

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

DANIEL FONSECA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DO
SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE TERMELÉTRICAS A MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA: ESTUDO DE CASO DA USINA
TERMELÉTRICA LUIZ OSCAR RODRIGUES DE MELO**

**VITÓRIA
2022**

DANIEL FONSECA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DO
SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE TERMELÉTRICAS A MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA: ESTUDO DE CASO DA USINA
TERMELÉTRICA LUIZ OSCAR RODRIGUES DE MELO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Fonseca do Nascimento**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Carla C.M. Cunha

**VITÓRIA
2022**


DANIEL FONSECA DO NASCIMENTO

**MODELAGEM E ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DO
SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE TERMELÉTRICAS A MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA: ESTUDO DE CASO DA USINA
TERMELÉTRICA LUIZ OSCAR RODRIGUES DE MELO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Fonseca do Nascimento**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 30 de março de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

 Documento assinado digitalmente
CARLA CESAR MARTINS CUNHA
Data: 01/04/2022 12:30:52-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Carla César Martins Cunha
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

A Antônio Luiz Alves Portela pelo encorajamento e a Margareth dos Santos Madeira pelo acolhimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo amor e entrega incondicional, dedicação incansável e exemplos de caráter e perseverança. Hoje colho os frutos de anos de empenho e persistência deles, a isso e tanto mais, sou imensamente grato.

Agradeço à Isabella pelo amor e companheirismo de tantos anos que estamos juntos. Por tantas vezes acreditar mais em minha capacidade que eu mesmo, seu apoio foi primordial.

Agradeço à professora Carla por me acompanhar nessa orientação, por investir tempo e energia em mim, por compartilhar conhecimentos, experiências e conselhos.

Agradeço ao Bruno Miotto pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus avós e familiares, por serem eternas fontes de inspiração e carinho.

Agradeço aos inúmeros amigos e pessoas queridas que me acompanharam na graduação, pelo companheirismo em diversos momentos. Suas presenças tornaram a jornada mais prazerosa.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Espírito Santo pelo ensino público, gratuito, de excelência e a todos professores que a compõem, em especial os do Departamento de Engenharia Elétrica, por moldarem o profissional e a pessoa que sou hoje.

“If you quit once, it becomes a habit. Never quit.”

Michael Jordan

RESUMO

Com a crescente demanda energética mundial, processos mais eficientes de geração de energia são cruciais para a segurança energética global no futuro. Uma estratégia válida para aumentar o saldo da oferta de energia total disponível, sem aumentar de forma desenfreada o consumo de recursos naturais, é reduzir o consumo interno das instalações geradoras, aumentando o montante energético total gerado. Na matriz elétrica brasileira, há uma grande parcela de usinas termelétricas que inicialmente foram projetadas e instaladas como usinas de disponibilidade, que seriam despachadas somente em situações especiais. Contudo, como estas instalações possuem rendimento aquém ao desejado e seus despachos vêm sendo constantemente mais frequentes que o planejado originalmente para suprir o sistema elétrico nacional, apresenta-se nelas uma grande oportunidade energética. Esta pesquisa desenvolveu um estudo de caso da Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues Melo (UTE LORM), no qual foram coletados dados do sistema supervisório que, aliados aos dados dos equipamentos, possibilitaram desenvolver um modelo computacional simplificado que discriminasse o consumo de energia elétrica dos motores de indução trifásicos presentes nos radiadores do sistema de resfriamento, quanto submetidos a diferentes controles de velocidade baseados na relação tensão/frequência de alimentação dos mesmos. Foi atestada a superioridade em se manter a razão V/f em uma relação quadrática, comparada à linear, para acionamentos de cargas do tipo ventilador, ao simular o sistema para ambos os controles e determinar que o consumo de energia elétrica foi cerca de 1,4% menor, decorrente de um rendimento médio cerca de 2,1% maior durante a operação de uma das unidades geradoras da UTE LORM em um dia com condições ambientais climáticas típicas.

Palavras-chave: Eficiência energética; Usinas termelétricas; Sistema de resfriamento; Modelagem.

ABSTRACT

Due to the world's growing energy demand, more efficient power generation processes are crucial for global energy security in the future. A valid strategy to increase the total balance of available energy supply, without increasing the consumption of natural resources unrestrainedly, is to reduce the internal consumption of generating power plants, increasing the final amount of energy generated. In the Brazilian electricity matrix, there is a large portion of thermoelectric power plants which were initially designed and installed as standby electric power plants, which were to be dispatched only on special occasions. However, as these facilities have an efficiency below the desired and their dispatches have constantly been more frequent than originally planned to supply the national electrical system, they present a great energy savings opportunity. This research developed a case study of the Luiz Oscar Rodrigues Melo Thermoelectric Power Plant (UTE LORM), in which data were collected from the supervisory system and alongside the equipment data, made it possible to develop a simplified computational model that evaluated the electric energy consumption of the existing three-phase induction motors in the radiators of the cooling system, when subjected to different speed controls based on the power supply voltage/frequency ratio. The superiority of keeping the V/f ratio in a quadratic behavior, rather than a linear one, for fan-type loads was attested, by simulating the computational system model for both controls and assessing that the electric energy consumption was about 1,4% lower, resulting on an average efficiency nearly 2,1% higher during the operation of one of UTE LORM's generating units on a day with typical weather conditions.

Keywords: Energy efficiency; Thermoelectric power plants; Cooling system; Computational Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – A UTE Luiz Oscar Rodrigues de Melo.....	20
Figura 2 – Moto-gerador empregado na UTE LORM.....	24
Figura 3 – Representação do motor de combustão interna e principais sistemas auxiliares ..	26
Figura 4 – Conjunto de ventiladores que compõem o sistema de resfriamento	26
Figura 5 – Esquema da temperatura em trocadores de calor em função da posição	27
Figura 6 – Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico	29
Figura 7 – Circuito elétrico no eixo-q da máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado.....	31
Figura 8 – Circuito elétrico no eixo-d da máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado.....	31
Figura 9 – Configurações de ligações distintas para um enrolamento quanto a seu número de polos.....	34
Figura 10 – Esquemático de um inversor de frequência.....	38
Figura 11 – Topologias de estágio de retificação com (a) chaves sem perdas e com (b) dispositivos IGBT.....	47
Figura 12 – Geração do sinal de disparo dos conversores.....	48
Figura 13 – Fragmento da planta da vista superior de uma casa de máquinas (<i>power house</i>) da UTE LORM	52
Figura 14 – Fragmento da planta da vista lateral de uma casa de máquinas (<i>power house</i>) da UTE LORM.....	53
Figura 15 – Visão no topo da <i>power house</i> da UTE LORM	54
Figura 16 – Leituras de tensão (a) e corrente (b) nos terminais de conexão aos motores de indução trifásicos	54
Figura 17 – Sinal sintetizado das três fases aferido na saída do bloco do inversor.....	58
Figura 18 – Corrente do rotor em função da velocidade do rotor	60
Figura 19 – Modelo computacional completo do sistema.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Demanda máxima instantânea no Sistema Interligado Nacional	16
Gráfico 2 – Indicadores energéticos, populacional e econômicos nacionais.....	18
Gráfico 3 – Matriz elétrica brasileira.....	19
Gráfico 4 – Participação de cada fonte na totalidade da energia elétrica gerada no SIN	22
Gráfico 5 – Curvas de corrente e torque em função da velocidade	33
Gráfico 6 – Variação da curva torque-velocidade de um motor de 4 polos, 60 Hz quando aplicado o controle de frequência	35
Gráfico 7 – Controle da velocidade pela resistência do rotor.....	36
Gráfico 8 – Controle da velocidade por meio da tensão de alimentação.....	36
Gráfico 9 – Relação tensão/frequência em motor de indução	37
Gráfico 10 – Curvas de torque por velocidade mantendo a relação tensão/frequência constante	39
Gráfico 11 – Curvas de torque por velocidade em um motor de 4 polos em 60 Hz com controle escalar	39
Gráfico 12 – Comportamento típico da curva torque-velocidade de ventiladores e bombas centrífugas.....	40
Gráfico 13 – Comportamento da relação V/f escalar: (a) linear e (b) quadrático	41
Gráfico 14 – Curva conjugado-velocidade aplicando a relação V/f quadrática	41
Gráfico 15 – Comportamento do torque e potência para cargas típicas com comportamento de crescimento de torque: (a) linear e (b) quadrático	42
Gráfico 16 – Curvas V/f parametrizáveis em inversores do fabricante Vacon: (a) linear e quadrática, e (b) programável	42
Gráfico 17 – Velocidade dos ventiladores dos radiadores segundo o sistema supervisório WOIS e modelado em 27 de julho de 2021	62
Gráfico 18 – Velocidade dos ventiladores dos radiadores segundo: (a) WOIS e modelo (b) em 28 de julho de 2021.....	62
Gráfico 19 – Perfil da velocidade simulada comparada com a de referência.....	68
Gráfico 20 – Comportamento da tensão de linha eficaz da frequência fundamental simulada comparada com a de referência	68
Gráfico 21 – Patamar de demanda de potência elétrica ativa nos intervalos de leitura conforme parametrização escalar quadrática.....	69

Gráfico 22 – Comportamento da fundamental da tensão de linha eficaz simulada com a relação V/f linear	70
Gráfico 23 – Patamar de demanda de potência elétrica ativa nos intervalos de leitura conforme parametrização escalar linear	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros técnicos de diferentes tipos de centrais termelétricas	23
Quadro 2 – Parâmetros da representação por fase da máquina assíncrona trifásica	30
Quadro 3 – Valores nominais da potência em rede de 380-500 V, 60 Hz, trifásico do VACON NX 0261 5 FR 9.....	46
Quadro 4 – Dados técnicos do VACON NXP 0261 5 FR 9.....	46
Quadro 5 – Resumo dos parâmetros do inversor de frequência VACON NXP 0261 5 FR 9	47
Quadro 6 – Balanço de energia no motor Wäertsilä 20V34SG.....	50
Quadro 7 – Características da instalação elétrica e das conexões dos inversores de frequência	51
Quadro 8 – Parâmetros dos cabos tripolares adotados na UTE LORM	51
Quadro 9 – Parâmetros dos motores de indução trifásicos dos ventiladores dos radiadores da UTE LORM.....	55
Quadro 10 – Parâmetros equivalentes (por fase) e mecânicos dos motores de indução dos ventiladores dos radiadores da UTE LORM	56
Quadro 11 – Comparativo entre a resposta obtida do modelo do motor de indução trifásico com dados do fabricante	57
Quadro 12 – Tensão sintetizada na saída do inversor conforme frequência definida	57
Quadro 13 – Resumo dos parâmetros do inversor da Unidade Geradora 5 nos dias 27 e 28 de julho de 2021	59
Quadro 14 – Desvios das comparações das aferições efetuadas contrastadas às referências do WOIS	61
Quadro 15 – Desvios das grandezas sinalizadas a validar o modelo simulado desenvolvido	64
Quadro 16 – Pontos de operação dos inversores segundo a parametrização da relação V/f quadrática.....	67
Quadro 17 – Pontos de operação dos inversores segundo a parametrização da relação V/f linear	70
Quadro 18 – Comparação da performance do sistema simulado entre as parametrizações ...	71
Quadro 19 – Consumo dos radiadores da UG-5 avaliada nas doze primeiras horas de 27 de julho de 2021	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACEEE	<i>American Council for an Energy-Efficient Economy</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CAC	Charge Air Cooler
CC	Corrente Contínua
CVU	Custo Variável Unitário
DTML	Diferença de temperatura média logarítmica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MCI	Motor a Combustão Interna
MIT	Motor de Indução Trifásico
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SIGA	Sistema de Informações da Geração da ANEEL
SIN	Sistema Interligado Nacional
UTE	Central Geradora Termelétrica
UTE LORM	Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo
WOIS	<i>Wärtsilä Operator Interface System</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m^2)
U	Coefficiente Global de Transferência de Calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K$)
J	Coefficiente de inércia ($kg \cdot m^2$)
F	Coefficiente de atrito (N. m. s)
i	Corrente (A)
$DTML$	Diferença de Temperatura Média Logarítmica (K)
h	Entalpia ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$)
f	Frequência (Hz)
ϕ	Fluxo magnético (Wb)
L	Indutância (H)
ρ	Massa específica ($kg \cdot m^{-3}$)
N_e	Número de espiras
P	Número de polos
p	Número de par de polos
θ	Posição angular (rad)
S	Potência aparente (VA)
X	Reatância (Ω)
R	Resistência (Ω)
η	Rendimento (%)
\dot{W}	Taxa de trabalho realizado (W)
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor (W)
V	Tensão (V)
T	Torque (N. m)
\dot{m}	Vazão mássica ($kg \cdot s^{-1}$)
\dot{V}	Vazão volumétrica ($m^3 \cdot s^{-1}$)
N	Velocidade (rpm)
ω	Velocidade angular ($rad \cdot s^{-1}$)
N_s	Velocidade síncrona (rpm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Cenário Energético do Brasil e do Espírito Santo	17
1.2	Caso em Estudo.....	19
1.3	Objetivos Geral e Específicos.....	21
1.4	Justificativa.....	21
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	23
2.1	Usinas Termelétricas a MCI.....	23
2.2	Sistema de Resfriamento	25
2.3	Motor de Indução Trifásico	28
2.3.1	Circuitos equivalentes por fase e d-q.....	29
2.3.2	Características de Velocidade e Conjugado.....	32
2.3.3	Métodos de Controle de Velocidade.....	34
2.3.4	Relação Tensão/Frequência	37
2.4	Inversor de Frequência	38
2.4.1	Controle Escalar Linear	38
2.4.2	Controle Escalar Quadrático	40
3	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	44
3.1	Modelagem dos Motores de Indução	45
3.2	Modelagem do Inversor de Frequência	45
3.3	Modelagem da Carga Acionada pelos Motores de Indução	49
3.4	Modelagem dos Cabos de Alimentação	51
4	VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA	55
4.1	Validação do Modelo dos Motores de Indução	55
4.2	Validação do Modelo do Inversor de Frequência.....	57
4.3	Velocidade dos Ventiladores.....	58
4.3.1	Apuração das leituras do sistema supervisório.....	59
4.3.2	Perfil de velocidade exigido pelas condições ambiente.....	61
4.4	Grandezas do Sistema Simulado Completo.....	63
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	65

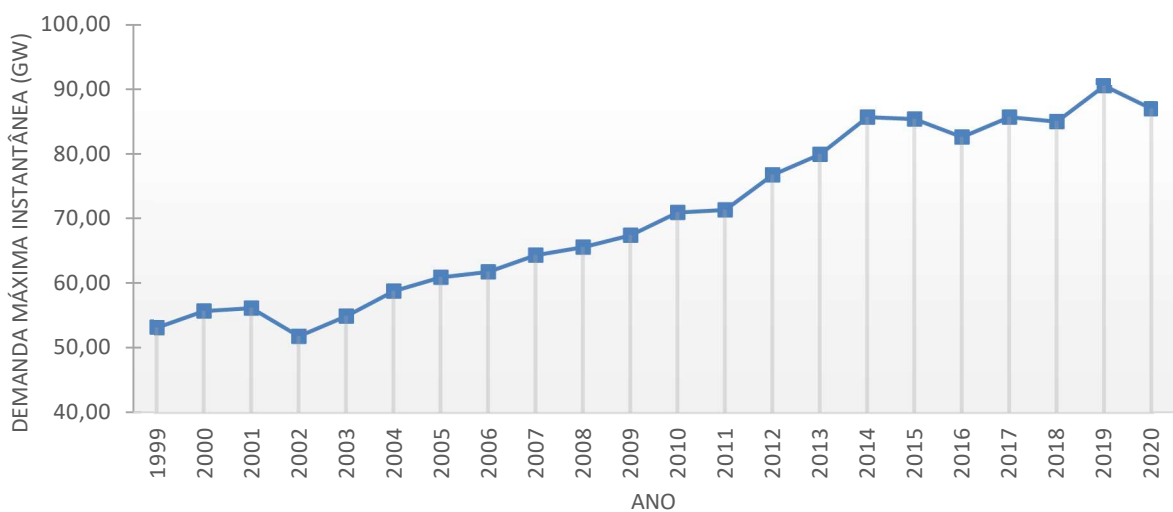
5.1	Operação Conforme Razão V/f Escalar Quadrática	65
5.2	Operação Conforme Razão V/f Escalar Linear	69
5.3	Avaliação de Consumo de Energia Elétrica e Comparação de Desempenho.....	71
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
	ANEXO A – CÓDIGO <i>PYHTON</i>.....	80
	ANEXO B – CORRESPONDÊNCIA DANFOSS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de muitos séculos, a abundância dos recursos naturais do planeta concedeu às civilizações humanas a falsa ilusão de que esses possuíam um caráter infinito. Com o avanço tecnológico e o aumento exponencial da população mundial vivenciado desde a Revolução Industrial, discussões em torno de um uso mais eficiente das fontes energéticas disponíveis numa escala global têm tomado um papel de maior destaque, a fim de buscar-se uma maior segurança energética para o futuro. É evidente que utilizar mais recursos desenfreadamente para a geração energética não é um caminho totalmente sustentável ao longo prazo, mas certamente há etapas destes processos que podem ser aperfeiçoadas, de forma a resultar em um saldo energético final superior.

O conceito de eficiência está atrelado ao uso racional dos recursos dos quais se dispõe em prol de um objetivo. Já no contexto energético, eficiência se traduz em ações que minimizem o desperdício e maximizem o trabalho que se consegue executar com uma mesma quantidade de energia. Práticas que se alinhem com essa ideologia são cruciais para o abastecimento energético das atividades humanas, cujas demandas batem recordes continuamente devido à natureza das tarefas modernas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020), conforme evidenciado pelo Gráfico 1.

Gráfico 1 – Demanda máxima instantânea no Sistema Interligado Nacional



Fonte: Operador Nacional do Sistema (2021a).

Nota: Adaptado pelo autor.

No âmbito nacional, é possível destacar programas governamentais de eficiência, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), cujas ações resultaram em uma economia equivalente a 4,64% do consumo total de energia do Brasil em 2020, equivalendo a 22,02 bilhões de kWh (PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Embora significativa, essa redução de consumo não chega a níveis observados internacionalmente.

A *International Energy Agency* (IEA), em seu relatório *Energy Efficiency – 2021*, estimou que as ações tomadas objetivando a eficiência energética nos Estados Unidos subtraíram em 16% o montante de energia consumida no país em 2018, enquanto na União Europeia, no mesmo período, esse montante atingiu 15%. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021). Por sua vez, o *American Council for an Energy Efficient Economy* (ACEEE), em seu *International Energy Efficiency Scorecard* de 2018, atribuiu ao Brasil a vigésima colocação no *ranking* entre as 25 maiores economias consumidoras de energia do mundo (AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY, 2018).

Apesar do acesso à energia elétrica ter uma correlação direta com o desenvolvimento econômico das nações, esse impacto é de suma importância, também, nas esferas social e ambiental. A Organização das Nações Unidas (ONU) lista “Energia Limpa e Acessível” como um dos seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis, os quais representam apelos globais a ações que garantam às pessoas desfrutarem de paz e prosperidade (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2021).

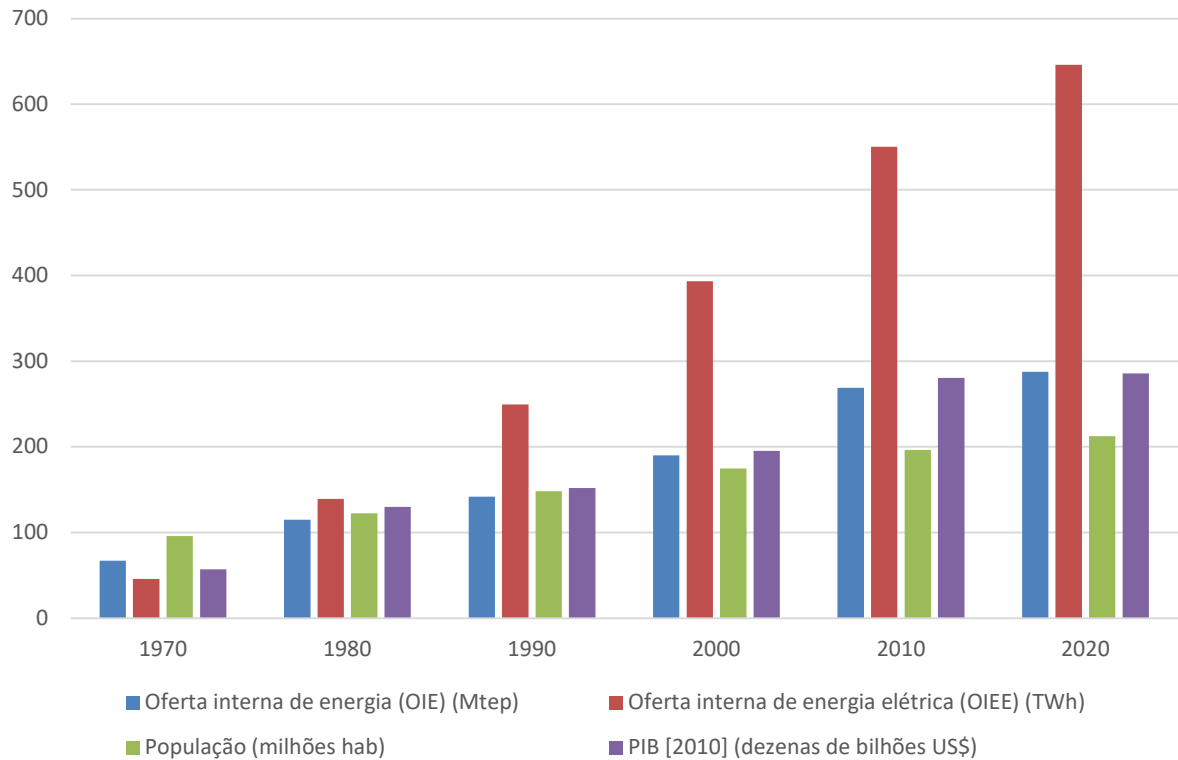
Tais índices evidenciam que, no setor energético brasileiro, apresentam-se oportunidades de melhorias no âmbito da eficiência, que se traduzem em ganhos substanciais de modicidade tarifária, postergação de investimentos em geração elétrica, maior competitividade e produtividade, geração de empregos, mais bem-estar para a população e redução de impactos ambientais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

1.1 Cenário Energético do Brasil e do Espírito Santo

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a oferta interna de energia do país tem tido um crescimento

constante nas últimas décadas, apresentando 65,64% de aumento já desde o início do século. Neste mesmo período, o Produto Interno Bruto (PIB) também seguiu essa tendência positiva, com 52,55% de aumento, conforme evidenciado pelo Gráfico 2.

Gráfico 2 – Indicadores energéticos, populacional e econômicos nacionais



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2021).

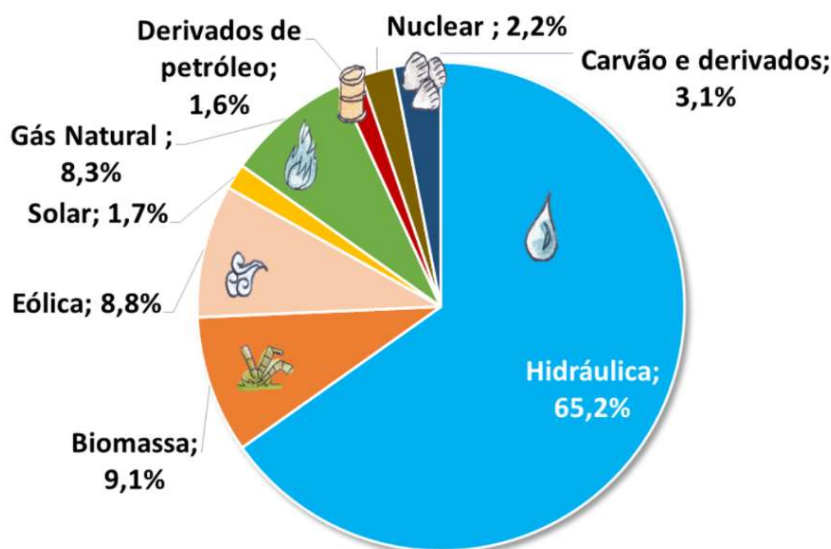
Nota: Adaptado pelo autor.

Partindo do ponto de vista de planejamento e expansão do sistema energético, a natureza finita dos recursos econômicos e naturais sinaliza que não será possível adotar uma estratégia expansionista desenfreada da geração de energia elétrica. Logo, se fazem necessários esforços em prol da otimização de processos, minimizando perdas, aumentando o saldo final da oferta de energia elétrica disponível.

Dados do BEN detalham a constituição da matriz elétrica brasileira, conforme Gráfico 3. É possível constatar a significativa parcela que as fontes renováveis representam (83%), sobretudo na forma das hidrelétricas, que correspondem a 65,2% dos 645,9 (TWh) gerados nacionalmente no ano de 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Apesar da predominância

das fontes renováveis, detecta-se que as termelétricas totalizaram, em 2020, por expressivos 24,3% da geração nacional de energia elétrica.

Gráfico 3 – Matriz elétrica brasileira



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2021).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as centrais geradoras termelétricas (UTE), embora distintas entre si, adotam o mesmo mecanismo de geração de energia elétrica, que consiste no aproveitamento da energia térmica obtida pela combustão de um combustível fóssil ou biomassa para geração de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020). No Espírito Santo, estas instalações são cruciais à matriz elétrica estadual. Segundo o Sistema de Informações da Geração da Aneel (SIGA), em meados de janeiro de 2022, cerca de 68,77% dos aproximadamente 1,775 (GW) de potência outorgada no estado eram oriundas de UTE (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

1.2 Caso em Estudo

Uma usina termelétrica pode apresentar-se com diversos princípios de funcionamento, tais como: caldeiras de vapor, turbinas a gás, motores de combustão interna (MCI), entre outros. Esta última, em especial, faz-se presente na maior usina do tipo no norte do Espírito Santo, a UTE Luiz Oscar Rodrigues de Melo (UTE LORM), ilustrada pela Figura 1. Segundo Santos (2005), em uma UTE com motor de combustão interna, os gases de escape são geralmente

jogados na atmosfera e a água quente do resfriamento é resfriada através de um dissipador de calor por convecção ou num radiador. Nessa configuração, há ventiladores contidos no radiador, que, por sua vez, são acionados por motores elétricos atuando no resfriamento do sistema. Estes motores também exigem dispositivos que atuem no controle dos processos de partida, frenagem e regulação do ponto de operação, conforme condições estabelecidas previamente ou decorrentes das condições ambientes.

Figura 1 – A UTE Luiz Oscar Rodrigues de Melo



Fonte: Linhares Geração (2021).

A atuação deste arranjo de motores se faz necessária em prol do sistema de resfriamento, que visa à manutenção de uma temperatura de operação favorável ao processo termodinâmico. Contudo, nestes componentes elétricos envolvidos apresenta-se também uma oportunidade de análise dos níveis de consumo, a fim de investigar possíveis estratégias de como reduzi-los. Tal procedimento traduzir-se-ia em uma repotenciação, conforme descrita por Stenzel (1997), como uma importante alternativa para alcançar melhorias nos sistemas e na geração de termelétricas, por meio de redução do consumo específico, limitação das emissões e adoção da opção de custo mínimo, aumentando a capacidade de geração.

Portanto, formulou-se a seguinte pergunta: é possível reduzir o consumo interno de energia elétrica da UTE LORM, resultando em um acréscimo no saldo final de energia gerada e

ampliando a eficiência energética total da instalação geradora, por meio de ajustes no sistema de controle do sistema de resfriamento das unidades geradoras?

1.3 Objetivos Geral e Específicos

O propósito deste estudo de caso era averiguar a viabilidade de redução do consumo interno de energia elétrica da UTE Luiz Oscar Rodrigues Melo, por meio de ajustes no sistema de controle do sistema de resfriamento das unidades geradoras que viessem a aumentar o saldo final de energia gerada na instalação, ampliando a eficiência energética total.

Para atingir o objetivo geral definido, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Discriminar o consumo de energia dos motores dos ventiladores do sistema de resfriamento dos MCI e sua relevância entre os principais usos finais de energia elétrica da termelétrica;
- b) Desenvolver um modelo simplificado que relacione o consumo de energia elétrica dos motores e seus inversores do sistema de resfriamento com a temperatura da água de resfriamento, os dados de geração, a temperatura ambiente e outros;
- c) Quantificar possíveis ganhos técnicos e econômicos oriundos de uma proposta de modificação dos atuais pontos de operação do sistema de controle dos motores do sistema.

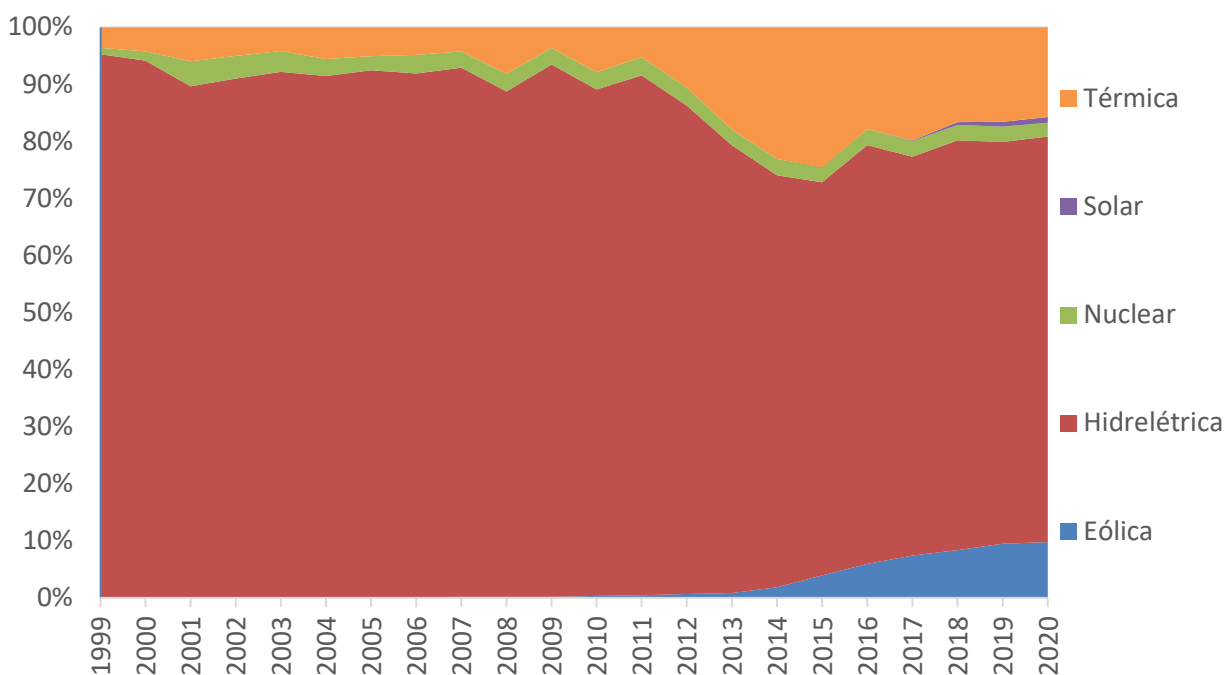
1.4 Justificativa

No SIGA, são listadas as usinas geradoras de energia elétrica em operação no país. Em meados de janeiro de 2022, as usinas termelétricas contabilizaram 49,145 GW de potência outorgada total em um total de 3.163 instalações em operação. Esse montante corresponde a 25,26% de toda a potência instalada no território nacional (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Este cenário, de presença expressiva de instalações de geração de energia elétrica a partir de energia térmica, requer atenção. Devido aos níveis de energia demandada pelos diversos setores da sociedade, faz-se necessário o despacho contínuo de usinas termelétricas, que, muitas vezes,

originalmente não foram planejadas com esse fim. Estas que inicialmente dariam segurança ao sistema energético, em sua concepção priorizaram plantas mais simples, com baixo custo inicial, sem empenho pela eficiência (MORAWSKI, 2016). É possível evidenciar essa tendência a partir dos dados de geração de energia elétrica anuais por cada fonte de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), mostrados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Participação de cada fonte na totalidade da energia elétrica gerada no SIN



Fonte: Operador Nacional do Sistema (2021b).

Nota: Adaptado pelo autor.

Portanto, este trabalho se justifica na expressividade das UTE na composição da matriz energética nacional, aliada com seus índices de eficiência, os quais apresentam um grande potencial de evolução, em um cenário global onde os recursos naturais devem ser empregados com prudência, em prol do desenvolvimento humano, social e econômico.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Usinas Termelétricas a MCI

Tolmasquim (2016) retrata que os motores de combustão interna representam a tecnologia mais difundida dentre as máquinas térmicas, sendo utilizadas para o acionamento de bombas, compressores ou qualquer outro tipo de carga estacionária. Nestas máquinas, a energia química do combustível é transformada em trabalho mecânico, a partir da combustão da mistura ar-combustível (TOLMASQUIM, 2016).

Segundo Lora e Nascimento (2004 apud VALIATI; MENDES JUNIOR, 2013), os motores alternativos de combustão interna (MCI) são máquinas que podem atingir até 50% de rendimento, tanto à carga parcial quanto nominal. Esta característica lhes proporciona a mais alta eficiência dentre as máquinas térmicas para aplicações de pequena capacidade, podendo ser empregados motores de até 100 MW por unidade, conforme evidenciado no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros técnicos de diferentes tipos de centrais termelétricas

Parâmetro	Central a vapor	Turbina a gás	Ciclo combinado	Motores de combustão interna
Potência nominal por unidade (MW)	20 ~ 1200	0,5 ~340	7 ~ 800	Até 100
Tipo de combustível	Sólido, líquido ou gasoso	Diesel especial ou gás natural	Diesel especial ou gás natural	Diesel especial ou gás natural
Rendimento (%)	42 - 44,5	36 - 37	55 - 60	50

Fonte: Lora e Nascimento (2004) citado por Valiati e Mendes Junior (2013).

Nota: Adaptado pelo autor.

A Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues Melo (UTE LORM) opera desde 2011, no município de Linhares, no Espírito Santo, sendo composta por 24 grupos geradores acionados por MCI, cada um apresentando capacidade de 8,545 MW, totalizando 204 MW de potência instalada (LINHARES GERAÇÃO, 2021).

Desde o início de sua operação, o despacho tem sido praticamente contínuo, fazendo com que a UTE LORM deixasse de ser um empreendimento que viesse a complementar a geração

hidroelétrica e passou a operar na base do Sistema Interligado Nacional. Esse aumento do nível de despacho se justifica em parte pela redução do preço do gás natural, que afetou diretamente o custo variável unitário (CVU) da sua energia gerada, somado à necessidade de suprir déficits de energia gerada associados às fontes hídricas (LINHARES GERAÇÃO, 2021).

Cada grupo gerador presente na usina é acionado por um motor alternativo de combustão interna de 4 tempos turbocomprimido (modelo Wärtsilä 20V34SG de 20 cilindros em V de ignição por centelha – ciclo Otto) alimentado exclusivamente a gás natural com injeção individual por cilindro. Nestes, cada um é dotado de um gerador síncrono trifásico de 10 polos (modelo Cummings AvK DIG 167g/10) (LINHARES GERAÇÃO, 2021). Uma foto do sistema é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Moto-gerador empregado na UTE LORM



Fonte: Linhares Geração (2021).

2.2 Sistema de Resfriamento

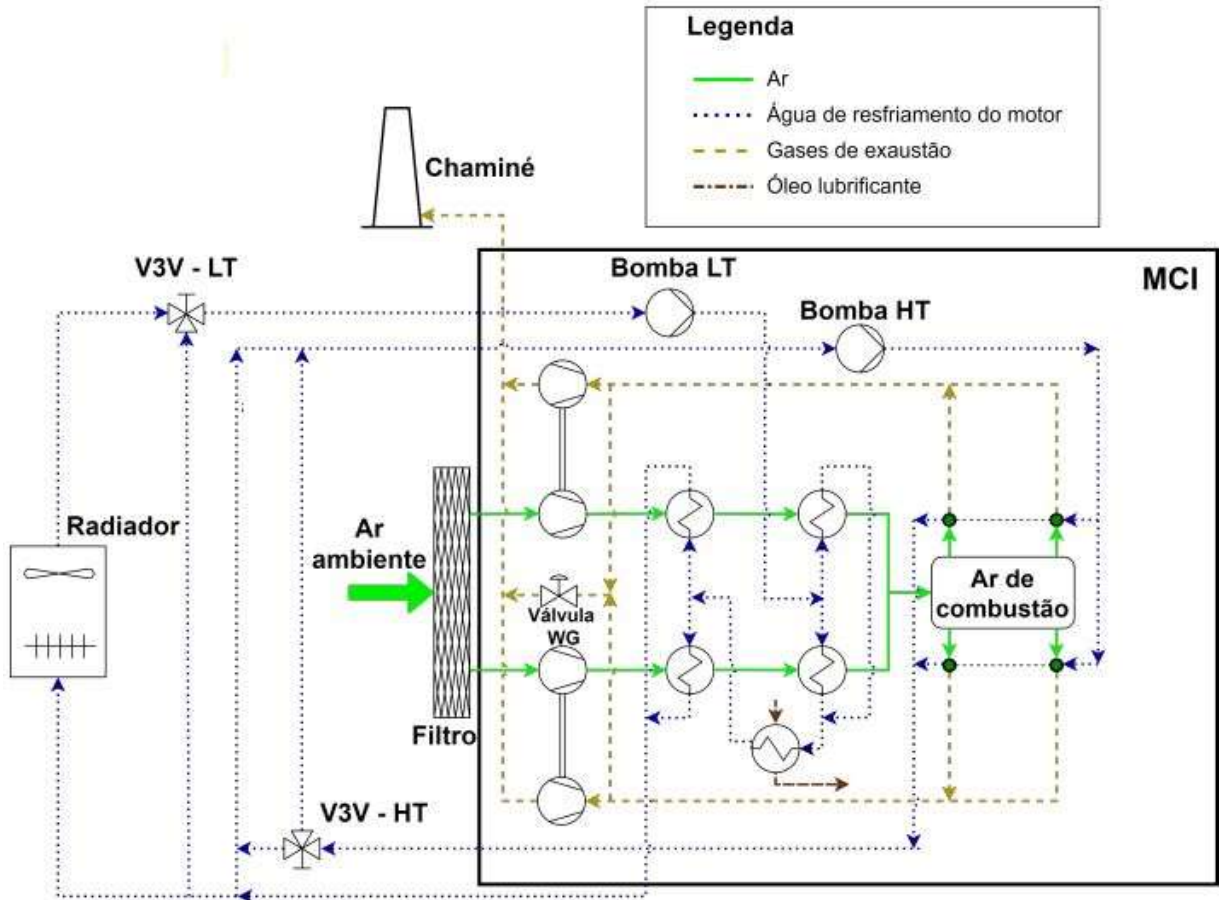
Segundo Iskandar (2011), os sistemas de resfriamento são aqueles que agem no controle de temperatura do motor de combustão interna. Logo, ao atuar nesta temperatura, o sistema de resfriamento contribui para uma maior durabilidade do motor, maior economia de combustível e menor desgaste, que resultarão em um aumento de seu desempenho. O meio utilizado para dissipar o calor pode ser o próprio ar, ou um líquido de arrefecimento (usualmente uma mistura de água e outras substâncias), sendo este último mais eficiente.

O sistema de resfriamento a troca indireta, ou seja, aquele que utiliza um líquido para dissipar calor, necessita dos seguintes componentes: um circuito hidráulico que transporte o fluido de refrigeração adotado, um radiador para resfriamento deste fluido, um ventilador sobre o radiador, uma bomba e uma válvula para a circulação do fluido através do radiador (ISKANDAR, 2011), como exposto na Figura 3. Em alguns destes componentes, como a bomba e o ventilador, faz-se necessária a atuação de motores elétricos. Tal aplicação, portanto, acarreta consumo de energia elétrica para o funcionamento pleno do sistema.

O nível de atuação demandada deste conjunto não é apenas função dos níveis de geração. Como o próprio ar é utilizado para facilitar a troca de calor entre o radiador e o meio ambiente, as condições ambientais instantâneas, como temperatura e umidade do ar atmosférico, serão fatores de influência. Uma vez que as condições climáticas estejam mais amenas, exigir-se-ia menos do conjunto do radiador e, por consequência, menor atuação dos motores acionando os ventiladores. Em momentos mais quentes, a demanda seria mais elevada.

A Figura 3 ilustra os principais componentes que atuam no sistema de resfriamento, que se divide em um circuito de alta temperatura (HT) e um de baixa temperatura (LT). Os radiadores atuam na dissipação do calor da água de resfriamento do motor, após a junção de ambos os circuitos (MIOTTO, 2021). Nas unidades geradoras da UTE LORM, os ventiladores dos radiadores presentes no sistema são acionados por motores de indução trifásicos. Estes ficam dispostos no topo do galpão que abriga as unidades geradoras e contam com 14 conjuntos motor-ventilador em cada radiador, sendo que cada uma das 24 unidades geradoras possui um radiador, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 3 – Representação do motor de combustão interna e principais sistemas auxiliares



Fonte: Miotto (2021).

Nota: Adaptado pelo autor.

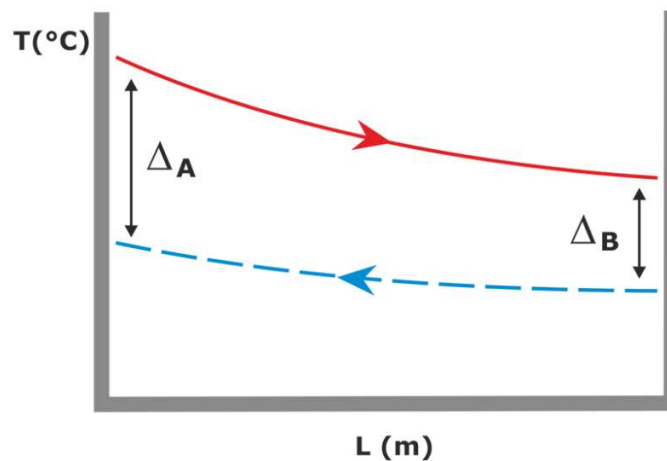
Figura 4 – Conjunto de ventiladores que compõem o sistema de resfriamento



Fonte: Wärtsilä (2017).

O radiador consiste em um trocador de calor, que pode ser representado por meio do modelo de diferença de temperatura média logarítmica (DMTL). Tal modelo fundamenta-se em projetar o desempenho de um trocador de calor, considerando o total de transferência de calor entre a entrada e saída dos fluidos envolvidos. Uma vez que a temperatura de cada fluido variará conforme a posição no trocador de calor, faz-se necessário trabalhar com uma taxa de variação, a partir de uma diferença logarítmica (INCROPERA et al., 2008). Conforme representado na Figura 5, para um trocador de calor com arranjo de contrafluxo, o fluido quente (representado em vermelho) se resfria ao longo do trocador, enquanto o fluido frio (em azul) tem o comportamento oposto.

Figura 5 – Esquema da temperatura em trocadores de calor em função da posição



Fonte: SWEP (2022).

Portanto, equaciona-se a diferença de temperatura logarítmica, conforme a equação (1) (INCROPERA et al., 2008).

$$DTML = \frac{\Delta_A - \Delta_B}{\ln \frac{\Delta_A}{\Delta_B}} = \frac{\Delta_A - \Delta_B}{\ln \Delta_A - \ln \Delta_B} \quad (1)$$

No qual, as diferenças de temperaturas seguem as relações expressas nas equações (2) e (3)

$$\Delta_A = T_{quente, entrada} - T_{frio, saída} \quad (2)$$

$$\Delta_B = T_{quente,saida} - T_{frio,entrada} \quad (3)$$

Portanto, torna-se possível expressar nas equações (4), (5) e (6), respectivamente, as três formas de calcular o calor transferido no radiador: através do *DMTL* e dos balanços de energia do ar e da água, nas quais \dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor no radiador, U_{rad} representa o coeficiente global de transferência de calor no radiador, \dot{m} é a vazão mássica e h é a entalpia.

$$\dot{Q}_{rad} = U_{rad} A_{rad} DTML_{rad} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{m}_{rad,ar} (h_{rad,ar,entrada} - h_{rad,ar,saida}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{m}_{rad,agua} (h_{rad,agua,entrada} - h_{rad,agua,saida}) \quad (6)$$

Com base no calor transferido, é possível averiguar as velocidades empregadas pelos ventiladores presentes nos radiadores que atuam no sistema de resfriamento. A rotação desses pode ser relacionada com a vazão de ar necessária e os dados nominais dos equipamentos. Finalmente, obtém-se a informação desejada a partir da relação de semelhança de ventiladores, aplicando as condições instantâneas e as condições nominais (MIOTTO, 2021). Nas equações (8) e (9), \dot{V} representa a vazão volumétrica, ρ_{ar} é a massa específica do ar atmosférico e n é a velocidade.

$$\dot{m}_{rad} = \dot{Q}_{rad} / (h_{rad,ar,entrada} - h_{rad,ar,saida}) \quad (7)$$

$$\dot{V}_{rad} = \dot{m}_{rad} / \rho_{ar} \quad (8)$$

$$\frac{\dot{V}_{rad}}{\dot{V}_{nom}} = \frac{n_{rad}}{n_{nom}} \quad (9)$$

2.3 Motor de Indução Trifásico

Em diversas aplicações industriais, faz-se necessária uma gama de velocidades de operação dos motores presentes em uma planta. Tradicionalmente, motores de indução com uma alimentação

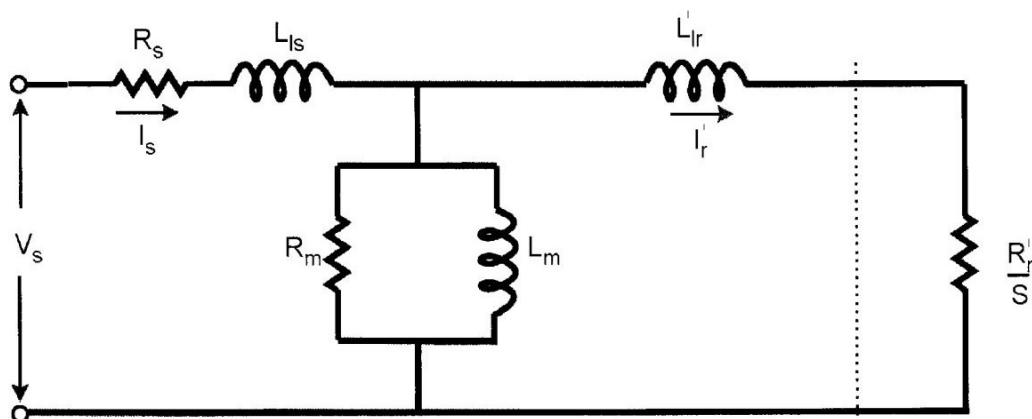
senoidal de frequência constante foram usados em aplicações de velocidade constante, enquanto motores de corrente contínua foram adotados para situações com velocidade variável. Estes últimos, contudo, apresentavam desvantagens por serem caros e necessitarem de manutenção constante nos comutadores e escovas, além de serem inutilizáveis em ambientes sujos e explosivos (BOSE, 2001).

Em contrapartida, os motores de indução se apresentam como máquinas mais baratas e robustas que são capazes de operar em diversos âmbitos. Estes equipamentos podem se apresentar em diferentes portes, desde aplicações monofásicas em ambientes residenciais, com frações de *horse-power (hp)*, até motores trifásicos na ordem de dezenas ou centenas de *hp* operando em bombas, ventiladores e compressores, entre outros (SEN, 1996). A crescente disponibilidade de controladores para máquinas de corrente alternada, embora mais complexos que os utilizados para máquinas de corrente contínua, tornou possível expandir sua abrangência a aplicações que exigem velocidade variável.

2.3.1 Circuitos equivalentes por fase e d-q

A partir dos elementos que constituem o motor, define-se o circuito equivalente por fase conforme a Figura 6. Denota-se o subscrito *s* para os elementos do estator, enquanto o índice *r* é adotado para os elementos do rotor, referenciados ao circuito do estator. Assim, é possível determinar características de desempenho das máquinas em diferentes condições de operação e, também, analisar as variações de corrente, potência, velocidade e comportamento das perdas conforme exigido pela carga (UMANS, 2014).

Figura 6 – Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico



Fonte: Bose (2001).

As equações que modelam o circuito equivalente por fase da máquina descrito anteriormente abrangem o acoplamento existente entre os circuitos do rotor e do estator com a posição do rotor. Torna-se interessante buscar um método de eliminar tal acoplamento, recorrendo-se à transformação das tensões e correntes do motor do referencial estacionário abc para o rotacional $d-q$ (BOSE, 2001). Este modelo segue um marco de referência, que pode ser associado tanto ao rotor, como ao estator, posto que as equações matriciais (10) e (11) regem as transformações entre os dois referenciais. A letra grega θ representa a posição angular do referencial adotado, enquanto β indica a diferença entre a posição do referencial e a posição elétrica do rotor (NOVOTNY; LIPO, 1996). Os circuitos elétricos do eixo em quadratura (q) e do eixo direto (d) da máquina e os parâmetros associados a esse modelo são expostos na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente, cujos parâmetros empregados são exibidos no Quadro 2.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta & \cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta \\ 2 \sin \theta & \sin \theta - \sqrt{3} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

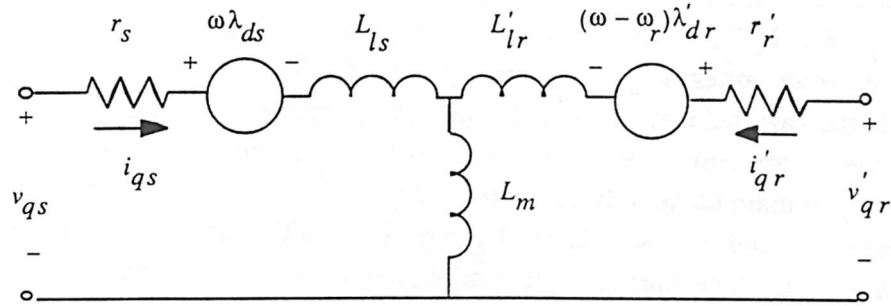
Quadro 2 – Parâmetros da representação por fase da máquina assíncrona trifásica

Parâmetro	Definição
R_s, L_{ls}	Resistência e indutância de dispersão do estator
L_m	Indutância de magnetização
L_s	Indutância total do estator
V_{qs}, i_{qs}	Tensão e corrente do estator no eixo-q
V_{ds}, i_{ds}	Tensão e corrente do estator no eixo-d
ϕ_{qs}, ϕ_{ds}	Fluxos do estator no eixo-q e eixo-d
ω_m, θ_m	Velocidade e posição angular do rotor
p	Número de pares de polos
Ω_r	Velocidade elétrica angular ($\omega_m \times p$)
θ_r	Posição angular elétrica do rotor ($\theta_m \times p$)
T_e	Torque eletromagnético
L'_r	Indutância total do rotor
R'_r, L'_{lr}	Resistência e indutância de dispersão do rotor
V'_{qr}, i'_{qr}	Tensão e corrente do rotor no eixo-q
V'_{dr}, i'_{dr}	Tensão e corrente do rotor no eixo-d
ϕ'_{qr}, ϕ'_{dr}	Fluxos do rotor no eixo-q e eixo-d

Fonte: MathWorks (2021a).

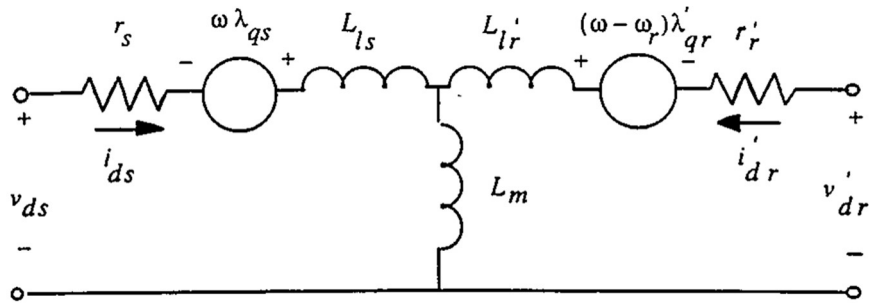
Nota: Adaptado e traduzido pelo autor.

Figura 7 – Circuito elétrico no eixo-q da máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado



Fonte: Novotny e Lipo (1996).

Figura 8 – Circuito elétrico no eixo-d da máquina de indução trifásica de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado



Fonte: Novotny e Lipo (1996).

São equacionadas, portanto, as relações que regem o comportamento das tensões, correntes do circuito e torque eletromagnético do motor, conforme demonstrado pelas equações (12) a (22) (NOVOTNY; LIPO, 1996).

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega\varphi_{ds} \quad (12)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega\varphi_{qs} \quad (13)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr} \quad (14)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr} \quad (15)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (16)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (17)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (18)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (19)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (20)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (21)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (22)$$

2.3.2 Características de Velocidade e Conjugado

Em motores de indução, a velocidade que age como referência para seu ponto de operação é a denominada velocidade síncrona. Esta, por sua vez, é regida tanto pelo número de polos dos enrolamentos do estator da máquina, quanto pela frequência de alimentação aplicada. Essa grandeza corresponde à velocidade do campo girante produzido pela alimentação das bobinas dos enrolamentos do estator da máquina, em corrente alternada. Seu valor numérico é expresso pela equação (23) (BOSE, 2001).

$$N_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (23)$$

onde N_s é a velocidade síncrona, em rpm, f_e (ou simplesmente f) é a frequência da tensão de alimentação do estator, em Hz, e P corresponde ao número de polos da máquina. Algo a se notar é o fato de que uma oportunidade de controle de velocidade se origina da relação descrita. Uma vez finalizada a construção da máquina, o número de polos torna-se uma grandeza que dificilmente será alterada, entretanto, a frequência é controlável pela alimentação aplicada aos terminais.

O valor obtido a partir da equação (23), contudo, não indica a velocidade observada no eixo. No caso do motor de indução, a interação entre o campo do estator e o do rotor induz uma tensão em seus enrolamentos (que são eletricamente curto-circuitados), de forma que circule uma corrente, que produzirá torque no eixo. Portanto, nesta máquina, seu princípio de funcionamento está diretamente ligado ao movimento relativo entre esses dois campos produzidos. Logo, caso o rotor opere na velocidade síncrona, a máquina não produzirá torque. Por sua vez, quanto maior for a demanda da carga no eixo, maior terá que ser a diferença entre

a velocidade do eixo e a síncrona, para que seja induzida uma maior corrente e produzido o torque necessário para o acionamento. Essa diferença, denominada escorregamento, é expressa segundo a equação (24) (BOSE, 2001).

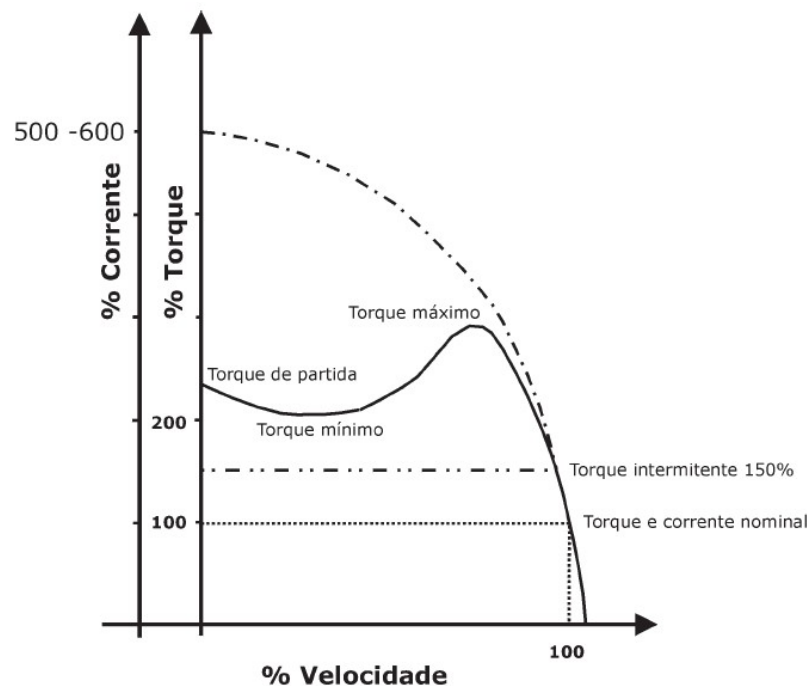
$$s = N_s - N \quad (24)$$

No qual s é o escorregamento, N_s é a velocidade síncrona e N , a velocidade no eixo da máquina, todos em rpm. O escorregamento também pode ser expresso em termos percentuais, conforme a equação (25), a partir da qual pode-se concluir que o valor do escorregamento acompanha o grau de carregamento do motor.

$$s_{(\%)} = 100 \frac{(N_s - N)}{N_s} \quad (25)$$

O comportamento da corrente e do torque em função da velocidade de rotação do motor é exibida no Gráfico 5, evidenciando os altos valores necessários para a partida do motor e o comportamento praticamente linear das curvas em condições próximas das nominais (baixos escorregamentos).

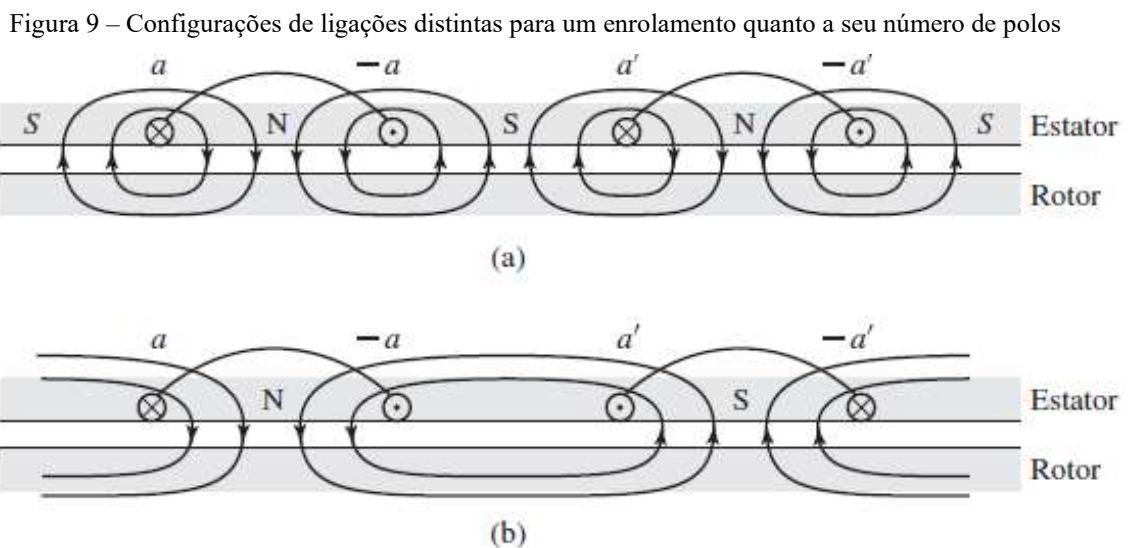
Gráfico 5 – Curvas de corrente e torque em função da velocidade



Fonte: Weg (2005).

2.3.3 Métodos de Controle de Velocidade

Conforme já discutido na seção 2.3.2, a velocidade síncrona do campo girante é regida pelo número de polos do motor de indução trifásico, assim como pela frequência da alimentação. Estão dispostos, portanto, dois possíveis métodos de controle da velocidade. Ademais, é ainda possível atuar no escorregamento do motor através do nível da tensão da alimentação, variando a resistência do rotor, ou, por fim, controlando a tensão aliada à frequência (UMANS, 2014). Uma primeira opção para o controle de velocidade de motores de indução seria o controle por variação de polos, considerando-se que é possível projetar motores de indução, que apresentem em seus enrolamentos, dois tipos diferentes de configurações de ligações das bobinas. Este arranjo permite alternar entre os dois modos, sendo que, entre uma seleção e outra, o número de polos da máquina será o dobro. No entanto, esse controle é limitado, uma vez que só será possível definir um número restrito de pontos de operação do motor (SEN, 1996).

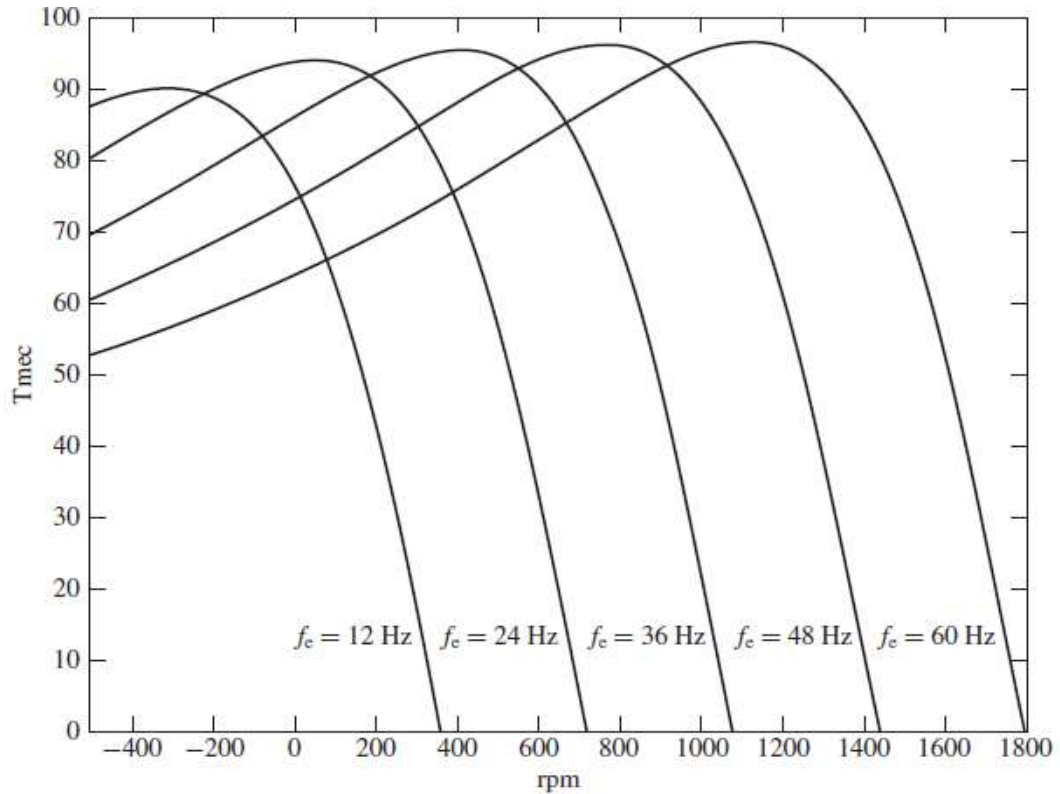


Fonte: Umans (2014).

Já o controle pela variação da frequência da tensão de alimentação do motor, assim como o número de polos da máquina, age diretamente na velocidade síncrona. Torna-se possível, então, atuar de forma muito flexível em uma vasta gama de velocidades. No entanto, adotando-se este método, faz-se necessária a atenção a certos limites de tensão e torque, a fim de garantir uma operação segura (CHAPMAN, 2013). Este tipo de controle atua de forma a deslocar a curva de torque-velocidade ao longo do eixo da velocidade, como ilustrado pelo Gráfico 6. Na prática, essa curva não se desloca sem sofrer alterações, uma vez que, para baixos valores de velocidade,

os efeitos de queda de tensão na resistência do estator da máquina tornam-se mais relevantes (SEN, 1996).

Gráfico 6 – Variação da curva torque-velocidade de um motor de 4 polos, 60 Hz quando aplicado o controle de frequência



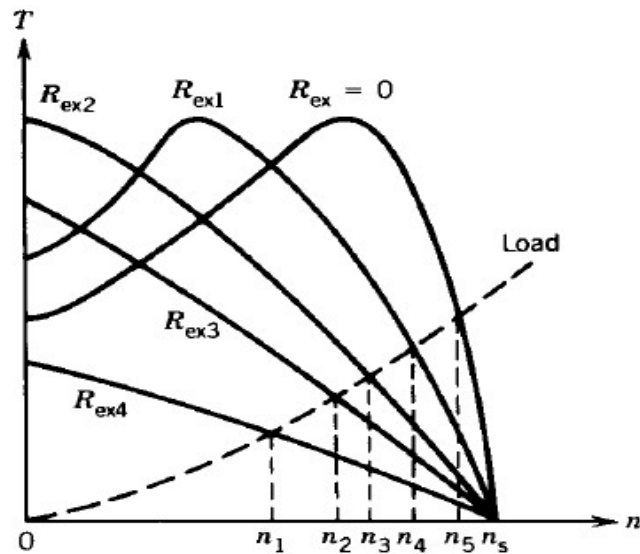
Fonte: Umans (2014).

Existe também a possibilidade de controle da velocidade por mudança da resistência do rotor, por meio da inserção de resistências adicionais no circuito do rotor da máquina. No entanto, este método se restringe a apenas motores do tipo rotor bobinado, nos quais há acesso aos terminais do rotor, fato este que não ocorre nos motores do tipo gaiola de esquilo (CHAPMAN, 2013). Conforme exposto no Gráfico 7, um ponto de destaque desse tipo de controle é a possibilidade de ter o torque máximo da máquina para condições de partida do motor. Contudo, as desvantagens desse método estão relacionadas à má regulação de velocidade, quando ocorre uma variação de carga, além do baixo rendimento em velocidades reduzidas (UMANS, 2014). Esse último ponto ganha uma relevância ainda maior no âmbito da eficiência energética.

Por fim, há a possibilidade do controle de velocidade pela tensão de alimentação. Sabe-se que esta rege também o comportamento do torque da máquina, numa relação quadrática. Essa

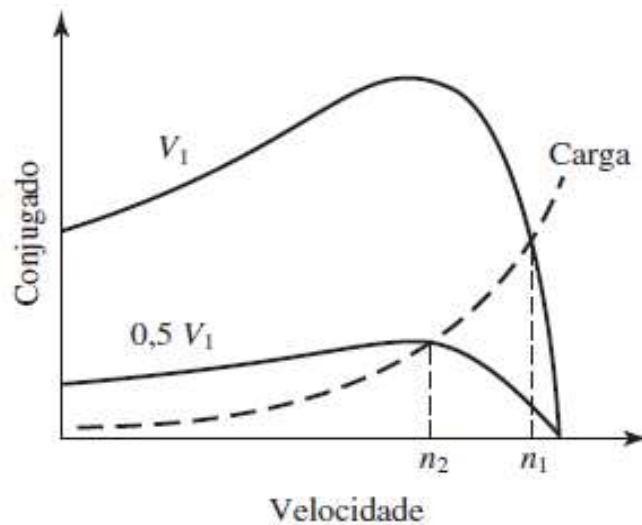
técnica caracteriza-se por ter uma faixa mais reduzida de controle de velocidade, uma vez que, em baixas velocidades, o escorregamento mais elevado causa sua operação mais ineficiente. Contudo, há situações em que a carga também apresenta uma relação quadrática entre o torque e a velocidade, como exposto no Gráfico 8. Logo, nesses casos, quando se trata de motores de pequeno porte, esta técnica se apresenta como uma opção de controle (UMANS, 2014).

Gráfico 7 – Controle da velocidade pela resistência do rotor



Fonte: Sen (1996).

Gráfico 8 – Controle da velocidade por meio da tensão de alimentação



Fonte: Umans (2014).

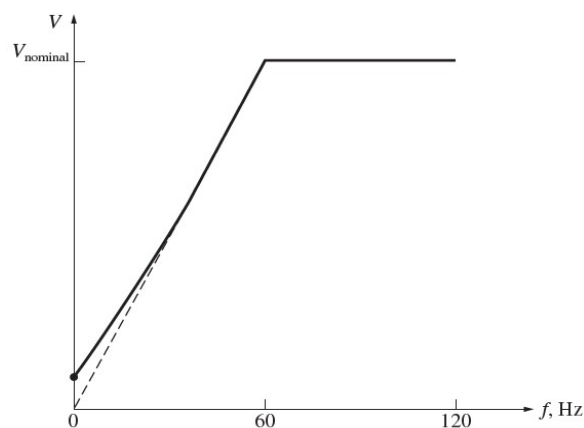
2.3.4 Relação Tensão/Frequência

Conforme mencionado na seção anterior, dentre os métodos disponíveis de controle de velocidade, regular diretamente tensão e frequência de alimentação do motor de indução rende uma faixa mais ampla de operação. Isto, aliada à evolução dos dispositivos de acionamento por estado sólido, tornou mais atraente e viável a atuação em ambas as grandezas para um controle mais robusto. Segundo Sen (1996), o controle do torque desenvolvido no motor é feito pelo fluxo magnético da máquina, cujo comportamento é regido pela equação (26).

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}}{2\pi N_e} \frac{V}{f} \quad (26)$$

Onde Φ corresponde ao fluxo, N_e , ao número de espiras, V , à tensão de alimentação e f , à frequência. Verifica-se que o fluxo é passível de ser controlado pela razão entre tensão e frequência. Assim, uma vez que a proporção seja mantida constante, o fluxo da máquina não se altera. Adotando-se os valores nominais, o torque nominal é possível de ser atingido em diversos pontos de velocidade (SEN, 1996). Tal técnica é aplicável em uma certa faixa de operação, uma vez que, em frequências muito baixas, a queda de tensão na resistência do estator não pode mais ser desprezada, conforme ilustrado na Figura 6. Aliado a isso, não se deve ultrapassar o limite da tensão nominal do motor, a fim de preservar a integridade dos enrolamentos. Desse ponto em diante, observa-se o enfraquecimento do fluxo e queda do torque da máquina, uma vez que a frequência poderia ser aumentada, enquanto a tensão, prudentemente não (WEG, 2005). Tais comportamentos estão expostos no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Relação tensão/frequência em motor de indução



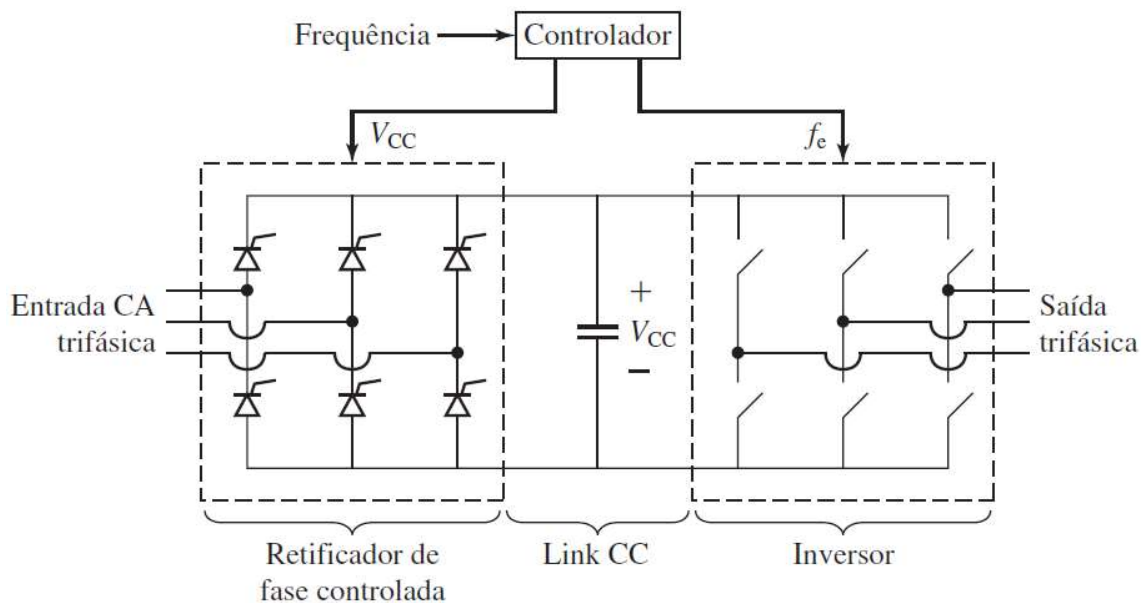
Fonte: Chapman (2013).

2.4 Inversor de Frequência

Com evolução da eletrônica de potência, os dispositivos eletrônicos têm assumido papel de destaque no acionamento de máquinas elétricas. Um dos líderes dessa tendência, o inversor de frequência permite a conversão de um sinal alternado original em um outro sinal alternado com tensão ou frequência distintas (FRANCHI, 2008).

Esse processo é efetuado em algumas etapas, conforme esquemático evidenciado na Figura 10. O bloco retificador converte a tensão originalmente CA em CC através de componentes retificadores, como diodos ou transistores, que retificam os semiciclos positivos e negativos do sinal da tensão, tornando-o contínuo e pulsante. O barramento CC, também chamado *link CC*, atua para que o nível da tensão oscile minimamente (FRANCHI, 2008).

Figura 10 – Esquemático de um inversor de frequência



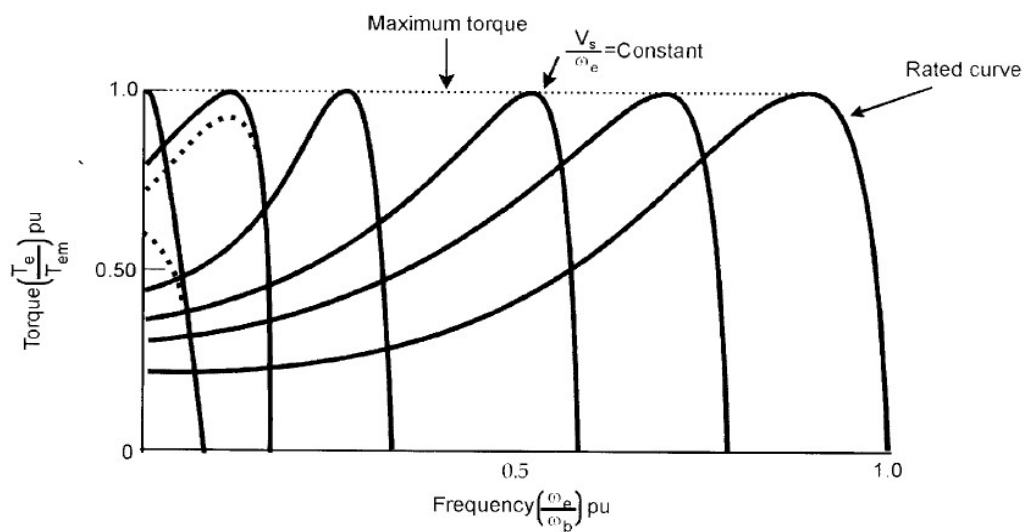
Fonte: Umans (2014).

2.4.1 Controle Escalar Linear

O chamado controle escalar, aplicado por inversores de frequência para acionar motores de indução, baseia-se justamente na possibilidade de controlar o valor da razão entre tensão e frequência de alimentação da máquina, também referida como relação V/f , apresentando-se como uma opção de barata implementação, em contextos nos quais não seja necessário um

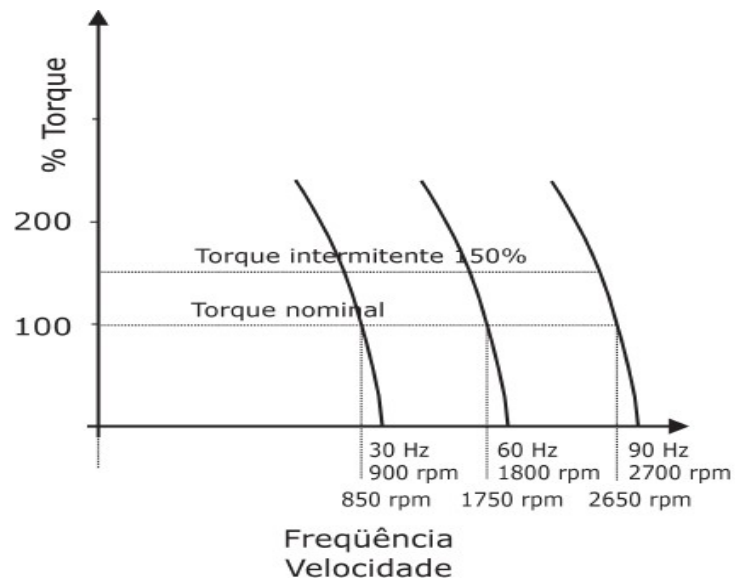
controle muito preciso de torque (WEG, 2005). Uma vez que essa relação seja mantida constante, no método chamado controle escalar linear, a tensão será variada linearmente em relação à frequência adotada, fazendo com que a curva de torque por velocidade não perca seu perfil característico, como se observa no Gráfico 10. É importante notar que, apesar da variação da frequência da tensão de alimentação do motor, o valor da velocidade de escorregamento do motor, em rpm, em certo carregamento também permanecerá constante. Tal evidência é melhor ilustrada no Gráfico 11.

Gráfico 10 – Curvas de torque por velocidade mantendo a relação tensão/frequência constante



Fonte: Bose (2001).

Gráfico 11 – Curvas de torque por velocidade em um motor de 4 polos em 60 Hz com controle escalar



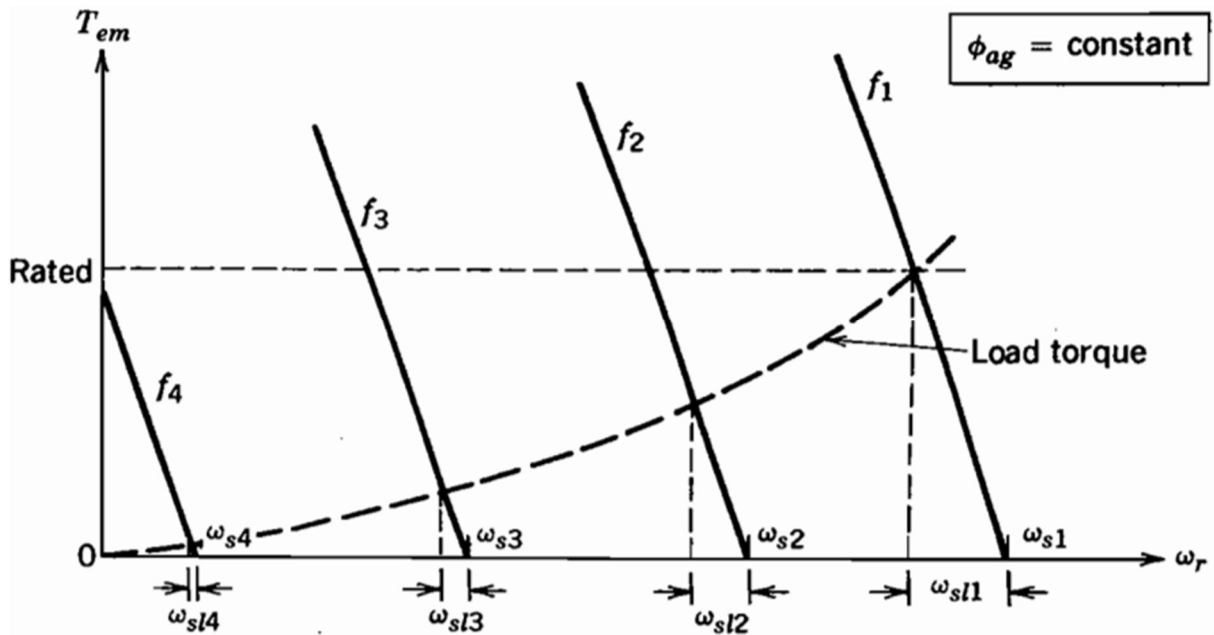
Fonte: Weg (2005).

O mesmo não ocorre para o valor percentual da velocidade de escorregamento, visto que este, por sua vez, não se mantém constante. Isso se torna relevante, pois sabendo-se o escorregamento nominal, faz-se possível estimar os demais parâmetros relacionados, desde que a frequência esteja na faixa de operação adequada (WEG, 2005).

2.4.2 Controle Escalar Quadrático

Em alguns tipos de carga, como bombas e ventiladores, as curvas torque-velocidade que descrevem seu comportamento não são lineares. Estas, na verdade, são regidas por uma curva na qual o torque varia com o quadrado da velocidade, como mostra o Gráfico 12.

Gráfico 12 – Comportamento típico da curva torque-velocidade de ventiladores e bombas centrífugas

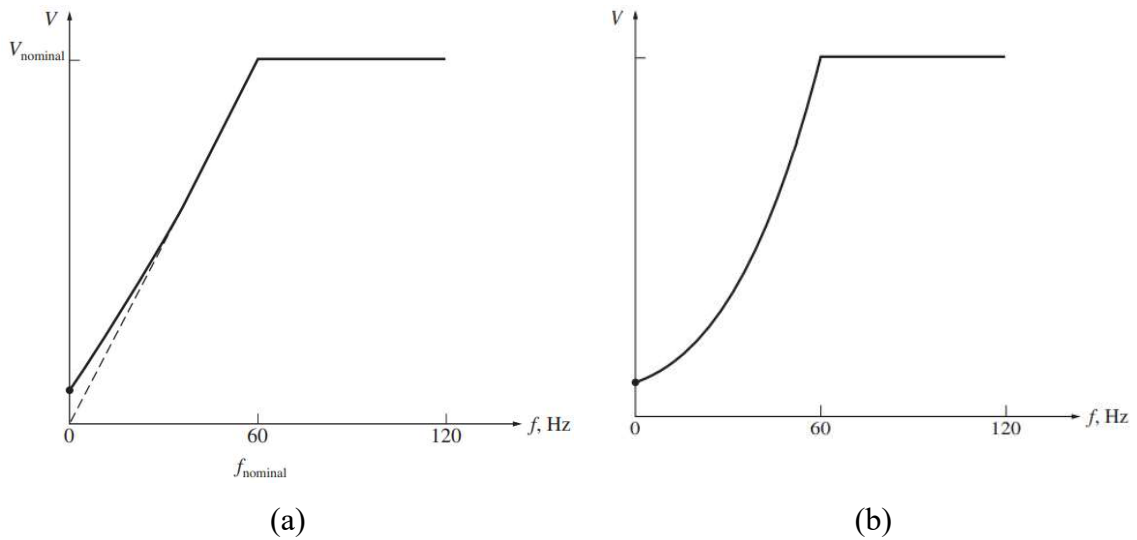


Fonte: Mohan (1995).

Segundo Mohan (1995), para acionamentos desses tipos de cargas, um controle escalar que aplique uma relação V/f linear não terá boas respostas, e, por consequência, pode apresentar um pior desempenho em termos de eficiência. Nessas aplicações, torna-se mais interessante aplicar um controle escalar quadrático, que possibilite um regime de alimentação mais adequado à carga. Os diferentes perfis de comportamento dessa relação são ilustrados pelo Gráfico 13.

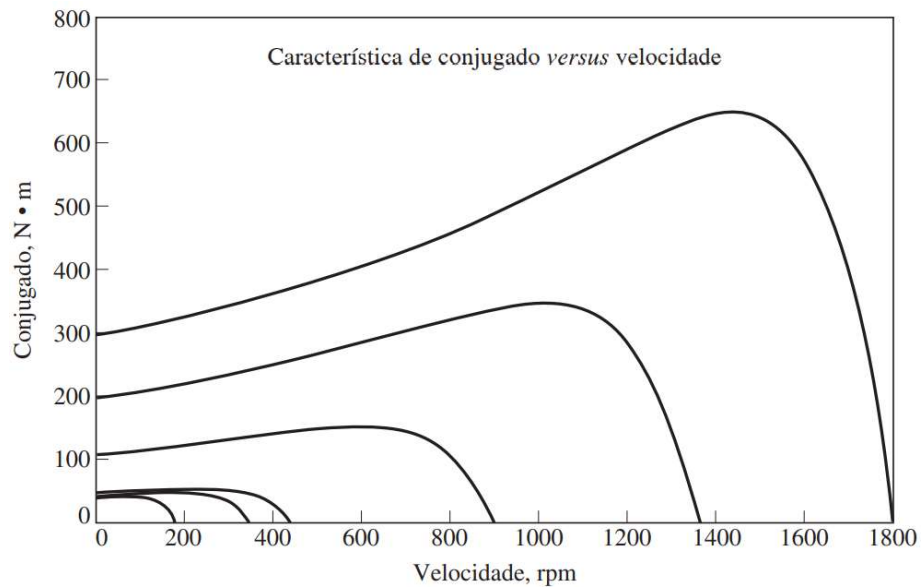
Conforme evidenciado pela equação (26), o fluxo da máquina neste tipo de controle operará em um valor menor. Por sua vez, o torque da máquina, assim como a corrente, também assumirá medidas inferiores, como demonstrado no Gráfico 14. Entretanto, tal comportamento não se apresentará como um problema, dependendo do tipo de carga a ser acoplada ao motor. Na verdade, é justamente essa característica que torna esse tipo de controle mais atraente para acionamentos de ventiladores e bombas.

Gráfico 13 – Comportamento da relação V/f escalar: (a) linear e (b) quadrático



Fonte: Chapman (2013).

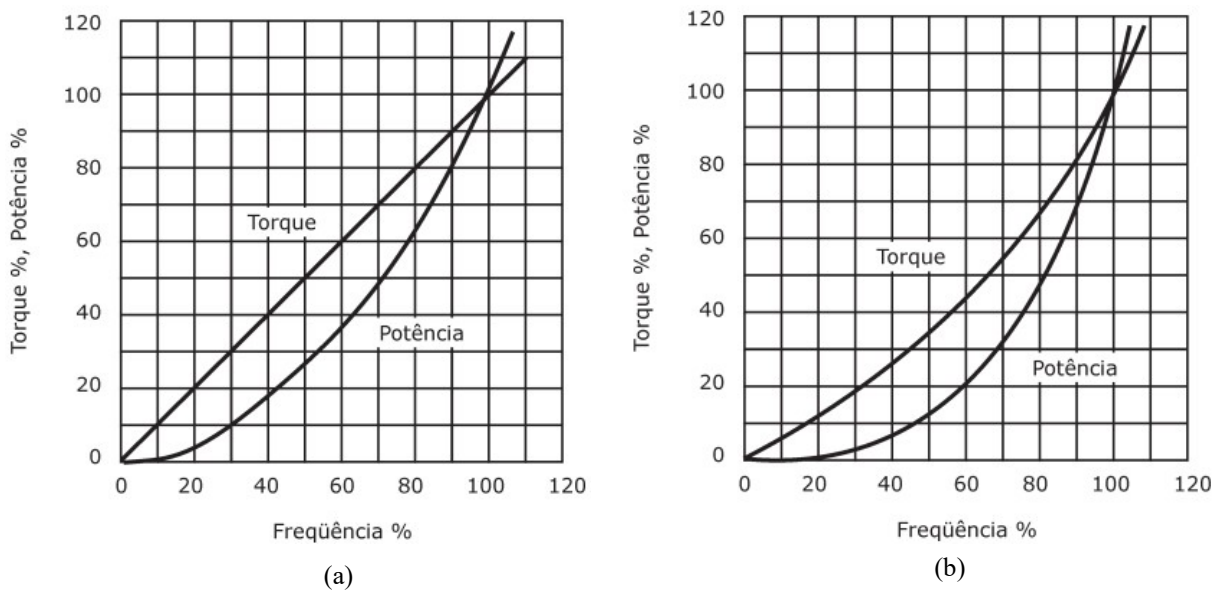
Gráfico 14 – Curva conjugado-velocidade aplicando a relação V/f quadrática



Fonte: Chapman (2013).

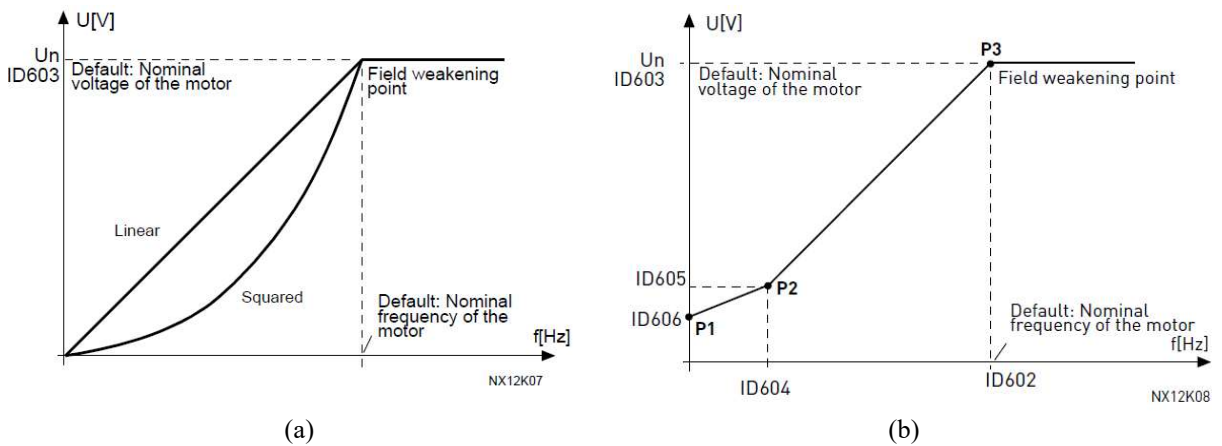
Com a redução do fluxo e, conseqüentemente, do torque e da corrente exigidos da máquina, uma menor potência elétrica será requerida do motor para acionamento da carga, o que leva a um desempenho energético mais favorável (WEG, 2005), conforme ilustrado pelo Gráfico 15. Alguns inversores apresentam também a possibilidade de programar distintas relações entre tais grandezas, além das duas já mencionadas para o controle escalar. Desta forma, adequar-se-ia o comportamento da relação V/f, conforme objetivo da aplicação específica, como ilustrado no Gráfico 16.

Gráfico 15 – Comportamento do torque e potência para cargas típicas com comportamento de crescimento de torque: (a) linear e (b) quadrático



Fonte: WEG (1995).

Gráfico 16 – Curvas V/f parametrizáveis em inversores do fabricante Vacon: (a) linear e quadrática, e (b) programável



Fonte: Vacon (2007).

Neste sentido, muito se tem proposto na busca por curvas ótimas de parametrização para distintos propósitos. Abrahamsen e outros (1998) avaliaram experimentalmente, com motores de indução de 2,2 kW, como que a escolha de um controle ótimo de energia é influenciada pela construção de motores de indução (padrão *versus* alta eficiência) e aplicação (torque constante *versus* aplicações em aquecimento, ventilação e ar-condicionado). Demonstraram também, estatisticamente, que esses mesmos resultados poderiam ser obtidos em motores de uma larga faixa de potência nominal de eixo, entre décimos de kW até 50 kW. Além disso, foi atestado que tanto no caso dos motores de construção padrão, quanto para os de construção de alta eficiência, o rendimento pode atingir índices melhores de desempenho em situações de carregamentos abaixo de 60%.

Martinez Molina e Ramires Scarpetta (2002) apresentaram uma metodologia que buscava encontrar uma curva V/f que minimizasse o consumo energético em cargas com comportamento quadrático, como ventiladores e bombas. Seus resultados demonstraram que, a partir dos dados de placa de motor, seria possível obter curvas parametrizadas tais, que resultariam em até 24% de redução das perdas totais da máquina, sendo possível, assim, obter melhoria de 6 pontos percentuais na eficiência e de 10 pontos percentuais no fator de potência.

Já Lee e outros (2018) quantificaram experimentalmente o desempenho de um motor de 4,6 kW em aplicações de torque variável acionando um ventilador centrífugo. Controlava-se o sistema com inversores, empregando diferentes algoritmos de eficiência energética, que se baseavam em perfis distintos de curvas de controle, usando a relação V/f escalar linear como referência contra a escalar quadrática, otimização de fluxo e V/f escalar de otimização energética. Os autores objetivavam encontrar o melhor desempenho que atendesse a padrões de qualidade estipulados por normas europeias e internacionais de conformidade. A partir dos resultados obtidos, foi possível determinar que os três algoritmos atingiam a conformidade regulatória. Além disso, foi categorizado o sistema experimental a partir do seu desempenho, conforme classes estipuladas com os padrões adotados.

3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Conforme abordado nas seções anteriores, este projeto objetiva investigar, por meio de um modelo computacional, o perfil de consumo de energia elétrica dos motores e seu inversor de frequência, que acionam os ventiladores presentes nos radiadores do sistema de refrigeração de uma usina termelétrica a motor de combustão interna.

Como já citado anteriormente, o trabalho foi desenvolvido analisando-se a planta da Usina Termelétrica Luiz Oscar Rodrigues de Melo, administrada pela Linhares Geração S.A. Esta UTE, por sua vez, está atrelada a um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) regulado pela ANEEL, no qual uma das integrantes é a professora orientadora deste projeto de graduação. Logo, fez-se possível essa relação de estudo na instalação.

Para o desenvolvimento do modelo computacional que representasse o sistema em estudo, foi utilizado o ambiente gráfico de programação *Simulink*[®]. Este, a partir da subdivisão *Simscape Electrical*[™], fornece uma vasta biblioteca de componentes para modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência e eletrônicos, entre outros (SIMSCAPE, 2021). Deste acervo, foram empregados blocos correspondentes aos elementos presentes na UTE LORM, adotando-se os parâmetros conhecidos no sistema real, a fim de se obter um modelo fidedigno. Outro ponto favorável à escolha deste *software* é a integração direta com a ferramenta *MATLAB*.

A partir do desafio proposto pela pesquisa, pode-se classificá-la como aplicada quanto à sua natureza, por dirigir-se à solução do problema específico da redução do consumo de energia elétrica nos componentes do sistema de resfriamento dos MCI de termelétricas. A característica explicativa da pesquisa quanto aos seus objetivos se justifica, visto que é explanado o sistema instalado e como alterações no mesmo podem modificar sua operação. Trata-se de uma pesquisa quantitativa na forma em que aborda o problema, uma vez que se busca mensurar a variação do consumo energético do sistema ao ser submetido a cenários distintos. Por fim, é adotado um estudo de caso em seu procedimento técnico, pois foram coletadas e analisadas informações da UTE LORM, de forma a permitir um conhecimento detalhado e amplo de instalações desta espécie.

3.1 Modelagem dos Motores de Indução

Na seção 2.3.1, a Figura 6 ilustrou as grandezas que compõem o circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico. Estas grandezas são exigidas no ambiente do *Simulink*®, ao empregar-se o bloco disponível na plataforma, no qual modela-se uma máquina trifásica assíncrona e viabiliza-se analisar o comportamento das grandezas elétricas e mecânicas da máquina.

O modelo adotado pelo *software* implementa uma máquina modelada em um sistema com eixos d-q, com a referência selecionada pelo usuário (THE MATHWORKS, 2021a). Este modelo da máquina de indução apresenta-se como uma forma compacta de representação das equações das máquinas rotativas, uma vez que aponta a uma referência comum o acoplamento entre rotor e estator, possibilitando simplificar sua representação (NOVOTNY; LIPO, 1996). Tal referência pode ser adotada tanto como estacionária, sendo neste caso associada ao estator, como também rotativa, neste caso a rotacionando sincronamente com o circuito do rotor ou do estator (NOVOTNY; LIPO, 1996).

Além do modelo d-q do motor, o *software* aplica as relações expressas pelas equações (27) e (28) para reger o comportamento mecânico da máquina. Nestas relações, a variável J indica o coeficiente de inércia combinado do rotor e da carga, enquanto F é o coeficiente de atrito viscoso do rotor e da carga e T_m o torque mecânico no eixo (NOVOTNY; LIPO, 1996).

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2J}(T_e - F\omega_m - T_m)\varphi'_{dr} \quad (27)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (28)$$

3.2 Modelagem do Inversor de Frequência

No ambiente de simulação adotado neste trabalho, não há disponível um bloco único que englobe todos os estágios de um inversor de frequência. Faz-se necessário, então, modelar o estágio de retificação, *link* CC e inversor, como ilustrado na Figura 10. Neste ponto, foi encontrado um empecilho. De forma análoga à seção anterior, foram levantados, junto ao

fabricante, as informações do modelo dos equipamentos adotados na UTE LORM. Entretanto, não foram disponibilizados, pelo fabricante do equipamento, os dados dos componentes internos que seriam necessários para uma modelagem mais precisa, e sim os dados técnicos mais comuns, exibidos nos Quadro 3 e Quadro 4.

Quadro 3 – Valores nominais da potência em rede de 380-500 V, 60 Hz, trifásico do VACON NX 0261 5 FR 9

Parâmetro	Valor
Corrente de entrada	261 A
Capacidade de carga baixa	261,0 A
Capacidade de carga baixa: Sobrecarga de 10%	287,1 A
Capacidade de carga alta	205,0 A
Capacidade de carga alta: Sobrecarga de 50%	308,0 A
Capacidade de carga máxima	410,0 A
Potência do eixo do motor: 10% de sobrecarga a 40 °C	132,0 kW
Potência do eixo do motor: 50% de sobrecarga a 50 °C	110,0 kW

Fonte: Danfoss (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

Quadro 4 – Dados técnicos do VACON NXP 0261 5 FR 9

Item ou função técnica	Dados técnicos	
Conexão da rede elétrica	Tensão de entrada	380 – 500 V
	Frequência de entrada	45 – 66 Hz
	Tempo de retardo da partida	5 s
Conexão do motor	Tensão de saída	0 – Tensão de Entrada
	Frequência de saída	0 – 320 Hz A
	Resolução da frequência	0,01 Hz
Qualidade de controle	Método de controle	Controle de frequência U/f
	Frequência de chaveamento	1 a 6 kHz Padrão: 3,6 kHz
	Tempo de aceleração	0,1 – 3000 s
	Tempo de desaceleração	0,1 – 3000 s

Fonte: Danfoss (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

A partir dos valores nominais, é instruído pelo manual do equipamento como ajustar a parametrização dos inversores. Os parâmetros mais relevantes a este trabalho estão resumidos no Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo dos parâmetros do inversor de frequência VACON NXP 0261 5 FR 9

Índice	Descrição do Parâmetro	Unidade
P 2.1.5	Limite de Corrente	A
P 2.1.6	Tensão nominal do Motor	V
P 2.1.7	Frequência nominal do motor	Hz
P 2.1.8	Velocidade nominal do motor	rpm
P 2.1.9	Corrente nominal do motor	A
P 2.1.10	Fator de potência do motor	-
P 2.6.9	Frequência de chaveamento	Hz

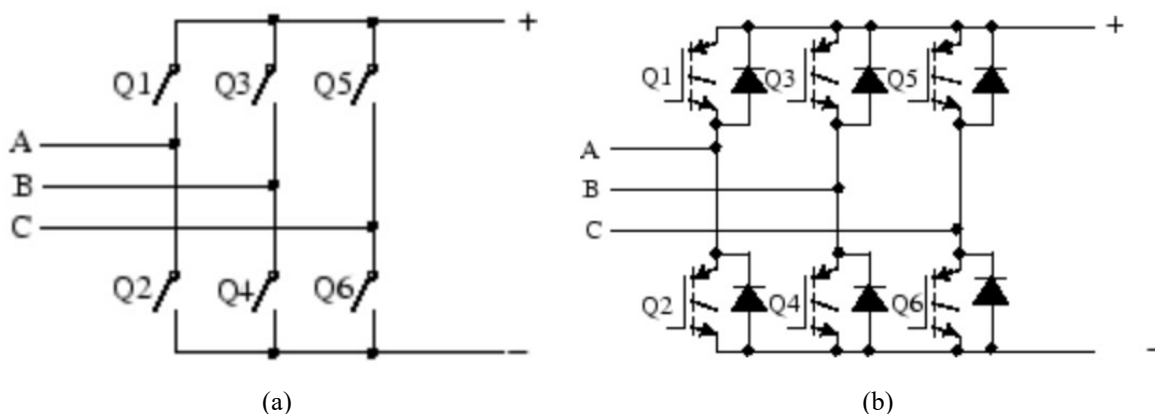
Fonte: Danfoss (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

Como mencionado anteriormente, apesar de a parametrização dos equipamentos ser muito bem conhecida e acessível, o mesmo não ocorreu com as informações a respeito dos componentes internos. Após tentativas de consultas com o fabricante, tais informações não foram fornecidas. Mohan (1995) descreve algumas das características que norteiam a seleção dos dispositivos semicondutores de chaveamento, como: queda de tensão e resistência de condução, tempos de chaveamento, nível de tensão e corrente suportada, coeficiente de temperatura. Tal desconhecimento inviabilizou uma correta modelagem destes componentes.

Partindo desse cenário, surgiu a necessidade de aplicar um modelo ideal ao inversor, no qual são desprezadas as perdas nos dispositivos de chaveamento, além de considerar que o chaveamento é instantâneo. Mohan (1995) assegura que, apesar da aplicação dessas considerações, não há perda significativa de precisão na análise do conversor. A Figura 11 ilustra a condição de um conversor ideal.

Figura 11 – Topologias de estágio de retificação com (a) chaves sem perdas e com (b) dispositivos IGBT



Fonte: MathWorks (2021b).

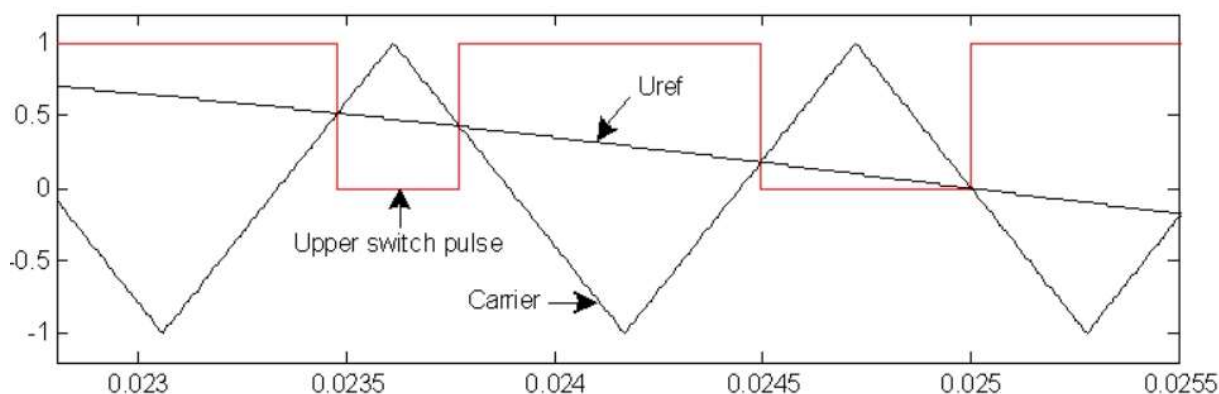
A capacitância do estágio do *link* CC do inversor seria uma outra informação importante a ser considerada para uma correta modulação do sistema como um todo. A presença deste elemento asseguraria uma tensão contínua com uma ondulação próxima de nula. Sem esse dado, faz-se necessário assumir o caso ideal, de um sinal constante na saída do estágio retificador e, por consequência entrada do estágio inversor. Após todas as considerações exercidas, o que se tem na saída do inversor é um sinal modulado, na frequência de chaveamento.

Portanto, para acionar as cargas, a alimentação recebida pelos motores será fornecida através de um sinal de tensão que já foi retificado e este, por sua vez, será modulado conforme a frequência de chaveamento parametrizada no equipamento, a fim de se obter o nível de tensão e a frequência do sinal de saída desejados, a partir do controle escalar adotado.

Por outro lado, apesar do modelo ideal adotado, fez-se necessária a parametrização dos disparos enviados aos dispositivos de chaveamento do inversor, para que a saída forneça uma alimentação aos motores conforme desejado, segundo a relação V/f pretendida.

Para tais disparos, foi confeccionado um circuito adicional de controle dos disparos. O componente que atuou como protagonista foi o bloco gerador de sinal PWM, já presente na biblioteca do *Simulink*[®]. Neste, é possível gerar um sinal pulsado para disparo de conversores de até três fases, através da comparação do sinal de referência, ou moduladora, com um sinal triangular simétrico da portadora (THE MATHWOKS, 2021c). Quando o sinal de referência é maior que a portadora, o pulso do disparo atinge nível alto, ligado. Por sua vez, nos casos em que isso não ocorre, o disparo tem nível nulo, desligado. A Figura 12 ilustra essa dinâmica.

Figura 12 – Geração do sinal de disparo dos conversores



Fonte: MathWorks (2021c).

Como entrada do bloco gerador PWM, empregou-se um sinal senoidal como a referência do comparador contra a portadora triangular. A frequência desse sinal de referência rege o sinal observado na saída do inversor. Controlando-se essa entrada, portanto, permite-se impor ao conjunto de motores a frequência de alimentação desejada. Por sua vez, regular a amplitude deste sinal de referência, viabiliza ajustar-se o valor eficaz do sinal de saída do inversor. Logo, a fim de comandar a relação V/f, sobre a qual os motores estarão submetidos, ajustam-se estas duas grandezas características do sinal de referência.

3.3 Modelagem da Carga Acionada pelos Motores de Indução

Conforme já exposto anteriormente, a carga a ser acionada pelo conjunto de motores de indução são ventiladores, que por sua vez apresentam um comportamento quadrático na curva de torque-velocidade. Desta forma, é necessário conhecer o ponto de operação desses ventiladores de acordo com as condições de operação da própria usina termelétrica, em especial, da potência gerada pela unidade geradora (MCI e gerador elétrico) e das condições climáticas no local, como temperatura ambiente e umidade do ar, entre outros. Em sua dissertação, Miotto (2021) desenvolveu um modelo que inclui uma representação do sistema de resfriamento, no qual o radiador abordado no presente trabalho está incluído. Portanto, faz-se possível obter a velocidade de operação e, por consequência, o torque a ser desenvolvido nos eixos dos motores elétricos em estudo.

Miotto (2021) modelou o radiador como um trocador de calor utilizando a diferença de temperatura média logarítmica (DTML), conforme descrito na seção 2.2. O modelo do radiador desenvolvido pelo autor determina a quantidade de calor que deve ser dissipada através do balanço de energia no motor Wärtsilä 20V34SG, conforme tabelado pelo fabricante e exposto no Quadro 6.

A partir dos valores tabelados, Miotto (2021) equacionou as correlações do calor dissipado pelo motor de combustão interna de três elementos: o óleo lubrificante, o bloco e o *charge air cooler* (CAC), respectivamente evidenciados nas equações (29), (30) e (31). O fluido de resfriamento adotado no motor, neste caso a água, absorve o calor rejeitado pelo MCI e segue para o radiador, para que se dissipe para o ambiente, conforme a equação (32), na qual \dot{W} representa a taxa do trabalho realizado pelo sistema e η é o rendimento.

Quadro 6 – Balanço de energia no motor Wärtsilä 20V34SG

Grandeza	Valores			
	100	90	75	50
Carga (%)				
<i>Brake Mean Effective Pressure</i> (bar)	19,96	17,97	14,97	9,98
Potência de eixo (kW)	8700	7830	6525	4350
Eficiência (%)	48	47,5	46,3	43
Óleo lubrificante (kW)	930	900	850	730
Bloco do motor (kW)	1230	1140	1040	900
CAC HT (kW)	1170	880	590	230
CAC LT (kW)	720	640	490	310
CAC total (kW)	1890	1520	1080	540
Radiação (kW)	280	270	260	250

Fonte: Wärtsilä (2008), citado por Miotto (2021).

$$L_{loc} = -2,27 \cdot 10^{-21} (\dot{W}_{eixo})^5 + 5,08 \cdot 10^{-17} (\dot{W}_{eixo})^4 - 3,19 \cdot 10^{-13} (\dot{W}_{eixo})^3 + 8,38 \cdot 10^{-2} \quad (29)$$

$$L_{bloco} = -4,04 \cdot 10^{-21} (\dot{W}_{eixo})^5 + 8,89 \cdot 10^{-17} (\dot{W}_{eixo})^4 - 5,27 \cdot 10^{-13} (\dot{W}_{eixo})^3 + 0,107 \quad (30)$$

$$L_{CAC} = 3,64 \cdot 10^{-21} (\dot{W}_{eixo})^5 - 7,67 \cdot 10^{-17} (\dot{W}_{eixo})^4 + 4,99 \cdot 10^{-13} (\dot{W}_{eixo})^3 + 3,41 \cdot 10^{-2} \quad (31)$$

$$\dot{Q}_{rad} = (L_{loc} + L_{bloco} + L_{CAC}) \dot{W}_{eixo} / \eta_{motor} \quad (32)$$

Durante suas análises, Miotto (2021) constatou que o modelo termodinâmico desenvolvido, a partir dos dados nominais fornecidos pelo fabricante, superestimava o resfriamento promovido pelo radiador. Através de uma série de medições locais, foram propostos parâmetros corrigidos para uma modelagem mais fidedigna, que fosse coerente com a realidade apurada na usina. Desta forma, utilizando-se os procedimentos desenvolvidos pelo citado autor, foram determinadas as velocidades a serem desenvolvidas pelos motores, baseadas nas leituras de temperatura ambiente do instante em questão, ao longo de um dia típico de operação da UTE LORM.

Miotto (2021) desenvolveu uma modelagem completa dos radiadores, em um código na linguagem de programação *python*, a fim de otimizar os cálculos, sendo que uma cópia se

encontra disponível no ANEXO A. ANEXO Para fundamentar os cálculos, foram solicitadas e obtidas leituras das variáveis termodinâmicas do sistema supervisorio de um dia completo de operação da usina, a saber, 27 de julho de 2021, com taxa de amostragem de dois segundos. O código em *python* recebe esse volume de dados e calcula a velocidade a ser desenvolvida pelos ventiladores relacionada às condições operacionais da UTE LORM a cada instante de leitura.

3.4 Modelagem dos Cabos de Alimentação

A partir do modelo de inversor adotado, é especificado pelo fabricante do próprio equipamento o cabo apropriado para alimentação dos motores de indução trifásicos que acionam os ventiladores presentes nos radiadores. São dadas duas opções de instalação, sendo que, dentre essas, a que foi adotada pela UTE LORM foi empregar cabos de 185 mm² e 95 mm². Essas informações cedidas pelo fornecedor são expostas no Quadro 7.

Quadro 7 – Características da instalação elétrica e das conexões dos inversores de frequência

Modelo	Corrente de Alto Carregamento	Fusível	Cabo de Cobre de Rede Elétrica e Motor
NX 0261 5	261 A	315 A	3x185 mm ² e 95 mm ²

Fonte: Danfoss (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

Na instalação, foram aplicados cabos da *Wirex Cable Solutions*, cujos dados de resistência e de reatância indutiva a 60 Hz são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Parâmetros dos cabos tripolares adotados na UTE LORM

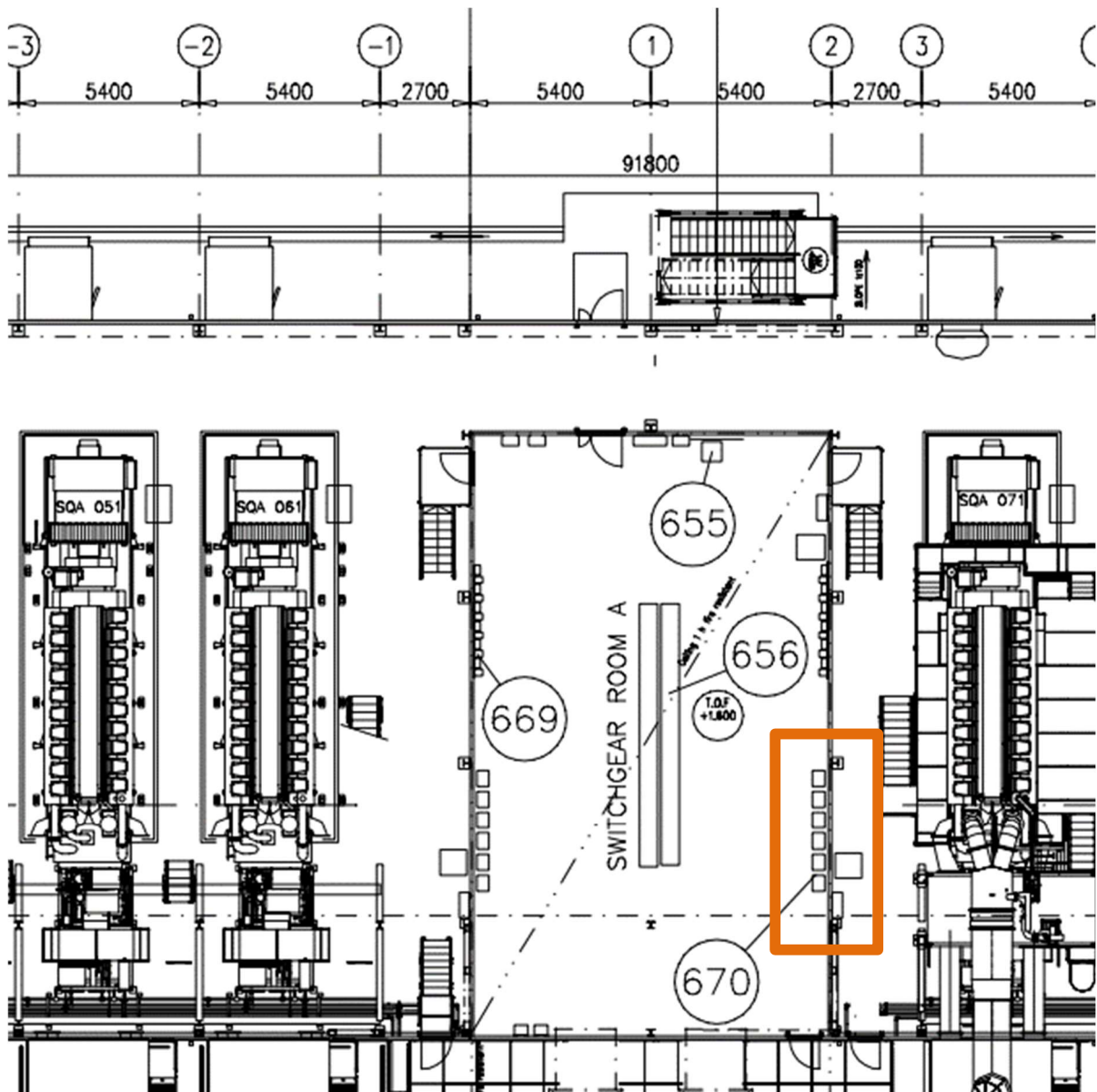
Seção Nominal (mm ²)	R_{CA} (Ω / km)	X_L (Ω / km)
95	0,2634	0,150
185	0,1365	0,150

Fonte: Wirex Cable Solutions (2021).

Nota: Adaptado pelo autor.

Foram ainda disponibilizadas as plantas da vista superior e da vista lateral dos 2 (dois) galpões que abrigam as unidades geradoras da UTE LORM, exibidos, respectivamente, na Figura 13 e na Figura 14.

Figura 13 – Fragmento da planta da vista superior de uma casa de máquinas (*power house*) da UTE LORM

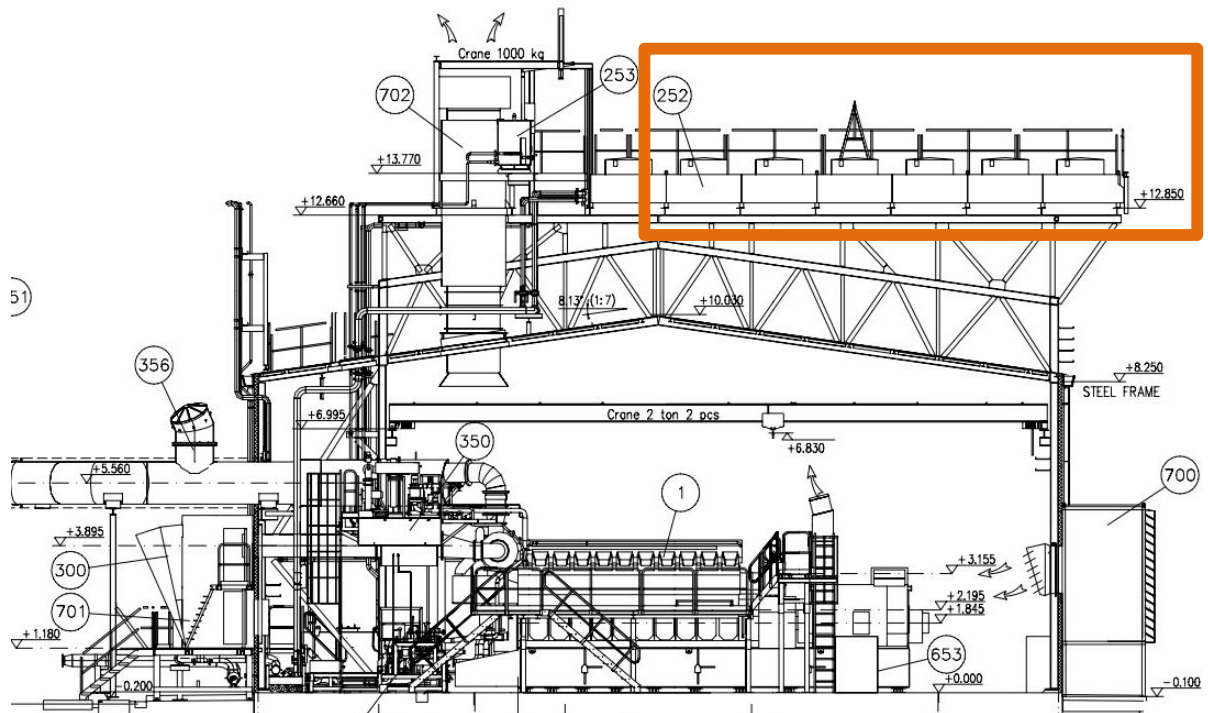


Fonte: Wärtsilä (2010a).

Nota: Adaptado pelo autor.

Com base nestes documentos, observando-se a disposição dos equipamentos, foi possível estimar a distância percorrida pelos cabos condutores entre um inversor e os motores de indução que são por ele alimentados. Nota-se que os radiadores estão presentes no topo da edificação que abriga as unidades geradoras e a sala de média tensão, onde estão instalados os inversores de frequência. Logo, trata-se de um comprimento que faz com que essa análise seja necessária e relevante para avaliar a queda de tensão resultante nos cabos.

Figura 14 – Fragmento da planta da vista lateral de uma casa de máquinas (*power house*) da UTE LORM



Fonte: Wärtsilä (2010b).

Nota: Adaptado pelo autor.

Como mencionado na seção anterior, foram solicitados os dados de um dia típico de operação da UTE LORM. O *Wärtsilä Operational Interface System* (WOIS) fornece os dados amostrados de leitura das grandezas térmicas, elétricas e condições ambientais. No que diz respeito às grandezas elétricas, foram aferidas as tensões e correntes no quadro de distribuição dos motores de indução trifásico no topo da *power house*. Desta forma, foi possível validar o comprimento estimado dos alimentadores e, por consequência, sua impedância equivalente e a queda de tensão associada. A Figura 15 e a Figura 16 ilustram as aferições executadas.

Figura 15 – Visão no topo da *power house* da UTE LORM



Fonte: Linhares Geração (2021).

Figura 16 – Leituras de tensão (a) e corrente (b) nos terminais de conexão aos motores de indução trifásicos



(a)



(b)

Fonte: Salvador (2021).

4 VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA

Uma vez desenvolvidos os modelos que representavam cada elemento do sistema, fez-se necessário simular condições de operação da planta conhecidas, a fim de serem analisadas as respostas obtidas, buscando a comprovação da robustez da simulação completa.

4.1 Validação do Modelo dos Motores de Indução

A partir do bloco de máquina assíncrona trifásica presente no *Simulink*® foram inseridos os parâmetros correspondentes dos motores de indução trifásicos e investigado seu comportamento, sob diversas condições de carga. As informações providas pelo fabricante a respeito do modelo do motor de indução adotado na UTE LORM encontram-se dispostas no Quadro 9.

Quadro 9 – Parâmetros dos motores de indução trifásicos dos ventiladores dos radiadores da UTE LORM

Parâmetro	Valor
Potência	7,5 cv
Número de polos	8
Frequência	60 Hz
Rotação	880 rpm
Tensão nominal	440 V
Corrente nominal	13,0 A
Corrente de partida	103 A
Torque nominal	6,1 kgf.m
Torque de partida	200 %
Torque máximo	250 %
Grau de proteção	IPW56
Massa	133 kg

Fonte: Nova Motores e Geradores Elétricos (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

No Quadro 10, estão apresentados todos os parâmetros empregados no ambiente de simulação para compor o modelo do motor de indução trifásico. Vista a impossibilidade de executar ensaios nos motores da UTE LORM para coleta dos dados, em virtude das demandas de operação da usina, recorreu-se, então, aos dados de projeto dos motores, fornecidos pelo fabricante.

Quadro 10 – Parâmetros equivalentes (por fase) e mecânicos dos motores de indução dos ventiladores dos radiadores da UTE LORM

Parâmetro	Representação	Valor
Potência aparente nominal	S_n	9.479,82 VA
Tensão eficaz de linha nominal	V_n	440 V _{rms}
Frequência nominal	f_n	60 Hz
Resistência do estator	R_s	0,6850 Ω
Resistência do rotor, referida ao estator	R_r	0,5209 Ω
Indutância de dispersão do estator	L_s	3,7701 mH
Indutância de dispersão do rotor, referida ao estator	L_r	3,7701 mH
Indutância de magnetização	L_m	7,5274 mH
Coefficiente de inércia combinado do rotor e da carga	J	0,1171 kg.m ²
Número de pares de polos	p	4
Coefficiente de atrito viscoso combinado do rotor e da carga	F	0,02776 N.m.s

Fonte: Nova Motores e Geradores Elétricos (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

O coeficiente de atrito viscoso não foi informado diretamente na documentação técnica obtida. Como observado na equação (27), este parâmetro se faz presente no modelo mecânico subtraindo do torque eletromagnético as perdas devido ao atrito, do qual resta o torque mecânico disponível para a carga.

A fim de obter um valor numérico que representasse o comportamento da máquina, no *software* alimentou-se o bloco do motor de indução com tensão senoidal trifásica, frequência e carregamento nominais, sendo que o coeficiente de atrito foi zerado. Foram contrastadas as respostas obtidas com os resultados nominais esperados. Caso fosse constatado um desvio, repetia-se a simulação adotando um novo valor para o fator procurado.

Esse algoritmo foi efetuado até serem atingidos valores de desempenho que equivalassem o esperado. Por fim, atingiu-se o valor exposto no Quadro 10. As respostas de desempenho obtidas estão expostas no Quadro 11. Sendo assim, consolida-se o modelo desenvolvido.

Quadro 11 – Comparativo entre a resposta obtida do modelo do motor de indução trifásico com dados do fabricante

Nível de Carregamento	Origem	Corrente	Velocidade	Potência Mecânica	Potência Elétrica	Fator de Potência
125%	Fabricante	14,14 A	878,9 rpm	6.899,95 W	8.034,2 W	0,745
	Simulado	13,83A	879,0 rpm	6.866,20 W	7.663,6 W	0,727
100%	Fabricante	12,44 A	883,4 rpm	5.519,99 W	6.484,2 W	0,684
	Simulado	12,16 A	883,4 rpm	5.520,23 W	6.169,5 W	0,666
75%	Fabricante	10,96 A	887,4 rpm	4.140,00 W	4.971,5 W	0,595
	Simulado	10,71 A	887,6 rpm	4.159,76 W	4.697,0 W	0,575
50%	Fabricante	9,78 A	891,8 rpm	2.760,00 W	3.494,6 W	0,469
	Simulado	9,57 A	891,6 rpm	2.785,76 W	3.244,5 W	0,445

Fonte: Nova Motores e Geradores Elétricos (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

4.2 Validação do Modelo do Inversor de Frequência

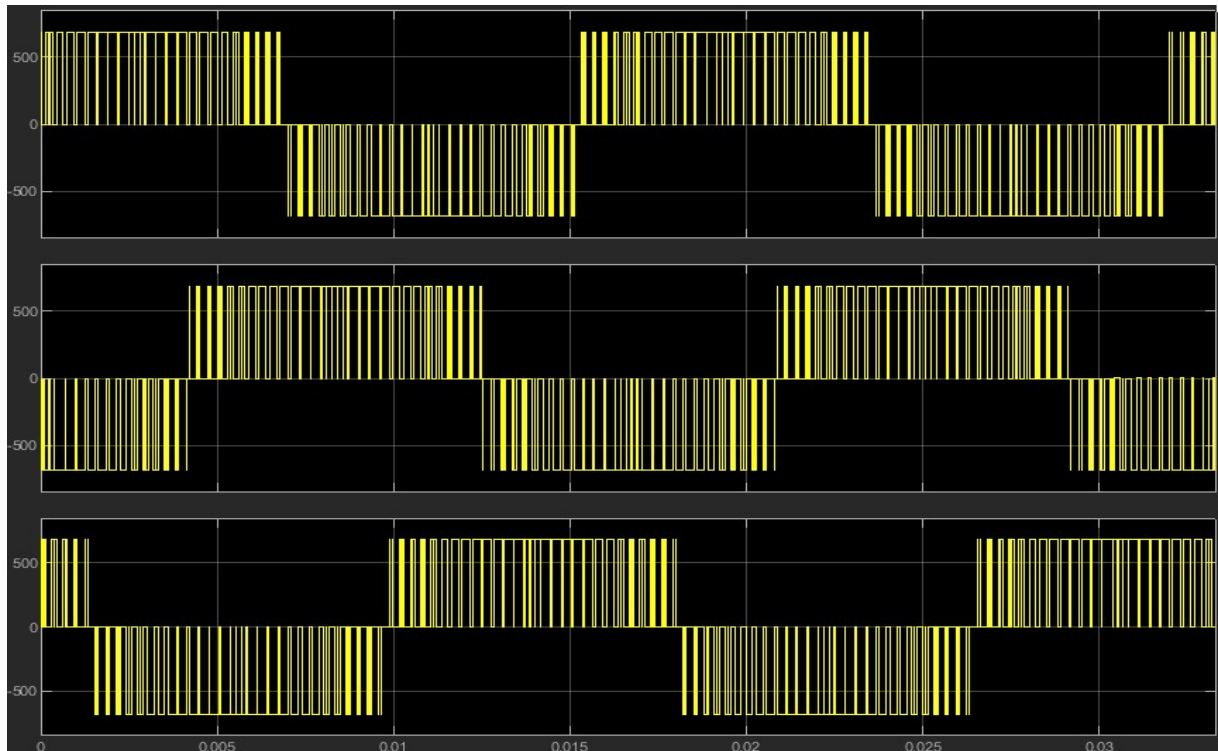
O modelo do inversor desenvolvido recebe como referência a almejada frequência da tensão em sua saída, a partir da qual computam-se os comandos de disparo de chaveamento, a fim de sintetizar o sinal de tensão modulado de saída, cujo valor eficaz da frequência fundamental obedeça a relação tensão/frequência desejada. Como esperado, o sinal de alimentação resultante é chaveado a partir da frequência definida no equipamento, conforme ilustrado pela Figura 17. No caso do equipamento em estudo, tal valor estava definido em 3,3 kHz. Foram, então, definidos valores específicos de frequência e avaliado se as respostas obtidas se encontravam conforme esperado, cujos resultados encontram-se no Quadro 12.

Quadro 12 – Tensão sintetizada na saída do inversor conforme frequência definida

Frequência	Tensão trifásica de linha eficaz esperada da componente fundamental	Tensão trifásica de linha eficaz obtida da componente fundamental
60,00 Hz	440,00 V	439,94 V
55,00 Hz	369,72 V	369,51 V
50,00 Hz	305,55 V	305,48 V
45,00 Hz	247,50 V	247,77 V
40,00 Hz	195,55 V	196,07 V

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 17 – Sinal sintetizado das três fases aferido na saída do bloco do inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 Velocidade dos Ventiladores

A fim de corretamente simular o comportamento do sistema de resfriamento presente na UTE LORM, as leituras fornecidas pelo WOIS se faziam de extrema importância para embasar as análises desejadas. No entanto, este foi um ponto muito desafiador ao presente trabalho, visto que os dados extraídos do sistema supervisorio não se comportavam de maneira esperada ou se apresentavam de forma questionável. Tal fato levou a uma exaustiva rotina de investigações das medições obtidas.

A princípio, foi solicitado um primeiro envio dos registros de um dia típico de operação, seguido das parametrizações empregadas em cada um dos inversores da usina. Neste momento, foi constatado que a parametrização adotada pelos inversores de frequência estava incoerente com os valores nominais dos motores presentes nos radiadores. Após uma correção, foram adotados os valores apontados no Quadro 13.

Quadro 13 – Resumo dos parâmetros do inversor da Unidade Geradora 5 nos dias 27 e 28 de julho de 2021

Índice	Descrição do Parâmetro	Valor Parametrizado	Mínimo	Máximo	Unidade
P 2.1.5	Limite de Corrente	200,2	20,5	410,0	A
P 2.1.6	Tensão nominal do Motor	440	180	690	V
P 2.1.7	Frequência nominal do motor	60,00	8,00	320,00	Hz
P 2.1.8	Velocidade nominal do motor	880	24	20000	rpm
P 2.1.9	Corrente nominal do motor	182,0	20,5	410,0	A
P 2.1.10	Fator de potência do motor	0,65	0,30	1,00	-
P 2.6.3	Razão V/f selecionada	1 – Quadrática	0	3	-
P 2.6.9	Frequência de chaveamento	3,3	1,0	6,0	kHz

Fonte: Danfoss (2019).

Nota: Adaptado pelo autor.

Em seguida, foram solicitados novamente dados de dois dias de operação com condições ambientais típicas de uma das unidades geradoras, a de número 5. Os dados retornados corresponderam aos dias 27 e 28 de julho de 2021. Esse novo conjunto de informações trouxe um comportamento mais próximo do que seria esperado do sistema. Ainda assim, dúvidas persistiram.

4.3.1 Apuração das leituras do sistema supervisório

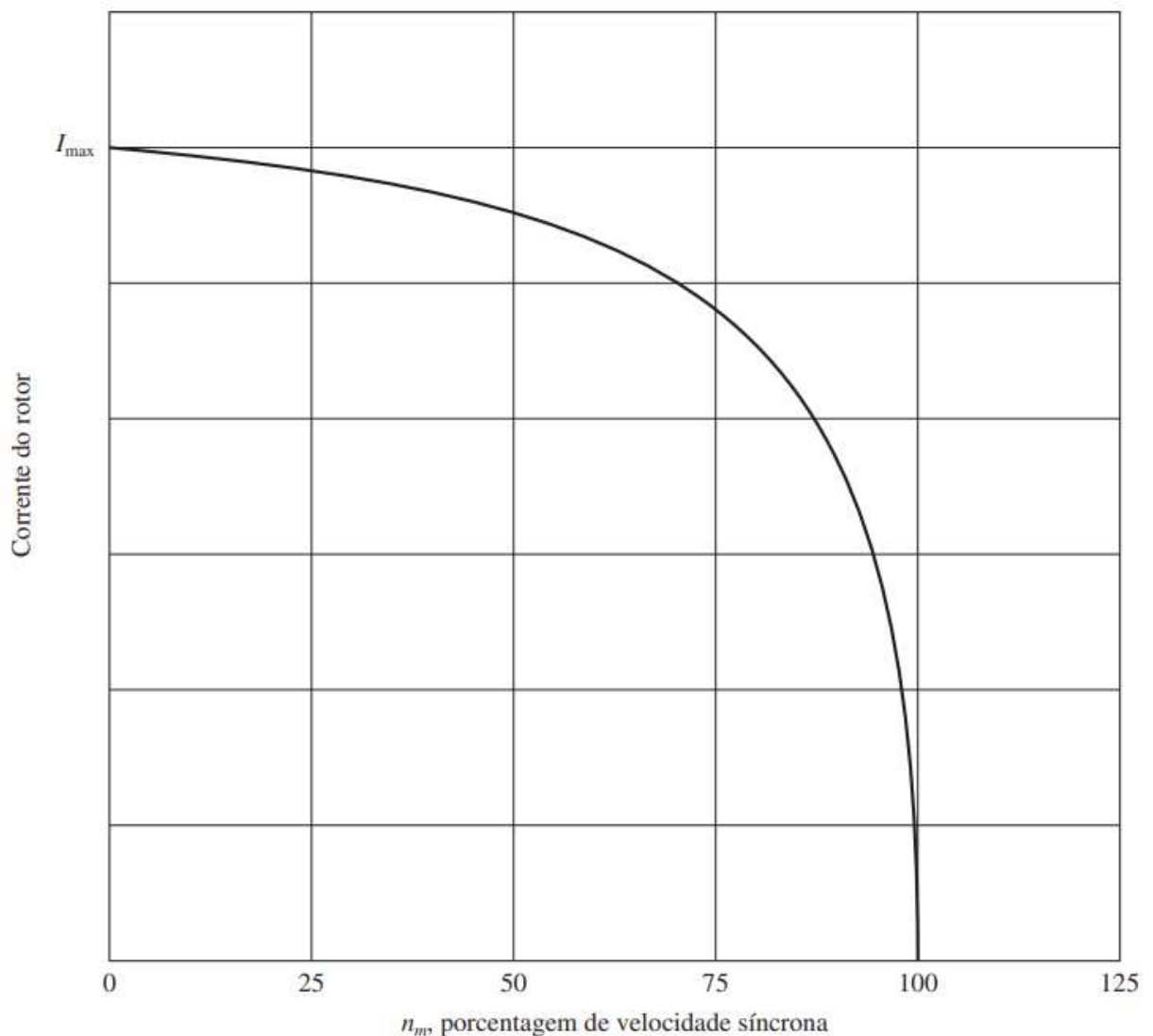
Devido à disposição dos componentes na *power house*, sabe-se que não há meios de os inversores aferirem grandezas mecânicas, como velocidade e conjugado no eixo dos motores. No entanto, estes valores são disponibilizados como leituras dos inversores, quando consultado o sistema supervisório.

A partir desta realidade, conclui-se que o equipamento estima essas medidas, a partir da leitura de algum(ns) outro(s) parâmetro(s). Investigou-se nos manuais disponíveis, catálogos e informações técnicas, algum registro da metodologia de cálculo, porém sem êxito. Como esta informação não estava disponível, um contato direto com o fabricante também foi empenhado. O retorno obtido não esclareceu os questionamentos levantados, alegando que tal cálculo seria exclusivo ao *software* do *drive* (DANFOSS DO BRASIL, 2021). O parecer enviado por mensagem eletrônica a respeito desse tópico encontra-se na íntegra no ANEXO B.

Quanto aos registros de velocidade, dentre as inúmeras hipóteses avaliadas, aquela que mais se aproximou dos dados do WOIS, baseou-se no comportamento da curva de corrente-velocidade

do motor de indução, para baixos escorregamentos. Conforme exposto na Figura 18, ao operar em uma velocidade próxima da velocidade síncrona, como é o usual para as máquinas assíncronas nestas aplicações, verifica-se que a corrente possui comportamento praticamente linear, que se pode aproximar a curva desta forma, neste intervalo pequeno da velocidade de operação. Seguindo esta estratégia e adotando-se os valores conforme parametrização exibida no Quadro 13, avaliou-se o desvio apresentado. O patamar máximo atingido foi de 4,75 %, enquanto a média dos desvios resultou em 1,23 %.

Figura 18 – Corrente do rotor em função da velocidade do rotor



Fonte: Chapman (2013).

As aferições de conjugado e potência também exigiram um esforço em compreender como poderiam ser disponibilizados pelo equipamento. Um fato que agravou essa realidade foi a

disposição das duas grandezas em unidade relativa, ao invés das absolutas, como seria usual. Nos campos parametrizáveis do inversor, não são fornecidos ao equipamento valores de referência para essas grandezas, fazendo-se necessário também assumir que estes são calculados a partir de outros valores medidos. Dentre as hipóteses avaliadas, calculou-se o conjugado considerando a relação quadrática desta em relação à velocidade. Por sua vez, a potência mecânica foi calculada como sendo o produto das outras duas grandezas já conhecidas, ou seja, velocidade e conjugado mecânicos. Os resultados de desvios obtidos encontram-se no Quadro 14.

Quadro 14 – Desvios das comparações das aferições efetuadas contrastadas às referências do WOIS

Desvio	Conjugado	Potência Mecânica
Mínimo	00,01 %	0,00 %
Médio	08,79 %	1,05 %
Máximo	30,19 %	4,77 %

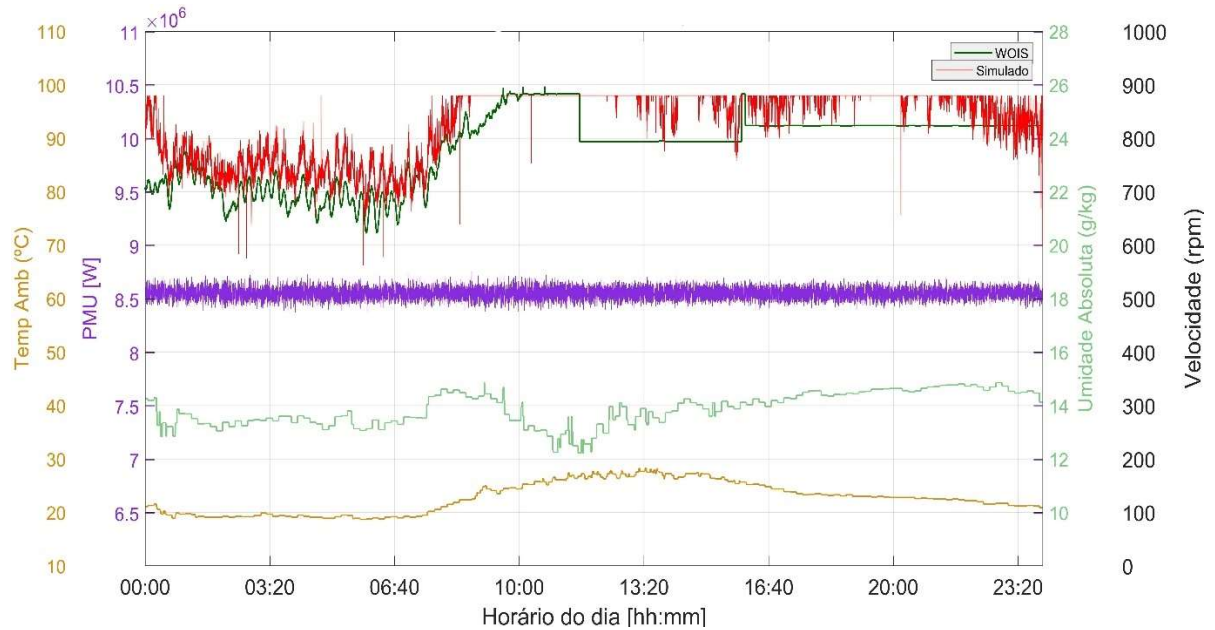
Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.2 Perfil de velocidade exigido pelas condições ambiente

O modelo desenvolvido por Miotto (2021) foi adotado para obter os resultados de velocidade que deveriam ser desenvolvidas pelos ventiladores dos radiadores da unidade geradora número 5 da UTE LORM. Como já mencionado anteriormente, o modelo analisa as condições ambientais e demandas operacionais, a fim de apontar o ponto necessário de desempenho. Os resultados gerados para ambos os dias de operação estudados estão dispostos no Gráfico 17 e no Gráfico 18.

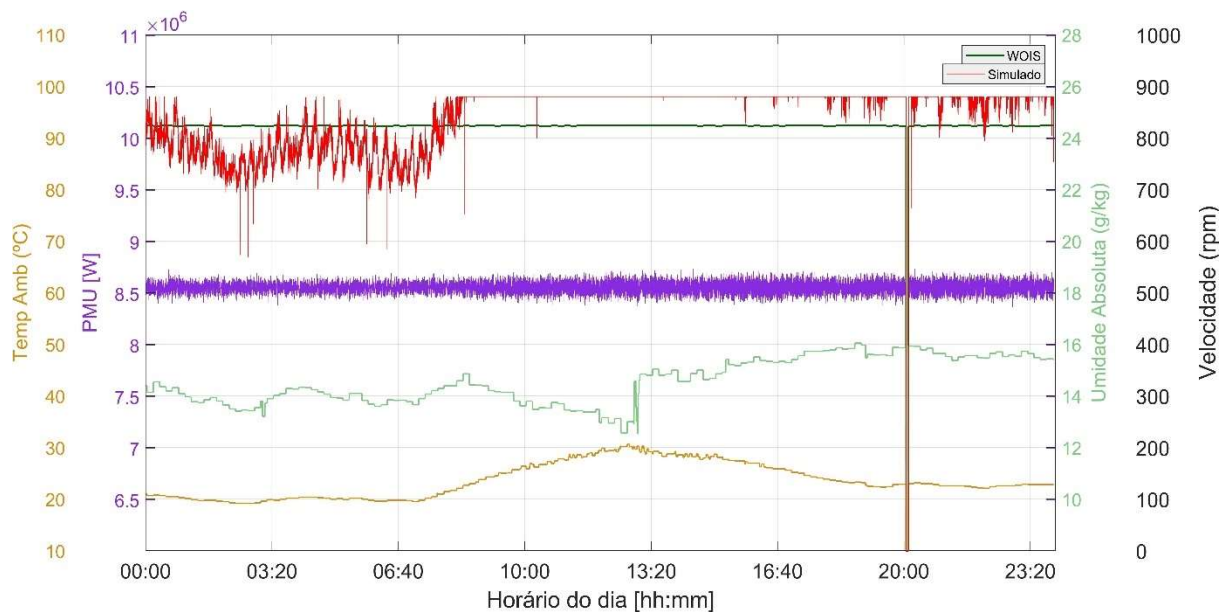
Analisando os valores de velocidade obtidos por ambos os métodos, é possível fazer algumas ressalvas. Primeiramente, observa-se o nível praticamente constante de geração de energia elétrica desta unidade geradora da usina, em ambos os dias, por volta de 8,5 MW, corroborando a informação do despacho contínuo da instalação. Nota-se também o comportamento já esperado das condições ambientais, sendo as madrugadas e noites mais amenas, enquanto as manhãs e as tardes são mais intensas. Este cenário leva à conclusão da necessidade de operação mais acentuada dos ventiladores dos radiadores durante as horas centrais do dia.

Gráfico 17 – Velocidade dos ventiladores dos radiadores segundo o sistema supervisório WOIS e modelado em 27 de julho de 2021



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 18 – Velocidade dos ventiladores dos radiadores segundo: (a) WOIS e modelo (b) em 28 de julho de 2021



Fonte: Produção do próprio autor.

Quanto às velocidades, constata-se uma situação particular. Na madrugada do dia 27 de julho de 2021, a demanda de velocidade é mais baixa. No período da manhã, a velocidade desenvolvida cresce até o valor de velocidade nominal dos motores, que ocorre por volta das 10h00, assim permanecendo por algum tempo. Pouco depois de 11h30min, é observada uma

queda brusca e a velocidade é fixada em um valor bem abaixo da nominal, o que seria inesperado para aquele período do dia. Algumas horas depois, por volta de 16h00, verifica-se que a velocidade desenvolvida retorna ao patamar do valor nominal, sendo fixada novamente em um valor abaixo do nominal pouco tempo depois. O patamar atingido permanece inalterado desta forma até o final do dia seguinte.

O comportamento observado nas primeiras horas do dia 27 de julho atesta a resposta do modelo desenvolvido por Miotto (2021), uma vez que o desempenho verificado pelos dados simulados seguiu a tendência dos valores fornecidos pelo sistema supervisorio. Uma questão que pode ser levantada para esse período seria a respeito da sensibilidade das duas abordagens, pelo fato de que foram observadas oscilações menos expressivas nos dados coletados do WOIS.

Já no restante do período analisado, no qual é nítida a falta de sincronia entre as duas abordagens, visto que a velocidade registrada esteve fixada em diferentes patamares de velocidade, parece ser evidente que houve uma interferência no controle aplicado à planta. Cabe exaltar que são disponibilizadas ao operador da usina diferentes formas de controle, os quais geram diferentes níveis de sinais de referência para o inversor. Nas leituras obtidas, o comportamento observado não condiz com o perfil de demanda usual, que seria exigida pelas condições ambientais ao longo do dia.

4.4 Grandezas do Sistema Simulado Completo

Conforme a realidade expressa no Gráfico 17 e no Gráfico 18, uma validação por comparação temporal instante a instante entre a velocidade coletada e a gerada teoricamente foi impossibilitada. Tal fato se justifica, uma vez que, a cada momento, os sistemas estariam operando em condições distintas, não possibilitando uma verificação coerente de desempenho. Portanto, a fim de corroborar os resultados obtidos pelo sistema simulado desenvolvido neste trabalho, foi estabelecida uma métrica de seleção dos pontos a serem comparados para analisar a resposta e validar o modelo. O sistema supervisorio apresenta as informações de velocidade com uma incerteza de 1 rpm, então definiu-se que, os instantes que desviassem dentro dessa faixa entre as duas leituras seriam adotados como base de ratificação.

Dentre 7200 pontos de leitura possíveis do dia 27 de julho, 63 deles atenderam o critério estabelecido. Com base nestes, foram verificados os desvios dos valores das seis grandezas disponibilizadas pelo sistema supervisorio da usina: frequência do sinal de alimentação, tensão de linha eficaz da componente fundamental, corrente de linha eficaz, além de potência mecânica, conjugado e velocidade calculados nos eixos dos motores. Os resultados atingidos foram expostos no Quadro 15.

Quadro 15 – Desvios das grandezas sinalizadas a validar o modelo simulado desenvolvido

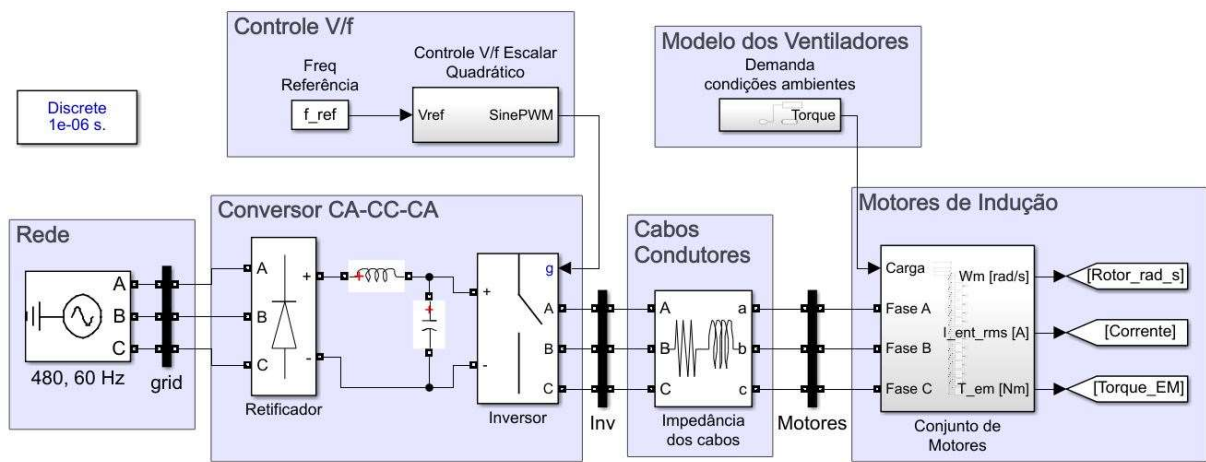
Grandeza	Desvio Mínimo	Média dos Desvios	Desvio Máximo
Frequência	0,04 %	0,69 %	3,59 %
Velocidade	0,20 %	0,40 %	0,80 %
Valor Eficaz da Tensão	0,00 %	0,70 %	1,67 %
Valor Eficaz da Corrente	0,56 %	2,14 %	3,90 %
Potência Mecânica	0,00 %	1,01 %	3,23 %
Conjugado	0,12 %	14,50 %	22,17 %

Fonte: Produção do próprio autor.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse do modelo consolidado, conforme exposto na Figura 19, iniciaram-se as análises das grandezas de interesse do sistema, conforme desempenho exigido dos radiadores, para atender as demandas de resfriamento da unidade geradora 5 da UTE LORM, segundo as condições ambientais instantâneas.

Figura 19 – Modelo computacional completo do sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

As velocidades que o sistema era suposto a desenvolver, deveriam ser impostas pelos motores de indução em seus eixos, a partir da frequência do sinal sintetizada pelos inversores que os acionavam. Logo, fez-se necessário calcular tais frequências, que resultariam uma velocidade síncrona apropriada para o circuito do estator do motor, permitindo que este operasse com o escorregamento condizente com a curva V/f desejada. No caso da aplicação deste estudo, que trata do acionamento de cargas do tipo ventiladores, tal curva deve comportar-se como ilustrado pelo Gráfico 12. Nota-se que nesta parametrização, conforme a frequência é reduzida em relação à nominal, o escorregamento decresce numa relação quadrática. No caso de uma relação linear, o comportamento esperado seria o expresso pelo Gráfico 11.

5.1 Operação Conforme Razão V/f Escalar Quadrática

Os dados empregados para que fossem determinadas as frequências de referência basearam-se na extração dos dados de parametrização da unidade geradora em estudo, no dia correto, como

foram apresentados no Quadro 13. Para tal aferição da frequência, obteve-se a equação da curva que dita seu comportamento. No caso do motor em questão, a frequência nominal é de 60 Hz, a máquina é de 8 polos e a velocidade nominal parametrizada é de 880 rpm.

Seguindo a relação expressa na equação (24), a velocidade do escorregamento é a diferença entre a síncrona e a mecânica. A velocidade mecânica já foi obtida pelo modelo termodinâmico desenvolvido por Miotto (2021). Já a velocidade síncrona, é retratada na equação (23) como sendo função do número de polos da máquina e frequência do sinal de alimentação do circuito do estator da máquina. Uma outra relação útil neste momento é a da frequência do escorregamento. Conforme exposto na equação (33), esta relaciona a frequência da alimentação com os valores nominais da alimentação e escorregamento, onde f_{esc} remete à frequência do escorregamento, f_e é a frequência procurada do sinal de alimentação, $f_{e,nom}$ seria a frequência nominal da alimentação, sendo 60 Hz nesse caso.

$$f_{esc} = \left(\frac{f_e}{f_{e,nom}}\right)^2 f_{esc,nom} \quad (33)$$

Por fim, $f_{esc,nom}$ é a frequência de escorregamento nominal, que, para a velocidade nominal de operação de 880 rpm nesta máquina, corresponde a 4/3 Hz, uma vez que o escorregamento seria dado pela razão 20/900. Uma vez obtida a frequência de escorregamento, é possível rescrever a equação (33), deixando-a em função das grandezas de interesse. Consolidando as relações encontradas, são desenvolvidas as equações (34), (35) e (36).

$$N_{esc} = N_{sinc} - N \quad (34)$$

$$\frac{120}{p} \left(\frac{f_e}{60}\right)^2 \frac{4}{3} = \frac{120 f_e}{P} - N \quad (35)$$

$$\frac{f_e^2}{2700} - f_e - N = 0 \quad (36)$$

Na equação (36), a frequência a ser sintetizada pelo inversor está em função apenas da velocidade mecânica a ser desenvolvida, N , que já é conhecida. Desta forma, a resolução de equação quadrática conduz ao valor desejado. Sendo assim, devido ao grande volume de pontos a serem calculados, os dados foram importados ao *MATLAB* e adotada uma rotina de cálculo

para automatizar o encontro das raízes da equação, atentando-se a reter apenas a solução que estivesse limitada a valores abaixo de 60, que corresponde à frequência nominal. A partir destes resultados, são definidos também os níveis de tensão a serem impostos na alimentação do motor, a partir da relação V/f quadrática. A título de exemplo, algumas das apurações obtidas nesse processo estão dispostas no Quadro 16.

Quadro 16 – Pontos de operação dos inversores segundo a parametrização da relação V/f quadrática

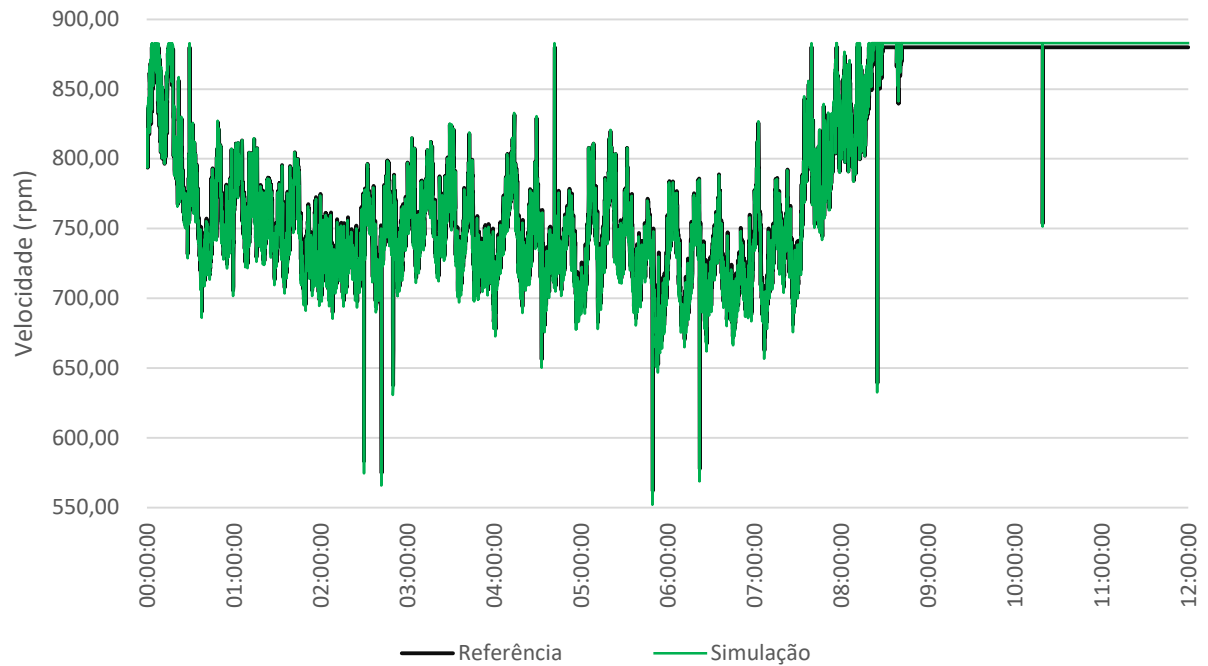
Velocidade a ser desenvolvida	Frequência a ser sintetizada	Velocidade Síncrona	Escorregamento	Tensão a ser sintetizada
880,00 rpm	60,00 Hz	900,00 rpm	2,22 %	440,00 V
840,28 rpm	57,23 Hz	858,48 rpm	2,12 %	400,39 V
800,02 rpm	54,43 Hz	816,48 rpm	2,02 %	362,12 V
760,03 rpm	51,66 Hz	774,86 rpm	1,91 %	326,14 V
720,00 rpm	48,89 Hz	733,28 rpm	1,81 %	292,08 V
680,45 rpm	46,15 Hz	692,28 rpm	1,71 %	260,33 V
639,37rpm	43,32 Hz	649,79 rpm	1,60 %	229,36 V

Fonte: Produção do próprio autor.

Conhecidas todas as grandezas correspondentes aos pontos de operação, executou-se o modelo simulado desenvolvido, a fim de ser examinado o consumo de energia elétrica do sistema, além de serem extraídos as informações de desempenho dos motores de indução. As simulações percorreram a operação das primeiras 12 horas do dia 27 de julho, uma vez que este período engloba os instantes nos quais o controle dos inversores atuou de forma mais coesa com as condições atmosféricas.

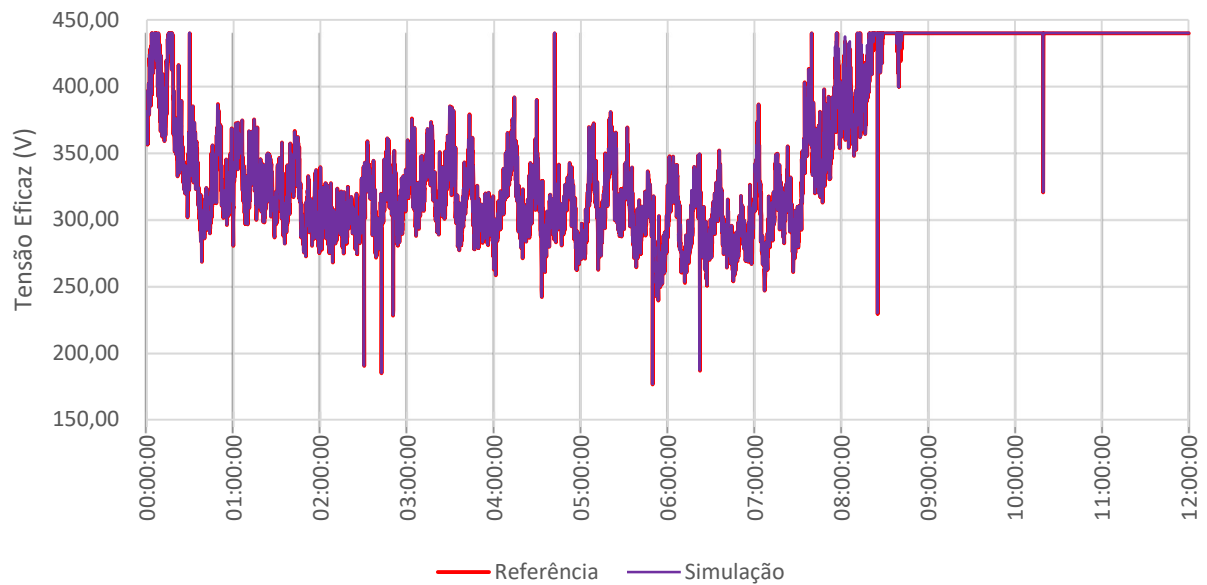
Inicialmente, foram avaliados os resultados da velocidade desenvolvida pelo sistema simulado. O desvio máximo observado no período foi de 1,74 %, enquanto a média dos desvios atingiu 0,35 %. O comportamento observado se encontra exposto no Gráfico 19. De forma similar, o perfil da tensão eficaz de linha da componente fundamental também aderiu fielmente ao esperado. No caso desta grandeza, a média dos desvios chegou a 0,11 %, atingindo no máximo 2,22 %. Os valores gerados estão dispostos no Gráfico 20.

Gráfico 19 – Perfil da velocidade simulada comparada com a de referência



Fonte: Produção do próprio autor.

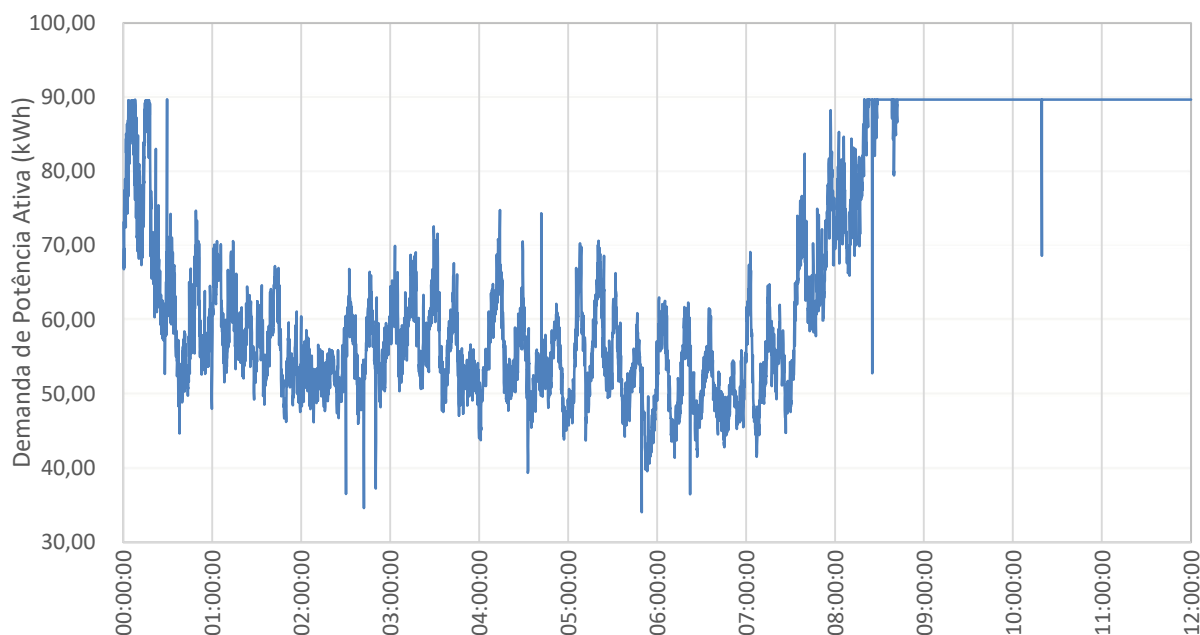
Gráfico 20 – Comportamento da tensão de linha eficaz da frequência fundamental simulada comparada com a de referência



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, o perfil da demanda de potência elétrica ativa é mostrado no Gráfico 21. Nota-se que, este se eleva atingindo valor máximo, conforme esperado, nos momentos em que as condições ambientais exigem uma atuação maior do sistema de resfriamento.

Gráfico 21 – Patamar de demanda de potência elétrica ativa nos intervalos de leitura conforme parametrização escalar quadrática



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Operação Conforme Razão V/f Escalar Linear

Um processo análogo de cálculo foi efetuado para determinar as frequências de referência que seriam sintetizadas pelo inversor, quando este fosse parametrizado a aplicar um sinal de alimentação a fim de manter a relação V/f escalar linear.

Como já ilustrado pela Gráfico 11, nesta parametrização, a velocidade do escorregamento, expressa em rpm, manter-se-á constante nos diferentes pontos de operação. Portanto, uma vez conhecido o escorregamento nominal e alcançadas as velocidades mecânicas a serem desenvolvidas no eixo da máquina, torna-se simples determinar a frequência a ser sintetizada com o auxílio das equações (24) e (23), nesta ordem. Foram calculadas, então, as grandezas de todos os pontos de operação desenvolvidos. Alguns desses pontos estão exibidos no Quadro 17.

Uma grandeza cujo comportamento muda drasticamente entre as duas parametrizações, e é facilmente observável, é o escorregamento. Na parametrização quadrática, o escorregamento nominal é o máximo a ser atingido pelo motor, sendo que esse estado dar-se-á apenas no caso de alimentação com tensão e frequências nominais. Já na parametrização linear, o

escorregamento nominal é o mínimo a ser desenvolvido, visto que a velocidade de escorregamento é fixa e, portanto, torna-se mais expressiva, quando observada uma redução da frequência do sinal de alimentação da máquina.

Quadro 17 – Pontos de operação dos inversores segundo a parametrização da relação V/f linear

Velocidade a ser desenvolvida	Velocidade Síncrona	Frequência a ser adotada	Escorregamento	Tensão de linha eficaz da frequência fundamental
880,00 rpm	900,00 rpm	60,00 Hz	2,22 %	440,00 V
840,28 rpm	860,28 rpm	57,35 Hz	2,32 %	420,58 V
800,02 rpm	820,02 rpm	54,67 Hz	2,44 %	400,90 V
760,03 rpm	780,03 rpm	52,00 Hz	2,56 %	381,35 V
720,00 rpm	740,00 rpm	49,33 Hz	2,70 %	361,78 V
680,45 rpm	700,45 rpm	46,70 Hz	2,86 %	342,44 V
639,37 rpm	659,37 rpm	43,96 Hz	3,03 %	322,36 V

Fonte: Produção do próprio autor.

O Gráfico 22 ilustra o comportamento da tensão sintetizada pelo inversor no modelo desenvolvido. Assim como na parametrização anterior, os valores alcançados tiveram um desvio abaixo do esperado, sendo que o maior desvio obtido foi de 0,76% e a média dos desvios chegou a 0,05 %.

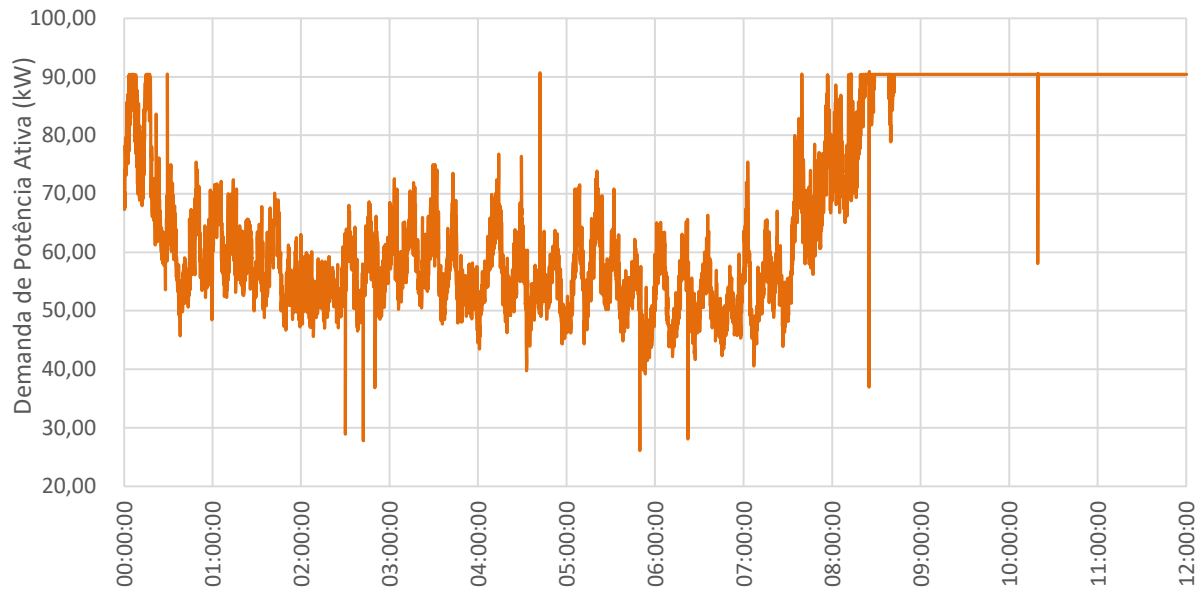
Gráfico 22 – Comportamento da fundamental da tensão de linha eficaz simulada com a relação V/f linear



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, o perfil de demanda de eletricidade do sistema simulado nesta condição de parametrização encontra-se disposto no Gráfico 23.

Gráfico 23 – Patamar de demanda de potência elétrica ativa nos intervalos de leitura conforme parametrização escalar linear



Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 Avaliação de Consumo de Energia Elétrica e Comparação de Desempenho

Obtidos os resultados das grandezas de interesse que o sistema simulado desempenhou para cada condição de relação da curva V/f, é necessário analisar a atividade dos radiadores desta unidade geradora. As primeiras métricas averiguadas foram a velocidade, a potência mecânica e o rendimento do sistema durante o período investigado.

Quadro 18 – Comparação da performance do sistema simulado entre as parametrizações

Grandeza	Parametrização da curva V/f	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
Velocidade	Quadrática	552,27 rpm	790,51 rpm	882,96 rpm
	Linear	574,62 rpm	797,02 rpm	882,91 rpm
Potência mecânica	Quadrática	1,40 kW	4,06 kW	5,50 kW
	Linear	1,46 kW	4,05 kW	5,39 kW
Rendimento	Quadrática	81,85 %	84,35 %	86,76 %
	Linear	78,07 %	83,25 %	84,64 %

Fonte: Produção do próprio autor.

Já em relação ao consumo de energia elétrica, foi executada a aferição em cada intervalo de seis segundos, conforme amostragem das condições de operação e, em seguida, efetuada uma soma acumulativa dos valores, para obter a quantia final consumida pelos radiadores para as doze horas avaliadas. Os valores obtidos estão dispostos no Quadro 19.

Quadro 19 – Consumo dos radiadores da UG-5 avaliada nas doze primeiras horas de 27 de julho de 2021

	Relação V/f Escalar Quadrática	Relação V/f Escalar Linear	Variação
Consumo de energia elétrica	808,23 kWh	819,54 kWh	- 1,4%

Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme os resultados dos patamares de consumo, atesta-se a superioridade, em termos de eficiência energética, ao ser imposta aos motores de indução trifásica um controle que mantenha a relação V/f em comportamento quadrático. Estes índices comprovam o desempenho esperado, segundo a literatura, para o acionamento de cargas deste tipo e sinalizam a existência de medidas de evolução a serem aplicadas, com intuito de reduzir o consumo encontrado de 808,23 kWh para as condições avaliadas.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A matriz elétrica brasileira, apesar de contar com uma maciça presença de hidrelétricas devido ao abundante recurso hídrico nacional, ainda apresenta uma parcela expressiva de termelétricas, adotando os mais variados tipos de combustíveis. A crescente demanda energética indica uma nítida tendência de necessidade de operação continuada destas instalações geradoras no sistema. Logo, estudos que visam à eficiência energética são essenciais para assegurar que o maior desempenho está sendo alcançado, possibilitando o melhor fornecimento de energia elétrica aos diversos setores da sociedade e das indústrias.

Em termelétricas, um correto controle dos sistemas auxiliares combinado a técnicas e topologias de aproveitamento do calor do processo apresentam-se como estratégias importantes a evoluir o saldo energético final, sem o acréscimo direto do consumo de combustível ou aumento de capacidade instalada. Sobretudo num contexto de escassez energética, avanços nessas áreas são fundamentais.

As simulações executadas neste trabalho possibilitaram atestar o desempenho em termos de eficiência da aplicação da relação quadrática na curva tensão frequência do motor de indução trifásico, quando este aciona cargas de comportamento quadrático de torque velocidade, como ventiladores e bombas. Também foram relatados os desafios que se apresentaram na modelagem desenvolvida advindos dos obstáculos da coleta e consolidação dos dados, assim como as iniciativas em contorná-las neste estudo de caso.

Dos objetivos específicos listados inicialmente, foi possível determinar o consumo do sistema de resfriamento de uma unidade geradora em um período do dia de operação, a partir do modelo simplificado desenvolvido neste trabalho, que permitisse tal aferição energética a partir dos dados de geração e condições ambientais. O controle escalar foi examinado conforme as relações linear e quadrática, não sendo investigado o controle vetorial e seu desempenho. Deste modo, surge a primeira sugestão de trabalho futuro, no qual seria possível avaliar técnica e economicamente a viabilidade de uma troca dos inversores atuais por modelos com capacidade de impor um controle vetorial de velocidade dos motores, obtendo, assim, um controle mais robusto e investigando se este resulta em ganhos energéticos.

Ademais, faz-se necessário também aprimorar a modelagem desenvolvida por Miotto (2021), a fim de torná-la mais sólida e precisa. Um conjunto de medições das grandezas elétricas em diferentes pontos da rede não disponíveis no WOIS possibilitaria também uma melhor validação do modelo desenvolvido, a respeito do consumo de energia elétrica. Fazer tais aferições, tal como nos terminais de entrada e saída dos inversores, além dos terminais de alimentação dos motores, tornou-se inviável na UTE LORM durante o período de desenvolvimento deste trabalho devido às dificuldades de acesso à instalação causadas pela pandemia global da COVID-19. Uma outra sugestão é aprimorar o modelo do inversor de frequência do sistema, minimizando as simplificações assumidas neste trabalho, a fim de representar as perdas envolvidas nos dispositivos de chaveamento do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSEN, F.; BLAABJERG, F.; GRABOWSKI, P. Z.; PEDERSEN, J. K.; THØGERSEN, P. On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 34, n. 4, p. 822-831, jul./ago. 1998. DOI: 10.1109/28.703985. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/703985>. Acesso em: 18 nov. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração. **Resolução Normativa nº 876, de 10 de março de 2020**. Brasília, DF: ANEEL, 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020876.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2021.

_____. Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Brasília, DF: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em: 15 jan. 2022.

AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY. **The 2018 International Energy Efficiency Scorecard**. Washington, DC: ACEEE, 2018. Disponível em: <https://www.aceee.org/research-report/i1801>. Acesso em: 26 jan. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; ELETROBRÁS. **Resultados PROCEL 2021 – Ano Base 2020**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2021>. Acesso em: 29 set. 2021.

BOSE, B. K. **Modern Power Electronics and AC Drivers**. Nova Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DANFOSS. **VACON® NXS/NXP refrigerado a ar Wall-mounted and Standalone**: Guia de Utilização. Nordborg: DANFOSS, 2019. Disponível em: <https://files.danfoss.com/download/Drives/VACON-NXS-NXP-Air-cooled-Operating-Guide-DPD01230G-BR-PT.pdf>. Acesso em: 07 out. 2021.

DANFOSS DO BRASIL. **SACT – NXP – Medição do Torque**. Destinatário: Daniel Fonseca do Nascimento. 01 out. 2021. 1 mensagem eletrônica.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas da Eficiência Energética: Brasil | 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2020>. Acesso em: 30 nov. 2021.

_____. **Balanco Energético Nacional – Ano Base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.

HABERKORN, B.; LEE, K.; RUCHTI, T.; ZHAI, P.; ZHOU, J. Optimal energy efficiency evaluation in induction machines driven by adjustable speed drives under EN 50598-2 and IEC 61800-9-1 standards. *In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION*, 1., 2018, Oregon. **Proceedings** [...]. Oregon: IEEE, 2018. p 829-836. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558445. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8558445>. Acesso em: 16 nov. 2021.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LRC, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency 2021**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ISKANDAR, M. A. **Análise e projeto de um sistema de controle de arrefecimento de um motor Diesel, visando à redução das emissões e consumo de combustível**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotivística) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264902/1/Iskandar_MarcoAntonio_M.pdf. Acesso em: 16 nov. 2021.

LINHARES GERAÇÃO. **A UTE LORM**. Vitória: LGSA, 2020. Disponível em: <http://www.lgsa.com.br/a-usina/>. Acesso em: 12 nov. 2021.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, 2004 apud VALIATI, A. S.; MENDES JUNIOR, O. F. M. **Modelagem e Simulação da Usina Termelétrica de Viana Visando o Diagnóstico Termodinâmico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2013-1_alan_e_oswaldo.pdf. Acesso em: 23 nov. 2020.

THE MATHWORKS INC. **Asynchronous machine**. Boston, MA: MathWorks, 2021a. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>. Acesso em: 28 nov. 2021.

THE MATHWORKS INC. **Universal Bridge**. Boston, MA: MathWorks, 2021b. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>. Acesso em: 29 nov. 2021.

THE MATHWORKS INC. **PWM Generator (2-Level)**. Boston, MA: MathWorks, 2021c. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>. Acesso em: 30 nov. 2021.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MARTÍNEZ MOLINA, J. J.; RAMÍREZ SCARPETTA, J. M. Optimal Uf control for induction motors. *In: TRIENNIAL WORLD CONGRESS*, 15., 2002, Barcelona. **IFAC Proceedings Volumes**. [S. l.]: Elsevier, 2002. V. 35, n. 1, p. 329-333. DOI 10.3182/20020721-6-ES-1901.01206. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015396270?via%3Dihub>. Acesso em: 22 nov. 2020

MIOOTTO, B. M. F. **Dimensionamento e Análise de um Sistema Experimental para Recuperação de Calor Residual e Condicionamento de Ar para um Motor de Combustão Interna de Grande Porte**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Disponível em: <https://engenhariamecanica.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEM/detalhes-da-tese?id=15057>. Acesso em: 03 nov. 2021.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications, and design**. 2nd. ed. New York: Wiley, 1995.

MORAWSKI, A. P. **Avaliação da Repotenciação de uma Termelétrica Equipada com Motores de Combustão Interna Diesel por Meio da Recuperação de Calor Residual**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/9805/1/tese_9627_Alexandre%20Persuhn%20Morawski.pdf. Acesso em: 30 out. 2020.

MUTIZE, C.; WANG, R. J. Performance comparison of induction motor and line start PM motor for cooling fan applications. *In: SOUTHERN AFRICAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE*, 21., 2013, Potchefstroom. **Proceedings** [...]. Potchefstroom: SAUPEC, 2013. p. 122-126. Disponível em: https://az817975.vo.msecnd.net/wm-418498_cmsimages/Saupec_Proceedings_2013.pdf. Acesso em: 02 out. 2021.

NOVA MOTORES E GERADORES ELÉTRICOS. **RES: UTE LORM - datasheet motores**. Destinatário: Kaio Spacini. 18 mar. 2019. 1 mensagem eletrônica

NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. **Vector Control and Dynamics of AC Drives**. Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1996.

Motores Trifásicos Blindados IP56. Joinville: NOVA, 2020. Disponível em: https://ba2a9565-018d-4e78-b1e7-1b29b9cdb49c.filesusr.com/ugd/ffccab_45c717557a624a3f877a570f40dd8df8.pdf. Acesso em: 16 nov. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Histórico da Operação: Demanda Máxima**. Brasília, DF: ONS, 2021a. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/demanda_maxima.aspx. Acesso em: 08 nov. 2021.

. **Histórico da Operação:** Geração de Energia. Brasília, DF: ONS, 2021b. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 08 nov. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7:** Energia limpa e acessível. Brasília: ONU, 2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>. Acesso em: 09 nov. 2021.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico:** métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Freevale, 2013.

PSG EQUILIBRIUM DO BRASIL; WÄRTSILÄ BRASIL. **Relatório de impacto ambiental – RIMA.** Usina termoeleétrica – UTE São Geraldo I. Vila Velha, 2010. Disponível em: https://iema.es.gov.br/Media/iema/Downloads/RIMAS/RIMAS_2010/2017.04.06%20-%20RIMA_SAOGERALDO_NOV2010.pdf. Acesso em: 07 out. 2021.

SALVADOR, R. L. **Dados Radiadores.** Destinatário: Carla Cesar Martins. 28 jul. 2021. 1 mensagem eletrônica

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics.** 2nd ed. Kingston: John Wiley & Sons, 1997.

STENZEL, W. C.; SOPOCY, D. M.; PACE, S. E. Repowering Existing Fossil Steam Plants. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION FOR THE POWER GENERATING INDUSTRIES, 10., 1997, Dallas, TX. **Proceedings** [...]. Palo Alto, CA: EPRI, 1997. p. 399-405. Disponível em: <http://www.coal2nuclear.com/MSR%20-%20Repowering%20Existing%20Fossil%20Steam%20Plants%20-%20SEPRIL%20.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

SWEP INTERNATIONAL AB. **Basic heat transfer.** Landskrona: SWEB, 2022. Disponível em: <https://www.swep.net/industrial-handbook/basic-heat-transfer/>. Acesso em: 29 jan. 2022.

TOMASQUIM, M. T. (coord.). **Energia Termelétrica:** Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2020.

VALIATI, A. S.; MENDES JUNIOR, O. F. M. **Modelagem e Simulação da Usina Termelétrica de Viana Visando o Diagnóstico Termodinâmico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2013-1_alan_e_oswaldo.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WÄRTSILÄ. Wärtsilä 34sg power plant product guide. Helsinki: WÄRTSILA, 2008. apud MIOTTO, B. M. F. **Dimensionamento e Análise de um Sistema Experimental para Recuperação de Calor Residual e Condicionamento de Ar para um Motor de Combustão Interna de Grande Porte**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021. Disponível em: <https://engenhariamecanica.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEM/detalhes-da-tese?id=15057>. Acesso em: 04 nov. 2022.

_____. **Master layout: Power Plant, Plan**. Proj. no. P/08677. Helsinki: WÄRTSILA, 2010a.

_____. **Master layout: Power Plant, Section**. Proj. no. P/08677. Helsinki: WÄRTSILA, 2010b.

_____. **Gas and Multifuel Power Plant**. Helsinki: WÄRTSILA, 2017. Disponível em: <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/brochures/gas-and-multi-fuel-power-plants-2017.pdf>. Acesso em: 07 out. 2021.

WEG AUTOMAÇÃO. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. 3. ed. Jaraguá do Sul: WEG AUTOMAÇÃO, 2005. Disponível em: <https://weg.com.br>. Acesso em: 30 set. 2021.

WIREX CABLE SOLUTION. **Ficha Técnica** – Cabo WIREX.POWER H90VF – 0,6/1 kV. Santa Branca: WIREX CABLE SOLUTION, 2021. Disponível em: <http://www.wirex.com.br/pt-br/produtos/cabos-de-potencia-cobre-em-baixa-e-media-tensao-ate-20-35-kv.html>. Acesso em: 25 set. 2021.

ANEXO A – CÓDIGO PYHTON

```
#Projeto de Graduação - Daniel Fonseca do Nascimento
#Engenharia Elétrica - Ufes
#Modelagem do Sistema de Resfriamento do motor Wäertsilä 20V34SG [Miotto (2021)]
```

```
from google.colab import drive
import pandas as pd
from scipy.optimize import minimize_scalar
!pip install CoolProp
import CoolProp
import CoolProp.CoolProp as CP
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
from CoolProp.HumidAirProp import HAPropsSI
import math
import numpy
import os
import fnmatch
import math
import statistics
import matplotlib.pyplot as plt

drive.mount('/content/gdrive')
file_param = "gdrive/My Drive/UFES/codePG2/Dados27Jul2021.xlsx"
file_result = "gdrive/My Drive/UFES/codePG2/Resultados27Jul2021.xlsx"
df=pd.read_excel(file_param)

#####Constantes#####
m_dot_agua_LT = 23.772 #kg/s -> vazão de água
P_amb = 101325 #pressão ambiente
N_proj_rad = 880 #velocidade
m_ar_rad_proj = 126.56
U_rad = 0.02268765330079689; #kW/m²K
A_rad = 10126; #Heat transfer area 10126 m²

##### CÁLCULO DO DTML #####
def dtml(T_hot_in, T_hot_out, T_cold_in, T_cold_out):
    delta_A = T_hot_in - T_cold_out
    delta_B = T_hot_out - T_cold_in
    DTML = (delta_A - delta_B)/ math.log(delta_A / delta_B)
    return DTML

##### CÁLCULO DO CALOR #####
def eta_gerador(FP, W_dot_ele):
    x = [0]*2
    x[0] = FP
    x[1] = W_dot_ele
```

```

const = [0]*5
const[0] = 919E-3
const[1] = 27.66E-3
const[2] = 555E-9
const[3] = 5.796E-03
const[4] = -129.2E-3
eta_g = const[0] + sum(const[k+1] * x[k] for k in range(2)) + sum(const[k+1] * x[k] ** const[k + 3] for k
in range(2))
return eta_g

```

```
##### ROTINA PRINCIPAL #####
```

```
N = 14370
```

```
resultados = numpy.zeros(N)
```

```
for i in range(N):
```

```
    UR_amb = df.values[i,0] #umidade relativa
```

```
    T_amb = df.values[i,1] + 273.15
```

```
    T_agua_s = df.values[i,2] + 273.15 #coluna M do excel
```

```
    W_dot_ele = df.values[i,3]
```

```
    if UR_amb == 0:
```

```
        resultado[i] = 0
```

```
    else:
```

```
        T_ar_e = T_amb
```

```
        omega_amb = HAPropsSI('W', 'R', UR_amb, 'T_db', T_amb, 'P', P_amb)
```

```
        FP = 1 # Fator de potência
```

```
        eta_ger = eta_gerador(FP, W_dot_ele/1000)
```

```
        W_dot_motor = W_dot_ele/eta_ger
```

```
        eta_motor = (-
```

```
0.000000027692*(W_dot_motor/1000)**2 + 0.000783313603*(W_dot_motor/1000) + 40.143195824032)/
100
```

```
        PCI = 48310900
```

```
        L_cac = 3.63660147826E-21*(W_dot_motor/1000)**5 - 7.67405255282E-
```

```
17*(W_dot_motor/1000)**4 + 4.98918334357E-13*(W_dot_motor/1000)**3 + 3.41254530913E-02
```

```
        L_bloco = -4.03851286949E-21*(W_dot_motor/1000)**5 + 8.89233925448E-
```

```
17*(W_dot_motor/1000)**4 - 5.27092957444E-13*(W_dot_motor/1000)**3 + 1.06802302368E-01
```

```
        L_rc = -1.86358909172E-21*(W_dot_motor/1000)**5 + 3.94685541882E-
```

```
17*(W_dot_motor/1000)**4 - 2.27813873052E-13*(W_dot_motor/1000)**3 + 3.22351701526E-02
```

```
        L_loc = -2.27355745542E-21*(W_dot_motor/1000)**5 + 5.07777722971E-
```

```
17*(W_dot_motor/1000)**4 - 3.18985044609E-13*(W_dot_motor/1000)**3 + 8.37771697758E-02
```

```
        Q_dot_GN = W_dot_motor / eta_motor
```

```
        m_ar = 1.20503E-14*(W_dot_motor/1000)**3 - 3.302E-
```

```
10*(W_dot_motor/1000)**2 + 0.00151956*(W_dot_motor/1000) + 0.652105907
```

```
#####Entrada do compressor#####
```

```
T_e_comp = T_amb
```

```
omega_comp = omega_amb
```

```

P_e_comp = P_amb
P_CA = (0.000000004981*(W_dot_motor/1000)**2 + 0.000342888634*(W_dot_motor/1000) + 0.41
5697276385)*100000
T_orv_CA = HAPropsSI('D','T',473,'W',omega_comp,'P',P_CA)
TE471 = df.values[i,4]+273.15
PE471 = 4.295640627*10**5
hE471 = PropsSI('H','T',TE471,'P',PE471,'IF97::Water')

##### Radiador #####
Q_dot_rad = (L_bloco+L_loc+L_cac)*Q_dot_GN
T8 = TE471 - 2
h8 = PropsSI('H','T',T8,'P',PE471,'IF97::Water')
h_ar_e = HAPropsSI('Hha','Tdb',T_amb,'W',omega_amb,'P',P_amb)
h_ar_s_nom = h_ar_e + Q_dot_rad/m_ar_rad_proj
T_ar_s_nom = HAPropsSI('Tdb','Hha',h_ar_s_nom,'W',omega_amb,'P',P_amb)

def fun(T6_teste):
    h6 = PropsSI('H','T',T6_teste,'P',PE471,'IF97::Water')
    m_6_1 = Q_dot_rad/(h6 - h8)
    m_6_2 = (hE471*m_dot_agua_LT - m_dot_agua_LT*h6)/(h8-h6)
    dif = abs(m_6_1 - m_6_2)
    return dif
result = minimize_scalar(fun, bounds = [300,500],method='bounded')
T6 = result.x
h6 = PropsSI('H','T',T6,'P',PE471,'IF97::Water')

#####CÁLCULO DO DTML#####
DTML_rad = (Q_dot_rad/1000) / (U_rad * A_rad)
h_agua_s = h8
h_agua_e = h6
T_agua_s = T8
T_agua_e = T6

def fun5(T_ar_saida):
    DTML_teste = dtml(T_agua_e,T_agua_s, T_ar_e,T_ar_saida)
    dif5 = abs(DTML_rad - DTML_teste)
    return dif5

result5 = minimize_scalar(fun5, bounds = [T_ar_s_nom,T6],method='bounded')
T_ar_s = result5.x

##### Balanço de Energia #####
h_ar_s = HAPropsSI('Hha','T',T_ar_s,'W',omega_amb,'P',P_amb)
h_ar_e = HAPropsSI('Hha','T',T_ar_e,'W',omega_amb,'P',P_amb)
m_ar_rad = Q_dot_rad / ( h_ar_s - h_ar_e)

#Obter a vazão volumétrica
rho_ar = 1/HAPropsSI('Vha','T',T_ar_s,'W',omega_amb,'P',P_amb)

```

```
V_ar_rad = m_ar_rad / rho_ar
V_ar_rad_proj = m_ar_rad_proj / rho_ar

#Semelhança de Ventiladores
N_rad = (V_ar_rad / V_ar_rad_proj) * N_proj_rad
resultado[i] = N_rad

### Salvar o resultado ####
teste = pd.DataFrame(resultado)
writer = pd.ExcelWriter(file_result, engine='openpyxl')
teste.to_excel(writer, sheet_name = 'Sheet1')
writer.save()

print("Execução finalizada!")
```

ANEXO B – CORRESPONDÊNCIA DANFOSS

De: Atendimento ao Cliente Danfoss <sac.brasil@danfoss.com>

Data: sex., 1 de out. de 2021 às 09:17

Assunto: SACT - NXP - Medição do torque

Para: daniel.f.nascimento@edu.ufes.br <daniel.f.nascimento@edu.ufes.br>

Daniel, bom dia!

Conforme havíamos conversado, não temos acesso à fórmula do cálculo do torque do motor (parâmetro V1.5 do Vacon NXP), sendo algo exclusivo do software do drive.

Entretanto podemos passar algumas sugestões para melhorar a precisão deste cálculo, conforme o documento anexo, "Tuning Steps for CL control".

No mais, temos o documento "Facts Worth Knowing about AC Drives" (anexo) que pode ser útil. Ele contém informações técnicas sobre diversos aspectos do controle da velocidade do motor via conversor de frequência e na página 18 há um capítulo sobre torque e motor.

Favor informar caso necessite de alguma informação / documento adicional.

Qualquer dúvida estamos à disposição.

Best Regards | Atenciosamente | Saludos

Lucas Caligaris Fecuri

Internal Sales & Back-office

Danfoss do Brasil Ind. e Com. Ltda

Danfoss Drives Latin America

R. Américo Vespúcio, 85 – Jd. Platina

Osasco – SP – 06273070 – Brazil

SAC: 0800 87 87 847

E-mail: SAC.BRASIL@danfoss.com Website: <http://www.danfoss.com.br>

Para nos ajudar a lidar com sua solicitação, não altere o título do assunto.

Você Sabia?

A Danfoss tem disponibilizado toda semana, vídeos instrucionais de configuração de Conversores de Frequência.

Acesse o nosso canal no Youtube e confira!

<https://www.youtube.com/channel/UCrjoKM8Rv9BzDC1nzOnj2ng/playlists>

ref:_00DC0Qm80._5003b1d0S3N:ref