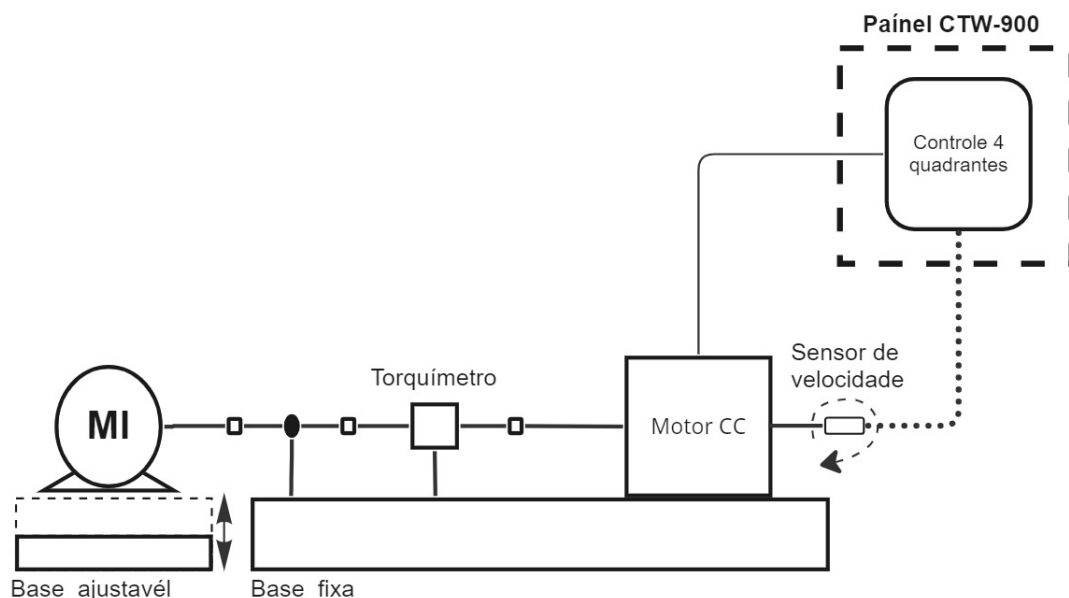
Tabela 1 – Parâmetros da máquina CC.

fabricante	Modelo
WEG	G 13-06
Potência	Regime
10 kW	S1
Tensão armadura	Corrente de armadura
150 V	66,7 A
Tipo	Excitação independente
150/12 V	4,46/0,6 A
Rotação	
900/3600 rpm	

Como a máquina CC tem velocidade de base de 900 rpm e pode operar com enfraquecimento de campo até 3600 rpm, é preciso operar nas duas faixas, uma vez que os ensaios requerem operação até 2200 rpm. Esse controle necessita de um sensor para *feedback* de velocidade acoplado ao eixo da máquina. O tacogerador tipo TCW20 foi instalado para esta função.

O layout que representa a conexão deste sistema na bancada é indicado na Figura 15 e o painel com IHM utilizada para acionamento visto na Figura 16.

Figura 15 – Layout representativo do acionamento da carga mecânica variável.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Painel e IHM do controlador CTW-900.



Fonte: Autor.

3.2.2 Acionamento da máquina a ser ensaiada

O acionamento da máquina a ser ensaiada na proposta do experimento deve variar de acordo com a topologia estudada. Diferentes topologias necessitam de modos específicos de acionamento para suas aplicações. A topologia da máquina escolhida foi a de um motor de indução de corrente alternada, com três fases e ligação em estrela. Para o acionamento foi utilizado um inversor de frequência trifásico com acesso ao barramento CC para medida de tensão e corrente.

A escolha da máquina utilizada para avaliação foi devido a disponibilidade no laboratório, por possuir estrutura mecânica compatível e disponível para realização do experimento, e pela disponibilidade de equipamentos para seu acionamento e controle no momento do desenvolvimento deste trabalho. Entende-se que para a aplicação veicular, onde este experimento tem grande relevância e motivação esta não é a topologia predominante empregada. Entretanto, para fins de estudo, a bancada possui as características necessárias para a realização dos ensaios que permitem determinar o mapa de rendimento das máquinas a serem analisadas.

Os principais parâmetros do motor escolhido para a realização dos ensaios estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros motor de indução.

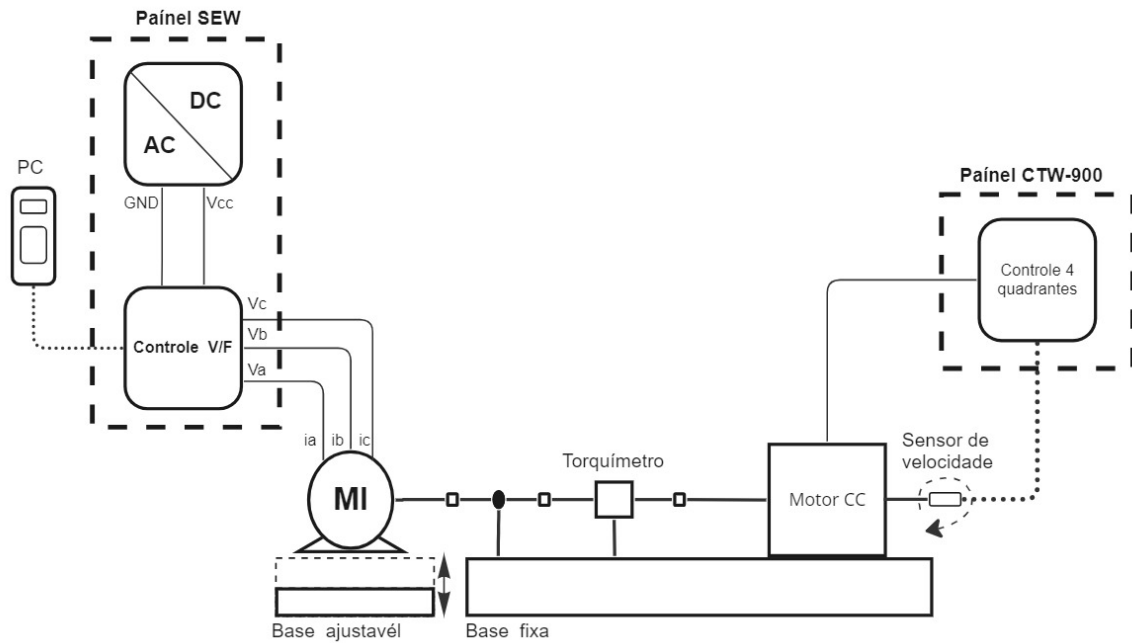
Fabricante	Modelo
VOGES	V 90 L4-E4699
Potência	Regime
2,2 kW	S1
Tensão linha	Corrente de linha
380 V	4,7 A
Rotação	Rendimento
1715 rpm	84%
FP	Fator de serviço
0,84	1,2

O acionamento do motor de indução é realizado por um inversor de frequência modelo MOVIDRIVE[®] MDX60/61B, fabricado pela SEW EURODRIVE. Este inversor possui possibilidade de controle vetorial e controle escalar do tipo V/F. Por questão de facilidade de implementação optou-se por utilizar o controle escalar para o projeto.

A interface homem máquina é realizada através da comunicação serial com o computador pelo software MOVITools MotionStudio[®]. Com ele enviamos novos valores desejados para a referência de velocidade, controle da partida e direção de acionamento.

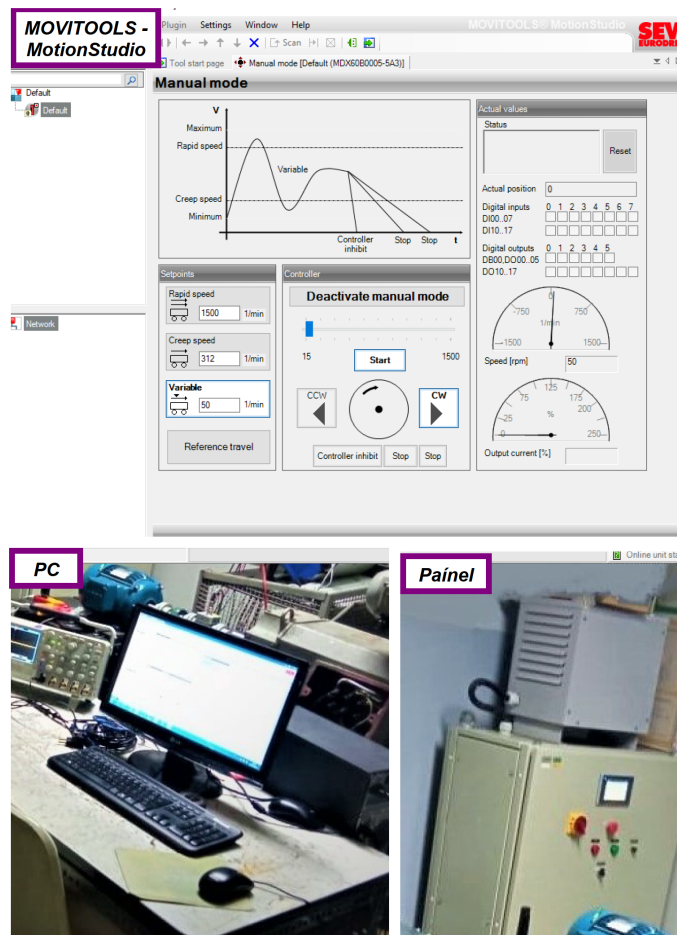
O layout que representa a elaboração deste acionamento é indicado na Figura 17, os blocos conversor CA/CC e controle V/F representam o inversor. O painel com o inversor e a IHM utilizada para acionamento são vistos na Figura 18.

Figura 17 – Layout representativo do acionamento motor de indução.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Interface IHM SEW.



Fonte: Autor.

3.3 Sistema de aquisição de dados

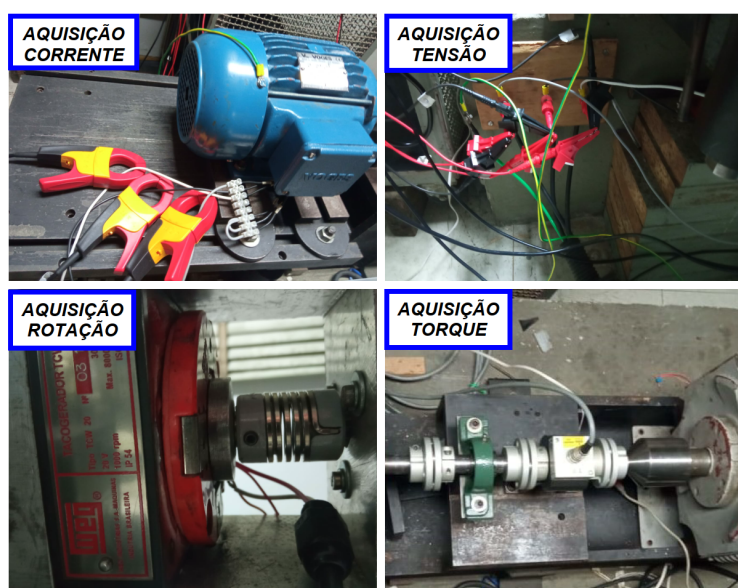
3.3.1 Instrumentos

Os instrumentos utilizados para medir as grandezas mecânicas de conjugado e rotação foram o torquímetro modelo *T22/50M* da fabricante HBM[®], com saída de ± 5 V para conjugado nominal de 50 Nm e rotação até 20000 rpm. Para rotação também foi utilizado o tacogerador *TCW20* da fabricante WEG[®], com rotação nominal até 8000 rpm.

Em ambos os instrumentos foi feita calibração com parâmetros de referência. Para o torquímetro foi realizada a curva de entre torque medido no canal configurado do equipamento Genesis da fabricante HBM[®] para diferentes pesos padrão fixados a um distância conhecida do eixo. O tacômetro digital modelo MDT-2245B, da fabricante Minipa[®], foi utilizado como referência entre o valor de tensão lido pelo Genesis e a velocidade medida. O Apêndice A contém as curva de calibração desses instrumentos. A calibração foi elaborada na mesma condição da operação do experimento, ou seja, todos os equipamentos estavam ligados. Dessa forma, é mensurado e considerada a influência da interferência eletromagnética (*Eletromagnetic Interference - EMI*) durante o processo de calibração.

Outros instrumentos foram utilizados no desenvolvimento do projeto para validar medidas, identificar falhas ou erros na criação do experimento como multímetro digital, ponteiros de alicate amperímetro e osciloscópio.

Figura 19 – Intrumentos e pontos de medição.



Fonte: Autor.

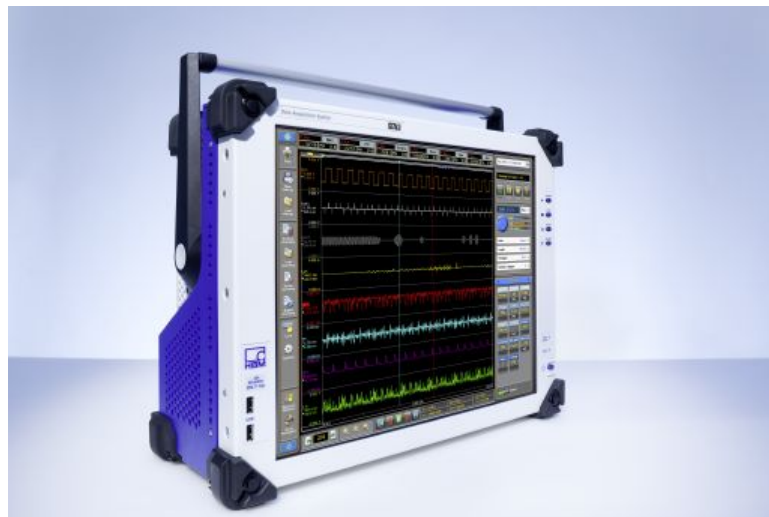
3.3.2 HBM Genesis[®] e Perception[®]

3.3.2.1 Hardware

O equipamento Genesis[®] é um sistema de aquisição de dados portátil que possui taxa de aquisição de dados até 1000 MSa/s. Este hardware opera em conjunto com o software HBM Perception[®] na aquisição de dados. O software permite a implementação de filtros analógicos e digitais, possibilita a customização de cálculos e gráficos, a utilizando em aplicações de tempo real que necessitam de alta taxa de amostragem e processamento.

O equipamento utiliza cartão de entradas diferenciais configuráveis que permitem conexão direta com tensões eficazes de até 600 V. O cartão possui 6 canais de entradas diferenciais balanceadas e isoladas, com *range* de tensão de entrada de ± 20 mV a ± 1000 V combinando faixas de alta e baixa tensão no mesmo cartão *all-in-one*. Os canais contém um amplificador com entrada independente, filtro digital selecionável entre Bessel, Butterworth e IIR Elíptico (Cauer), filtro anti-aliasing analógico Bessel ou Butterworth de 7 polos, conversor digital analógico de 18 bits, dentre outras funcionalidades.

Figura 20 – Sistema de aquisição de dados portátil HBM Genesis[®].



Fonte: HBM[®], 2014.

Para atender os requisitos de *hardware* do projeto, oito canais devem ser utilizados para realizar as medições. Para isso, foi necessário o uso de dois cartões para mensurar as variáveis base para os cálculos desenvolvidos em cada etapa dos ensaios. O equipamento fornece compatibilidades com outros modelos de cartões e instrumentos para implementação de outras funcionalidades não utilizadas na aplicação.

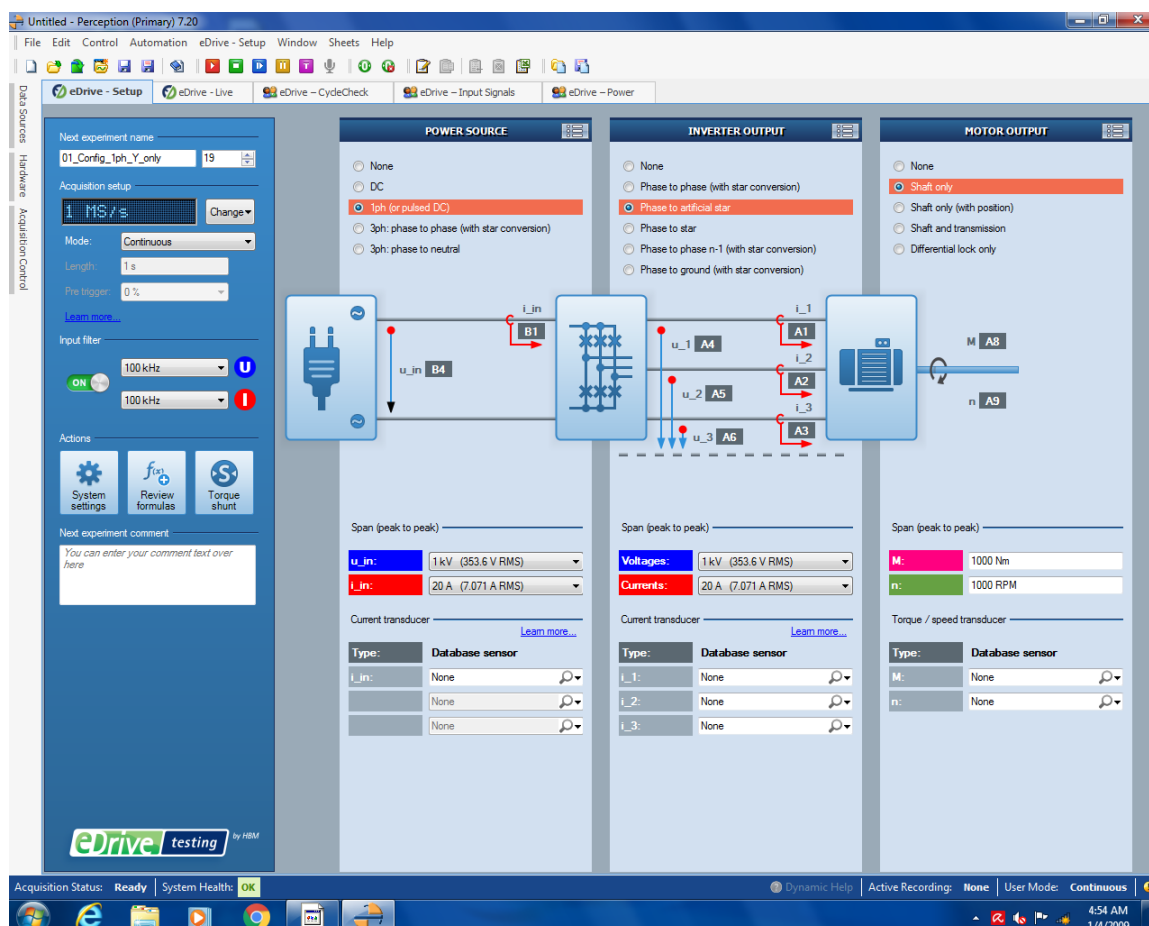
Figura 21 – Cartão de entradas diferenciais de 6 canais.



Fonte: HBM®, 2014.

3.3.2.2 Configuração do *eDrive Setup*

O software possibilita uma configuração intuitiva dos cartões e canais para a aplicação. Na aba *eDrive Setup* pode-se configurar a fonte de alimentação, a saída do inversor e a saída do motor. As configurações nos trazem como predefinições as formas de como realizar as conexões entre os canais e os circuitos, para um usuário ainda inexperiente seguir as orientações é o suficiente para o uso do equipamento. Na Figura 22, é mostrado um exemplo de configuração da interface na aba *eDrive Setup* durante o desenvolvimento do projeto. Ao criar o setup deve ser associado a cada canal um instrumento predefinido pela biblioteca *sensor database*.

Figura 22 – *eDrive Setup* do software *Perception*®.

Fonte: Autor.

3.3.2.3 Configuração dos canais do cartão de entradas

A desvantagem em escolher uma configuração predefinida é que o software não permite a customização de algumas áreas, como os cálculos realizados na aba *RTFormulas* e ou reconfigurar os canais utilizados. Como todos os campos são interligados ou possuem interdependências, quando são usadas configurações predefinidas ela bloqueia a edição de diversas funcionalidades dentro de cada área.

Dessa forma, como os sensores utilizados não possuíam equivalentes na biblioteca padrão *sensor database*, cada canal foi criado e configurado manualmente, onde foi possível renomear o rótulo associado ao canal, ajustar o range de operação, *offset* e aplicar filtro em hardware ao sinal. A interface para esta configuração é vista na Figura 23. Realizar essa configuração facilita para o operar a realizar o desenvolvimento de cálculos e análise da dados.

Figura 23 – HBM *Perception*® configuração dos canais.

Input	Signal coupling	Input coupling	Span	Offset	Technical units multiplier	Technical units offset
Basic - Voltage	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Group 1						
Recorder A	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch A1: Ch A1	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch A2: Ch A2	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch A3: Ch A3	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch A4: Ch A4	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Recorder C	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch C1: Ch C1	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch C2: Ch C2	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch C3: Ch C3	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch C4: Ch C4	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Recorder F	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V
Ch F1: Ch F1	DC	SE Positive	20 V	0 V	1 V/V	0 V

Fonte: HBM®, 2014.

3.3.2.4 Cálculos em tempo real

Existem duas formas de realizar cálculos e análise de dados. A primeira é em tempo real pela aba *RTFormulas* e a segunda é por meio da aquisição de dados para pós-processamento na aba *Formulas*. Cada uma possui suas vantagens e desvantagens. Manipular dados em tempo real possui diversos benefícios; entretanto, consome mais memória RAM disponível para realizar as operações de aquisição de dados. Realizar a avaliação posterior não traz a mesma agilidade, mas permite acesso uma quantidade maior de ferramentas de análise. Neste projeto, foi possível realizar todas as operações desejadas em tempo real, exceto pela criação dos mapas de rendimento, que foram produzidos em outra ferramenta com base nos dados de rendimento obtidos em tempo real.

Ambas as formas de cálculo possuem a mesma estrutura, elas são uma planilha de cálculo onde é possível criar constantes, além de criar e atribuir variáveis. Além disso, elas utilizam os canais a partir dos rótulos atribuídos com fonte de dados. Disponibilizam ainda um conjunto funções personalizadas que permitem o cálculo do valor médio e eficaz das variáveis.

O *scribript* de cálculo elaborado é apresentado no Apêndice B deste trabalho. Entretanto, a lógica aplicada pode ser sumarizada. Basicamente os cálculos descritos na Seção 2.2 são empregados para obtenção do valor médio e eficaz de tensões e correntes. Então o que deve ser realizado:

- Escolher um canal como fonte de dados.
- Determinar um período de ciclo como referência com base neste canal.
- Calcular os valores médios e eficazes das grandezas mensuradas no período definido.

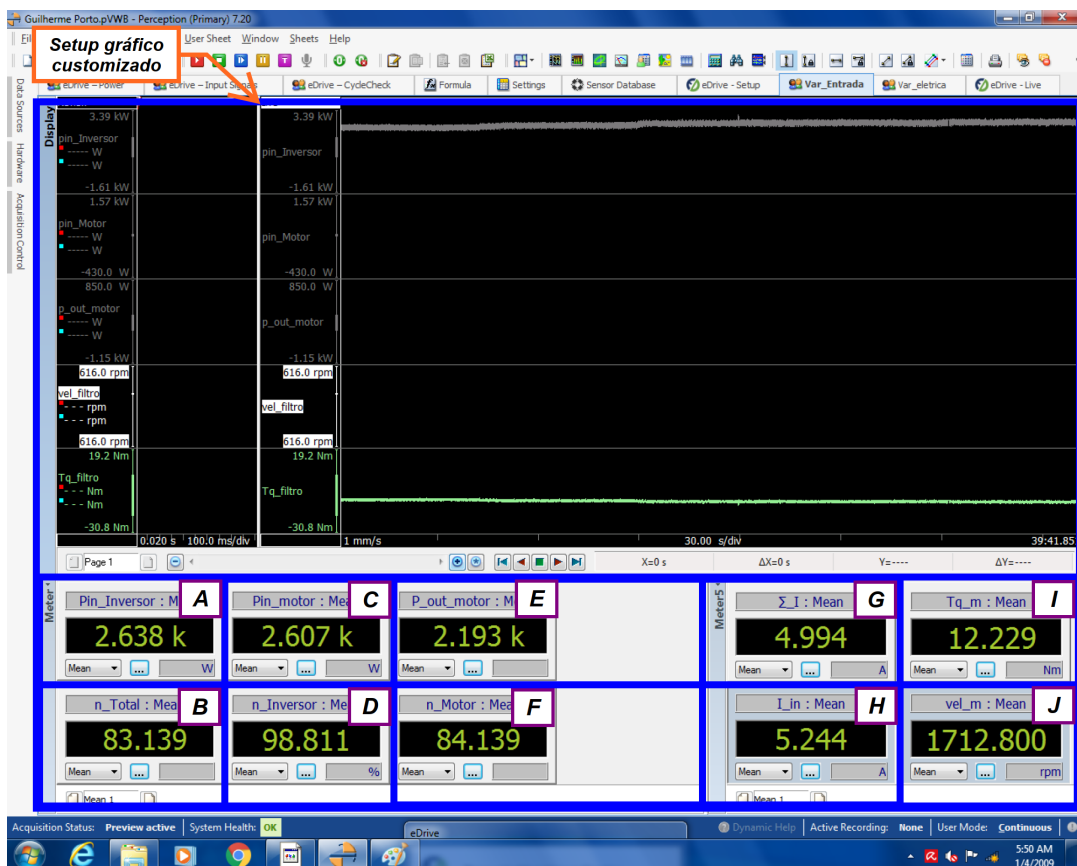
Após, compreender como o software cria os *scripts* de cálculo e configura os canais não é mais necessário a utilização das configurações predefinidas. Logo, todas as configurações no *eDrive Setup* foram setadas na opção *None*, no projeto criado para o experimento, os canais configurados de forma manual e o *script* de cálculo elaborado apresentado no Apêndice B. Nele também é possível visualizar, que foi aplicado aos sinais adquiridos filtro passa baixa *Butterworth* de ordem 3, onde a frequência de corte foi ajustada para obter a melhor relação entre minimizar o ruído e sem que ocorra a distorção

do sinal para cada uma das grandezas mensuradas, para redução do ruído presente na aquisição.

3.3.2.5 Visualização em tempo real

A última componente da aquisição de dados é a visualização personalizada onde o *Perception* permite criar a interface desejada a partir de uma variedade grande de objetos para visualizar dados como *display* de forma de onda no tempo, *display spectral*, *display-XY*, *display* numérico, tabelas, imagens e vídeos. Cada variável criada pelo usuário e outras criadas pelo sistema podem ser acessadas e informadas nos objetos. O *setup* criado, visualizado na Figura 24, contém *displays* de forma de onda no tempo e *displays* numéricos. A análise temporal dos dados foi utilizada para acompanhar a operação dos ensaios, aquisição bruta de sinais, calibração de sensores, validação da configuração de canais e monitoramento de falhas. Através dos *displays* numéricos foram organizados os dados de saída de interesse no monitoramento e desenvolvimento do ensaio de rendimento, e posterior aquisição. A legenda dos campos é identifica na Tabela 3.

Figura 24 – *Setup* customizado de visualização de dados.



Fonte: Autor.

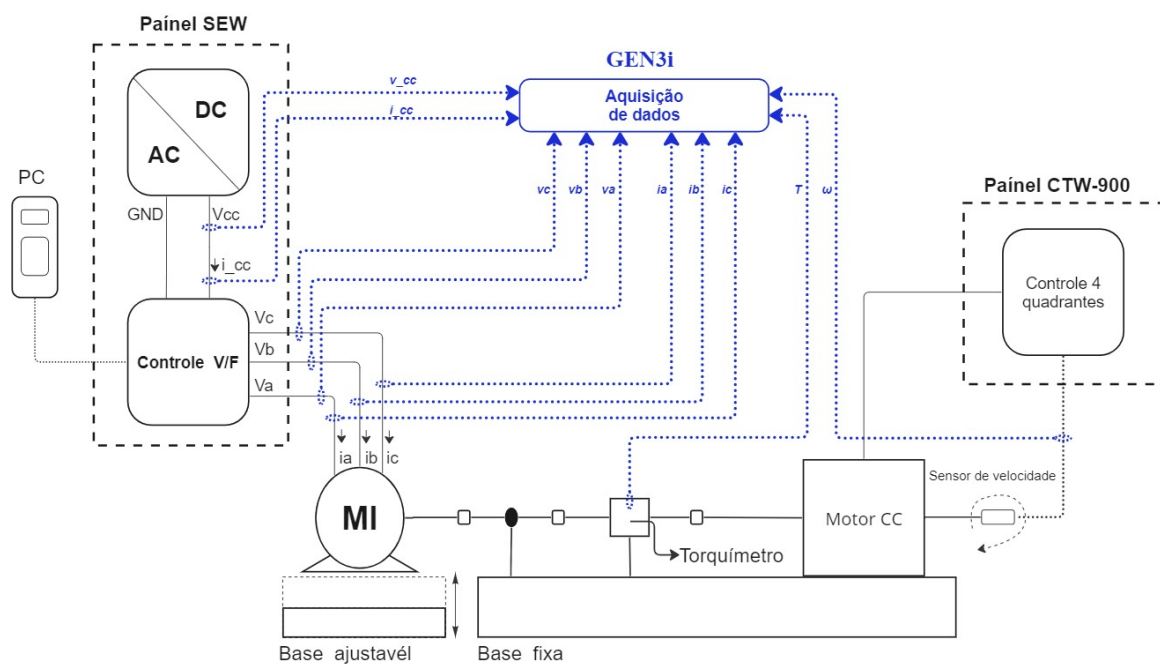
Tabela 3 – Legenda para os campos dos *displays* numéricos.

A	Potência de entrada	kW
B	Rendimento total	%
C	Potência no inversor	kW
D	Rendimento inversor	%
E	Potência mecânica	kW
F	Rendimento motor	%
G	Corrente de fase	A
H	Corrente no barramento CC	A
I	Conjugado	Nm
J	Rotação	rpm

3.4 Sistema completo e bancada montada

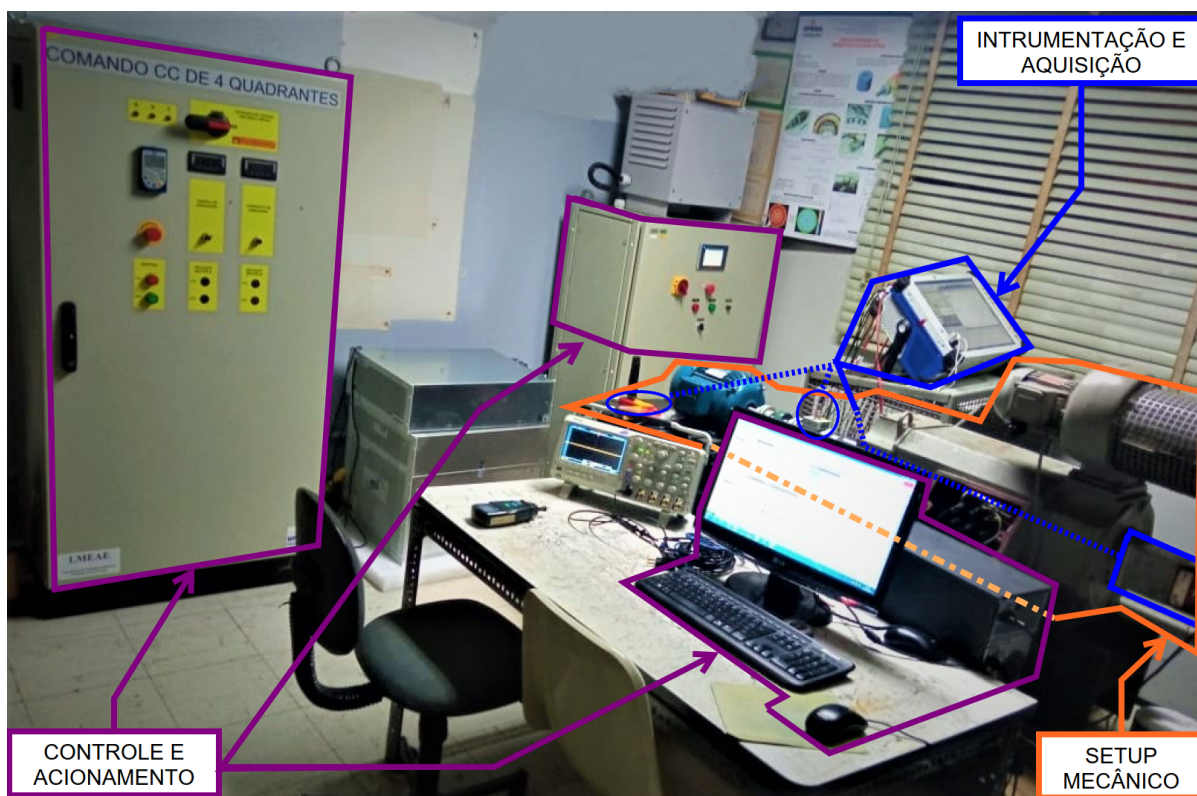
Os dados mensurados no experimento são respectivos a potência de entrada no inversor, potência de saída do inversor e potência mecânica. A potência de entrada do inversor é mensurada após passar pelo circuito de retificação trifásico, pela tensão contínua v_{in} e corrente contínua i_{in} presente no barramento. A potência de saída do inversor é obtida a partir das tensões v_a , v_b , v_c e correntes i_a , i_b , i_c de fase. A potência mecânica é determinada pela velocidade angular ω e torque τ no eixo. A representação da bancada com a montagem mecânica, sistemas de acionamento e aquisição de dados é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Layout da bancada com sistema de aquisição de dados.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Bancada criada com todos os sistemas montados.



Fonte: Autor.

4 Descrição dos ensaios

Neste capítulo - são descritos os processos e procedimentos aplicados na realização dos ensaios e são descritas as limitações impostas.

4.1 Procedimentos realizados

4.1.1 Controle da carga variável

O controle da carga variável foi realizado pela IHM através do painel do conversor CTW-900. Com ele ativado é informado no *display* do painel a mensagem que indica parâmetros da operação atual do motor, vista na Figura 16. Na primeira linha informa a velocidade atual, na segunda linha a tensão de armadura e a na terceira linha a corrente de armadura.

Segundo o manual do fabricante do conversor CTW-900, o conjugado da máquina CC T_{cc} é linearmente proporcional à corrente de armadura até a rotação nominal e acima da rotação nominal deve ser incluído um fator de correção proporcional a rotação atual da máquina. A Equação (18) refere-se a como é feito o cálculo de conjugado para máquina CC quando opera em sua região linear e a Equação (19) expressa como é feito o cálculo do conjugado quando opera na região não linear.

$$T_{cc-Linear} = \frac{I_{aATUAL}}{I_{aNOMINAL}} 100\% \quad (18)$$

$$T_{cc-Nao-Linear} = \left(\frac{I_{aATUAL}}{I_{aNOMINAL}} \right) \frac{Rot_{NOMINAL}}{Rot_{ATUAL}} 100\% \quad (19)$$

A partir das equações 18 e 19 que expressam como é determinada a referência de torque da máquina CC é possível verificar se existe a possibilidade dela operar nas mesmas condições nominais de operação da máquina de ensaio.

As Tabelas 1 e 2 fornecem os dados nominais, respectivamente, para o motor CC e MI. Com isso, é possível constatar que a máquina CC é de maior porte com potência nominal de 10 kW, enquanto o MI possui 2,2 kW. Entretanto, as curvas de velocidade e torque não são proporcionais em toda a sua região linear, visto que, velocidade nominal do

motor de indução é 1715 rpm, isto é, acima da rotação nominal do motor CC de 900 rpm. O critério adotado para realizar essa análise é verificar se corrente atual I_{aATUAL} no motor CC está abaixo da sua corrente nominal informada pelo fabricante quando operando em sua região linear, e em sua zona de enfraquecimento de campo na condição nominal da MI.

O conjugado nominal de cada máquina pode ser calculado com a Equação (??) aplicando os dados nominais de potencia e rotação de cada máquina. Assim, com potência nominal de 10 kW e rotação de nominal 900 rpm, pode-se calcular o conjugado nominal da máquina CC, então, é obtido um valor de aproximadamente 106,1 Nm, superior ao torque de aproximadamente 12,25 Nm de operação nominal do motor de indução. Para a região linear é viável a aplicação do motor CC.

Quando em operação dentro da faixa com enfraquecimento de campo e na condição nominal da MI, calculou-se a corrente de armadura I_{aATUAL} na máquina CC para para essa operação isolando-a na Equação (19).

$$I_{aATUAL} \approx 16,5A. \quad (20)$$

Com a corrente calculada menor que a corrente nominal do motor, o motor CC tem a sua faixa de operação validada para uso como carga variável para o motor de indução escolhido no teste quando aplicado o controle por efeito de campo pelo conversor independentemente de operar na região linear ou não linear.

A referência de entrada para operar com conjugado de carga desejado é dada pela corrente de armadura, que é ajustada com o potenciômetro no painel pelo operador.

4.1.2 Controle do motor de indução

A interface de controle com software *MOVITOOLS MotionStudio*[®] utiliza comunicação serial entre o computador e inversor para configuração de parâmetros, modos de operação e visualização de dados. Ao iniciar um projeto o software identifica com qual modelo de inversor está comunicando, faz a leitura dos parâmetros de configurações atuais e disponibiliza ao usuário a visualização destes parâmetros e edição se necessário. Quando inicia a operação são setados manualmente os parâmetros de velocidade e corrente do motor a ser operado, então as travas e alarmes de segurança do inversor operam corretamente. Também ocorre a leitura das resistências e indutâncias do motor, com estes parâmetros

adquiridos é realizado o controle *sensorless* do motor sem a necessidade de realimentação de sensor de velocidade.

O modo de operação setado como manual, permite o controle pelo usuário com o computador através da interface, vista na Figura 18. Isso possibilita o ajuste de início e pausa da máquina, sentido de rotação e insira os valores de referência de velocidade conforme desejado.

4.2 Implementação da grade de pontos

Para reproduzir o mapa de rendimento é necessário obter a eficiência da máquina em análise para diferentes pontos de operação. Os pontos do gráfico onde o eixo x representa a rotação ω , geralmente expressa em rpm, e o eixo y representado pelo conjugado T , expresso em Nm. Então, o primeiro passo foi identificar o range de análise para o conjugado e a rotação com base nos parâmetros nominais contidos na Tabela 2. Assim, estipulou-se a rotação mínima $\omega_{mín}$, rotação máxima $\omega_{máx}$, e o intervalo $\Delta\omega$. De forma análoga estipulou-se o torque mínimo $T_{mín}$, torque máximo $T_{máx}$, e o intervalo ΔT com sua descrição indicada na Tabela 4.

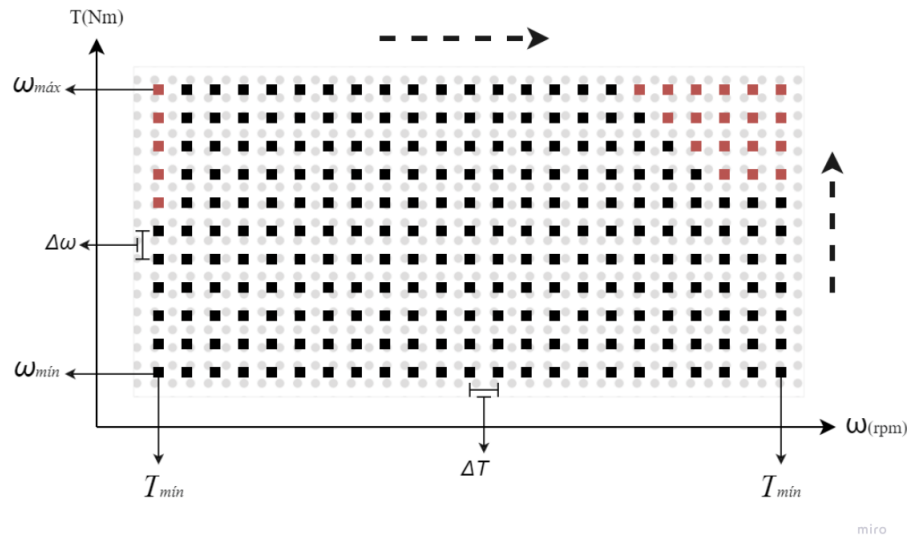
Tabela 4 – Parâmetros para criação da grade de pontos.

$\omega_{mín}$	$T_{mín}$
100 rpm	2 Nm
$\omega_{máx}$	$T_{máx}$
2200 rpm	12 Nm
$\Delta\omega$	ΔT
100 rpm	1 Nm

Com isso, forma-se uma grade de 22x11 pontos, com total de 242 pontos para representação do nosso resultado. A escolha da formação da grade foi baseada na tentativa de explorar a faixa de conjugado até seu valor nominal, com o delta de 1 Nm, devido a resolução do torquímetro possibilitar uma boa diferenciação para esse valor. Ao explorar a rotação o delta escolhido foi de 100 rpm, por ser um múltiplo do primeiro ponto e possibilitar uma quantidade considerada apropriada de ponto até o valor máximo analisado de 2200 rpm, superior ao valor nominal especificado para a rotação. Outro fator importante na escolha do intervalo entre os pontos - foi o tempo para execução dos ensaios, pois este aumenta com a quantidade de pontos. O próximo passo é realizar os procedimentos necessários para acionamento das duas máquinas de forma controlada. Separados em dois

métodos, um para a partida do sistema e outro para agilizar a troca entre um ponto e outro de operação.

Figura 27 – Grade de pontos ponto formada para criação de mapa de rendimento.



Fonte: Autor.

4.2.1 Partida do sistema

Como este é um ensaio longo e possui algumas limitações, abordadas na subsecção 4.3, foi necessário realizar algumas paradas durante a execução dos ensaios. Cabe destacar que a elaboração de um método rápido e ágil para retomar a operação desejada torna-se importante para poder alterar o ponto de operação. Relembrando, a velocidade é setada pelo computador através da IHM descrita na secção 4.1.2 e o ajuste do conjugado na secção 4.1.1. Essas grandezas são monitorados durante os ensaios pelo *setup* de visualização representado na Figura 24. Na partida do sistema deve-se realizar os seguintes procedimentos:

- Iniciar com as travas de segurança desabilitando as saídas de velocidade e conjugado. Com a intenção de proteger para uma possível configuração equivocada no próximo passo;
- Configurar a velocidade e conjugado inicial como zero;
- Habilitar a saída de velocidade da MI;
- Setar a velocidade desejada;
- Habilitar a saída para controle da carga com a máquina CC;

- Ajustar gradualmente o conjugado desejado de forma a evitar picos de corrente e impactos bruscos na estrutura mecânica devida a uma alteração repentina na carga;
- Pronto para aquisição;

Com a execução dos passos para a partida dos sistema nessa ordem, até o primeiro ponto desejado, torna-se mais segura e ágil a operação.

4.2.2 Alteração do ponto de operação

Ao alterar entre um ponto e outro, observou-se que variar a carga mantendo a velocidade fixa trouxe mais agilidade ao processo. Então, os passos executados foram os seguintes.

- Início em um ponto $P(\omega_i, T_j)$;
- Ajustar gradualmente o conjugado desejado até o próximo ponto $P(\omega_i, T_{j+1})$ de forma a evitar picos de corrente e impactos bruscos na estrutura mecânica devida a uma alteração repentina na carga;
- Pronto para aquisição de $P(\omega_i, T_{j+1})$;
- Agora, para os próximos pontos também devem ser mantido o reajuste na carga até o ponto $P(\omega_i, T_{j\approx máx})$, mantendo a mesma rotação ω_i ;
- Ao finalizar a aquisição para uma rotação ω_i realizar a redução na carga;
- Com carga reduzida, setar a velocidade desejada;
- Fazer o mesmo procedimento de variar a carga de T_j à $T_{j\approx máx}$ para a rotação escolhida;
- Novamente reduzir a carga para troca de velocidade;
- Reproduzir os passos até a finalização do experimento em $P(\omega_{i\approx máx}, T_{j\approx máx})$;

Entretanto, durante a execução do experimento não foi possível operar nos 242 pontos desejados. Isso se deva à escolha de limitar a corrente para valores ligeiramente superiores ao valor nominal e devido ao uso do controle V/F, que não permitiu impor valores de conjugado próximos ao nominal na faixa de 100 rpm.

4.3 Limitações

No desenvolvimento do projeto diversas dificuldades foram encontradas e solucionadas; porém, algumas soluções adotadas não foram escolhas que impactaram no melhor de desempenho ao experimento o que resultou em algumas limitações na sua execução. Outras foram causadas pela própria característica da aplicação. Os detalhes das limitações são pontuados, conforme segue:

- A diferença de porte entre as máquinas, como a curva de operação possui uma diferença significativa. Onde para a MI possui potência nominal 2,2 kW operando com rotação nominal de 1715 rpm e a máquina CC de 10 kW com 900 rpm nominal. O controle do conjugado para baixas velocidade se mostrou instável, assim, o início da velocidade analisada foi em 100 rpm;
- Outro ponto que resultou em limitações especialmente em baixa velocidades foi o método de controle escolhido para o controle do MI. Utilizar o método de controle V/F limitou a capacidade de operar em baixa velocidade ao elevar a carga. Esse método foi escolhido pois não foi possível instalar e configurar o sensor de velocidade no sistema que envia o sinal de *feedback* para aplicar o controle vetorial em malha fechada;
- Ao operar com velocidades elevadas, o controle não foi a limitação, mas sim a corrente de fase máxima. Não foi objetivo explorar os limites do fator de serviço do MI; então, os pontos utilizados como limites de operação foram os primeiros ao ultrapassar a corrente de fase nominal do MI. Como uma abordagem conservadora para manter a integridade do MI;
- Um fator limitante geral foi o método para criação da grade pontos, o que limita a quantidade de pontos a serem coletados devido ao tempo de execução elevado.

5 Resultados e discussões

Neste capítulo - são apresentados os resultados numéricos e gráficos coletados a partir do desenvolvimento da bancada. Também é discutida a influência das zonas de operação não lineares próximos aos limites de operação testados.

5.1 Verificação do desenvolvimento da bancada

Os resultados coletados operando na condição nominal da máquina podem ser vistos na Figura 25 e foram reagrupados na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos para condição nominal.

Potência de entrada	2,638 kW
Rendimento total	83,14 %
Potência no inversor	2,607 kW
Rendimento inversor	98,81 %
Potência mecânica	2,193 kW
Rendimento motor	84,14 %
Corrente de fase	4,99 A
Corrente no barramento CC	5,24 A
Conjugado	12,229 Nm
Rotação	1712,8 Nm

Para esta condição foi obtido para a eficiência global do sistema n_t igual a 83,14%, a eficiência no inversor n_{inv} igual a 98,81%, e eficiência no motor n_{motor} igual a 84,14%. A corrente no barramento CC i_{in} igual a 5,24 A e corrente de fase i_θ igual a 4,99 A. Esses resultados demonstram-se coerentes de forma qualitativa onde no fluxo de potência do sistema possui consumo na entrada maior que na saída, condizente com máquina de indução na operação como motor.

Para verificar o desenvolvimento da bancada e o *setup* implementado de forma quantitativa, na Tabela 6 - são comparados os dados nominais informados pelo fabricante na placa de identificação do motor com os resultados coletados no experimento para a condição nominal informada.

A partir da comparação realizada, é verificado que para os parâmetros analisados a diferença percentual para cada parâmetro avaliado em módulo é pequena, com a maior

Tabela 6 – Comparação entre dados de identificação nominais e resultados da operação nominal do motor.

Parâmetros	Placa de identificação	Operação nominal	diferença (%)
Rendimento motor	85,0 %	84,139 %	1,01 %
Potência mecânica	2,2 kW	2,193 kW	0,31 %
Corrente de fase	4,7 A	4,99 A	-6,17 %
FP	0,84	0,83	1,19 %
Torque	12,249 Nm	12,229 Nm	0,16 %
Rotação	1715 rpm	1712,8 rpm	0,12 %

taxa de divergência de 6,17% em módulo para a corrente de fase. Para a eficiência no motor apenas 1,01%. Dessa forma, é possível verificar que os dados coletados a partir da bancada e experimento proposto para gerar mapas de eficiência, neste trabalho, podem ser considerados apropriados.

5.2 Apresentação dos mapas de rendimento

Os resultados gerados na criação de mapas de rendimento através do desenvolvimento deste projeto podem ser visualizado na Figura 28 para o mapa de rendimento do motor, na Figura 29 para o mapa de rendimento do inversor e na Figura 30 para o mapa de rendimento do sistema global.

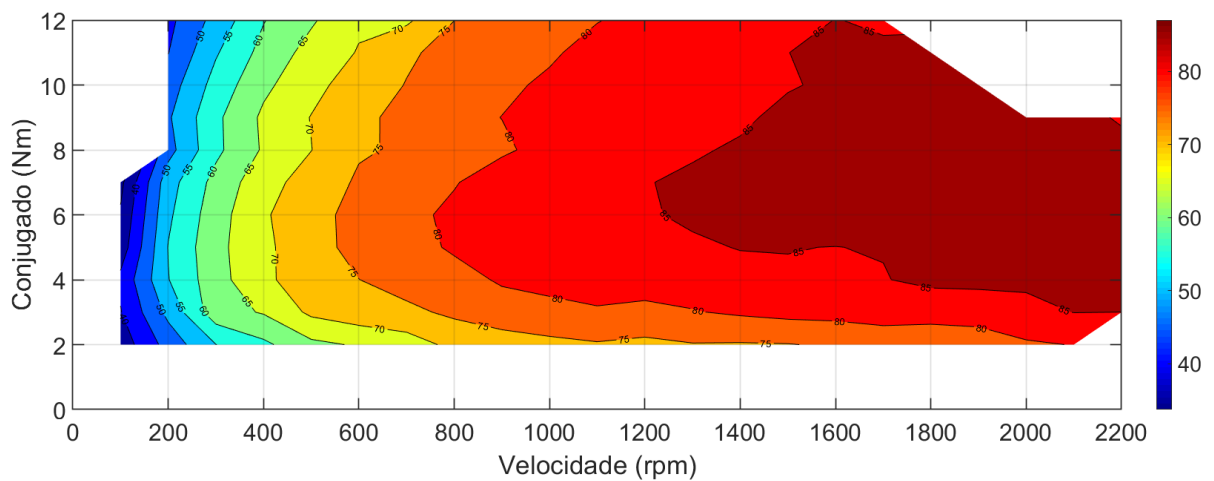
O mapa criado na Figura 28 para a máquina possui comportamento das curvas de nível semelhante ao visualizado na Figura 5 para uma máquina de indução, com escala e range de operação especificado na Tabela 4. Nela é possível observar para as condições testadas na faixa avaliada a eficiência em baixas velocidades é menor que em velocidades mais elevadas.

Para as regiões de operação entre 4 Nm e 12 Nm e rotação entre 1600 rpm e 2200 rpm, o rendimento na máquina é acima de 85%, maior que o especificado pelo fabricante na condição nominal, tornando este a região de melhor eficiência da máquina.

O mapa de rendimento do inversor visto na Figura 29 possui as curvas de contorno com comportamento não muito bem definido como a máquina de indução, onde é possível visualizar regiões de maior eficiência dentro de regiões de menor eficiência. A explicação para o comportamento do rendimento do inversor pode estar relacionada a imprecisão da medição das grandezas de tensão e corrente, uma vez que as curvas de nível para regiões de operação com mais elevada carga ocorrem com valores muito próximos. Adicionalmente,

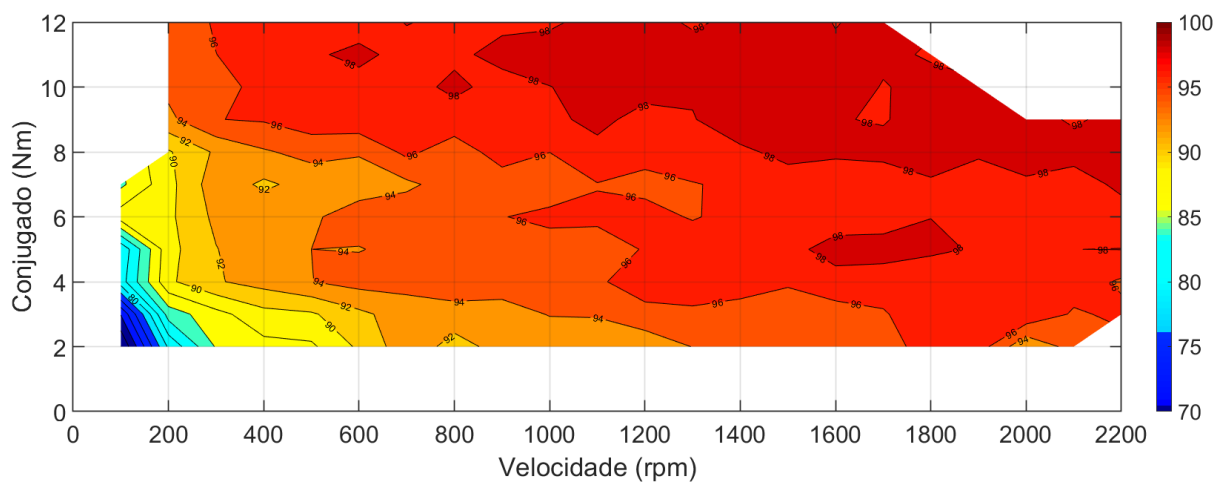
é importante pontuar que a potência nominal do inversor nominal é de 20 kVA, ou seja, o equipamento está operando a 10% da sua carga nominal e ainda inferiores a este. Entretanto, como o esperado os valores absolutos são mais elevados em comparação a máquina de indução. Nela é possível verificar que para velocidade acima de 400 rpm a eficiência é superior à 90%.

Figura 28 – Mapa de rendimento do motor.



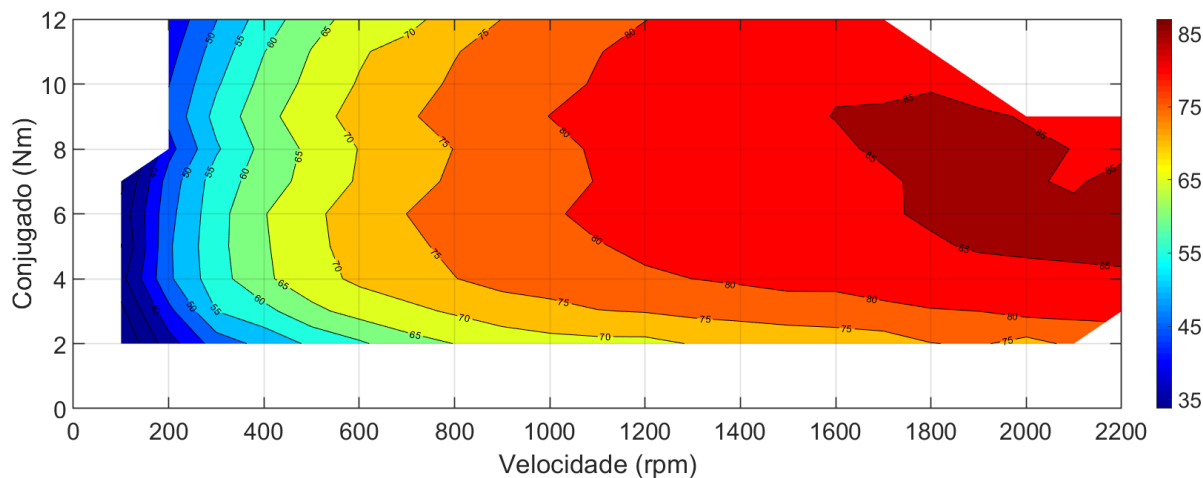
Fonte: Autor.

Figura 29 – Mapa de rendimento do inversor.



Fonte: Autor.

Figura 30 – Mapa de rendimento global.



Fonte: Autor.

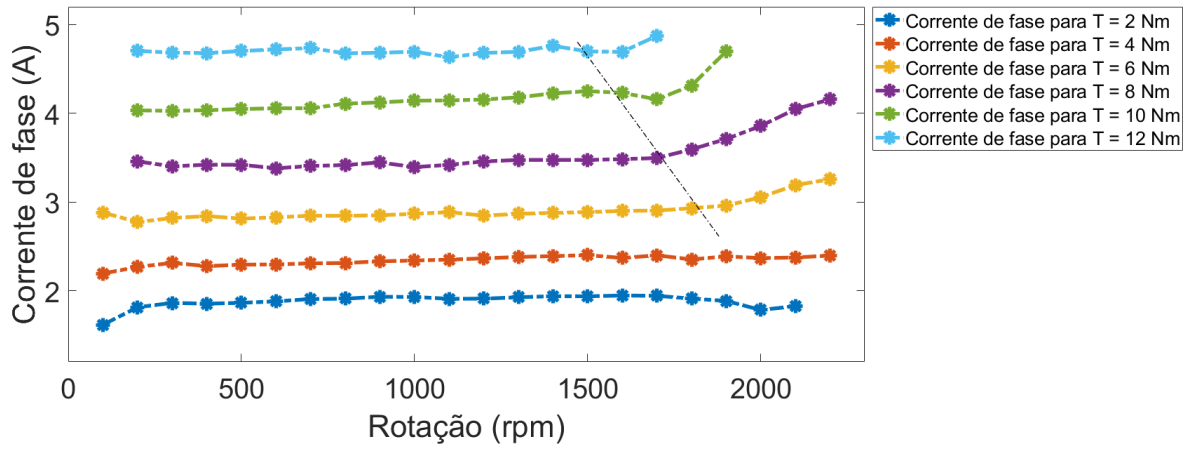
O resultado para o mapa de rendimento global do sistema é visto na Figura 30, com ele podemos ver que as curvas de níveis continuam bem definidas, em comparação as curvas da máquina de indução. Como resultado das perdas no inversor ocorre uma redução das áreas de maior rendimento. Assim, para o sistema global a região de melhor eficiência torna-se entre 6 Nm e 10 Nm e rotação entre 1700 rpm e 2200 rpm.

Alguns pontos da grade não foram possíveis de serem atingidos. Na secção 5.3, serão discutidos alguns fatores que influenciaram nestes resultados.

5.3 Zonas não lineares e restrições

A análise do comportamento da corrente de fase do motor durante os experimentos é feita, na Figura 31, para curvas onde o torque é constante e feita variação da rotação entre 100 rpm e 2200 rpm. Dessa forma, é possível verificar que a corrente permanece constante ao variar a rotação e manter um conjugado constante até 1700 rpm para todas as curvas de conjugado. Ao passar desta rotação, é possível verificar um aumento de corrente para curvas com conjugado a partir de 6 Nm. O que indica que para estes pontos o motor esta operando em uma região de enfraquecimento de fluxo, o que requer maiores níveis de corrente para manter o torque constante, uma vez que a frequência é aumentada para valores acima da nominal e a tensão é mantida no seu valor nominal. Para curvas abaixo não foi possível verificar este início de operação não linear para velocidades de até 2200 rpm, mas deve ocorrer em maiores velocidades.

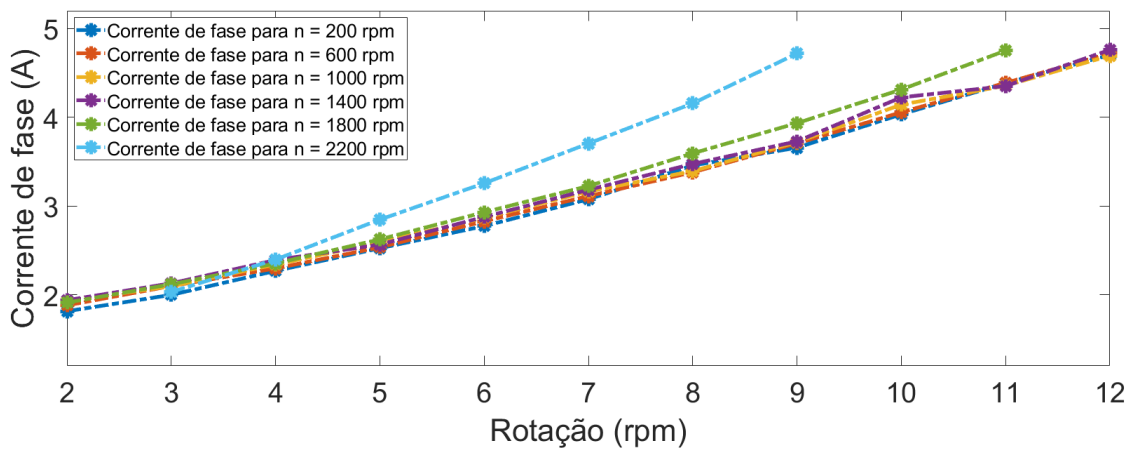
Figura 31 – Corrente de fase para conjugado constante.



Fonte: Autor.

Também é feita a análise da corrente de fase, na Figura 32, para curvas com velocidade constante e com a variação de conjugado entre 2 Nm e 12 Nm. Nessa outra análise, para as curvas até 1600 rpm é possível identificar que elas possuem comportamento semelhante, ou seja, com a mesma inclinação, estando praticamente sobrepostas umas as outras para toda a faixa analisada. A curva com velocidade de 1800 rpm possui a mesma inclinação que as curvas com velocidades inferiores até 4 Nm e após esse valor a taxa com que a corrente cresce começa a aumentar para alcançar o conjugado desejado. O que indica o início da operação na zona de não linear. Por fim, na curva de 2200 rpm, é mais evidente e acentuado esse aumento da taxa de incremento de corrente para manter o conjugado constante a partir de 4 Nm.

Figura 32 – Corrente de fase para rotação constante.



Fonte: Autor.

Como mencionado na Seção 4.3 uma das restrições impostas foi limitar os pontos de operação para correntes ligeiramente acima do valor nominal. Essa precaução tomada mostra-se necessária visando manter a integridade da máquina, sendo que a partir das análises mostradas nas Figuras 31 e 32, é possível verificar que em regiões de operação com rotação e conjugado próximos ou acima dos valores nominais resulta em correntes com valores elevados, considerando como referência o valor nominal. Adicionalmente, tomou-se o cuidado de operar em faixas seguras para a máquina tendo em vista que o ajuste da carga foi feito de forma manual e por meio analógico. Em função do uso dessa forma de ajuste de carga é importante manter uma margem de segurança para não danificar a máquina em função de um ajuste que possa elevar abruptamente a corrente da máquina.

Outra restrição imposta na operação foi a escolha do controle escalar aplicado ao acionamento da máquina de indução, impedindo operar na rotação de 100 rpm para conjugado acima de 8 Nm.

6 Conclusão

A reprodução da bancada permitiu elaborar um método manual para determinação do mapa de rendimento de motores elétricos até 10 kW com aquisição e monitoramento em tempo real do experimento. O método proposto é validado ao possibilitar a operação nominal conforme indicado na placa de identificação do MI com diferença percentual na ordem de 1% em relação ao valor nominal especificado pelo fabricante, ou seja, 2,2 kW na rotação de 1715 rpm, o que permite concluir que o método possibilita mensurar a eficiência para os pontos testados com boa precisão de forma quantitativa.

Além disso, os mapas de rendimento formulados obtiveram comportamento qualitativo esperado. Com a eficiência avaliada, de forma isolada no motor e no inversor, assim como, a eficiência do conjunto motor-inversor. Quando comparado com outros trabalhos realizados indicados como referência deste trabalho, verifica-se que o comportamento é semelhante ao obtido como resultados deste trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se algumas ações, como realizar simulações para comparação entre resultados teórico e prático. A automatização da implementação da grade pontos, eliminando a operação manual para controle das máquinas utilizadas e aquisição de dados. Sugere-se também alterar os parâmetros de entrada e caracterizar um sistema de tração elétrica a fim de trocar a grade de pontos por ciclos de condução de veículos. Por fim, a ampliação da região de operação para avaliar máquinas de porte mais elevado, como motivação sistemas de *powertrain* elétrico para veículos de grande porte.

Referências Bibliográficas

- [1] Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley [recurso eletrônico] / Stephen D. Umans; tradução: Anatólio Laschuk. – 7. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2014. ISBN-13 978-8-5805-5373-4.
- [2] Chapman, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013. ISBN-13 978-8-5805-5206-5
- [3] TONG, Wei. Mechanical Design of Electric Motors. CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. ISBN-13: 978-1-4200-9144-1.
- [4] MANIKTALA, Sanjaya. Switching Power Supplies A - Z 2nd Edition. Newnes; 2nd edition, April 18, 2012. ISBN-13: 978-0123865335.
- [5] Giacomo Bacco, Cristian Babetto, Michele Bonfante, Matteo Carbonieri and Nicola Bianchi. Efficiency Maps Computation and Comparison Including Thermal Limits. University of Padova, 2019.
- [6] Bojoi, R.; Armando, E.; Pastorelli, M.; Lang, K. Efficiency and loss mapping of AC motors using advanced testing tools. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016.
- [7] Novak, M.; Novak, J.; Novak, Z. Methodology for Efficiency Mapping of Permanent Magnet Synchronous Motors. 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2017.
- [8] Rassólkin, A.; Heidari, H.; Kallaste, A.; Vaimann, T.; Pando Acedo, J.; Romero-Cadaval, E. Efficiency Map Comparison of Induction and Synchronous Reluctance Motors. 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia, 2019.
- [9] Kiyota, K.; Sugimoto, H.; Chiba, A. Comparison of Energy Consumption of SRM and IPMSM in Automotive Driving Schedules. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, 2012.

[10] Luiz Eduardo Altoé Lirio. Dissertação: Contribuições para Análise de Perdas Em Conversores de Potência com MOSFET. Universidade do Federal do Rio de Janeiro, 2013.

[11] Rodrigo Mauro Bauer Moritz. Dissertação: Estudo de Perdas por Comutação, Condução e Cálculo Térmico de um Inversor Trifásico de Dois Níveis. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014.

[12] HBM. Datasheet GEN series GEN3iA Transient Recorder and Data Acquisition System. Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B05167.pdf>>. Acesso em: (04/02/2024).

[13] WEG. Manual do Usuário da Série CTW900. N° do Documento: 10001528547 / 01. Versão de Software: 1.0X. Idioma: Português. Data da Publicação: 08/2012.

[14] SEW EURODRIVE. Manual do MOVITOLS MotionStudio V5.60. Edition 08/2009.

[15] HBM. Datasheet T22/50M. Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B02318.pdf>>. Acesso em: (04/02/2024).

[16] WEG. Manual do Usuário TCW20. Disponível em: <<https://homolog.ergmotores eletricos.com.br/solucao/tacogeradores-weg-tcw-r-rc-rcp-e-rp/>>. Acesso em: (04/02/2024).

[17] Minipa. Manual do Usuário MDT-2245B. <<https://www.minipa.com.br/images/Manual/MDT-2245C-1102-BR.pdf>>. Acesso em: (04/02/2024).

APÊNDICE A – Calibração de instrumentos

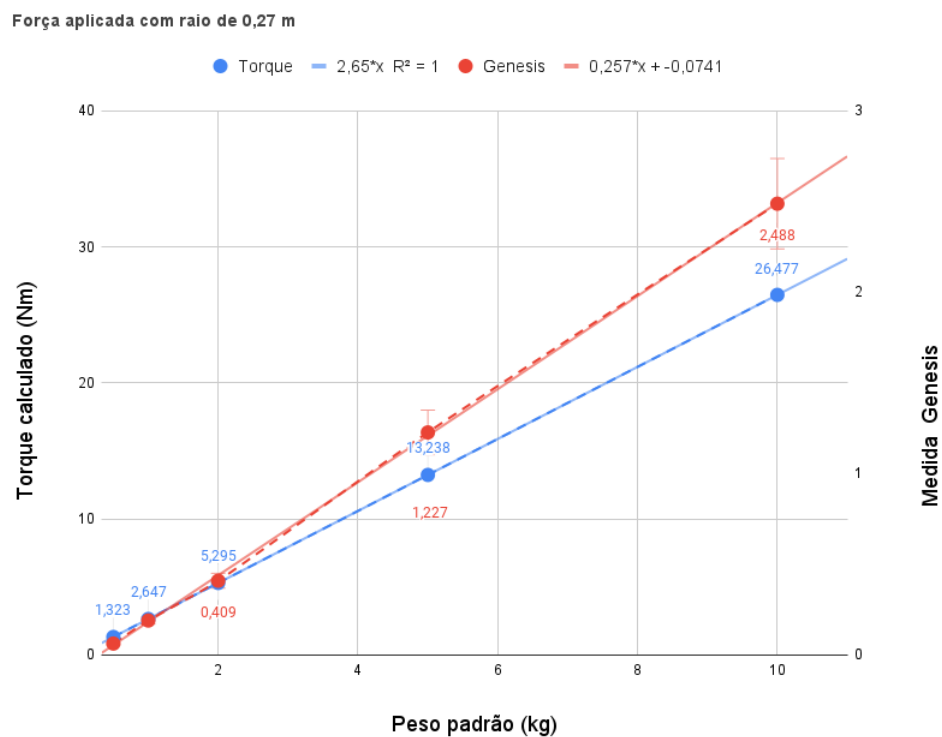
Tabela 7 – Parâmetros para calibração do torquímetro.

Massa (kg)	M1	M2	M3	Média	Conjugado teórico (Nm)
0,5	0,063	0,063	0,063	0,063	1,3238
1	0,191	0,190	0,189	0,190	2,6477
2	0,409	0,410	0,409	0,4093	5,2955
5	1,224	1,229	1,229	1,2273	13,2388
10	2,490	2,485	2,491	2,488	26,4776

Tabela 8 – Valores corrigidos de conjugado.

Massa (kg)	Conjugado teórico (Nm)	Conjugado estimado (Nm)	Erro (%)
0,5	1,3238	1,4166	7
1	2,6477	2,7261	2,96
2	5,2955	4,9877	5,81
5	13,4238	13,4223	1,39
10	26,4776	26,4283	0,19

Figura 33 – Curva de calibração de torque.



Fonte: Autor.

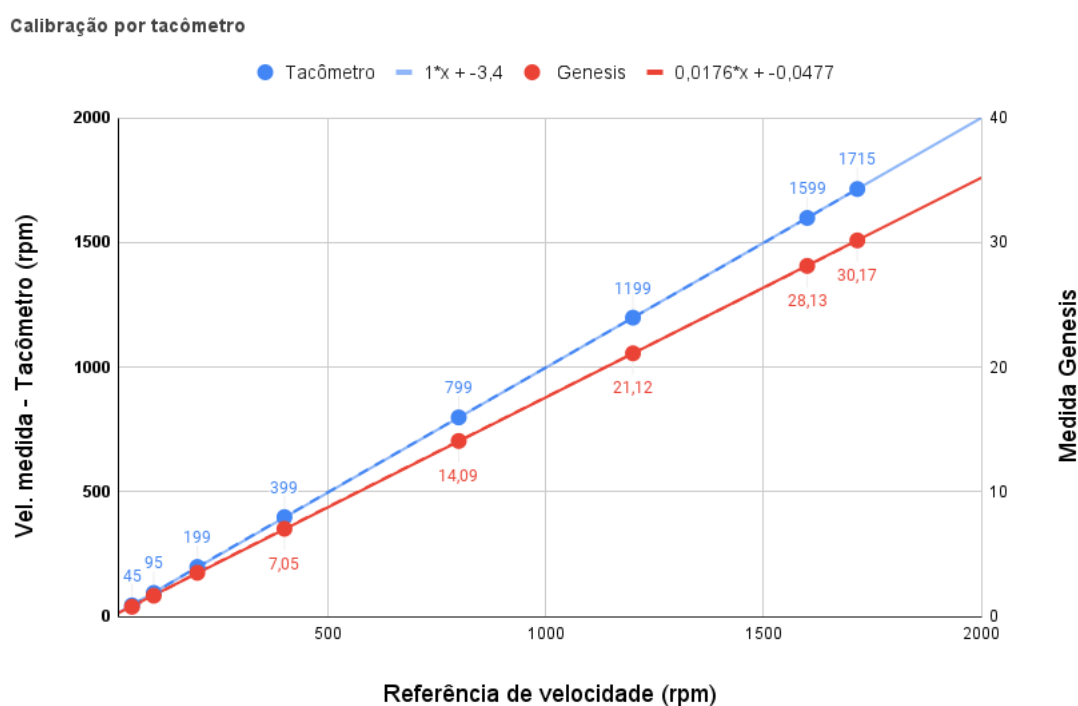
Tabela 9 – Parâmetros para calibração do tacômetro

Rotação ref. (rpm)	M1	M2	M3	Média	Rotação tacômetro (rpm)
50	0,785	0,78	0,79	0,785	45
100	1,675	1,679	1,677	1,677	95
200	3,517	3,514	3,514	3,515	199
400	7,044	7,044	7,045	7,044	399
800	14,09	14,09	14,09	14,090	799
1200	21,12	21,12	21,12	21,120	1199
1600	28,13	28,13	28,14	28,133	1599
1715	30,18	30,18	30,17	30,176	1715

Tabela 10 – Valores corrigidos de velocidade.

Rotação ref. (rpm)	Rotação tacômetro (rpm)	Rotação corrigida (rpm)	Erro (%)
50	45	44,602	0,88
100	95	95,284	0,30
200	199	199,716	0,36
400	399	400,246	0,31
800	799	800,568	0,20
1200	1199	1200	0,08
1600	1599	1598,485	0,03
1715	1715	1714,583	0,02

Figura 34 – Curva de calibração de rotação.



Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Real Time Formulas

	*** Automatic formulas are created below this line, you can add your own formulas at the bottom ***	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
	*** Automatic created formulas are finished, below this line you can add your own formulas ***	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	*** Automatic formulas are created below this line, you can add your own formulas at the bottom ***	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	*****	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
	#region AC1_in	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
	BLOCK formulas AC1 version 2017 07 18	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	=====	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	#region Variable allocation	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	START of Variable allocation	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
i_in	@FilterButterworthLP(Recorder_B.Ch_B1; 3; 100)*10	A	Sync	true	false	0	16711680	-20	20	15.23 %/Recorder B - 1.34 %/Recorder B	200000
u_in	@FilterButterworthLP(Recorder_B.u_in; 3; 100)	V	Sync	true	false	0	255	-500	500	15.34 %/Recorder B	200000
	END of variable allocation	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	#endregion Variable allocation	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	=====	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	#region External Variables	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	START of list of External variables used	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
	none	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
	END of list of External variables used	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	#endregion External Variables	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	=====	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	#region Cycle Parameters	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	Defining cycle parameters	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
Cycle_source_in	Recorder_B.u_in		SyncAnalog	true	false	0	16777215	-1	1		0
Cycle_count_in	1		Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_level_in	0		Scalar	true	false	0	16777215	0	1		0
Cycle_hysteresis_in	100		Scalar	true	false	0	16777215	0	200		0
Cycle_holdoff_in	0,001 s		Scalar	true	false	0	16777215	0	0,002		0
Cycle_filter_type_in	1		Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_cutoff_frequency_in	1000 Hz		Scalar	true	false	0	16777215	0	2000		0
Cycle_direction_in	0		Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_timeout_in	1 s		Scalar	true	false	0	16777215	0	1		0
Cycle_source_filter_in	@HWFilter (RTFormulas.Cycle_source_in ; RTFormulas.Cycle_filter_type_in ; RTFormulas.Cycle_cutoff_frequency_in)		SyncFilteredAnalog	true	false	0	16777215	-1	1	0.11 %/Recorder B	200000
	End of cyle parameters	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	#endregion Cycle Parameters	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
	=====	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
	#region Cycle computation and Cycle check	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	START of Computing the CYCLE MASTER	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
Cycle_Master_in	@CycleInterval (0.2)		Cycles	true	false	0	16777215	-5	5		0
	END of Computing the CYCLE MASTER	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	-----	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
	START computing the CYCLE CHECK (= cycle frequency) to check for missing/multiple cycles	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
Cycle_Check_in	@CycleFrequency (RTFormulas.Cycle_Master_in)	Hz	Async	true	false	0	16777215	0	2000	1.69 %/Recorder B	0
	END of Computing the CYCLE CHECK	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	#endregion Cycle computation and Cycle check	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	=====	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	#region Power computations	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	
	START of Computing the True RMS current signal	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
I_in	@CycleMean (RTFormulas.i_in ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	A	Async	true	false	0	16711680	-20	20	1.08 %/Recorder B	0
	END of Computing the True RMS current signal	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	-----	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	START of Computing the True RMS voltage signal	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
U_in	@CycleMean (RTFormulas.u_in ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	V	Async	true	false	0	255	-500	500	1.08 %/Recorder B	0
	END of Computing the True RMS voltage signal	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0	
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0	
	START of Computing the electrical power	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0	
	xxxxx START Active power / Wirkleistung xxxxx	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0	
	Note: // Active power P = Mean (voltage x current) // in [W] // Mean is calculated per cycle	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0	
	As a first intermediate step the instantaneous power is computed below	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0	

pin_Inversor	RTFormulas.u_in * RTFormulas.i_in	W	Sync	true	false	0	8026746	-10000	10000	1.34 %/Recorder B	200000
	Then then mean over a cycle of each instantaneous power gives the active power below		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
Pin_Inversor	@CycleMean (RTFormulas.pin_Inversor ;										
or	RTFormulas.Cycle_Master_in)	W	Async	true	false	0	65280	-10000	10000	1.08 %/Recorder B	0
	xxxxx END Active power / Wirkleistung xxxxxx		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	xxxxx START Apparent power / Scheinleistung xxxxxx		Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	Note: // Apparent power S = TrueRMS current x TrueRMS voltage // in [VA]		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
S_in	RTFormulas.I_in * RTFormulas.U_in	VA	Async	true	false	0	16776960	-10000	10000		0
	xxxxx END Apparent power / Scheinleistung xxxxxx		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	xxxxx START Reactive power / Blindleistung xxxxxx		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	Note: // Reactive power Q = SQRT (S ² - P ²) // in [var]		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
Q_in	@Sqrt ((RTFormulas.S_in * RTFormulas.S_in) - (RTFormulas.Pin_Inversor * RTFormulas.Pin_Inversor))	var	Async	true	false	0	8858594	-10000	10000		0
	xxxxx END Reactive power / Blindleistung xxxxxx		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	xxxxx START Power factor / Leistungsfaktor Lambda		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	xxxxxx Note: // Power factor Lambda = Active power P / Apparent power S // in []		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
λ_in	RTFormulas.Pin_Inversor / RTFormulas.S_in		Async	true	false	0	16777215	-1	1		0
	xxxxx END Power factor / Leistungsfaktor Lambda		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	xxxxxx END OF Computing the electrical		Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	-----		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	#endregion Power computations		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	#endregion AC1_in		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	*****		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	*****		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	*****		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	#region AC3_PP		Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	BLOCK formulas AC3 PP version 2017 07 18		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	#region Variable allocation		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	@FilterButterworthLP(Recorder_A.u_12; 2; 850)		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	START of Variable allocation		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
i_1	@FilterButterworthLP(Recorder_A.Ch_A1; 2; 550)*100	A	Sync	true	false	0	16711680	-20	20	10.92 %/Recorder A - 1.34 %/Recorder A	200000
i_2	@FilterButterworthLP(Recorder_A.Ch_A2; 2; 550)*100	A	Sync	true	false	0	13369344	-20	20	10.92 %/Recorder A - 1.34 %/Recorder A	200000
i_3	@FilterButterworthLP(Recorder_A.Ch_A3; 2; 550)*100	A	Sync	true	false	0	10027008	-20	20	10.92 %/Recorder A - 1.34 %/Recorder A	200000
u_12	@FilterButterworthLP(Recorder_A.u_12; 2; 550)	V	Sync	true	false	0	255	-500	500	11.03 %/Recorder A	200000
u_23	@FilterButterworthLP(Recorder_A.u_23; 2; 550)	V	Sync	true	false	0	33023	-500	500	11.03 %/Recorder A	200000
u_31	@FilterButterworthLP(Recorder_A.u_31; 2; 550)	V	Sync	true	false	0	41215	-500	500	11.03 %/Recorder A	200000
	END of variable allocation		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	#endregion Variable allocation		Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	#region External Variables		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	START of list of External variables used		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	none		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	END of list of External variables used		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	#endregion External Variables		Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	#region Cycle Parameters		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	Defining cycle parameters		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
Cycle_source	Recorder_B.Ch_B1		SyncAnalog	true	false	0	16777215	-20	20		0
Cycle_count		1	Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_level		0	Scalar	true	false	0	16777215	0	1		0
Cycle_hysteresis		1	Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_holding		0,001 s	Scalar	true	false	0	16777215	0	0,002		0
Cycle_filter_type		1	Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_cutoff_frequency		1000 Hz	Scalar	true	false	0	16777215	0	2000		0
Cycle_direction		0	Scalar	true	false	0	16777215	0	2		0
Cycle_timeout		1 s	Scalar	true	false	0	16777215	0	1		0
	@HWFilter (RTFormulas.Cycle_source ;										
	RTFormulas.Cycle_filter_type ;										
Cycle_filter	RTFormulas.Cycle_cutoff_frequency)		SyncFilteredAnalog	true	false	0	16777215	-20	20	0.11 %/Recorder B	200000
	End of cyle parameters		Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	#endregion Cycle Parameters		Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	=====		Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	#region Cycle computation and Cycle check		Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0

	START of Computing the CYCLE MASTER	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
Cycle_Ma ster	@CycleDetect (RTFormulas.Cycle_source_filt ; RTFormulas.Cycle_count ; RTFormulas.Cycle_level ; RTFormulas.Cycle_hyst ; RTFormulas.Cycle_holdoff ; RTFormulas.Cycle_direction ; RTFormulas.Cycle_timeout)	Cycles	true	false	0	16777215	-5	5		0
	END of Computing the CYCLE MASTER	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
Cycle_Che ck	START computing the CYCLE CHECK (= cycle frequency) to check for missing/multiple cycles	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	@CycleFrequency (RTFormulas.Cycle_Master)	Hz Async	true	false	0	16777215	0	2000	1.69 %/Recorder B	0
	END of Computing the CYCLE CHECK	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
u_1 u_2 u_3	#endregion Cycle computation and Cycle check	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	=====	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	#region Voltage transformation Triangle to Star	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
	START of Voltage transformation Triangle to Star	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	@FilterButterworthLP(Recorder_B.i_in; 2; 850)	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
	(RTFormulas.u_12 - RTFormulas.u_31) / 3	V Sync	false	false	0	255	-500	500	1.23 %/Recorder A - 1.69 %/Recorder A	0
	(RTFormulas.u_23 - RTFormulas.u_12) / 3	V Sync	false	false	0	33023	-500	500	1.23 %/Recorder A - 1.69 %/Recorder A	0
	(RTFormulas.u_31 - RTFormulas.u_23) / 3	V Sync	false	false	0	41215	-500	500	1.23 %/Recorder A - 1.69 %/Recorder A	0
	END of Voltage transformation Triangle to star	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
U_12	START of Computing the True RMS voltage signals Phase to Phase	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	@CycleRMS (RTFormulas.u_12; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	255	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
	U_23 @CycleRMS (RTFormulas.u_23; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	33023	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
U_31	@CycleRMS (RTFormulas.u_31; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	41215	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
	Computing the mean (or collective) voltage (RTFormulas.U_12 + RTFormulas.U_23 + RTFormulas.U_31)	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	/ 3	V Async	true	false	0	255	-500	500		0
Σ_U_PP	END of Computing the True RMS voltage signals Phase to Phase	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	#endregion Voltage transformation Triangle to Star	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	=====	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
I_1	#region Power computations	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	START of Computing the True RMS current signals	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	@CycleRMS (RTFormulas.i_1; RTFormulas.Cycle_Master)	A Async	true	false	0	16711680	-20	20	1.08 %/Recorder A	0
I_2	@CycleRMS (RTFormulas.i_2; RTFormulas.Cycle_Master)	A Async	true	false	0	13369344	-20	20	1.08 %/Recorder A	0
	@CycleRMS (RTFormulas.i_3; RTFormulas.Cycle_Master)	A Async	true	false	0	10027008	-20	20	1.08 %/Recorder A	0
	Computing the mean (or collective) current	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
Σ_I	(RTFormulas.i_1 + RTFormulas.i_2 + RTFormulas.i_3) / 3	A Async	true	false	0	16711680	-20	20		0
	END of Computing the True RMS current signals	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
U_1	START of Computing the True RMS voltage signals	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	@CycleRMS (RTFormulas.u_1; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	255	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
	U_2 @CycleRMS (RTFormulas.u_2; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	33023	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
U_3	@CycleRMS (RTFormulas.u_3; RTFormulas.Cycle_Master)	V Async	true	false	0	41215	-500	500	1.08 %/Recorder A	0
	Computing the mean (or collective) voltage	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	Σ_U (RTFormulas.U_1 + RTFormulas.U_2 + RTFormulas.U_3) / 3	V Async	true	false	0	255	-500	500		0
p_1	END of Computing the True RMS voltage signals	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
	-----	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
	START of Computing the electrical power per phase	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
pin_Moto r	xxxxx START Active power / Wirkleistung xxxxx	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	Note: // Active power P = Mean (voltage x current) // in [W] // Mean is calculated per cycle	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10		0
	As a first intermediate step the instantaneous power per phase is computed below	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
P_1	RTFormulas.u_1 * RTFormulas.i_1	W Sync	false	false	0	8026746	-10000	10000	1.23 %/Recorder A	0
	RTFormulas.u_2 * RTFormulas.i_2	W Sync	false	false	0	10066329	-10000	10000	1.23 %/Recorder A	0
	RTFormulas.u_3 * RTFormulas.i_3	W Sync	false	false	0	11842740	-10000	10000	1.23 %/Recorder A	0
P_2	Then the total instantaneous power is the sum of the phase inst power // in [W]	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	RTFormulas.p_1 + RTFormulas.p_2 + RTFormulas.p_3	W Sync	true	false	0	8026746	-30000	30000	1.23 %/Recorder A - 1.34 %/Recorder A	200000
	Then then mean over a cycle of each instantaneous power gives the active power below	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
P_3	@CycleMean (RTFormulas.p_1 ; RTFormulas.Cycle_Master)	W Async	true	false	0	65280	-10000	10000	1.08 %/Recorder A	0
	@CycleMean (RTFormulas.p_2 ; RTFormulas.Cycle_Master)	W Async	true	false	0	52224	-10000	10000	1.08 %/Recorder A	0
	@CycleMean (RTFormulas.p_3 ; RTFormulas.Cycle_Master)	W Async	true	false	0	39168	-10000	10000	1.08 %/Recorder A	0
Pin_motor	The sum of the active power per phase gives the total active power	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
	RTFormulas.P_1 + RTFormulas.P_2 + RTFormulas.P_3	W Async	true	false	0	65280	-30000	30000		0
	xxxxx END Active power / Wirkleistung xxxxx	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0

	xxxxx START Apparent power / Scheinleistung xxxxxx	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	Note: // Apparent power S = TrueRMS current x TrueRMS voltage // in [VA]	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
S_1	RTFormulas.U_1 * RTFormulas.I_1	VA Async	true	false	0	16776960	-10000	10000	0
S_2	RTFormulas.U_2 * RTFormulas.I_2	VA Async	true	false	0	16777088	-10000	10000	0
S_3	RTFormulas.U_3 * RTFormulas.I_3	VA Async	true	false	0	16777120	-10000	10000	0
	The sum of the apparent power per phase gives the total apparent power	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
S	RTFormulas.S_1 + RTFormulas.S_2 + RTFormulas.S_3	VA Async	true	false	0	16776960	-30000	30000	0
	xxxxx END Apparent power / Scheinleistung xxxxxx	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
	xxxxx START Reactive power / Blindleistung xxxxxx	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10	0
	Note: // Reactive power Q = SQRT (S ² - P ²) // in [var]	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
Q_1	@Sqrt (RTFormulas.S_1 * RTFormulas.S_1 - RTFormulas.P_1 * RTFormulas.P_1)	var Async	true	false	0	8858594	-10000	10000	0
Q_2	@Sqrt (RTFormulas.S_2 * RTFormulas.S_2 - RTFormulas.P_2 * RTFormulas.P_2)	var Async	true	false	0	10772457	-10000	10000	0
Q_3	@Sqrt (RTFormulas.S_3 * RTFormulas.S_3 - RTFormulas.P_3 * RTFormulas.P_3)	var Async	true	false	0	12290031	-10000	10000	0
	The sum of the reactive power per phase gives the total reactive power	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
Q	RTFormulas.Q_1 + RTFormulas.Q_2 + RTFormulas.Q_3	var Async	true	false	0	8858594	-30000	30000	0
	xxxxx END Reactive power / Blindleistung xxxxxx	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	xxxxx START Power factor / Leistungsfaktor Lambda	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	xxxxxx Note: // Power factor Lambda = Active power P / Appearant power S // in []	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
λ_1	RTFormulas.P_1 / RTFormulas.S_1	Async	true	false	0	16777215	-1	1	0
λ_2	RTFormulas.P_2 / RTFormulas.S_2	Async	true	false	0	16777215	-1	1	0
λ_3	RTFormulas.P_3 / RTFormulas.S_3	Async	true	false	0	16777215	-1	1	0
λ	RTFormulas.Pin_motor / RTFormulas.S	Async	true	false	0	16777215	-1	1	0
	xxxxx END Power factor / Leistungsfaktor Lambda	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	xxxxxx	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	END of Computing the electrical power per phase	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	-----	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	#endregion Power computations	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
	=====	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10	0
	#endregion AC3_PP	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	*****	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	*****	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	*****	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	#region Analysis_inverter	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	BLOCK formulas Analysis drive inverter version 2016 04 01	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
	This block will be added if ANY input selection is made, (but not for none)	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10	0
	=====	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	#region Variable allocation	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	START of Variable allocation	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	none	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	END of variable allocation	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
	#endregion Variable allocation	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10	0
	=====	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	#region External Variables	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	START of list of External variables used	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	RTFormulas.P	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	RTFormulas.P_in	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
	END of list of External variables used	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10	0
	#endregion External Variables	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	=====	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	#region Power computations	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	START Efficiency (Eta) Inverter (Motor mode)	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	Note: // Efficiency Inverter (eta) = Output power / Input power // in [%]	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
n_Inverso	(RTFormulas.Pin_motor / RTFormulas.Pin_Inverso) * 100 %	Async	true	false	0	16777215	0	100	0
r	Note: // Efficiency η_inv_mot larger 100% indicates system is in GENERATOR mode	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	END Efficiency (Eta) Inverter (Motor mode)	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	START Efficiency (Eta) Inverter (Generator mode)	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	Note: // Efficiency Inverter (eta) = Input power / Output power // in [%]	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
n_inv_gen	(RTFormulas.Pin_Inverso / RTFormulas.Pin_motor) * 100 %	Async	true	false	0	16777215	0	100	0
	Note: // Efficiency η_inv_gen larger 100% indicates system is in MOTOR mode	Unknown	false	false	0	65535	-10	10	0
	END Efficiency (Eta) Inverter (Generator mode)	Unknown	false	false	0	15631086	-10	10	0
	-----	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10	0
	START Power loss / Verlustleistung INVERTER	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10	0
	Note: // Power Loss = Input power - Output power // in [W]	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10	0
P_loss_inv	RTFormulas.Pin_Inverso - RTFormulas.Pin_motor	W Async	true	false	0	65280	-10000	10000	0

Note: // Power loss being negative would indicate system is in GENERATOR mode									
END Power loss / Verlustleistung INVERTER	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0
#endregion Power computations	Unknown	false	false	0	16777215	-10	10		0
=====									
#endregion Analysis_inverter	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
*****	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
*****	Unknown	false	false	0	9498256	-10	10		0
*** Automatic created formulas are finished, below this line you can add your own formulas ***									
*****Torque - Velociade - Potecia de saida estimados****	Unknown	true	false	0	16711680	-10	10		0
(@FilterButterworthLP(Recorder_B.Taco; 3; 350)+0.00155)*1/0.0176	rpm Sync	true	false	0	16777215	-2000	2000	15.23 %/Recorder B - 1.23 %/Recorder B - 1.23 %/Recorder B - 1.8 %/Recorder B	200000
@CycleMean (RTFormulas.vel_filtro ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	rpm Async	true	false	0	16711680	-2000	2000	1.08 %/Recorder B	0
Tq_filtro	Nm Sync	true	false	0	9498256	-50	50	15.23 %/Recorder B - 1.23 %/Recorder B - 1.23 %/Recorder B - 1.69 %/Recorder B - 1.34 %/Recorder B	200000
Tq_m	Nm Async	true	false	0	15631086	-50	50	1.08 %/Recorder B	0
p_out_motor	W Sync	true	false	0	8026746	-5000	5000	1.34 %/Recorder B - 1.69 %/Recorder B - 1.23 %/Recorder B	200000
P_out_motor	W Async	true	false	0	15631086	-10	10	1.08 %/Recorder B	0
@FilterButterworthLP(Recorder_B.i_in; 3; 850)-3.755	Unknown	true	false	0	15631086	-10000	10000		0
@CycleMean (RTFormulas.Cin_filtro ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	Unknown	false	false	0	16776960	-10	10		0
@FilterButterworthLP(Recorder_B.u_in; 2; 850)	Unknown	true	false	0	9498256	-10	10		0
@CycleMean (RTFormulas.Vin_filtro ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	Unknown	false	false	0	16711680	-10	10		0
@FilterButterworthLP(RTFormulas.Vin_filtro*RTFormulas.Cin_filtro; 2; 850)	Unknown	true	false	0	16777215	-10	10		0
@FilterButterworthLP(RTFormulas.Vin_filtro*RTFormulas.Cin_filtro; 3; 850)	Sync	true	false	0	65535	-10	10		0
@CycleMean (RTFormulas.pin_calc ; RTFormulas.Cycle_Master_in)	Unknown	true	false	0	65535	-10	10		0
n_Total	Async	true	false	0	16776960	-10	10		0
n_Motor	Async	true	false	0	65535	-10	10		0
	Unknown	false	false	0	65535	-10	10		0