

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE MOTORES
MONOFÁSICOS PARA APLICAÇÕES
RESIDENCIAIS**

Miguelises Colla Cabrera

São Carlos
2013

MIGUELISES COLLA CABRERA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE MOTORES
MONOFÁSICOS PARA APLICAÇÕES
RESIDENCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Cabrera, Miguelises Colla
C112a Análise da eficiência energética de motores
monofásicos para aplicações residenciais. / Miguelises
Colla Cabrera; orientador José Carlos de Melo Vieira
Júnior. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2013.

1. eficiência energética. 2. motor de indução
monofásico. 3. motor à velocidade variável. 4. inversor
de frequência. 5. refrigeração. 6. ciclo de
refrigeração. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Miguelises Colla Cabrera

Título: "Análise da eficiência energética de motores monofásicos para aplicações residenciais"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25 / 11 / 2013,

com NOTA 8,5 (oito, cinco), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador -
SEL/EESC/USP)*

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP

Mestre Daniel Petean - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedico todo o meu trabalho e esforço ao meu avô materno, Euclydes,
que ao longo de toda sua vida me amou, apoiou, ensinou e protegeu.

Agradecimentos

Agradeço primordialmente a Deus pelo dom da vida, pela fé e pelas bênçãos;

À minha família, em especial meus pais Rosa e Miguelises, pelo apoio, carinho e resguardo;

Ao meu orientador professor José Carlos de Melo Vieira Júnior pelo tempo dedicado, pelos conselhos e ensinamentos oferecidos;

À minha amiga e namorada, Flavia, pela compreensão e pelos momentos divididos.

Sumário

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Siglas e Símbolos.....	xix
Resumo.....	xxiii
Abstract.....	xxv
1. Introdução.....	27
1.1. Objetivos.....	29
1.2. Organização do Documento.....	30
2. Sistemas de Refrigeração.....	31
2.1. Ciclo de Refrigeração.....	31
2.2. Motor de indução monofásico.....	35
2.2.1. Histórico.....	35
2.2.2. Princípio de funcionamento e classificação.....	36
2.3. Motor de velocidade variável.....	39
2.3.1. Inversor de frequência.....	40
2.4. Estado da Arte.....	42
3. Modelagem e simulação dos sistemas.....	45
3.1. Modelagem dos sistemas.....	45
3.1.1. Motor de indução monofásico convencional.....	45
3.1.2. Motor de indução monofásico à velocidade variável.....	46
3.2. Simulação dos sistemas.....	48
3.2.1. Motor de indução monofásico convencional.....	48
3.2.2. Motor de indução monofásico à velocidade variável.....	49
4. Resultados.....	51
4.1. Resultados da simulação de partida.....	51
4.1.1. Corrente elétrica total do motor de indução.....	51
4.1.2. Corrente elétrica do enrolamento principal do motor de indução...	52
4.1.3. Corrente elétrica do enrolamento auxiliar do motor de indução.....	53
4.1.4. Fator de potência do motor de indução.....	54
4.1.5. Potência elétrica do motor de indução.....	55
4.1.6. Energia elétrica consumida pelo motor de indução.....	55
4.1.7. Torque eletromagnético gerado pelo motor de indução.....	56

4.1.8. Potência mecânica do eixo do motor de indução.....	57
4.1.9. Velocidade do eixo do motor de indução.....	58
4.1.10. Resultados em regime permanente.....	58
4.2. Resultados da simulação de distúrbio.....	59
4.2.1. Variação da tensão de alimentação.....	59
4.2.1.1. Afundamento da tensão de alimentação.....	61
4.2.1.2. Sobretenção de alimentação.....	63
4.2.2. Variação da carga em regime.....	65
4.2.2.1. Diminuição da carga em regime.....	65
4.2.2.2. Aumento da carga em regime.....	68
4.3. Resultados da simulação de um ciclo de funcionamento.....	69
4.4. Discussão dos resultados.....	71
5. Conclusões.....	73
Referências Bibliográficas.....	75
Bibliografia.....	77
Apêndice A.....	81

Lista de Figuras

Figura 1.1: Percentual do consumo de energia elétrica residencial [1].....	28
Figura 2.1: Gráfico da pressão pela entalpia do Ciclo de Refrigeração Ideal e do Ciclo de Refrigeração Real, adaptado de [4].....	32
Figura 2.2: Ciclo de Refrigeração, adaptado de [6].....	33
Figura 2.3: Esquema de um refrigerador doméstico, adaptado de [7].....	34
Figura 2.4: Comparativo do motor monofásico versus motor trifásico da fabricante WEG, ambos de 1cv [6].....	36
Figura 2.5: Circuito equivalente do motor de indução monofásico de fase dividida.....	38
Figura 2.6: Diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico [3].....	41
Figura 3.1: Circuito equivalente do motor de indução monofásico a duplo capacitor.....	45
Figura 3.2: Diagrama de blocos do controle vetorial.....	47
Figura 3.3: Modelo equivalente do motor de indução monofásico a duplo capacitor simulado.....	49
Figura 3.4: Modelo equivalente do motor de indução monofásico à velocidade variável simulado.....	49
Figura 4.1: Gráfico das correntes elétricas totais dos motores convencional e à velocidade variável.....	52
Figura 4.2: Gráfico das correntes elétricas do enrolamento principal dos motores convencional e à velocidade variável.....	53
Figura 4.3: Gráfico das correntes elétricas do enrolamento auxiliar dos motores convencional e à velocidade variável.....	54
Figura 4.4: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável.....	54
Figura 4.5: Gráfico da potência elétrica total consumida pelos motores convencional e à velocidade variável.....	55

Figura 4.6: Gráfico da potência elétrica ativa consumida pelos motores convencional e à velocidade variável.....	56
Figura 4.7: Gráfico torque eletromagnético (conjugado) gerado pelos motores convencional e à velocidade variável.....	57
Figura 4.8: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável.....	57
Figura 4.9: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável.....	58
Figura 4.10: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.....	62
Figura 4.11: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.....	62
Figura 4.12: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.....	63
Figura 4.13: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.....	64
Figura 4.14: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.....	64
Figura 4.15: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.....	65
Figura 4.16: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.....	66
Figura 4.17: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.....	67
Figura 4.18: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.....	67
Figura 4.19: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com aumento da carga acoplada ao eixo do motor.....	68

Figura 4.20: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com aumento da carga acoplada ao eixo do motor..... 69

Figura 4.21: Gráfico da energia elétrica consumida pelos motores convencional e à velocidade variável durante um ciclo de funcionamento..... 70

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Percentual do consumo de energia elétrica no setor comercial e no setor público [1].....	29
Tabela 4.1: Dados extraídos após três segundos.....	59
Tabela 4.2: Resultado das simulações de flutuação de tensão no motor convencional.....	60
Tabela 4.3: Resultado das simulações de flutuação de tensão no motor com velocidade variável.....	61
Tabela 5.1: Parâmetros dos motores de indução monofásicos.....	81

Lista de Siglas e Símbolos

F.M.	Força motriz
C.P.	Calor de Processo
A.D.	Aquecimento direto
Refrig.	Refrigeração
Ilumin.	Iluminação
ΔT_{sub}	Variação de temperatura devido ao subresfriamento do líquido refrigerante
ΔT_{sup}	Variação de temperatura devido ao superaquecimento do vapor de sucção
ΔP_d	Variação de pressão devido à perdas de pressão na saída do compressor
ΔP_s	Variação de pressão devido ao atrito do líquido refrigerante
P_c	Pressão de condensação
P_o	Pressão de vaporização
COP	Coeficiente de Performance
F.P.	Fator de Potência
cv	Cavalo de força
$V(t)$	Tensão de alimentação
$I(t)$	Corrente total
$I_p(t)$	Corrente do enrolamento principal
$I_a(t)$	Corrente do enrolamento auxiliar
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente contínua
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

1Ø	Monofásico
3Ø	Trifásico
Hz	Hertz
V _{dc}	Tensão em corrente contínua
PWM	Pulse Width Modulation
R _{principal}	Resistencia do enrolamento principal
R _{auxiliar}	Resistencia do enrolamento auxiliar
L _{principal}	Indutância do enrolamento principal
L _{auxiliar}	Indutância do enrolamento auxiliar
I _{princ}	Corrente do enrolamento principal
I _{aux}	Corrente do enrolamento auxiliar
PID	Controlador proporcional integral derivativo
V	Volt
p.u.	Por unidade
A	Ampère
s	Segundos
%	Porcentagem
VA	Volt x Ampère
w	Watt
rpm	Rotações por minuto
kVA	Quilo Volt x Ampère
kw	Quilo Watt
h	Entalpia
P	Pressão

S	Entropia
cte	Constante

Resumo

CABRERA, M. C. **Análise da eficiência energética de motores monofásicos para aplicações residenciais.** 79p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O consumo de energia elétrica cresce em uma velocidade maior que a sua geração, por uma série de motivos. Tal situação induz a buscar soluções para a desigualdade entre a demanda e a geração de energia, antes que ela se torne um grave problema. A motivação deste trabalho é comparar e analisar uma proposta de amenizar esta desigualdade, através da melhoria da eficiência energética de motores monofásicos em aplicações residenciais. Esta proposta se embasa na comparação entre o tipo de solução mais comum em refrigeradores domésticos, motor de indução monofásico a duplo capacitor, e uma solução mais atual, o motor à velocidade variável, através de simulações computacionais, analisar suas diferenças, vantagens, desvantagens e peculiaridades.

Palavras-chave: eficiência energética, motor de indução monofásico, motor à velocidade variável, inversor de frequência, refrigeração, ciclo de refrigeração.

Abstract

CABRERA, M. C. **Energy efficiency analysis of single-phase motors for residential applications.** 79p. Course Conclusion work - Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

The electricity consumption grows at a higher rate than the generation, due to a number of reasons. This situation leads us to look for solutions to this unbalance between demand and power generation, before it becomes a serious problem. The motivation of this work is to compare and analyze a proposal to mitigate this inequality by improving energy efficiency of single-phase motors in residential applications. This proposal is grounded on the comparison between the most common type of solution for household refrigerators, single-phase induction motor with double capacitor, and a current solution, variable speed induction motor, through computer simulations, to analyze their differences, advantages, disadvantages and particular characteristics.

Keywords: energy efficiency, single phase induction motor, variable speed motor, frequency inverter, cooling, refrigeration cycle.

1. Introdução

Desde os primórdios da civilização e até mesmo antes dela, o Homem já manuseava a energia como ferramenta a seu favor. Segundo o que já foi provado, a primeira forma de energia manipulada pelo Homem foi o calor na forma do fogo utilizada para aquecer e iluminar, e posteriormente como proteção e no preparo de alimentos. Com o passar do tempo, o Homem foi aprendendo a aproveitar outras formas de energia, tais como a energia do movimento dos ventos utilizada em moinhos e barcos, e também a energia do movimento das águas em pequenas rodas d'água. Com o desenvolvimento das civilizações, a humanidade aprendeu também a utilizar a energia química de substâncias como óleos derivados de plantas e animais e substâncias derivadas do petróleo.

A civilização atual somente atingiu o seu ápice energético com a descoberta e capacidade de manipular e tratar a energia elétrica, uma das formas mais finas de energia conhecida. A energia elétrica é de tal importância na sociedade moderna que uma das formas de medir o desenvolvimento das sociedades é através da sua produção e de seu consumo.

Historicamente, a energia sempre foi uma ferramenta muito importante para o Homem, apresentando-se sempre como solução para inúmeros questionamentos e problemas que afligiam as sociedades. Até pouco tempo era um recurso considerado farto, quase inesgotável e pouca importância era dada em como ou porquê era utilizada.

Porém, hoje é alcançada a consciência de que ela não é inesgotável e que a forma como é gerada, manipulada e consumida, assim como a sua falta podem gerar grandes problemas não apenas às sociedades, mas também a todo o planeta Terra e seu equilíbrio.

A construção de novas usinas hidroelétricas, termoelétricas e termonucleares além de altos custos financeiros de implementação gera também impactos ambientais relevantes, o que torna cada vez mais complicado o aumento dos sistemas de geração. A maioria das novas tecnologias de geração, consideradas limpas, ainda não atingiram uma eficiência satisfatória, demonstrando assim a necessidade de buscar outros caminhos para solucionar ou amenizar a questão energética.

Como uma das principais linhas de pesquisa e desenvolvimento deste novo problema surge a eficiência energética. Anteriormente esquecida ou considerada irrelevante, principalmente associada ao consumo, a eficiência energética ganha força e importância não apenas dentro de centros tecnológicos e de pesquisas, mas alcança

o mercado e até mesmo cada membro individual da sociedade pelo potencial de impacto ambiental e financeiro que ela pode causar.

Como anteriormente esta área foi pouco abordada, seu potencial de desenvolvimento é grande e não inclui apenas novas tecnologias e novos materiais, mas também uma metodologia de mudança comportamental.

Entre todas as áreas de atuação da eficiência energética, um ramo que merece destaque é o de sistemas de refrigeração. A figura 1.1 apresenta um gráfico da divisão do consumo de energia elétrica residencial, o qual explicita a grande participação de sistemas de refrigeração no consumo com 34% do total, sendo que destes, 28% são consumidos por geladeiras e 6% por freezers. No setor comercial e no setor público a participação dos sistemas de refrigeração também é alta, atingindo 33,3% do consumo total do primeiro e 18% do segundo, como mostra a tabela 1.1. Deve-se lembrar de que na indústria, os sistemas de refrigeração também são largamente utilizados em controle térmico de processos, em fabricação e armazenamento de produtos perecíveis entre outras aplicações [1].

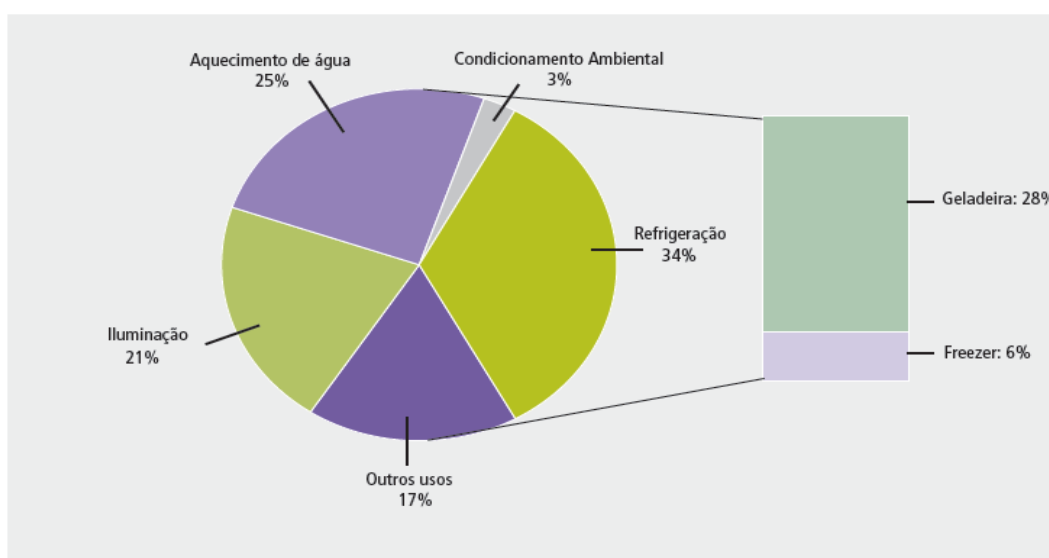


Figura 1.1: Percentual do consumo de energia elétrica residencial [1].

Tabela 1.1: Percentual do consumo de energia elétrica no setor comercial e no setor público [1].

Coeficientes de destinação							
	F.M (%)	C.P. (%)	A.D. (%)	Refrig. (%)	Ilumin. (%)	Outras (%)	Total (%)
Setor Comercial	14,6	0,6	7,8	33,3	41,8	1,9	100
Setor Público	27,8	0,3	2,2	18	49,7	2	100
Total	19,6	0,4	5,7	27,6	44,8	1,9	100
<i>Legenda: F.M.: Força motriz; C.P.: Calor de Processo; A.D.: Aquecimento direto; Refrig.: Refrigeração; Ilumin.: Iluminação</i>							

Os sistemas de refrigeração usam comumente o motor de indução monofásico para realizar o trabalho do ciclo térmico. O motor de indução apresenta uma alta corrente de partida, que acarreta em um aumento do consumo de energia e funciona em uma única velocidade [2]. Levando em consideração estas duas características do motor de indução e sabendo que a maioria dos sistemas de refrigeração utiliza um funcionamento “liga-desliga” em torno de uma referência de temperatura, conclui-se que há um número grande de partidas desse motor durante o regime de funcionamento do sistema de refrigeração, situação que aumenta o consumo de energia.

Aplicando um motor com velocidade variável controlado por um inversor de frequência ao sistema de refrigeração eliminam-se as duas restrições mencionadas anteriormente gerando uma corrente de partida menor e diminuindo o número de partidas do motor por meio do controle de sua velocidade [3]. Com isso, adequa-se o torque do motor à situação de funcionamento em regime permanente, reduzindo o consumo de energia de um sistema de refrigeração e funcionando como um potencial de redução do consumo de energia elétrica.

1.1. Objetivos

Com base nas considerações apresentadas anteriormente, toma-se como objetivo deste trabalho a simulação e comparação dos seguintes subsistemas do ciclo de refrigeração:

- i. Motor de indução monofásico convencional com controle “liga-desliga”;
- ii. Motor de velocidade variável controlado por inversor de frequência;

O foco é comparar a diferença de energia consumida entre ambos os subsistemas durante o período de partida dos mesmos, e considerando um ciclo de 24 horas de operação.

1.2. Organização do Documento

Para melhor compreensão e fluidez este trabalho foi desmembrado em cinco capítulos, os quais são indicados e sucintamente explicados a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: atual capítulo que contextualiza os objetivos do trabalho.

Capítulo 2 – Sistemas de refrigeração: capítulo em que se apresentam e se explicam os conceitos necessários para melhor compreensão do funcionamento de um ciclo de refrigeração, de um motor de indução monofásico e de um inversor de frequência.

Capítulo 3 – Modelagem e simulação dos sistemas: neste capítulo serão apresentadas as formas de modelagens e simulação dos dois modelos em estudo por este trabalho.

Capítulo 4 – Resultados: este capítulo apresentará a informações mais relevantes para este trabalho, é nele em que se apresentam e se discutem os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Conclusões: capítulo final que apresenta as considerações de maior relevância obtidas com este trabalho.

2. Sistemas de Refrigeração

Neste capítulo será apresentada uma sucinta explicação do ciclo de refrigeração e seus componentes. Após esclarecido o ciclo de refrigeração, o capítulo reserva-se ao componente do ciclo mais importante ao trabalho, o motor de indução monofásico. Na finalização do capítulo será apresentado o atual estágio de desenvolvimento do ciclo de refrigeração aplicado a refrigeradores, dos motores de indução monofásicos e dos controles do último.

2.1. Ciclo de Refrigeração

A base teórica de funcionamento dos refrigeradores domésticos é o ciclo de refrigeração que, por sua vez, deriva da teoria do Ciclo de Carnot. O ciclo de refrigeração consiste em retirar calor de um reservatório frio e descartar calor em um reservatório quente através do trabalho realizado sobre um fluido refrigerante.

A figura 2.1 representa um gráfico da pressão pela entalpia do ciclo de refrigeração que auxilia na elucidação de seu funcionamento, o qual se descreve da seguinte forma:

- O fluido à baixa pressão e na forma de vapor é sugado pelo compressor (1), onde é comprimido, saindo à alta pressão e na forma de vapor superaquecido (2).
- Do compressor, o vapor superaquecido (2) segue para o condensador onde perde energia na forma de calor para o ambiente e passa para o estado líquido (3).
- Em seguida, o fluido alcança o dispositivo de expansão adquirindo uma baixa pressão e voltando ao estado de vapor (4).
- Após a expansão, o fluido se encaminha ao evaporador absorvendo energia na forma de calor do meio a ser refrigerado e volta ao compressor (1), reiniciando assim o ciclo.

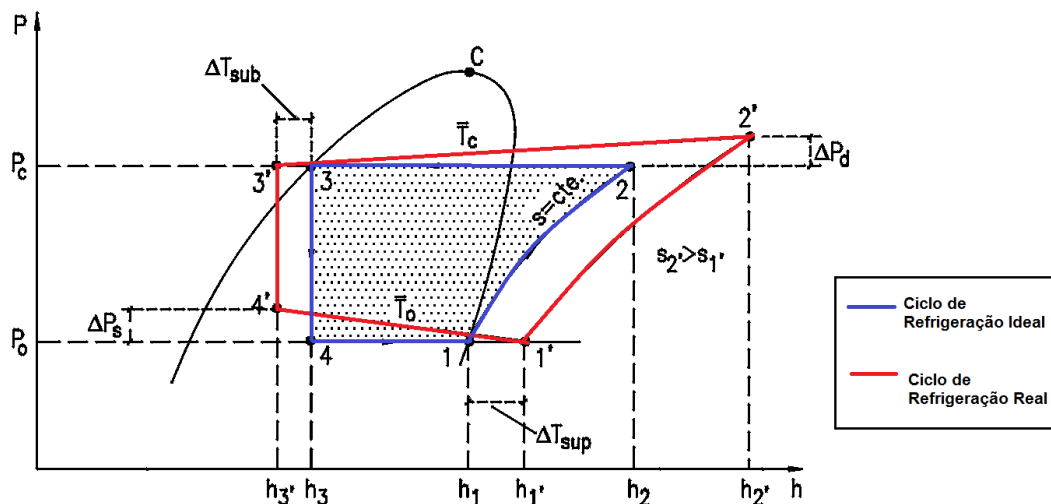


Figura 2.1: Gráfico da pressão pela entalpia do Ciclo de Refrigeração Ideal e do Ciclo de Refrigeração Real, adaptado de [4].

O ciclo de refrigeração real apresenta algumas diferenças do ciclo de refrigeração ideal, ou teórico. Isso acontece devido a uma infidelidade das características reais às teóricas na construção dos equipamentos e montagem do ciclo geradas pelas perdas e imperfeições dos mesmos. Entre tais características destaca-se [5]:

- Superaquecimento do vapor de sucção;
- Subresfriamento do líquido refrigerante;
- Perdas de pressão;
- Atrito do líquido refrigerante.

A diferença entre os ciclos ideal e real podem ser observadas no gráfico da pressão pela entalpia, apresentado na Figura 2.1. Este gráfico representa a perda causada pelo superaquecimento do vapor de sucção por ΔT_{sup} , tal perda está associada à entrada do compressor e desloca o ponto 1 para a posição 1'. Vinculado ao dispositivo de expansão está a perda pelo subresfriamento do líquido refrigerante que é representada no gráfico por ΔT_{sub} e movimenta o ponto 3 para 3'. O gráfico ilustra também as perdas de pressão associadas à saída do compressor que são caracterizadas por ΔP_d e reposiciona o ponto 2 para a posição 2'. Por fim as perdas pelo atrito do líquido refrigerante de forma relevante estão no evaporador, são apresentadas como ΔP_s e altera o ponto 4 para 4' [5].

A maior consequência dessas diferenças é uma diminuição da eficiência do ciclo e consequentemente uma maior quantidade de trabalho precisa ser entregue ao ciclo, o que resulta em um maior consumo de energia pelos sistemas de refrigeração.

No ciclo de refrigeração por compressão existem quatro dispositivos fundamentais para o funcionamento do mesmo, a saber:

- compressor, dispositivo responsável pela circulação do fluido refrigerante em um sistema de refrigeração por compressão, sendo assim, é o responsável por comprimir o líquido refrigerante possibilitando-o de rejeitar calor, através da injeção de trabalho no ciclo e do consumo de energia elétrica.
- dispositivo de expansão, o qual é responsável por expandir o líquido refrigerante e assim possibilitando o último a absorver calor;
- condensador, duto onde o líquido refrigerante se encontra a alta pressão e alta entalpia para rejeitar calor;
- evaporador, duto onde o líquido refrigerante se encontra a baixa pressão e baixa entalpia para absorver calor.

Na figura 2.2 está a representação gráfica destes dispositivos dentro de um ciclo de refrigeração, assim como a direção do fluido refrigerante e os fluxos de calor.

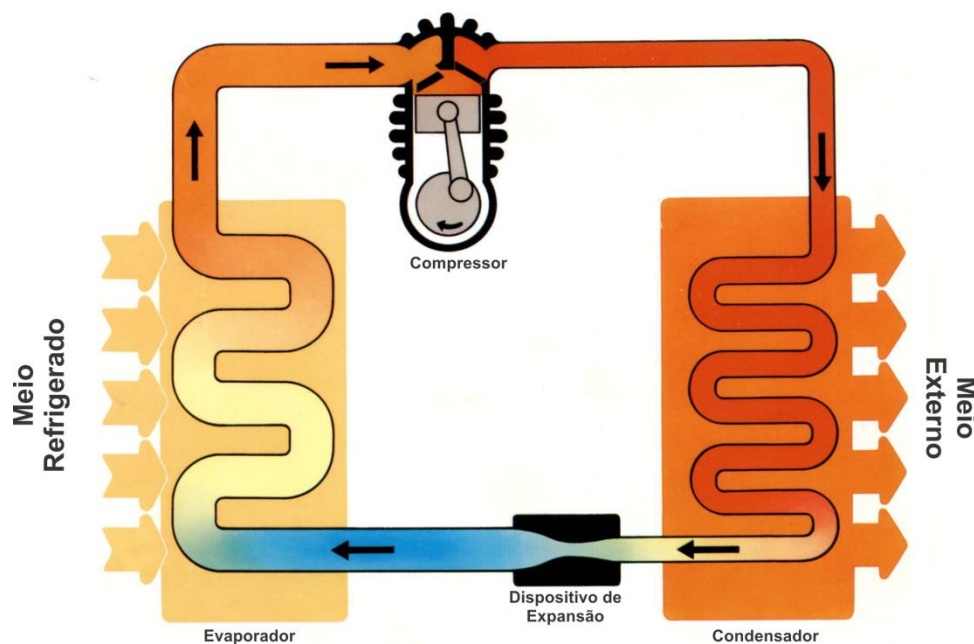


Figura 2.2: Ciclo de Refrigeração, adaptado de [6].

Na proposta de análise do consumo de energia e eficiência deste sistema é necessário um olhar mais cauteloso sobre o elemento consumidor de energia elétrica, o compressor. Este realiza trabalho sobre o líquido refrigerante, mas para tal utiliza a energia cinética cedida pelo eixo do motor de indução, em outras palavras o elemento que realmente consome energia elétrica no sistema de refrigeração é o motor de indução.

Na refrigeração, assim como em outras áreas existem formas de analisar o desempenho dos seus sistemas. O cálculo de cada indicador de desempenho está relacionado com o parâmetro ou objetivo em questão. Voltando-se o olhar para a questão de eficiência energética um indicador de alta importância é o COP, Coeficiente de Performance, que é calculado pela razão entre o calor absorvido pelo evaporador e o trabalho realizado pelo compressor

Uma representação esquemática de um refrigerador doméstico, com seus principais dispositivos e o fluxo do líquido refrigerante é apresentada na figura 2.3, onde a cor azul do refrigerante representa baixa temperatura e a cor vermelha representa alta temperatura.

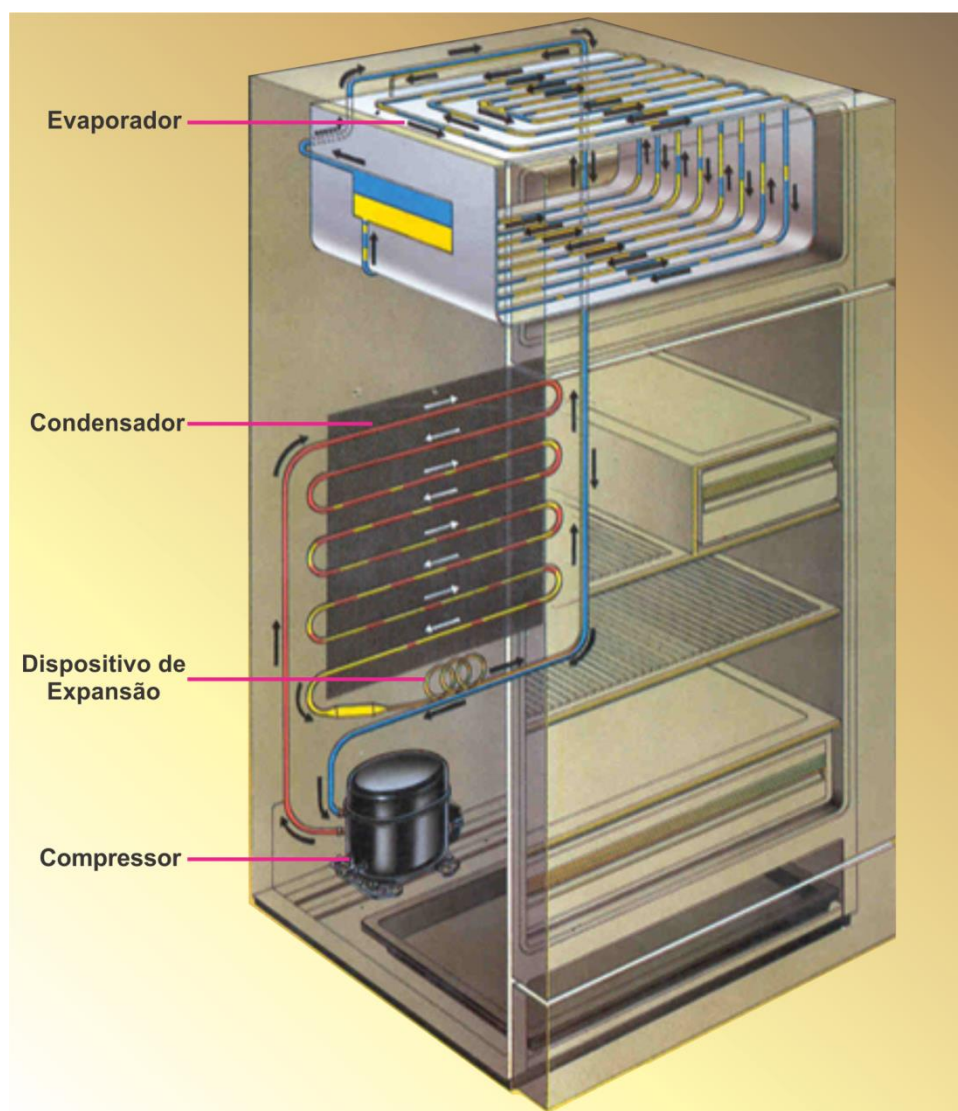


Figura 2.3: Esquema de um refrigerador doméstico, adaptado de [7].

2.2. Motor de indução monofásico

2.2.1. Histórico

O conceito do motor de indução originou-se do trabalho do engenheiro italiano Galileo Ferraris sobre campos girantes. Embasado em tais teorias, o engenheiro iugoslavo Nicola Tesla desenvolveu o princípio de funcionamento do motor de indução, em torno do ano de 1881, porém essa concepção de motor elétrico foi patenteada pelo engenheiro russo Michael Von Dolivo Dobrowolski durante o período em que trabalhou na empresa alemã AEG, no ano de 1889.

As primeiras aplicações do motor de indução foram realizadas a partir de redes polifásicas e visando a indústria, contudo, com o passar do tempo, aprimoramento das teorias e com a implementação de redes elétricas residenciais e comerciais predominantemente monofásicas e/ou bifásicas, os motores de indução monofásicos representam hoje uma grande fatia do mercado.

O motor de indução apresenta algumas vantagens quando comparado a outros motores elétricos, as quais se destacam [8]:

- simplicidade e baixo custo de construção;
- eliminação do atrito dos contatos elétricos deslizantes;

Se comparado com o motor de indução trifásico, o motor de indução monofásico apresenta certas desvantagens as quais se destacam:

- maior corrente elétrica, principalmente a corrente de partida;
- menor rendimento;
- inexistência do torque de partida.

A figura 2.4 é um comparativo dos motores de indução monofásico e trifásico, nela estão representadas graficamente as principais características de ambos. Analisando a figura, constata-se que para motores de indução trifásico e monofásico de mesma potência, os rendimentos são próximos, contudo o motor trifásico apresenta uma massa consideravelmente menor e um fator de potência mais adequado à rede elétrica, mas a maior e mais relevante diferença é observada na corrente nominal dos motores: com uma corrente relevantemente menor, o motor trifásico apresenta uma maior eficiência, um menor aquecimento e um menor estresse da própria máquina.

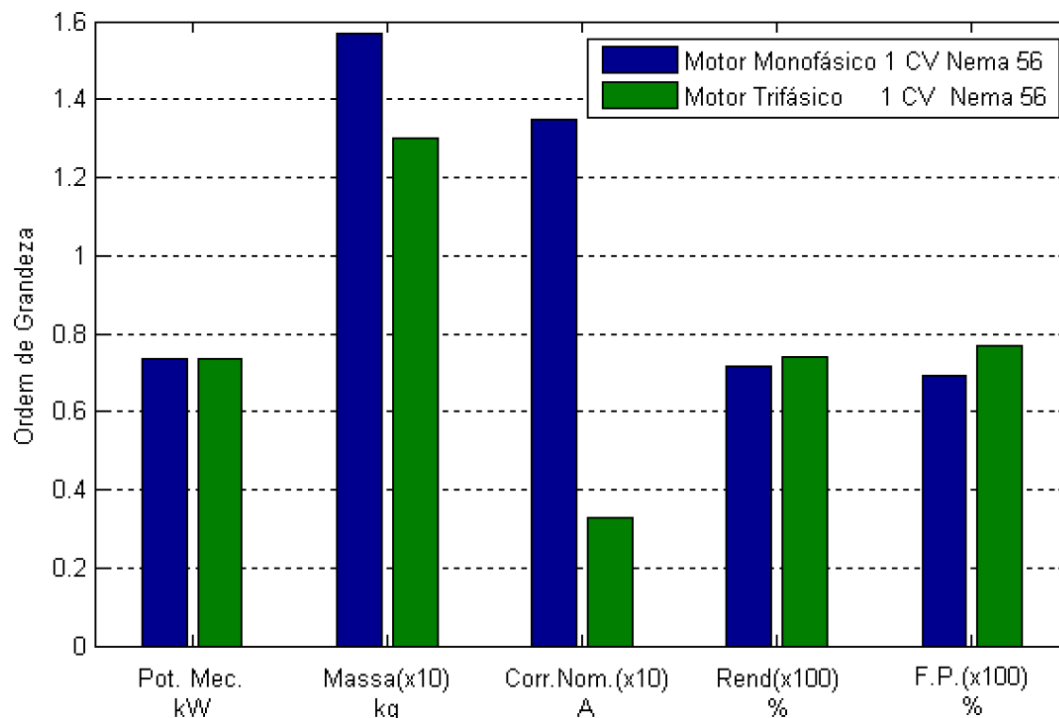


Figura 2.4:Comparativo do motor monofásico versus motor trifásico da fabricante WEG, ambos de 1cv [9].

Como apresentado anteriormente, apesar das desvantagens do motor de indução monofásico para com o motor de indução trifásico, a priorização do motor monofásico é justificada pela configuração das redes de consumo elétrico em baixa tensão, prioritariamente monofásicas e/ou bifásicas.

Uma das principais características do motor de indução monofásico é a falta do torque de partida, que pode ser solucionado de algumas maneiras dependendo das características da aplicação. Desta forma, a classificação dos motores monofásicos é baseada no seu método de partida.

2.2.2. Princípio de funcionamento e classificação

Os conceitos que embasam os motores de indução são as teorias de campo eletromagnético, interação entre circuitos elétricos e campos elétricos além da teoria de campos girantes sumariamente difundidas na Física, Eletromagnetismo e Engenharia.

O motor de indução une essas teorias de forma simples, robusta e altamente adaptável, criando assim uma enorme gama de circuitos diferentes, porém com a mesma base construtiva, abordada e rapidamente explicada a seguir.

Os motores de indução são máquinas elétricas assíncronas, alimentadas por fontes alternadas (senoidais), constituídas por duas partes: o estator e o rotor. O estator é a parte estacionária do motor e a qual recebe a fonte de alimentação, geralmente o estator é externo ao rotor. O rotor é a parte dinâmica do motor, ou seja, a parte ao qual se movimenta devido à força gerada pela interação dos campos magnéticos entre as duas partes do motor, predominantemente o rotor é interno ao estator. Tanto o estator quanto o rotor são projetados, construídos e montados em um eixo comum, porém sem que haja contato entre eles, este espaço é denominado entreferro [2].

Alimentando o motor de indução em uma rede monofásica, alimenta-se o estator com uma corrente igualmente monofásica. Nessas condições, o estator induz um campo pulsante que por sua vez gera dois torques de módulos iguais e sentidos opostos. Nesta situação o rotor consegue manter sua inércia, mas considerando o motor parado não há torque de partida que acelere o rotor e coloque o motor em seu regime de funcionamento. Portanto para partir o motor de indução monofásico utiliza-se um circuito auxiliar ou secundário [2].

O circuito auxiliar é responsável pela partida do motor e pode ser desligado ou não durante o regime permanente. Para gerar um torque suficiente para a partida, o enrolamento auxiliar deve gerar uma corrente elétrica defasada em relação à corrente elétrica do enrolamento principal, geralmente esta defasagem aproxima-se de 90° elétricos. Tal circunstância gera um campo girante desequilibrado similar ao de um motor de indução bifásico com capacidade de partir o motor [9].

O enrolamento principal ou de marcha se mantém ligado durante todo o tempo, seja na partida, seja em regime permanente. Ambos os circuitos, principal e auxiliar, são montados no estator.

O enrolamento principal é responsável por gerar o campo pulsante e manter o motor em regime. O circuito auxiliar é formado essencialmente por um enrolamento auxiliar, podendo apresentar alguns outros elementos como capacitor e chave centrífuga. O objetivo do enrolamento auxiliar é gerar o campo girante capaz de criar um torque que rompa a inércia do rotor. Técnicas comumente utilizadas na construção do circuito auxiliar para induzir este campo girante são a base da classificação dos motores de indução monofásicos.

Na figura 2.5 está representado o circuito equivalente de um motor de indução monofásico com dois enrolamentos, o enrolamento principal e o auxiliar, assim como uma chave centrífuga que desacopla o enrolamento auxiliar durante o regime permanente do motor.

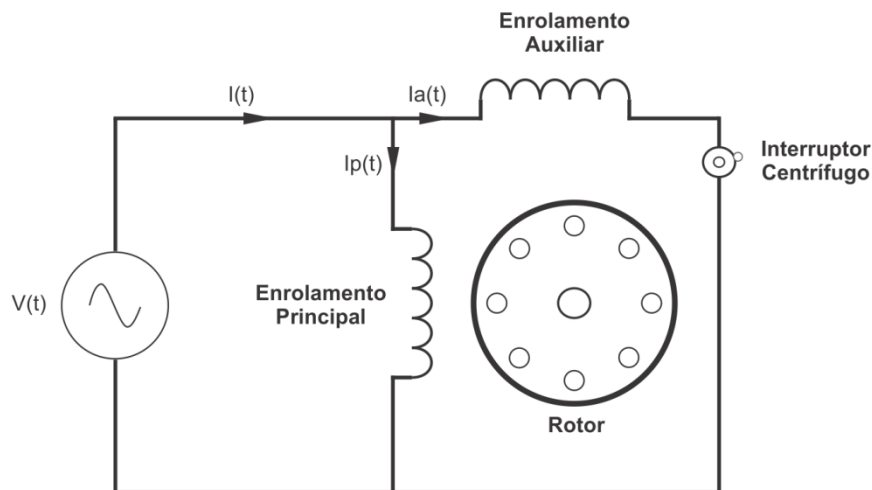


Figura 2.5: Circuito equivalente do motor de indução monofásico de fase dividida

Os principais circuitos de partida do motor de indução monofásico que os classificam são [10]:

- Fase dividida;

Esta construção se caracteriza por ter apenas os dois enrolamentos, principal e auxiliar. Para atingir a defasagem necessária entre as correntes, o enrolamento auxiliar é construído com um número menor de espiras e um fio de diâmetro menor que o do enrolamento principal. Neste motor o enrolamento auxiliar é desconectado após atingir uma velocidade pré-determinada, geralmente por uma chave centrífuga [10].

- Capacitor de partida;

Este tipo de motor tem a construção semelhante ao motor de indução de fase dividida. Por meio da adição de um capacitor em série com o enrolamento auxiliar, tal adição gera um aumento da defasagem entre os ângulos das correntes proporcionando um aumento no torque de partida [10].

- Capacitor permanente;

O motor com capacitor permanente apresenta em sua construção os enrolamentos, principal e auxiliar, semelhantes, ou seja, mesmo número de espiras e mesmo fio, porém o enrolamento auxiliar está em série com um capacitor. Durante o regime deste motor o enrolamento auxiliar não é desconectado, por estas características esta construção apresenta um baixo torque de partida e de marcha. A vantagem desta configuração é sua capacidade de reversão de sentido através de uma chave de reversão que recondiciona o capacitor colocando-o em série com o enrolamento principal, invertendo os enrolamentos [10].

- Duplo capacitor;

Como o próprio nome esclarece, este tipo de motor apresenta dois capacitores, paralelos entre si e em série com o enrolamento auxiliar. O capacitor permanente se mantém operando durante a partida e o regime, ao passo que o capacitor de partida atua apenas durante a partida e após o motor atingir uma determinada velocidade uma chave centrífuga em série ao mesmo se abre, desacoplando-o durante o regime [10].

- Polo ranhurado.

O motor de polo ranhurado é um motor de construção bastante simples, sem a utilização de chaves centrífugas, capacitores ou enrolamentos especiais. Ele conta apenas com um enrolamento monofásico, rotor do tipo gaiola fundida e peças polares especiais. A potência deste tipo de configuração é geralmente fracionária [10].

2.3. Motor de velocidade variável

Desde sua concepção, o motor de indução foi amplamente estudado, modificado e melhorado de maneira que, ao longo de sua história, inúmeras configurações e análises foram realizadas a fim de minimizar suas deficiências e maximizar sua eficiência atingindo o atual estágio de desenvolvimento.

Na busca por melhorias de desempenho, o motor de indução foi acoplado a sistemas de controle, com a finalidade de adequar o seu regime à necessidade momentânea através de variações da sua velocidade.

Em relação à operação de um motor de indução monofásico, é importante saber quais os parâmetros que alteram a sua velocidade, os quais estão relacionados como segue:

- Número de polos;
- Frequência de alimentação do motor;
- Nível de tensão fornecido ao motor.

Consequentemente, os projetos de controle de velocidade são baseados nos parâmetros citados. A utilização de cada controle é analisada projeto a projeto, dependendo de suas especificações, complexidade, robustez e viabilidade econômica. Um dispositivo de controle de velocidade interessante para estes motores são os inversores estáticos de frequência.

2.3.1. Inversor de frequência

Para o controle de motores de indução um dispositivo bastante utilizado é o inversor estático de frequência ou simplesmente inversor de frequência, que consiste basicamente de um circuito de eletrônica de potência controlado.

O inversor de frequência é dividido em três estágios:

- Retificador;
- Filtro;
- Inversor.

O Retificador é o estágio de entrada, constituído de diodos tem como função retificar o sinal CA da rede em um sinal CC.

O Filtro é o estágio intermediário, composto por elementos que armazenam energia, geralmente capacitivos, é responsável pela eliminação do *ripple* e pela regulação da tensão CC.

O inversor é o estágio de saída, formado por transistores, frequentemente IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), transforma a energia CC do estágio intermediário em sinais CA em sua saída com tensão e frequência variável, é o inversor também o estágio controlado.

A figura 2.6 representa um diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico da fabricante WEG, a figura mostra também as formas de onda da corrente e tensão de saída do inversor, e conseqüentemente de entrada do motor. A tensão de entrada é a tensão da rede de alimentação que é retificada para um sinal de tensão positiva com o valor de pico igual ao valor de pico da rede de alimentação. O filtro transforma sua onda de tensão senoidal positivo em um sinal CC com um pequeno *ripple*. Após este estágio, a energia está pronta para ser entregue à carga, entrega que é realizada pelo inversor e controlada pelo sistema de controle do inversor de frequência. Tal controle é feito a partir da corrente, gerando assim uma corrente de saída senoidal quase perfeita e uma tensão de saída na forma pulsante [3].

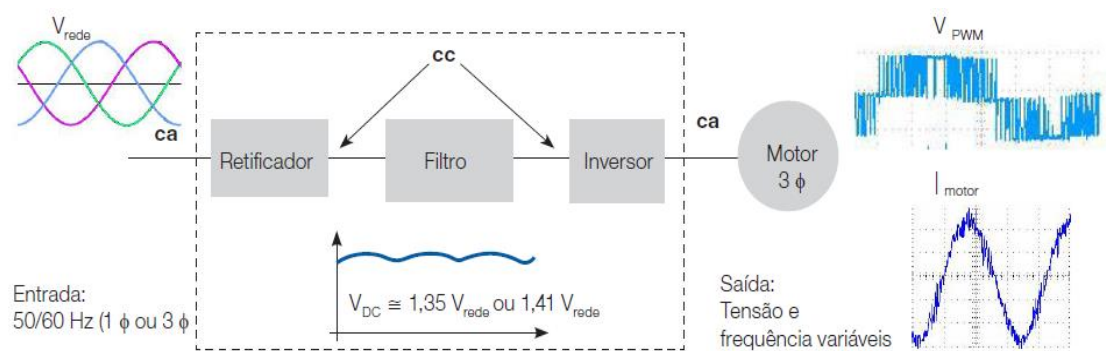


Figura 2.6: Diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico [3].

O inversor de frequência é utilizado principalmente para controlar motores em regimes transitórios, durante as partidas e alterações abruptas de carga, com eficiência e suavidade evitando grandes variações das grandezas elétricas e agressões desnecessárias ao motor e à rede de alimentação, mas pode ser utilizado também para adequar o motor à carga momentânea ou a aplicação gerando economia de energia e/ou uma melhor eficiência energética.

Os inversores de frequência apresentam duas formas de controle mais difundidas, são elas [3].

- Controle escalar;
- Controle vetorial.

O controle escalar é o mais simples, mais robusto e barato. Esta forma de controle baseia-se em uma relação entre tensão e frequência, de forma a manter esta relação constante. Pela sua simplicidade esta forma de controle não é comumente implementada em motores que necessitem de uma resposta rápida ou que apresentem um regime de trabalho inconstante por sua resposta não ser satisfatória [3].

O controle vetorial é um controle mais complexo, refinado e de resposta mais rápida. Tal controle separa a corrente do motor em dois vetores para análise e controle independente, vetor de torque e vetor de fluxo magnético. O controle vetorial pode ser classificado como [3]:

- Controle vetorial em malha aberta (*sensorless*);
- Controle vetorial em malha fechada.

O controle em malha aberta, como o próprio nome indica, não necessita de uma realimentação externa, portanto é mais barato e menos complexo que o controle de malha fechada e consegue atingir um desempenho bastante similar em médias e altas velocidades.

O controle em malha fechada é o mais refinado e preciso além de ser o que apresenta a resposta mais rápida, no entanto necessita de uma realimentação externa, a medição da velocidade do motor, geralmente é feita por um encoder ou um tacômetro, considerando um controle vetorial direto [3]. Para o controle vetorial indireto calcula-se a velocidade a partir de medidores de fluxo eletromagnéticos ou da medição das correntes dos enrolamentos.

Em todos os controles mencionados, o sinal de saída é uma sequência de pulsos em alta frequência e de largura variável, conhecida como onda modulante. Esta onda modulante interage com a tensão do estágio de saída, conhecida como onda portadora, gerando um sinal de saída do inversor de frequência que apresenta as características de uma corrente senoidal e uma tensão pulsante. Esta técnica é conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) ou Modulação por Largura de Pulso.

2.4. Estado da Arte

Desde a invenção do primeiro motor de indução em 1881 com o engenheiro Nicola Tesla, tal motor é alvo de inúmeros estudos, análises e artigos evoluindo até atingir os patamares atuais. O desenvolvimento deste tipo de motor, assim como o ciclo de refrigeração não se limita apenas a níveis teóricos, elétricos ou eletromagnéticos, mas alcança desenvolvimentos nas áreas de termodinâmica, engenharia dos materiais e engenharia química.

Nos artigos encontrados hoje, o motor de indução não apresenta melhorias relevantes seja no aspecto construtivo, elétrico ou de materiais, enquanto o ciclo de refrigeração apresenta melhorias, seja no nível de novos dispositivos, como válvulas de expansão eletromecânicas, materiais, como novos refrigerantes, ou mesmo processos, como o “*frost-free*”.

Entretanto quando aplicado a sistemas que suportam regime de velocidade variável, o motor de indução apresenta um potencial de desenvolvimento grande, devido a duas limitações intrínsecas de seu projeto: alta corrente de partida e funcionamento de regime em velocidade constante. Tais características são contornadas com a utilização de um motor com velocidade variável acoplado a um sistema de controle de velocidade.

Tal sistema é formado por dois componentes: um sistema de entrega de potência e um sistema de controle de velocidade, ambos os sistemas são relativamente novos, porém bastante consolidados. Atualmente, as principais áreas de pesquisa dos sistemas de entrega de potência, ou eletrônica de potência, são os

transistores bipolares, IGBT, enquanto que nos sistemas de controle os artigos apresentam uma maior pulverização dos temas, sendo os temas com maior destaque o controle escalar e o controle vetorial direto e indireto.

Com um sistema de velocidade variável pode-se gerar partidas mais suaves, evitando os picos de corrente na partida dos motores o que acarreta em uma economia considerável de energia. As vantagens não se limitam exclusivamente à partida e sim na redução destas, pois com esse motor controla-se não somente a velocidade do motor, mas também a capacidade de refrigeração do sistema a fim de mantê-lo mais tempo em funcionamento e com um número menor de partidas.

Neste sistema a forma mais eficiente de controlar a capacidade de refrigeração é a variação da velocidade do compressor, isso porque a capacidade de refrigeração se adapta às diferentes condições de carga [11].

Na grande maioria dos trabalhos realizados, a exemplo [11]-[15], os esforços se concentram em modelagens matemáticas dos sistemas de refrigeração, da modelagem ou implementação de novos sistemas de controle de motores de velocidade variável, ou ainda a comparação entre os sistemas de grande porte, criando assim uma lacuna na pesquisa, quando se refere à uma oposição de sistemas de controle, suas diferenças, vantagens ou desvantagens associados à refrigeração doméstica, ou de pequeno porte.

Este trabalho tem como meta preencher parcialmente esta lacuna comparando parâmetros entre um sistema de controle “liga-desliga” acoplado a um motor de indução monofásico e um inversor de frequência com controle vetorial acoplado a um motor de velocidade variável.

A importância deste novo sistema de controle pode ser demonstrada pelo mercado japonês de eletrodomésticos que em 2002 tinha 37% de seus produtos fabricados (especificamente refrigeradores, condicionadores de ar, lavadoras de roupa e aspiradores de pó) já utilizando inversores de frequência [16].

3. Modelagem e simulação dos sistemas

No capítulo em questão será tratada inicialmente a parte de modelagem dos sistemas em análise, os programas utilizados para realizar tal modelagem, as premissas em que foi embasado o trabalho e os dados necessários para sua realização.

As principais características dos motores utilizados assim como seus dados mais importantes estão explicitados no apêndice deste trabalho.

3.1. Modelagem dos sistemas

3.1.1. Motor de indução monofásico convencional

A modelagem do circuito foi realizada com a ferramenta SimPowerSystems, pertencente ao programa computacional MatLab. A simulação do sistema convencional de refrigeração foi feita apenas com um motor de indução monofásico a duplo capacitor, alimentado diretamente por uma fonte de tensão alternada.

A escolha do motor de indução a duplo capacitor para a simulação do sistema de refrigeração convencional é dada pela ampla utilização desta configuração de motor em sistemas de refrigeração doméstica, o que caracteriza assim a fidelização do modelo simulado ao modelo real. A figura 3.1 apresenta o circuito equivalente desta configuração, que conta com dois capacitores em paralelo e um deles o de partida em série com uma chave centrífuga.

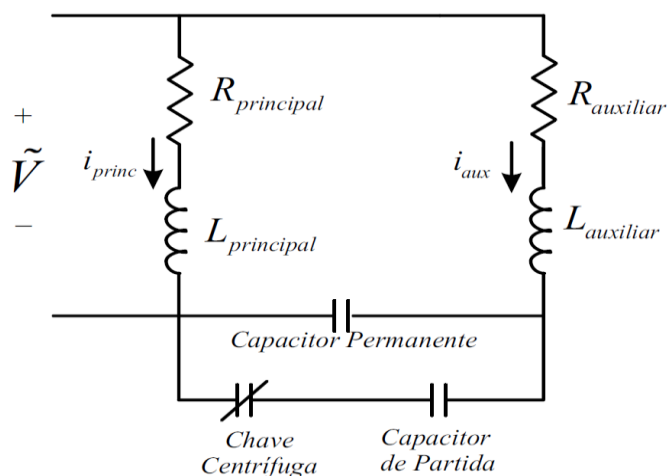


Figura 3.1: Circuito equivalente do motor de indução monofásico a duplo capacitor.

As principais características deste modelo são:

- O alto torque de partida [10], [17];
- Alta eficiência em regime de trabalho [17];
- Alto fator de potência.

O alto torque de partida é devido ao capacitor de partida, que se mantém em funcionamento durante a partida do motor e posteriormente é retirado do circuito. A alta eficiência do motor em regime permanente é consequência do segundo capacitor do circuito, denominado capacitor de marcha, que fica em paralelo ao capacitor de partida. A principal diferença entre os dois capacitores é o valor da capacitância, sendo que o capacitor de partida apresenta uma maior capacitância em relação ao capacitor permanente [17]. Com a utilização de capacitores tanto em partida quanto em regime, tem-se um efeito secundário de aumentar o fator de potência do motor, garantindo não apenas uma melhoria na eficiência do sistema, mas também uma melhor qualidade de energia para a rede de alimentação.

3.1.2. Motor de indução monofásico à velocidade variável

Assim como o motor convencional, a simulação do motor de indução monofásico de velocidade variável foi realizada com o auxílio da ferramenta SimPowerSystems, pertencente ao programa computacional MatLab. Para esta simulação foi utilizado um motor de indução monofásico de fase dividida com o enrolamento auxiliar montado a 90° em relação ao enrolamento principal, sendo que este tipo de motor permite o acesso às duas fases de forma individual.

Para a simulação do inversor de frequência foi necessário montá-lo a partir de seus estágios mencionados anteriormente assim como seu controle, pois o programa computacional não apresenta um modelo pronto para utilização.

O estágio de entrada do retificador foi simulado por um bloco de retificação composto por diodos, próprio do programa. O estágio intermediário foi montado por um conjunto de capacitores. O estágio de saída foi simulado por um bloco de transistores, IGBT, também próprio do programa. O controle do inversor de frequência foi adaptado de um modelo de controle vetorial pré-existente no MatLab que utiliza como referência um valor de velocidade.

Para este controle, utiliza-se a teoria de motores cc caracterizando-se o sistema apenas por duas correntes, corrente de magnetização e corrente de fluxo rotórico. A corrente de magnetização é calculada a partir das características

construtivas do motor, como uma constante, por apresentar uma variação infinitesimal no motor real durante o seu funcionamento. A segunda corrente, corrente de fluxo rotórico, é calculada a partir da velocidade de referência aplicada a um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) a fim de estimar o torque elétrico necessário para tal velocidade, assim através de uma função do fluxo rotórico e de magnetização calcula-se a corrente de fluxo rotórico. Com ambas as correntes calculadas, resta apenas calcular a fase entre elas, essencial para atingir o torque necessário, que é calculada a partir do fluxo rotórico, do fluxo de magnetização e da velocidade medida do motor.

Com as correntes e a fase entre elas calculadas, basta agora fazer a transformada inversa, de correntes de magnetização e rotórica, para correntes de fase, corrente principal e corrente auxiliar, às quais são comparadas com as correntes reais do motor. A saída do controlador é a quantidade de pulsos necessários para que as correntes reais do motor atinjam o valor calculado.

Na figura 3.2 está representado um diagrama de blocos deste controle, onde os blocos em azul representam cálculos realizados pelo controlador, em verde estão representadas as entradas e saídas do controle e em laranja estão representadas as medições necessárias para o correto funcionamento do controle.

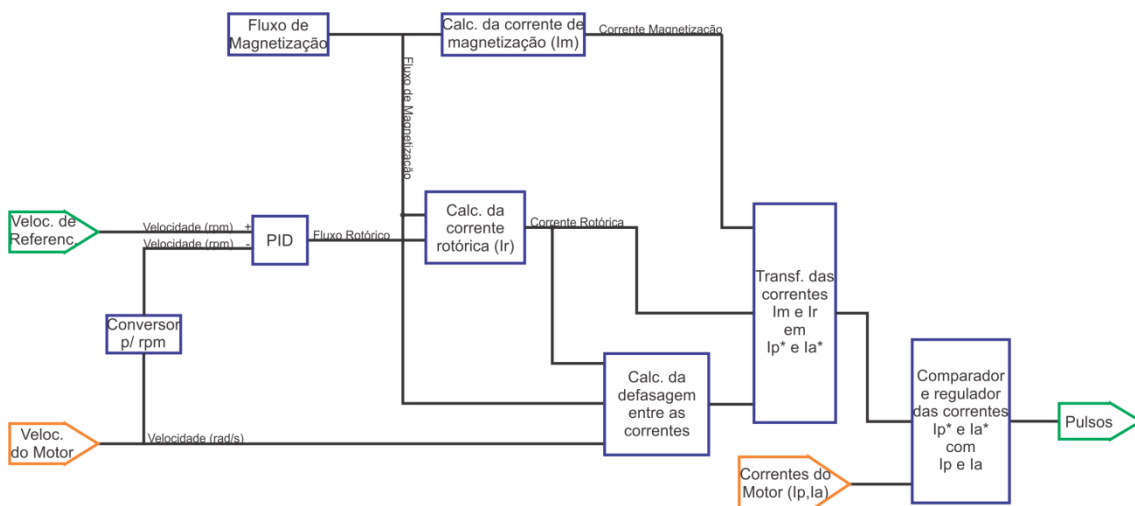


Figura 3.2: Diagrama de blocos do controle vetorial.

O controle vetorial em questão utiliza para velocidade de referência uma rampa de partida que atinge o seu valor de regime em 2,25 segundos. As principais características desse sistema são:

- Partida suave;
- Alta eficiência na partida e em regime;

- Alto torque de partida;
- Condicionamento do torque à carga.

3.2. Simulação dos sistemas

Para as simulações foram mantidas constantes todas as condições externas, a alimentação dos sistemas foi realizada por uma fonte de tensão alternada com valor eficaz de 110 V; o valor de torque inercial gerado pela carga do compressor hermeticamente fechado foi considerada 1 p.u..

Para a análise dos circuitos amostramos algumas grandezas, são elas:

- Corrente total de entrada do motor de indução monofásico;
- Corrente do enrolamento principal;
- Corrente do enrolamento auxiliar;
- Torque eletromagnético (conjugado);
- Velocidade do motor;

Além dessas medidas, durante as simulações foi realizado o cálculo de quatro dados importante para a análise:

- Potência mecânica do eixo;
- Fator de potência do motor;
- Potência elétrica do motor;
- Energia elétrica consumida pelo motor de indução.

3.2.1. Motor de indução monofásico convencional

A Figura 3.3 apresenta a representação gráfica do modelo do motor de indução monofásico a duplo capacitor utilizado na sua respectiva simulação. Para uma melhor análise da partida do motor, a chave que energiza o motor é fechada um instante após o tempo zero de forma que fosse possível visualizar antes e depois de sua partida.

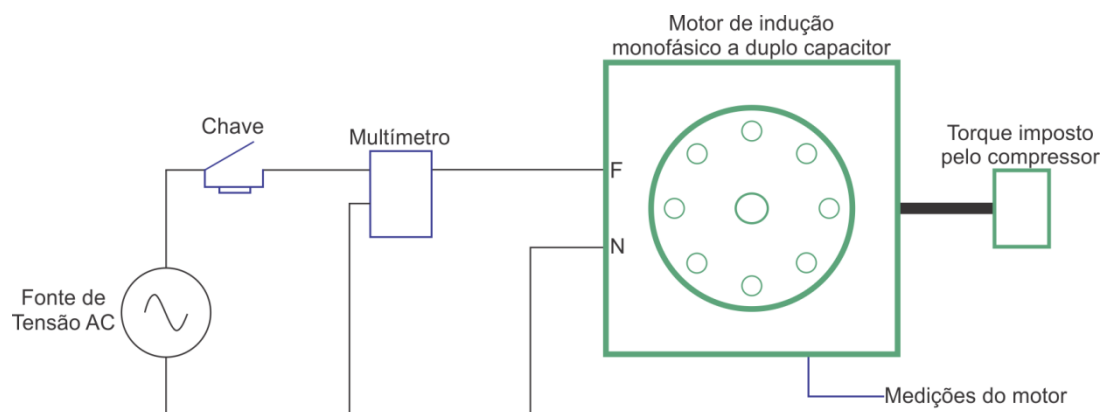


Figura 3.3: Modelo equivalente do motor de indução monofásico a duplo capacitor simulado.

3.2.2. Motor de indução monofásico à velocidade variável

A Figura 3.4 mostra a representação gráfica do modelo do motor de indução monofásico à velocidade variável utilizado na sua respectiva simulação, neste modelo não se faz necessário o uso da chave devido à existência do controle que foi programado para inicializar o motor em um instante após o tempo zero.

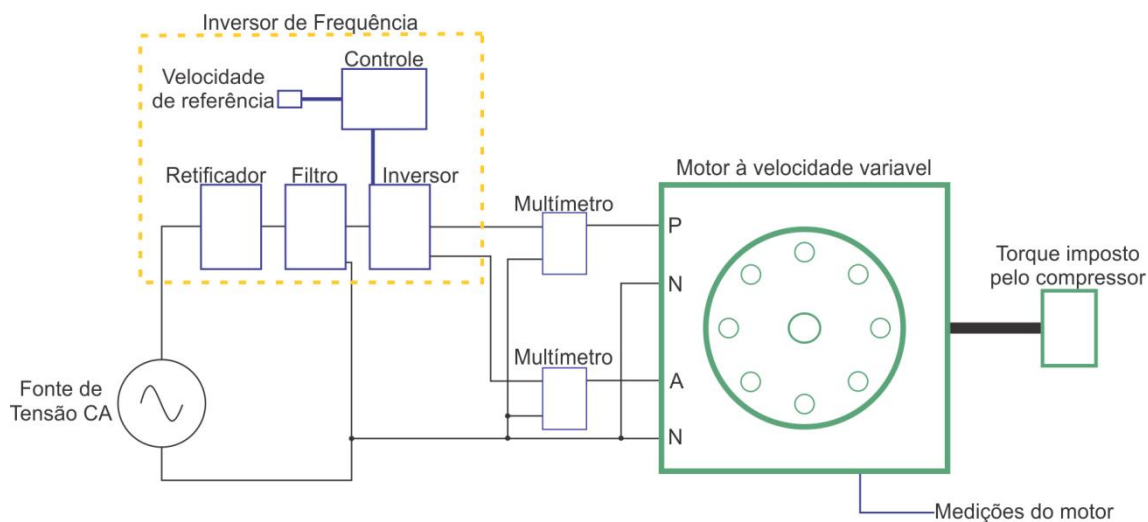


Figura 3.4: Modelo equivalente do motor de indução monofásico à velocidade variável simulado.

4. Resultados

As características das simulações dos motores e seus respectivos resultados são apresentados neste capítulo, tais simulações podem ser divididas em três categorias:

- Simulação de partida;
- Simulação de distúrbios;
- Simulação de um ciclo de funcionamento.

Para o encerramento do capítulo será realizada uma discussão sobre as simulações e seus resultados a fim de caracterizar os mesmo, assim como apontar as diferenças, e peculiaridades de cada sistema.

4.1. Resultados da simulação de partida

Para a caracterização do comportamento dos sistemas em comparação foi realizada inicialmente a simulação da partida em condições estáveis de carga e alimentação de forma que ambos os sistemas foram alimentados no instante de tempo igual a zero, os resultados são apresentados a seguir.

4.1.1. Corrente elétrica total do motor de indução

Na figura 4.1 estão representadas as correntes totais do motor de indução convencional e à velocidade variável. No momento da partida a corrente total do motor convencional aproxima-se de $27 A_{pico}$ ($19,09 A_{rms}$), enquanto a corrente de regime não ultrapassa $3,5 A_{pico}$ ($2,47 A_{rms}$). No motor à velocidade variável a corrente de partida não alcança os $7,0 A_{pico}$ ($4,95 A_{rms}$), e a sua frequência varia. A corrente de regime permanente ultrapassa levemente $3,5 A_{pico}$ ($2,47 A_{rms}$) o que se deve devido à compensação do controle vetorial para com o efeito de escorregamento do motor.

No motor com controle convencional a corrente total começa a decair no instante imediatamente após $t=0,6$ s, isto ocorre, pois neste instante o motor atinge 75% de sua velocidade nominal fazendo com que a chave centrífuga abra e desacople o capacitor de partida, enquanto que no motor com controle vetorial a corrente decai no instante $t=2,25$ s, momento ao qual o motor atinge sua velocidade nominal de regime.

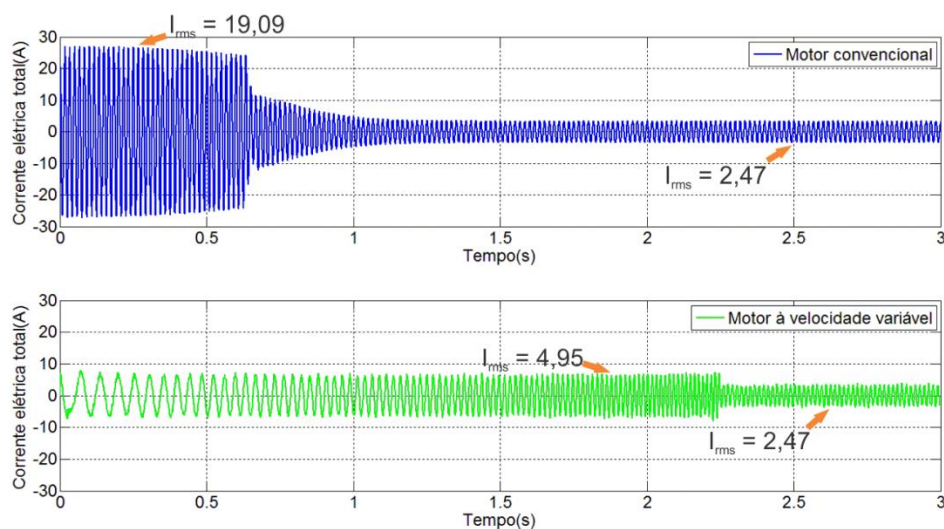


Figura 4.1: Gráfico das correntes elétricas totais dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.2. Corrente elétrica do enrolamento principal do motor de indução

A figura 4.2 apresenta os gráficos das correntes do enrolamento principal do motor convencional e à velocidade variável. No motor convencional a corrente de partida não atinge o valor de $20,0 A_{pico}$ ($14,14 A_{rms}$) enquanto a corrente de regime registra $2,9 A_{pico}$ ($2,05 A_{rms}$). O motor à velocidade variável registrou $3,0 A_{pico}$ ($2,12 A_{rms}$) em regime, enquanto que na partida alcançou $5,5 A_{pico}$ ($3,89 A_{rms}$), com variação na sua frequência.

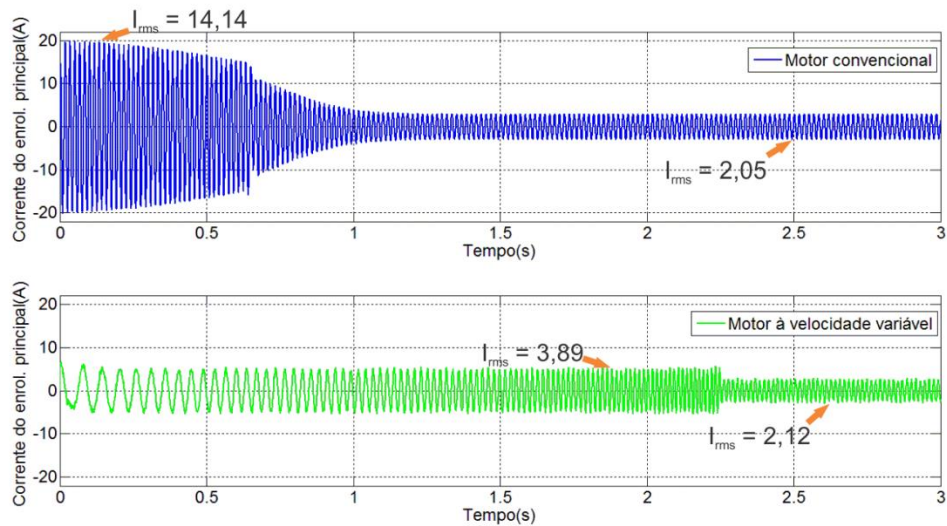


Figura 4.2: Gráfico das correntes elétricas do enrolamento principal dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.3. Corrente elétrica do enrolamento auxiliar do motor de indução

Na figura 4.3 estão representadas as correntes do enrolamento auxiliar, do motor convencional e à velocidade variável. A corrente do motor convencional no momento da partida atinge $10,0 A_{pico}$ ($7,07 A_{rms}$) enquanto que, em regime atinge $1,85 A_{pico}$ ($1,31 A_{rms}$). No motor à velocidade variável as correntes não extrapolam os $4,5 A_{pico}$ ($3,18 A_{rms}$) na partida e durante o regime registra-se $2,4 A_{pico}$ ($1,70 A_{rms}$).

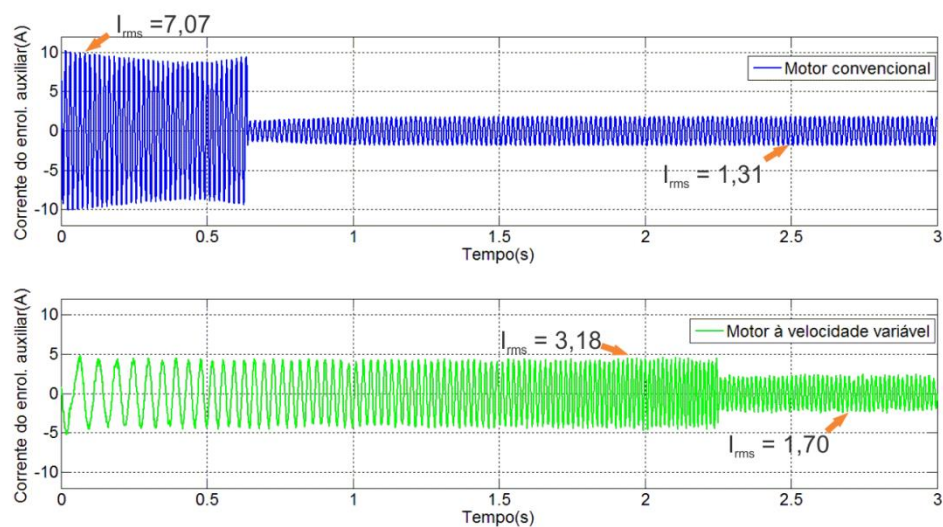


Figura 4.3: Gráfico das correntes elétricas do enrolamento auxiliar dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.4. Fator de potência do motor de indução

Na figura 4.4 estão representados os fatores de potência de ambos os motores, o motor à velocidade variável apresenta um fator de potência mais elevado na partida, contudo em regime o fator de potência mais elevado é do motor convencional a duplo capacitor.

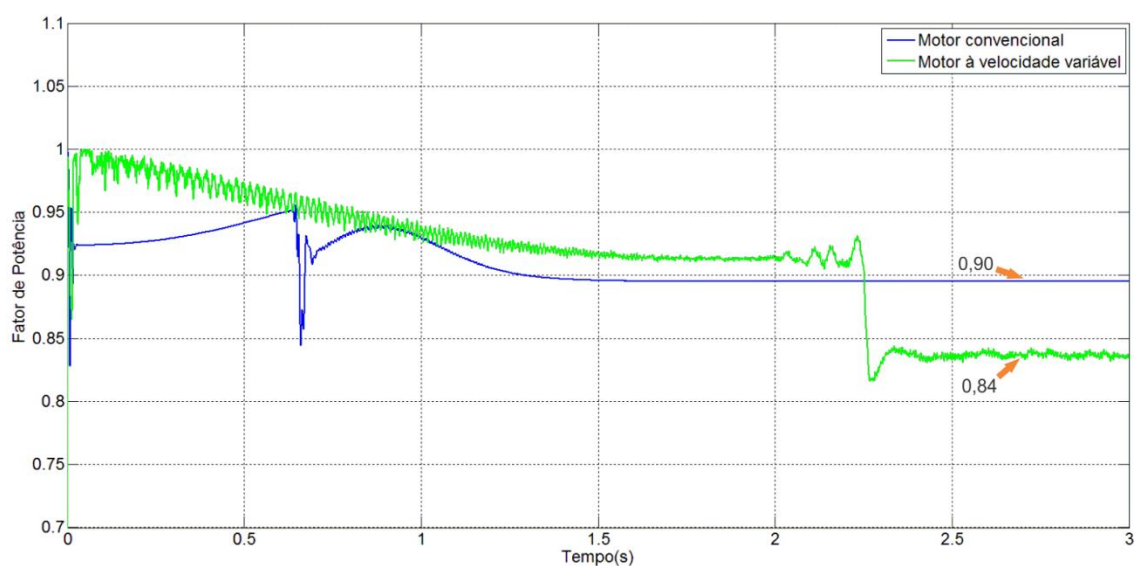


Figura 4.4: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.5. Potência elétrica do motor de indução

A figura 4.5 apresenta o gráfico da potência de cada motor durante a partida. Este gráfico comprova o que os gráficos das correntes indicavam, o motor convencional utiliza uma potência elétrica extremamente alta para partir, aproximadamente 8,12 vezes maior que sua potência em regime caracterizando assim o seu alto consumo de energia elétrica durante a partida. O motor à velocidade variável se mantém bastante eficiente, necessitando de cerca 3,65 vezes a sua potência de regime para partir e de maneira mais suave. Observa-se também na figura 4.5 que após a partida, durante o regime permanente o motor à velocidade variável se mantém mais eficiente consumindo a potência de 222,3 W enquanto que o motor convencional consome 240,6 W, ambos acionando a mesma carga.

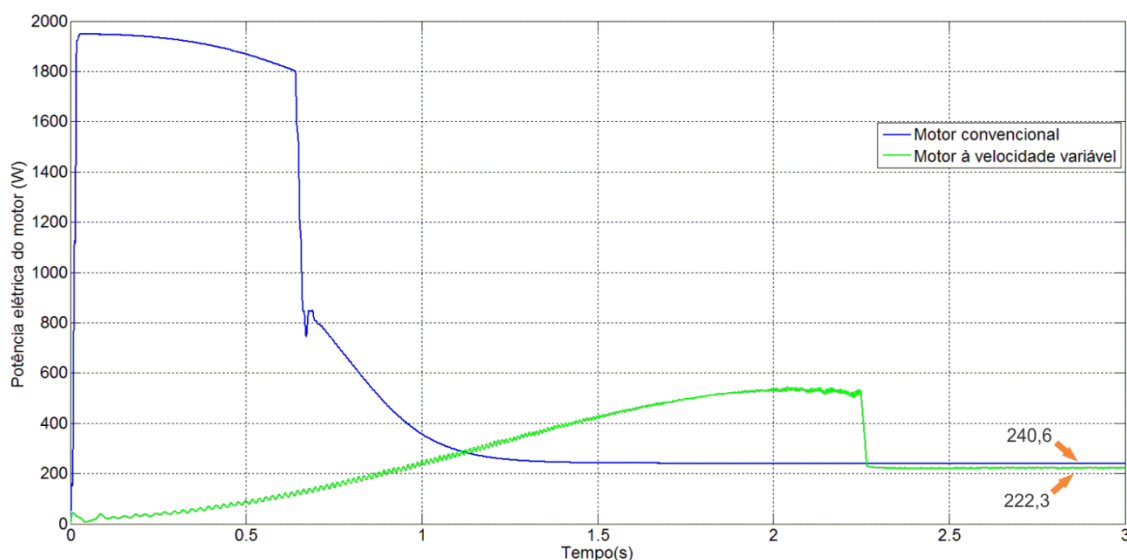


Figura 4.5: Gráfico da potência elétrica dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.6. Energia elétrica consumida pelo motor de indução

A energia elétrica consumida segue o mesmo padrão da potência elétrica, como apresenta a figura 4.6. Durante a partida, o consumo de energia elétrica do motor convencional é significativamente maior que o motor à velocidade variável e mesmo durante o regime permanente esta diferença continua aumentando. No instante de tempo igual a três segundos após a partida dos dois sistemas, caracterizando assim que ambos já se encontrassem em regime, o consumo do motor

convencional foi aproximadamente 2,36 vezes o consumo do motor à velocidade variável.

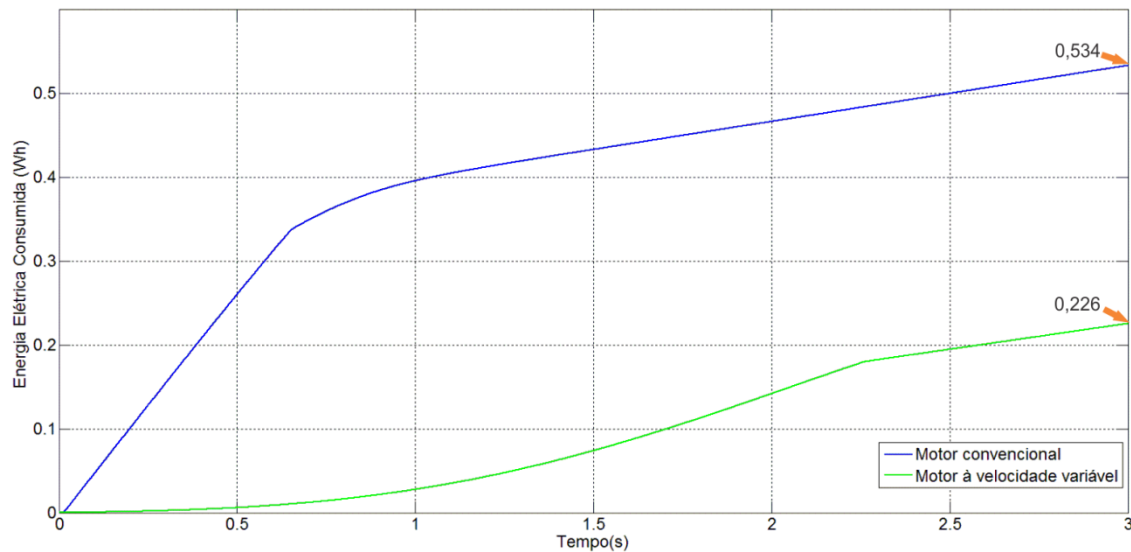


Figura 4.6: Gráfico da energia elétrica consumida pelos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.7. Torque eletromagnético gerado pelo motor de indução

A figura 4.7 apresenta a impressão dos torques eletromagnéticos dos motores, convencional e à velocidade variável. O torque do motor convencional sofre bastante variação na partida enquanto o torque do motor à velocidade variável é bastante estável, desde os primeiros instantes, gerando apenas o torque exigido.

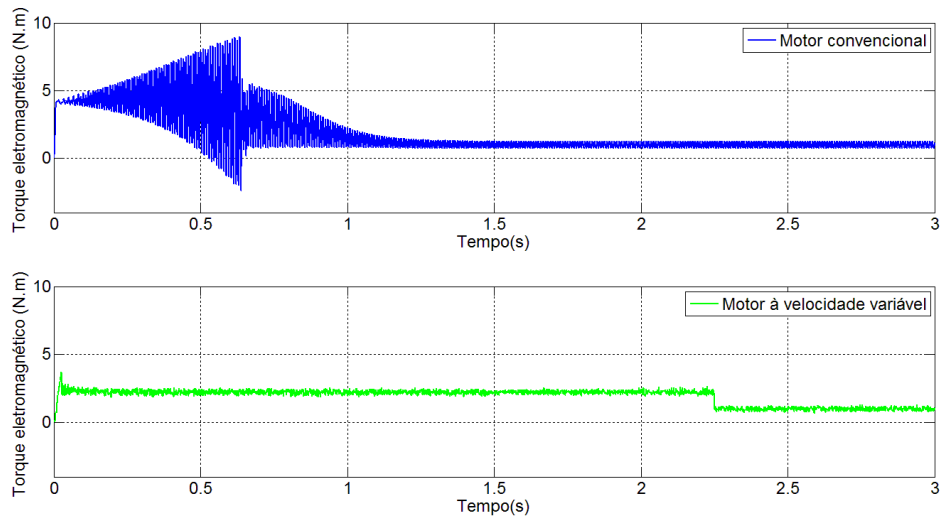


Figura 4.7: Gráfico torque eletromagnético (conjugado) gerado pelos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.8. Potência mecânica do eixo do motor de indução

A figura 4.8 apresenta o gráfico da potência mecânica dos motores, convencional e à velocidade variável. A potência mecânica do motor convencional apresenta uma característica não linear até o seu valor de regime enquanto a potência mecânica do motor à velocidade variável apresenta características lineares.

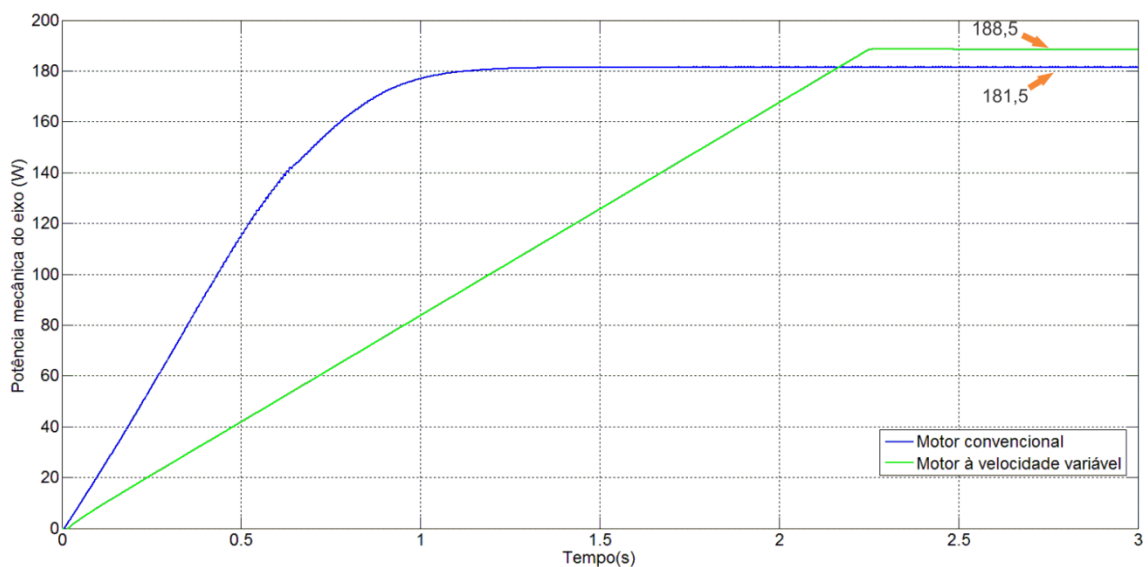


Figura 4.8: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.9. Velocidade do eixo do motor de indução

Na figura 4.9 está a representação gráfica da velocidade dos motores, convencional e à velocidade variável. A exemplo da potência mecânica, a velocidade do motor convencional apresenta comportamento quadrático até sua velocidade de regime enquanto o motor à velocidade variável apresenta comportamento linear.

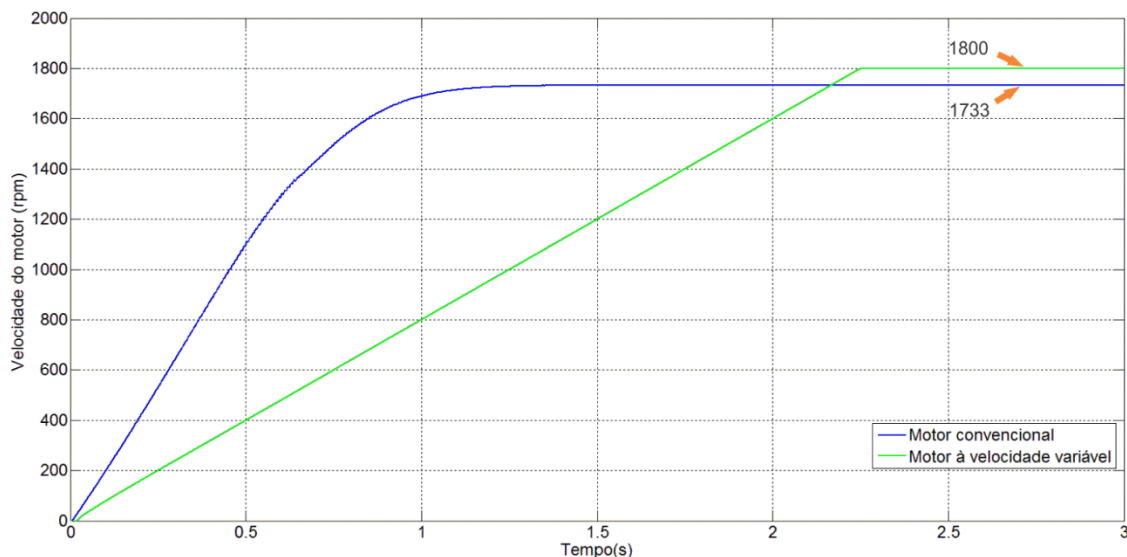


Figura 4.9: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável.

4.1.10. Resultados em regime permanente

Ao fim das simulações foram extraídos resultados com relevante importância para a análise proposta por este trabalho, tais dados foram registrados três segundos após a energização de cada um dos sistemas de forma a garantir que ambos os sistemas já se encontrassem em regime permanente e estão representados na tabela 4.1. Estes dados representam a potência elétrica consumida na partida dos motores e as principais características de regime permanente, fator de potência, potência mecânica e velocidade de regime do motor, assim como um cálculo de eficiência dos motores caracterizado pela razão entre a potência mecânica entregue pelo eixo do motor e a potência elétrica entregue ao motor.

Tabela 4.1: Resultados extraídos após três segundos.

	Fator de potência	Potência elétrica (W)	Energia elétrica consumida (Wh)	Potência mecânica do eixo (W)	Velocidade do eixo (rpm)	Pot. Mec. / Pot. Elet.
Motor convencional	0,895	240,6	0,534	181,5	1733	0,754
Motor à velocidade variável	0,837	222,3	0,226	188,5	1800	0,850

4.2. Resultados da simulação de distúrbios

Para uma análise completa e detalhada faz-se necessário também a simulação de condições adversas e transitórias dos sistemas a fim de comparar suas respostas em tais condições, desta forma são apresentadas algumas destas condições.

4.2.1. Variação da tensão de alimentação

Uma situação relativamente comum é a flutuação da tensão de alimentação, que pode ser gerada por diversos fatores, entre eles pode-se citar a entrada e saída de grandes cargas na rede que geram um afundamento de tensão e uma sobretensão, respectivamente.

Na representação desses distúrbios, foram geradas simulações com variações na tensão de alimentação de forma a respeitar as resoluções normativas presentes no PRODIST, que garante uma qualidade de energia adequada. Segundo o Módulo 8 do PRODIST, a energia elétrica apresenta uma qualidade adequada para os pontos de conexão residencial, tensão igual ou inferior a 1kV, quando a flutuação de tensão de alimentação não ultrapassa o valor de 5% do valor contratado ou nominal, seja para mais ou para menos.

Para caracterizar estas situações, as simulações foram realizadas garantindo que os distúrbios de alimentação ocorressem quando ambos os motores já se encontrassem em regime permanente, de forma que os distúrbios foram efetuados 3 segundos após a energização dos sistemas e sua tensão de alimentação variou a partir de 0,95 da alimentação nominal dos motores até atingir o valor de 1,05, com variações de 0,01.

Os dados de maior relevância destas simulações para este trabalho estão representados nas tabelas 4.2 e 4.3 e são eles: a potência elétrica absorvida pelos motores, a potência mecânica no eixo dos motores, a velocidade em que os motores operam e um cálculo da eficiência dos motores, representado pela razão entre as potências citadas anteriormente.

A tabela 4.2 apresenta as respostas do motor convencional perante tais simulações. É perceptível a vulnerabilidade do motor convencional às flutuações de tensão, apresentado valores diferentes para todos os dados em todas as simulações. Com o aumento do valor da tensão de alimentação, o motor convencional apresenta uma maior potência elétrica, uma maior potência mecânica em seu eixo e também gira a uma velocidade maior, porém perde eficiência à medida que a tensão se eleva.

Tabela 4.2: Resultado das simulações de flutuação de tensão no motor convencional.

Motor convencional				
Tensão (p.u.)	Potência Elétrica Entrada (W)	Potência Mecânica do Eixo (W)	Velocidade do Motor (rpm)	Pot. Mec. / Pot. Elét.
0,95	236,1	180,6	1725	0,7649
0,96	236,9	180,8	1727	0,7632
0,97	237,8	181	1728	0,7611
0,98	238,7	181,2	1730	0,7591
0,99	239,6	181,3	1732	0,7567
1,00	240,6	181,5	1733	0,7544
1,01	241,6	181,6	1735	0,7517
1,02	242,5	181,8	1736	0,7497
1,03	243,6	181,9	1737	0,7467
1,04	244,6	182,1	1739	0,7445
1,05	245,7	182,2	1740	0,7416

A tabela 4.3 indica os dados das simulações do motor com velocidade variável sob as oscilações de tensão. Este motor mantém a sua potência mecânica e sua velocidade, estáveis e constantes demonstrando uma alta robustez enquanto sua potência elétrica oscila entre 219 W e 224 W durante as simulações, independente da oscilação de tensão, o mesmo ocorre com sua eficiência que varia entre 0,86 e 0,84.

Tabela 4.3: Resultado das simulações de flutuação de tensão no motor com velocidade variável.

Motor com velocidade variável				
Tensão (p.u.)	Potência Elétrica Entrada (W)	Potência Mecânica do Eixo (W)	Velocidade do Motor (rpm)	Pot. Mec. / Pot. Elét.
0,95	221,8	188,5	1800	0,8499
0,96	222,3	188,5	1800	0,8480
0,97	222,7	188,5	1800	0,8464
0,98	223,4	188,5	1800	0,8438
0,99	223,4	188,5	1800	0,8438
1,00	221,6	188,5	1800	0,8506
1,01	221,3	188,5	1800	0,8518
1,02	219,9	188,5	1800	0,8572
1,03	220,1	188,5	1800	0,8564
1,04	220,7	188,5	1800	0,8541
1,05	221,4	188,5	1800	0,8514

4.2.1.1. Afundamento da tensão de alimentação

Para avaliar o comportamento de ambos os sistemas sob a condição de afundamento transitório de tensão foi realizada uma simulação em que 3 segundos após a energização dos sistemas, a tensão de alimentação cai para 0,95 da alimentação nominal requerida pelos motores. Os dois sistemas atingem a velocidade de regime permanente em um tempo inferior a 2,5 segundos, de forma que quando o afundamento de tensão acontece, os sistemas já apresentam condição de regime.

Como demonstra a figura 4.10, a velocidade do motor com sistema de controle “liga-desliga” apresentou uma leve queda se limitando à velocidade de 1725 rpm enquanto o motor controlado pelo inversor não sofreu alteração mantendo-se em 1800 rpm.

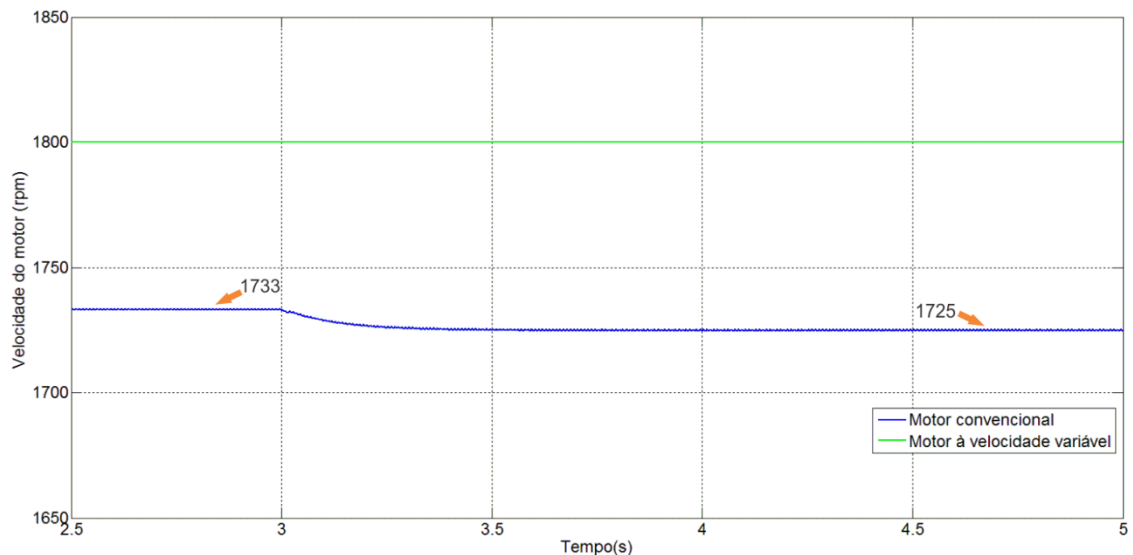


Figura 4.10: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.

A queda da velocidade indica uma queda na potência mecânica do eixo do motor e conseqüentemente uma queda na capacidade frigorífica do sistema. A queda da potência mecânica do sistema “liga-desliga” pode ser observada na figura 4.11 que diminui de 181,5 W para 180,2 W enquanto no sistema controlado pelo inversor a potência se mantém em 188,5 W.

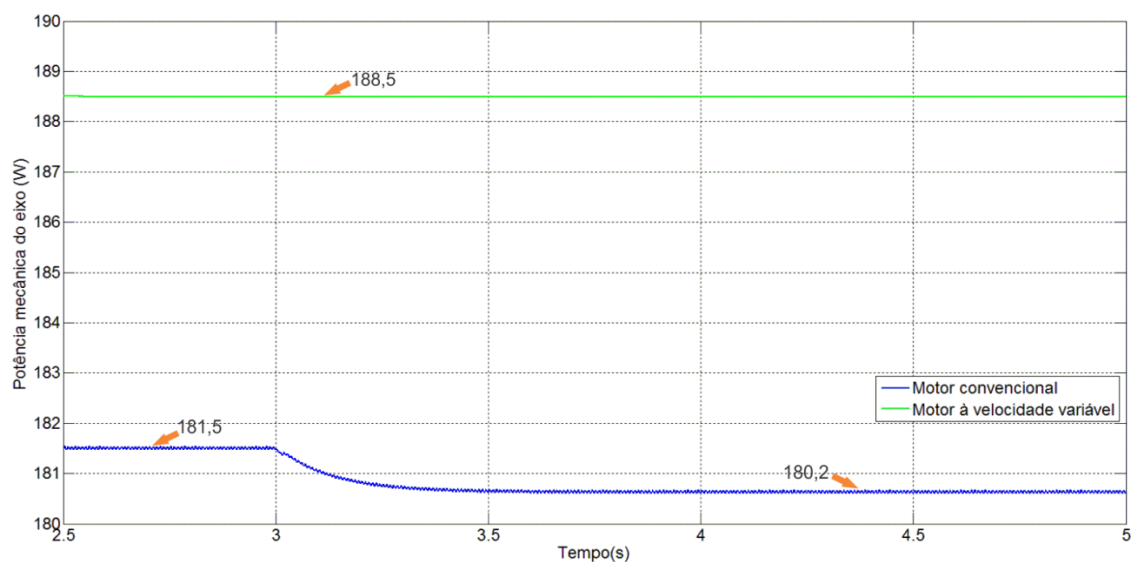


Figura 4.11: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.

Porém o resultado que apresenta variação em ambos os sistemas é o fator de potência, ao qual aumenta no sistema “liga-desliga” de 0,895 para 0,906, seguido pelo

sistema com o inversor que também sobe de 0,837 para 0,840, como é comprovado na figura 4.12.

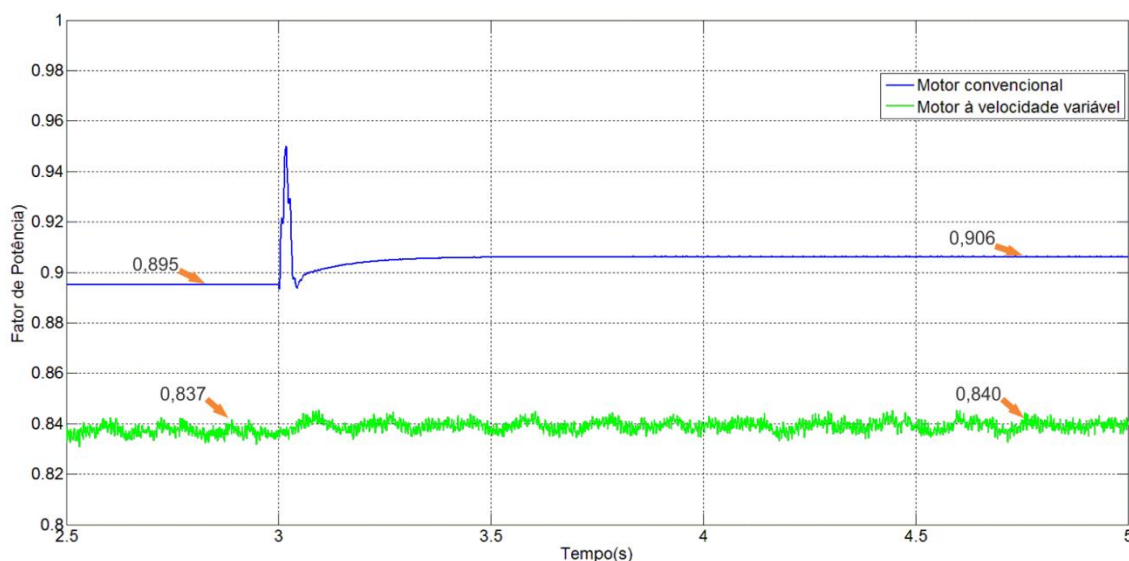


Figura 4.12: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com afundamento de tensão.

4.2.1.2. Sobretensão de alimentação

Na simulação de sobretensão transitória os procedimentos foram similares ao de afundamento, o distúrbio de alimentação foi gerado 3 segundos após a energização dos sistemas e sua intensidade foi de 1,05 do valor nominal de alimentação dos motores.

A velocidade do sistema controlado pelo inversor se manteve constante a 1800 rpm, entretanto a velocidade do sistema “liga-desliga” teve um aumento alcançando 1740 rpm, como demonstra a figura 4.13.

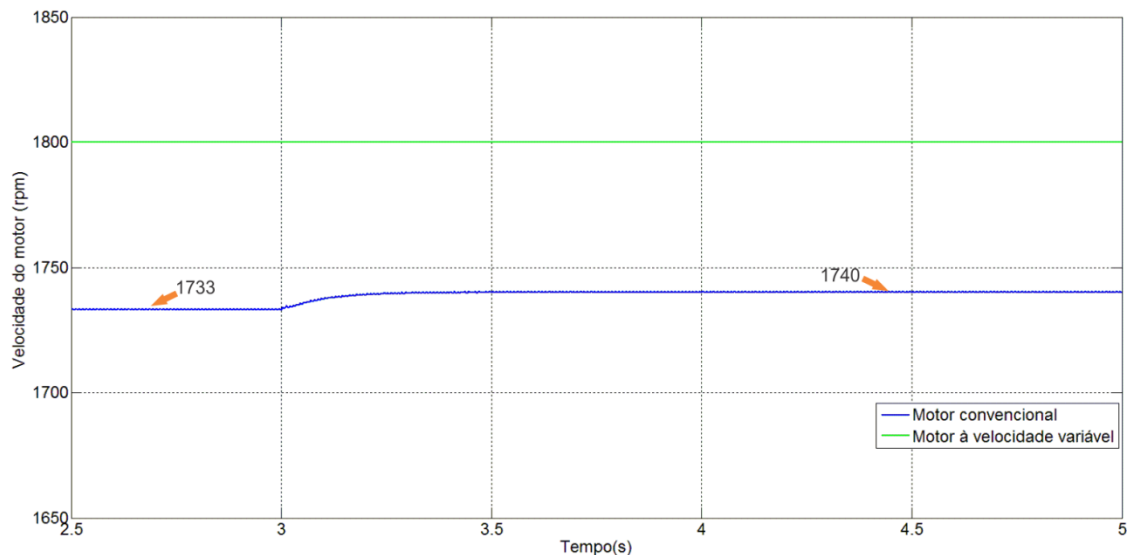


Figura 4.13: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.

Como esperado com o aumento da velocidade, a potência mecânica do eixo teve uma elevação no sistema “liga-desliga” atingindo o valor de 182,2 W, representado na figura 4.14, enquanto a potência mecânica do sistema com inversor se manteve estável em 188,5 W.

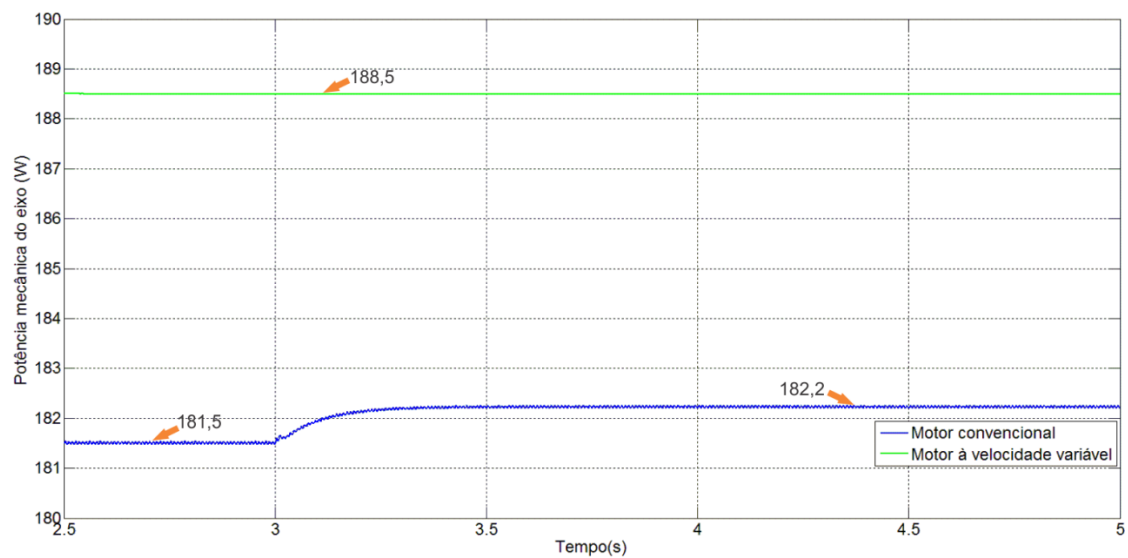


Figura 4.14: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.

Novamente a única medição que apresentou variação em ambos os sistemas foi o fator de potência, porém desta vez enquanto o valor do sistema com o inversor

apresentou uma queda infinitesimal, o valor do sistema “liga-desliga” teve uma queda atingindo 0,883 assim relata a figura 4.15.

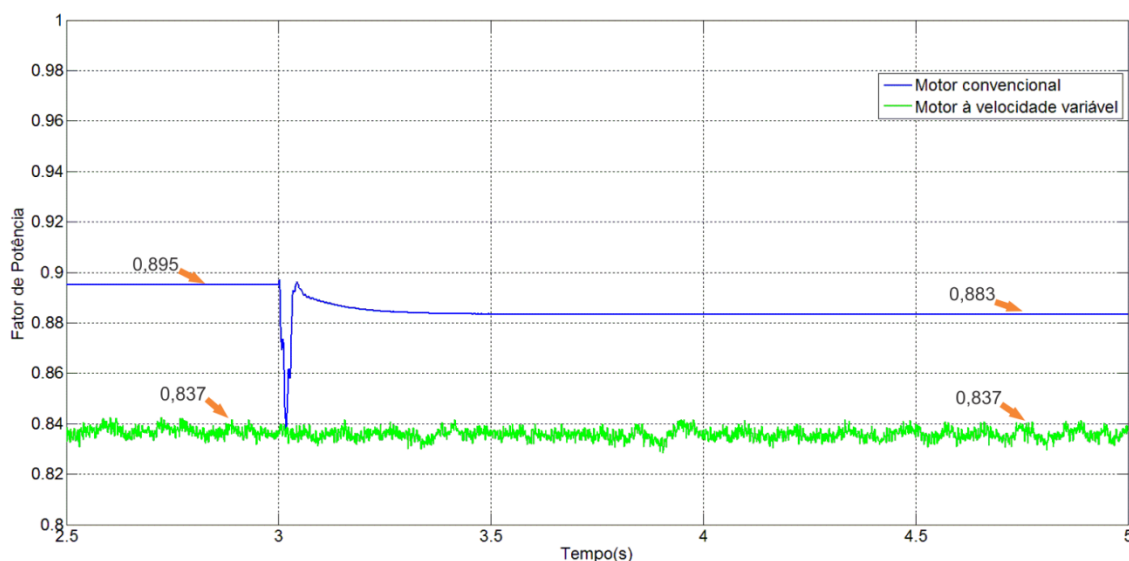


Figura 4.15: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com sobretensão.

4.2.2. Variação da carga em regime

Durante a operação do motor ocorrem situações em que a carga associada ao mesmo se altera, por exemplo se houver um vazamento do líquido refrigerante a carga associada ao eixo do motor pode diminuir enquanto que um entupimento parcial do dispositivo de expansão pode gerar um aumento desta carga. Para analisar a resposta dos dois sistemas em estudo a uma alteração de carga durante o regime de operação foram realizadas simulações para ambos os sistemas de maneira que após a partida houvesse uma alteração no valor da carga com duas situações possíveis, uma em que o valor da carga aumentasse e outra em que o valor da carga diminuísse a fim de aumentar a amplitude do estudo.

4.2.2.1. Diminuição da carga em regime

Ambos os sistemas atingem seu estado de regime permanente antes do tempo de 2,5 segundos após sua energização, portanto a alteração da carga acoplada ao eixo do motor é realizada 3 segundos após a energização de cada sistema, garantindo assim que estejam em regime. Para a análise referente à diminuição da carga

acoplada ao eixo do motor foi realizada uma alteração de 1 p.u. para 0,85 p.u. do valor nominal da carga do eixo.

Com uma menor carga para ser acionada, o motor necessita fazer menos força para girar consequentemente a potência mecânica do motor tende a ser menor. Tal fato pode ser atestado pela figura 4.16, a potência do eixo do motor do sistema “liga-desliga” atinge apenas o valor de 155,3 W enquanto a potência do sistema com o inversor não ultrapassa o valor de 160,2 W.

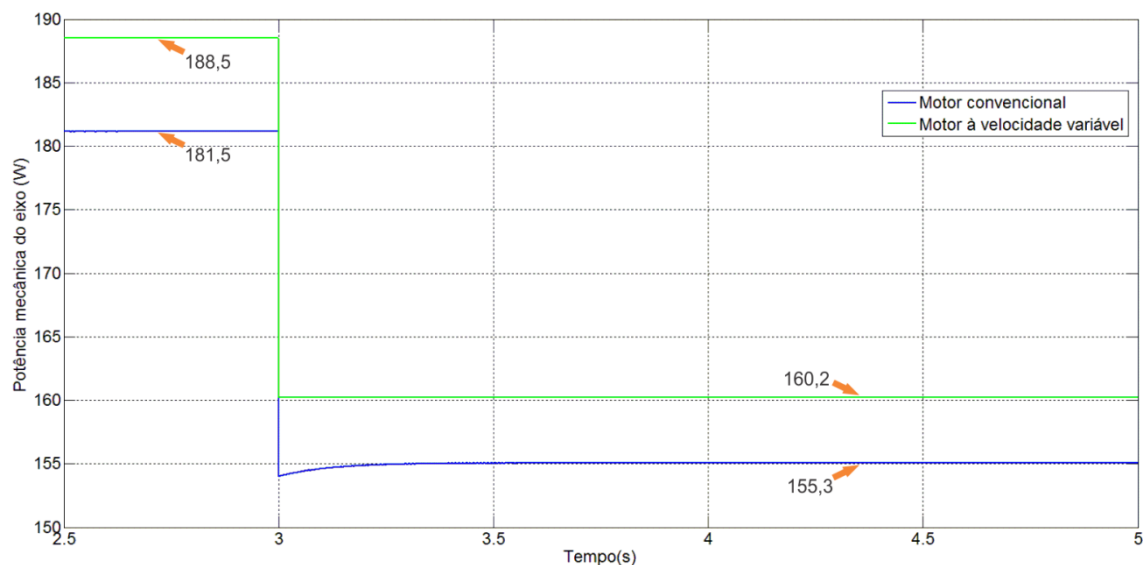


Figura 4.16: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.

Com menos exigência ao motor sua velocidade aproxima-se da velocidade nominal, no caso do sistema “liga-desliga”, chegando a 1744 rpm como apresenta a figura 4.17, já a velocidade do sistema com o inversor se mantém inalterada.

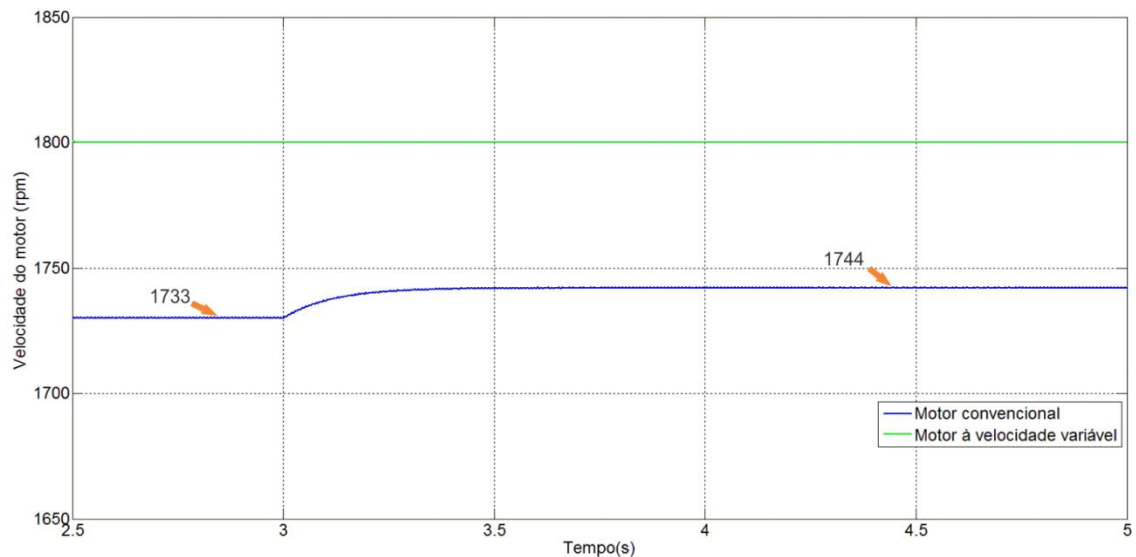


Figura 4.17: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.

Quando analisado o fator de potência dos sistemas, observa-se através da figura 4.18 o mesmo padrão de resposta, com queda em ambos os sistemas. Para o sistema com o inversor o fator de potência caiu de 0,837 para 0,804 enquanto o sistema “liga-desliga” foi de 0,895 para 0,875.

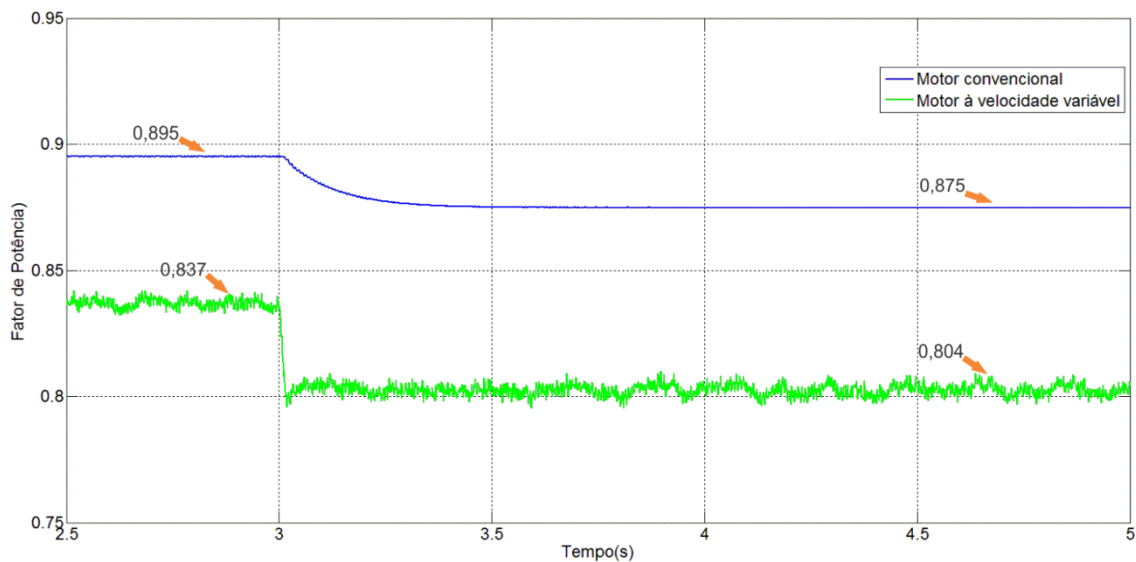


Figura 4.18: Gráfico do fator de potência dos motores convencional e à velocidade variável com diminuição da carga acoplada ao eixo do motor.

4.2.2.2. Aumento da carga em regime

Para a análise dos sistemas com um aumento de carga no eixo do motor durante o regime de operação foram seguidos os mesmos padrões da diminuição de carga de forma que no instante igual a 3 segundos a carga foi alterada de 1 p.u. para 1,05 p.u. do valor nominal.

Com o aumento da carga acoplada ao eixo é previsível supor que a força exigida do motor seja maior e a potência mecânica de seu eixo aumente, como é demonstrado pela figura 4.19, onde a potência mecânica do sistema “liga-desliga” atinge 190,1 W e a do sistema com inversor alcança 197,9 W.

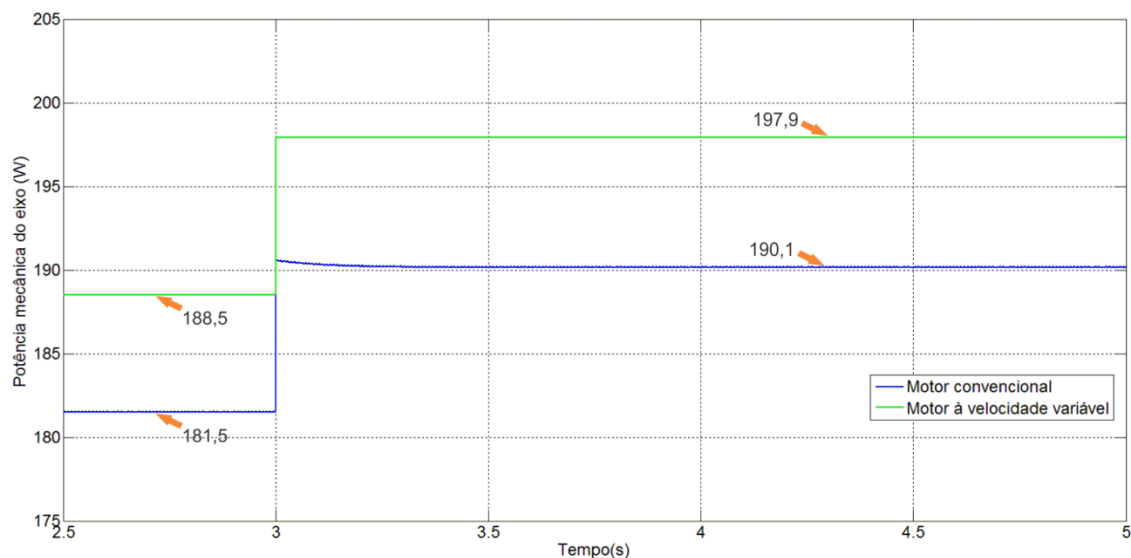


Figura 4.19: Gráfico da potência mecânica do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com aumento da carga acoplada ao eixo do motor.

Com o aumento da carga no eixo do motor seria aceitável uma queda de velocidade do mesmo no sistema “liga-desliga”, porém tal queda foi pequena sendo reduzida apenas 4 rpm e marcando 1729 rpm, enquanto o sistema controlado pelo inversor não tem sua velocidade alterada como apresenta a figura 4.20.

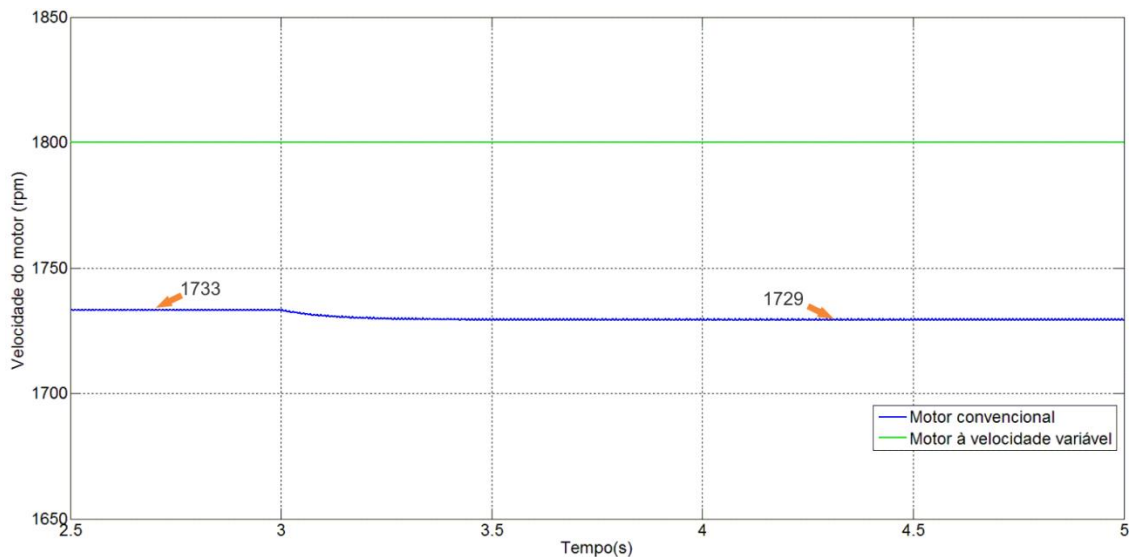


Figura 4.20: Gráfico da velocidade do eixo dos motores convencional e à velocidade variável com aumento da carga acoplada ao eixo do motor.

Cabe aqui salientar que apesar de realizadas as simulações das partidas com as alterações de carga anteriormente mencionadas, os resultados apresentados são bastante semelhantes às simulações já representadas, portanto suas representações foram omitidas deste trabalho.

4.3. Resultados da simulação de um ciclo de funcionamento

Após a análise da partida dos sistemas e da resposta a possíveis perturbações, seja de alimentação ou de carga, resta agora analisar o gasto energético destes sistemas. Para tal foram realizadas simulações de um ciclo completo de funcionamento de um refrigerador. O ciclo completo é formado por duas partes, o ciclo de funcionamento do sistema de refrigeração, que representa o momento de resfriamento do âmbito interno do refrigerador atingindo uma temperatura de referência pré-definida, geralmente um pouco inferior à temperatura desejada; ciclo de repouso do sistema de refrigeração, momento em que o refrigerador lentamente absorve calor do meio normalmente por condução e irradiação.

O consumo de energia pelo motor ocorre somente quando ele está em funcionamento, logo no ciclo de funcionamento. Segundo [18] em média um ciclo de funcionamento do motor dura 8,8 minutos e pelos dados apresentados em [18], este ciclo repete-se ao longo do dia aproximadamente 40 vezes.

As simulações dos sistemas foram iniciadas da partida dos mesmos mantendo-se ligados por 8,8 minutos. Algumas considerações precisam ser realizadas neste momento:

- Durante toda a simulação foram mantidas a alimentação nominal e a carga no eixo do motor em 1 p.u.;
- A fim de fidelizar a comparação dos sistemas, o controle do inversor de frequência foi ajustado para manter o motor de velocidade variável em 1733 rpm e potência do eixo do mesmo em 181,5 W, perfeitamente iguais à velocidade e potência do motor com sistema “liga-desliga” garantindo a mesma capacidade de refrigeração para os dois sistemas;
- Esta forma de controle do motor à velocidade variável não é a mais eficiente e foi utilizada apenas para uso comparativo.

Para a análise energética o dado mais importante é o de energia elétrica consumida pelos motores. Para um ciclo de funcionamento, tais dados são apresentados na figura 4.21. O sistema controlado pelo inversor apresenta um menor consumo, 35,62 Wh ante 32,16 Wh do motor com controle “liga-desliga”, o que demonstra uma maior eficiência do sistema controlado pelo inversor, mesmo quando atuando fora de sua melhor condição.

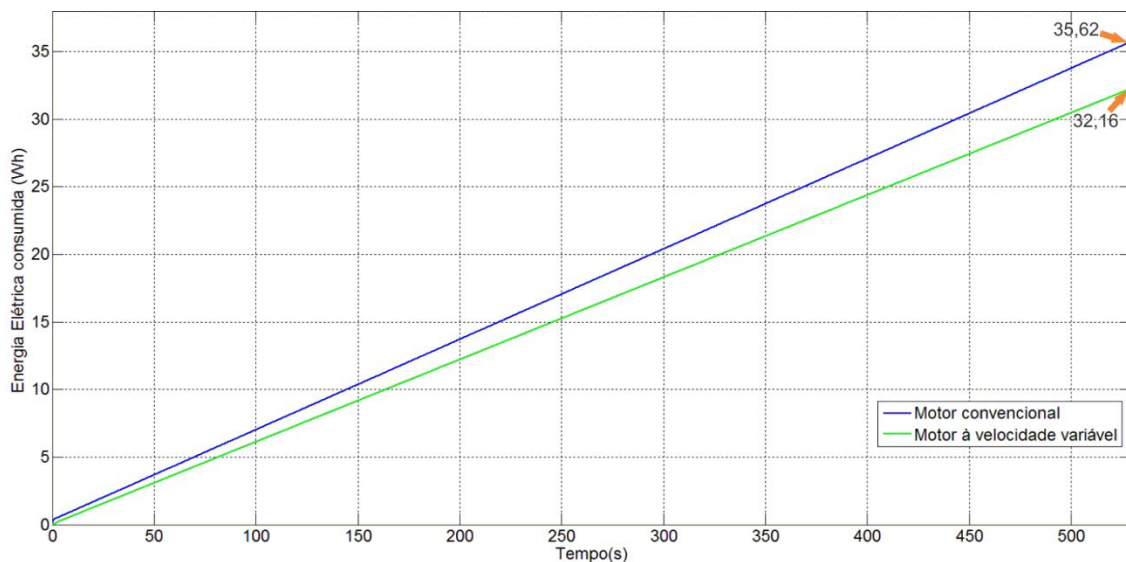


Figura 4.21: Gráfico da energia elétrica consumida pelos motores convencional e à velocidade variável durante um ciclo de funcionamento.

4.4. Discussão dos resultados

Através dos gráficos percebe-se que a partida do motor de velocidade variável é mais suave, o torque é mais estável e a progressão de sua velocidade mais linear. Também é perceptível que as correntes de partida do motor de velocidade variável são menores, o que gera um menor consumo de energia elétrica assim como um menor estresse do motor.

Comparando as velocidades do eixo dos dois motores em regime permanente, nota-se que o motor convencional apresenta uma velocidade um pouco inferior à de valor nominal, isso se deve ao escorregamento do motor. No entanto, o motor de velocidade variável atinge o seu valor nominal, mérito do controle do inversor que contorna o efeito de escorregamento elevando levemente o valor de suas correntes. Por efeito deste controle, o motor à velocidade variável alcança também um maior conjugado e uma maior potência mecânica no seu eixo mesmo absorvendo uma menor quantidade de potência elétrica, este último causado pelo cálculo das melhores correntes, intensidade e defasagem das correntes principal e auxiliar, para produzir o campo eletromagnético mais eficiente para girar o rotor. Outro efeito do controle pelo inversor é uma alta robustez a distúrbios, seja na tensão de alimentação ou na alteração da carga, o que garante estabilidade e alta confiabilidade de operação.

Durante as simulações o motor convencional apresentou apenas uma vantagem sobre o motor à velocidade variável, o fator de potência em regime permanente. Durante a partida os dois motores mantiveram fatores de potência bem semelhantes, com uma leve vantagem para o motor à velocidade variável, porém em regime permanente o valor do fator de potência do motor convencional se mostrou aproximadamente 6,6% mais elevado que o motor à velocidade variável, fato caracterizado pelo uso do capacitor de marcha.

Tais dados aliados à geração de harmônicos por parte do inversor indica a necessidade de uma análise dos distúrbios que esse sistema pode causar à qualidade da energia elétrica da rede de alimentação e/ou maneiras de amenizá-las.

Os dados de consumo de energia elétrica dos motores apresentaram valores bem distintos, o motor à velocidade variável não alcançou a metade da energia consumida pelo motor convencional durante as simulações de partida, fato que não reflete sozinho o consumo dos sistemas na partida. No sistema do motor convencional o único consumidor de energia é o próprio motor, enquanto que no sistema do motor à velocidade variável além do motor existe outro consumidor de energia, o inversor de frequência, o qual não teve o consumo de energia adicionado às simulações deste

trabalho. O consumo de energia do inversor é relevante e as principais fontes deste consumo podem ser consideradas como perdas construtivas, entre elas se destaca a energia perdida no chaveamento dos transistores.

Durante as simulações de um ciclo de funcionamento do refrigerador a diferença de consumo entre os sistemas diminuiu consideravelmente de maneira que o motor controlado pelo sistema “liga-desliga” consumiu 10,77% de energia a mais do que o motor controlado pelo inversor. Isto ocorreu, pois o motor à velocidade variável foi induzido a funcionar como um motor à velocidade fixa, afastando-se da sua melhor condição de funcionamento.

Em complementação a estes resultados, analisando o desempenho dos motores apenas nas condições de velocidade fixa e em um ciclo de funcionamento, com base nos dados de [18] estima-se que um sistema de refrigeração doméstica tem em média 40 ciclos diários, 280 ciclos semanais e 1200 ciclos mensais, considerando um mês de trinta dias, o que geraria uma economia de energia relevante mesmo fora da sua condição de maior eficiência para qualquer sistema de geração, evitando maiores investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia.

5. Conclusões

Em uma realidade em que o crescimento da produção de energia não acompanha o crescimento de sua demanda, toda e qualquer forma de equilibrar essa equação deve ser relevada, estudada e se viável, implementada.

O inversor de frequência já é uma realidade de mercado consolidado tecnologicamente, a combinação deste ao motor de indução monofásico representa uma ótima solução para minimizar esta demanda, não apenas em sistemas de refrigeração doméstica, mas também em outras aplicações como condicionamento de ambientes, máquinas de lavar, entre outras e não apenas a nível nacional.

Outros aspectos merecem destaque quando se refere ao inversor, de forma positiva ressalta-se a alta robustez a distúrbios de qualidade de energia como afundamentos de tensão, elevação de tensão e alteração da frequência fundamental o que garante uma maior estabilidade de funcionamento do motor e esta estabilidade não se limita apenas às variações na tensão de alimentação, mas também em variações de carga, merece ser ressaltado também que o inversor apresenta um controle e que este é programável de maneira que o motor pode operar em velocidades diferentes para condições diferentes em uma mesma aplicação maximizando a sua eficiência energética.

O nível de eficiência deste sistema não depende apenas do sistema e sim de correta adequação à aplicação e para tal é necessário um estudo específico, o que inclui também uma correta programação do seu módulo de controle. O que se torna inevitável é afirmar que o inversor acoplado ao motor de indução é uma boa solução de eficiência energética.

Referências Bibliográficas

- [1] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2006-2007.
- [2] Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr., C., Umans, S. D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. São Paulo, Bookman, 2008.
- [3] WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Guia técnico.
- [4] Pirani, M. J. **ENG176 Refrigeração e Ar Condicionado, Parte I Refrigeração**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA.
- [5] Martinelli Jr., L. C. **Refrigeração e Ar-Condicionado, Parte II**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- [6] Perguntas e Respostas sobre Refrigeração e Climatização. Desenvolvido por Instituto Federal de Santa Catarina, São José: IFSC. Disponível em: <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Arquivo:Novo_do_ciclo_de_refrigera%C3%A7%C3%A3o.jpg>. Acesso em: 25 set. 2013
- [7] Martinelli Jr., L. C. **Refrigeração e Ar-Condicionado, Parte I**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- [8] Leonard, W. **Control of Drives**. 2°. Ed [S.I.]: Springer, 1997.
- [9] Pelizari, A. **Um Estudo da Influência das Configurações dos Enrolamentos no Desempenho de Motores de Indução Monofásicos com Capacitor de Partida**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2009.
- [10] Vieira, R. P. **Servocontrole de Velocidade Aplicado a Motores de Indução Monofásicos sem Sensores Mecânicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2008.
- [11] Tassou S. A., Quereschi T. Q.. **Performance of a Variable-Speed Inverter/Motor Drive for Refrigeration Applications**. IEE Computing Control Engineering Journal, Vol. 5, N°. 4. 1994.

- [12] Aprea, C., Mastrullo, R., Renno, C.. **Fuzzy Control of the Compressor Speed in a Refrigeration Plant.** International Journal of Refrigeration, N°. 27. 2004.
- [13] Batista, A. P. **Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por Meio de um Sistema Distribuído.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG. 2006.
- [14] Garcia, F. E. M. e Bandarra Filho, E. P.. **Desempenho Energético de um Sistema de Refrigeração Aplicando o Controle Adaptativo Fuzzy.** 16º simpósio de pós-graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2006.
- [15] Moreno, F. E.. **Estudo Experimental de Controle Adaptativo para um Sistema de Refrigeração.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 2006.
- [16] J. Donlon, J. Achhammer, H. Iwamoto e M. Iwasaki. **Power Modules for Appliance Motor Control.** IEEE Industry Applications Magazine, Jul/Ago 2002.
- [17] Peixoto, L. **Aspectos de Projeto de Motores de Indução Monofásicos Aplicados em Compressores Herméticos para Refrigeração.** Dissertação (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2011.
- [18] Niro, G. **Gerenciamento de refrigeradores para redução do pico de demanda em Redes Inteligentes.** Dissertação (Graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2011.

Bibliografia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2006-2007.

Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr., C., Umans, S. D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. São Paulo, Bookman, 2008.

WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Guia técnico.

Pirani, M. J. **ENG176 Refrigeração e Ar Condicionado, Parte I Refrigeração**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA.

Martinelli Jr., L. C. **Refrigeração e Ar-Condicionado, Parte II**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Perguntas e Respostas sobre Refrigeração e Climatização. Desenvolvido por Instituto Federal de Santa Catarina, São José: IFSC. Disponível em: <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Arquivo:Novo_do_ciclo_de_refrigera%C3%A7%C3%A3o.jpg>. Acesso em: 25 set. 2013

Martinelli Jr., L. C. **Refrigeração e Ar-Condicionado, Parte I**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Leonard, W. **Control of Drives**. 2°. Ed [S.I.]: Springer, 1997.

Pelizari, A. **Um Estudo da Influência das Configurações dos Enrolamentos no Desempenho de Motores de Indução Monofásicos com Capacitor de Partida**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2009.

Vieira, R. P. **Servocontrole de Velocidade Aplicado a Motores de Indução Monofásicos sem Sensores Mecânicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2008.

Tassou S. A., Quereschi T. Q.. **Performance of a Variable-Speed Inverter/Motor Drive for Refrigeration Applications**. IEE Computing Control Engineering Journal, Vol. 5, N°. 4. 1994.

Aprea, C., Mastrullo, R., Renno, C.. **Fuzzy Control of the Compressor Speed in a Refrigeration Plant**. International Journal of Refrigeration, N°. 27. 2004.

Batista, A. P. **Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por Meio de um Sistema Distribuído**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG. 2006.

Garcia, F. E. M., Bandarra Filho, E. P.. **Desempenho Energético de um Sistema de Refrigeração Aplicando o Controle Adaptativo Fuzzy**. 16º simpósio de pós-graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2006.

Moreno, F. E. **Estudo Experimental de Controle Adaptativo para um Sistema de Refrigeração**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 2006.

J. Donlon, J. Achhammer, H. Iwamoto e M. Iwasaki. **Power Modules for Appliance Motor Control**. IEEE Industry Applications Magazine, Jul/Ago 2002.

Peixoto, L. **Aspectos de Projeto de Motores de Indução Monofásicos Aplicados em Compressores Herméticos para Refrigeração**. Dissertação (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2011

Niro, G. **Gerenciamento de refrigeradores para redução do pico de demanda em Redes Inteligentes**. Dissertação (Graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 2011.

Barb, I. **Teoria fundamental do motor de indução**. Santa Catarina, Editora da UFSC, 1985.

ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**. 2010

Baltar, M. G. **Redução da Demanda de Energia Elétrica utilizando Parâmetros Construtivos visando ao Conforto Térmico**. Dissertação (Mestrado) – Pontífice Universidade Católica do Rio Grandedo Sul, Porto Alegre – RS. 2006.

Leandro, E. **Um Novo Sistema de Refrigeração com Controle de Temperatura, Compressor Aberto, Máquina de Indução Trifásica com Velocidade Variável e Correção Ativa do Fator de Potência do Estágio de Entrada**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP. 2006

AAE - Agência para aplicação de energia. **Manual de Administração de Energia.** São Paulo, 1997.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia. **Manual de Conservação de Energia Elétrica. Prédios Públicos e Comerciais.** Eletrobrás, 1994.

Yamamoto, S. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento Térmico e Elétrico do Refrigerador Doméstico.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru – SP. 2006.

Apostila de Refrigeração. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Santo Amaro - BA. 2009.

Apêndice A

Dados dos motores:

Tabela 5.1: Parâmetros dos motores de indução monofásicos.

	Motor acoplado ao sistema de controle “on-off”	Motor acoplado ao sistema com inversor
Classificação	<i>Duplo Capacitor</i>	<i>Fase Dividida</i>
Potência nominal (VA/HP)	<i>186,5/0,25</i>	<i>186,5/0,25</i>
Tensão nominal (Vrms)	<i>110</i>	<i>110</i>
Frequência nominal (Hz)	<i>60</i>	<i>60</i>
Par de polos	<i>2</i>	<i>2</i>
Resistência do enrolamento principal (Ω)	<i>4,12</i>	<i>4,12</i>
Resistência do enrolamento auxiliar (Ω)	<i>7,14</i>	<i>7,14</i>
Indutância do enrolamento principal (mH)	<i>5,6</i>	<i>5,6</i>
Indutância do enrolamento auxiliar (mH)	<i>8,54</i>	<i>8,5</i>
Inércia do rotor (Kg.m^2)	<i>0,0146</i>	<i>0,0146</i>
Capacitância de partida (mF)	<i>255</i>	-----
Capacitância de marcha (mF)	<i>21,1</i>	-----
Velocidade de desacoplamento do capacitor de partida (%)	<i>75</i>	-----