

Aplicação de Variadores de Velocidade em Sistemas de Climatização

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

Aplicação de Variadores de Velocidade em Sistemas de Climatização

PEDRO MIGUEL DA SILVA MONTEIRO
Novembro de 2014

PEDRO MIGUEL DA SILVA MONTEIRO
Novembro de 2014



APLICAÇÃO DE VARIADORES DE VELOCIDADE EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Pedro Miguel da Silva Monteiro



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2014

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Pedro Miguel da Silva Monteiro, N° 1040767, 1040767@isep.ipp.pt

Orientação científica: Nuno Filipe da Fonseca Basto Gomes, nbg@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2014

Resumo

Por um lado vivemos numa sociedade cujos padrões de conforto são cada vez mais exigentes, por outro encontramos-nos numa era pautada por um certo declínio económico, social e também ambiental. Não se assumindo uma estratégia que limite ou diminua essas condições de conforto resta-nos atuar de forma a que os recursos utilizados para garantir esse mesmo conforto sejam utilizados da melhor forma possível.

O setor dos edifícios é responsável por uma grande parcela de consumo de energia na sociedade atual, sendo que os sistemas de climatização que dele fazem parte, apresentam-se na maioria dos casos como os grandes consumidores de energia. Nesse sentido têm sido feitos esforços enormes no sentido de encontrar soluções que garantam a eficiência energética destes sistemas.

O Variador Eletrónico de Velocidade apresenta-se como uma das soluções amplamente difundidas, na vertente do controle de processos e economia de energia. A sua aplicação em sistema de climatização é mais um desses casos. Nesse sentido, numa primeira parte é feito o estudo das características e funcionamento dos Variadores de Velocidade, Sistemas de Climatização e sua aplicação conjunta. Em seguida é realizada uma aplicação informática que pretende demonstrar a economia de energia garantida por aplicação de um Variador de Velocidade.

Palavras-Chave

Sistemas de Climatização, Variadores Eletrónicos de Velocidade, Motores Eléctricos, Economia de Energia, Eficiência Energética

Abstract

On the one hand we live in a society whose standards of comfort are increasingly demanding, on the other we find ourselves in an era marked by a certain economic, social and also environmental decline. Not assuming a strategy to limit or diminish these conditions of comfort left us act so that the resources used to ensure that same comfort are used in the best possible way.

The buildings sector is responsible for a large portion of power consumption in today's society, and the HVAC systems that are part of it, show up in most cases as the major energy consumers. Accordingly enormous efforts have been made to find solutions that ensure energy efficiency of these systems.

The Variable Speed Drive presents itself as one of the widely spread solutions of process control and energy savings. Its application in the HVAC system is another one of those cases. Because of that fact, in the first part is made the study of the characteristics and operation of Variable Speed Drives, HVAC Systems and their joint application. Then is performed a software application that aims to demonstrate the energy savings guaranteed by applying a Variable Speed Drive.

.

Keywords

HVAC systems, Variable Speed Drive, Electrical Motors, Power Savings, Energy Efficiency

Agradecimentos

A elaboração de uma tese de Mestrado constitui uma tarefa árdua, que exige dedicação e algum sacrifício pessoal. A dificuldade desta tarefa depende das adversidades, mas também dos apoios que vão surgindo ao longo do trabalho. Nesse sentido, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Doutor Nuno Filipe Da Fonseca Bastos Gomes, pela total disponibilidade que dispôs para me receber, pelo apoio, prestabilidade e orientação.

Ao Eng.º. Armando Herculano Lopes Ferreira, um agradecimento também especial, pelo apoio prestado na compreensão de conceitos relacionados com Conversores de Potência.

Quero também congratular a ajuda de todos os professores deste Instituto que me capacitaram para a elaboração deste trabalho.

E por fim, mas não menos importante, quero agradecer à minha família pelo carinho, apoio e suporte que demonstraram e sempre me deram, e também à minha namorada pelo apoio incondicional que sempre me deu.

Índice

RESUMO	I
ABSTRACT	III
AGRADECIMENTOS	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.OBJETIVOS	3
1.2.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.	3
2. SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO	5
2.1.LEGISLAÇÃO APLICADA NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS	7
2.2.CLASSIFICAÇÃO DE UM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO	14
2.3.SISTEMAS "TUDO AR"	15
2.4.SISTEMAS AR E ÁGUA.....	19
2.5.COMPONENTES DE UM SISTEMA AVAC.....	21
3. MOTORES ELÉTRICOS	23
3.1.MÁQUINA ASSÍNCRONA DE CORRENTE ALTERNADA	25
3.2.MOTORES DE ALTO RENDIMENTO	27
3.3.MODELO DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA DE CORRENTE ALTERNADA.....	31
3.4.ARRANQUE MOTORES DE INDUÇÃO	35
4. VARIADORES DE VELOCIDADE	37
4.1.TIPOLOGIA DE UM VARIADOR DE VELOCIDADE	39
4.2.CONTROLO ESCALAR.....	41
4.3.CONTROLO VETORIAL	47
5. CONSIDERAÇÕES NA INTERAÇÃO REDE - VEV - MOTOR	53
5.1.INTERAÇÃO ENTRE A REDE E O CONVERTOR.....	54
5.2.INTERAÇÃO ENTRE O CONVERTOR E O MOTOR	56
5.3.VIABILIDADE ECONÓMICA NA IMPLEMENTAÇÃO DE UM VEV.....	58

6. APLICAÇÃO INFORMÁTICA.....	61
6.1.VENTILADORES	63
6.2.BOMBAS CENTRIFUGAS	64
6.3.DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO	66
7. CONCLUSÃO.....	71
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	73

Índice de Figuras

FIGURA 1 - APLICAÇÃO DE VEV'S EM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO AVAC [4]	2
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO AVAC.....	6
FIGURA 3- CLASSES DE RENDIMENTO IE1, IE2, IE3 E IE4 PARA OS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COMERCIALIZADOS NO ESPAÇO EUROPEU [12]	13
FIGURA 4 - DIAGRAMA DE PRINCÍPIO DE UMA INSTALAÇÃO DE CLIMATIZAÇÃO “TUDO AR” DE UMA SÓ ZONA	16
FIGURA 5 - INSTALAÇÃO DO TIPO VAV	16
FIGURA 6 - CONTROLO DE UMA UTA POR UM VEV CUJA VARIÁVEL DE CONTROLO SÃO SENSORES DE PRESSÃO ESTÁTICA [4] ...	18
FIGURA 7 - CONTROLO DE UMA UTA POR UM VEV CUJA VARIÁVEL DE CONTROLO SÃO SENSORES DE CO ₂ [4]	18
FIGURA 8 - CONTROLO DO CAUDAL DE ÁGUA NO CHILLER POR UM VEVs [4]	20
FIGURA 9 - OS PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO: A CIRCULAÇÃO DE AR, CIRCUITOS DE ARREFECIMENTO DE ÁGUA E CIRCUITOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	24
FIGURA 10 - CORTE DE MOTOR DE INDUÇÃO COM A) ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO E B) ROTOR BOBINADO. [16].....	25
FIGURA 11 - BALANÇO ENERGÉTICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO [20]	28
FIGURA 12 - MOTOR WEG W22 PLUS COM NÍVEL DE RENDIMENTO IE2	28
FIGURA 13 - EFICIÊNCIA GLOBAL DE UM SISTEMA ELETROMECÂNICO. [21].....	30
FIGURA 14 - ESQUEMA MONOFÁSICO EQUIVALENTE EM T DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	31
FIGURA 15 - ESQUEMA MONOFÁSICO EQUIVALENTE EM L DA MÁQUINA ASSÍNCRONA.....	33
FIGURA 16 - DIAGRAMA DE COMANDO E DE POTÊNCIA DE UM ARRANCADOR ESTRELA TRIÂNGULO [16]	35
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO GERAL DE VEV's[25].....	40
FIGURA 18 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM IFT TRIFÁSICO	40
FIGURA 19 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UM IFC TRIFÁSICO	40
FIGURA 20 - ESQUEMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE V/Hz EM MALHA ABERTA [23].....	42
FIGURA 21 - CURVAS DE BINÁRIO/VELOCIDADE DEMONSTRADO O EFEITO DAS VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA, BINÁRIO E TENSÃO [23].....	44
FIGURA 22 - CARACTERÍSTICAS ACELERAÇÃO/DESACELERAÇÃO COM CONTROLO V/Hz EM FUNÇÃO DO BINÁRIO E DA VELOCIDADE [23].....	44
FIGURA 23 - CARACTERÍSTICAS ACELERAÇÃO/DESACELERAÇÃO COM CONTROLO V/Hz EM FUNÇÃO DO TEMPO [23]	44
FIGURA 24 - ESQUEMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE V/Hz EM MALHA FECHADA COM COMPENSAÇÃO DE ESCORREGAMENTO [23]	46
FIGURA 25 - ESQUEMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE V/Hz EM MALHA FECHADA COM CONTROLO DE FLUXO E BINÁRIO [23]	46
FIGURA 26 - (A) MOTOR CC EXCITADO SEPARADAMENTE, (B) MOTOR CONTROLADO VECTORIALMENTE [23].....	48

FIGURA 27 - DIAGRAMA FASORIAL DO CONTROLE VETORIAL [28]	50
FIGURA 28 - TRANSFORMAÇÃO DA REFERÊNCIA ESTACIONÁRIA AB PARA REFERENCIA DE ROTAÇÃO SÍNCRONA D-Q.....	51
FIGURA 29 - FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTE AOS TERMINAIS DO MOTOR, QUANDO SOB ALIMENTAÇÃO PWM [32] ..	57
FIGURA 30 - POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR ALIMENTADO POR CONVERSOR EM FUNÇÃO DA SUA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO [32] ..	57
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM VENTILADOR (A) CENTRIFUGO, (B) AXIAL	62
FIGURA 32 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA BOMBA CENTRIFUGA.....	62
FIGURA 33 - BOMBA COM A MESMA ALTURA GEOMÉTRICA NA MEDIÇÃO DE PRESSÃO [34].....	64
FIGURA 34 - BOMBA COM DIFERENTE ALTURA GEOMÉTRICA E DIFERENTES DIMENSÕES DE ABERTURA NOS DOIS PONTOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO [34]	65
FIGURA 35 - AMBIENTE DE TRABALHO DO SIMULADOR	66
FIGURA 36 - DADOS DE ENTRADA CASO VENTILADOR	67
FIGURA 37 - CICLO DE OPERAÇÃO CASO VENTILADOR	68
FIGURA 38 - COMPARAÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO TRABALHANDO COM O MOTOR, E POR APLICAÇÃO DO VEV CASO VENTILADOR.....	68
FIGURA 39 - RESULTADO OBTIDOS PARA O CASO DO VENTILADOR.....	68
FIGURA 40 - DADOS DE ENTRADA CASO BOMBA	69
FIGURA 41 - CICLO DE OPERAÇÃO CASO BOMBA.....	70
FIGURA 42 - CONSUMO DE ENERGIA CASO BOMBA.....	70

Índice de Tabelas

TABELA 1 - REQUISITOS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA DAS UNIDADES DE PRODUÇÃO TÉRMICA [9]	9
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE UNIDADES SPLIT, MULTI-SPLIT, VRF E COMPACTAS, COM PERMUTA AR - AR [9]	10
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE UNIDADES SPLIT, MULTI-SPLIT E COMPACTAS, COM PERMUTA AR-ÁGUA [9].....	10
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE UNIDADES DO TIPO ROOFTOP [9].....	10
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE UNIDADES DO TIPO CHILLER BOMBA DE CALOR DE COMPRESSÃO [9].....	11
TABELA 6- REQUISITOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BOMBAS E VENTILADORES [10]	12
TABELA 7 - NÍVEIS DE RENDIMENTO EXIGIDOS PARA ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO [13].....	13
TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DOS HARMÓNICOS QUANTO Á ORDEM E Á SEQUÊNCIA [30].....	55
TABELA 9 - LIMITES PARA AS TENSÕES HARMÓNICAS INDIVIDUAIS, EXPRESSAS EM % DA TENSÃO NOMINAL, DE ACORDO COM A NORMA NP EN 50160 [31]	55

Acrónimos

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
MEPS	European Minimum Energy Performance Standard
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RQSECE	Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
UE	União Europeia
CE	Comunidade Europeia
SCE2006	Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios
SCE2013	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
QAI	Qualidade do Ar Interior
VEV's	Variadores Eletrónicos de Velocidade
VRV	Volume de refrigerante variável
AQS	Preparação de água quente sanitária
EER	Índice de Eficiência de Energia
COP	Coefficiente de Desempenho

f.e.m	força eletromotriz
IFT	Inversor por Fonte de Tensão
IFC	Inversor por Fonte de Corrente
MLI	Inversor de fonte de tensão com modulação por largura de impulso
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
UTAN	Unidade de Tratamento de Ar Novo
VAV	Volume de Ar Variável
VAC	Volume de Ar Constante
THD	Distorção harmónica total
PID	Proporcional Integral Derivativo
MI	Motor de Indução
VAL	Valor Atual Líquido
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
n_{iMi}	Rendimento do Motor de Indução
n_{iBC}	Rendimento da Bomba Centrífuga
n_{iVEN}	Rendimento do Ventilador
$n_{iVEV-MI}$	Rendimento do Sistema Motor de Indução + Variador Eletrónico de Velocidade
P_{iMi}	Potência do Motor de Indução
$P_{iVEV-MI}$	Potência do Sistema Motor de Indução + Variador Eletrónico de Velocidade

h_i	Período de funcionamento
c_i	Custo médio do kWh para o período h
PTD	Pressão Total Diferencial
P	Potência Absorvida
Q	Caudal
H	Altura manométrica
p	Pressão
ρ	Densidade do líquido
g	Aceleração da gravidade
D	Diâmetro da porta

1. INTRODUÇÃO

É natural que à medida que a sociedade se torna mais desenvolvida, aumentem as suas necessidades de conforto e consumo de energia. No entanto é possível fazer uma utilização responsável, ou seja, consumir menos energia em cada produto ou serviço que utilizamos, sem alterar o nosso estilo de vida ou sem abdicar do nosso conforto, atuando numa lógica de otimização dos sistemas. [1]

O sector dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa. No entanto, mais de 50% deste consumo pode ser reduzido através de medidas eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ – quase a totalidade do compromisso da União Europeia (UE) no âmbito do Protocolo de Quioto. [1]

Aumentar a eficiência energética dos edifícios além de permitir diminuir os níveis de CO₂ contribui fortemente para a redução dos custos energéticos. Mas para manter os níveis de conforto térmico exigidos pela sociedade contemporânea e pela legislação em vigor, são necessários sistemas de climatização, e estes representam uma fatia importante do consumo global de um edifício, variando esse consumo com o tipo de atividades levadas a cabo nesse mesmo edifício. [2]

Os sistemas de climatização são responsáveis por mais de 30% de toda a eletricidade consumida nos setores industriais e comerciais, em muito devido aos motores que impulsionam compressores, bombas e ventiladores que representam mais de 98% dessa energia. [3]

Estes sistemas de bombagem e ventilação requeridos pelos sistemas de climatização são normalmente projetados para um modo de funcionamento do motor à velocidade nominal, sendo o controlo do sistema efetuado por meios mecânicos através de redutores, palhetas, válvulas ou mesmo controlo on / off. Embora este tipo de controlo permita reduzir a carga sobre os motores este método não é propriamente eficiente. A estrangulação causada na circulação conduz a elevadas perdas de carga e de eficiência. É neste campo que a aplicação de variadores de velocidade se torna bastante eficiente.

Um Variador Eletrónico de Velocidade (VEV), também conhecido como fonte de alimentação de frequência variável, é um conversor eletrónico de potência, que permite o controlo da velocidade de rotação de um motor. Este substitui com grandes vantagens, todos os sistemas utilizados até ao momento no arranque de motores, através da otimização da potência elétrica pedida à rede com a carga imposta ao veio do motor, assim como permite realizar um controlo em modo contínuo e permanente desde o seu arranque, ao funcionamento em regime normal, passando pelo ajuste otimizado nas situações de regime transitório. A aplicação de VEVs em sistemas de climatização é já usual como se pode verificar na Figura 1 e prevista em termos de legislação.

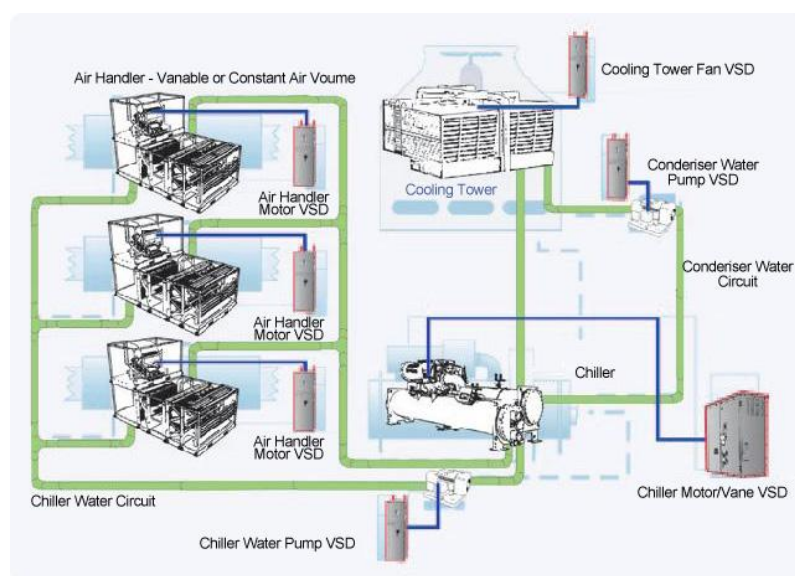


Figura 1 - Aplicação de VEV'S em Sistemas de Climatização AVAC [4]

1.1. OBJETIVOS

Neste trabalho pretende-se fazer uma análise sobre as potencialidades na aplicação de VEVs em sistemas de Climatização. Nesse sentido, é necessário antes de mais analisar as três vertentes pelo qual se baseia esta temática, os sistemas de climatização, os Motores elétricos e os VEVs. Posteriormente pretende-se uma aplicação informática que permita determinar a economia de energia e a viabilidade económica na implementação de VEVs em bombas centrífugas e ventiladores.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.

Esta dissertação está dividida em sete capítulos que consistem no seguinte:

Capítulo 1 - Introdução: Nesta secção pretende-se enquadrar o leitor sobre a temática que vai ser tratada, o interesse na sua execução e os objetivos do trabalho proposto.

Capítulo 2 - Sistemas de Climatização: Neste capítulo, é feita uma breve descrição sobre os principais sistemas de climatização existentes dividindo-os de acordo com a sua natureza de aplicação e apresentando as suas principais características. No seguimento faz-se referencia á topologia dos sistemas em que a aplicação de VEVs pode ser implementada, descrevendo também o método de como essa aplicação é feita.

Capítulo 3 - Motores Elétricos: Nesta secção faz-se uma análise geral sobre o motor assíncrono trifásico que é para todos os efeitos o elemento base de trabalho dos Sistemas de Climatização.

Capítulo 4 - Variadores de Velocidade: Neste capítulo é efetuada uma análise sobre as características e principio de funcionamento dos VEVs. Nele pode ser encontrada, referencias ao tipos de VEVs existentes, á sua composição, e a metodologia aplicada no tipos de estratégias de controle que eles disponibilizam.

Capítulo 5 - Considerações na Interação Rede-VEV-Motor: Nesta secção faz-se referência aos problemas com os harmónicos, associados na aplicação de VEVs, tanto para a instalação elétrica, como para o próprio motor que ele se encontra a controlar.

Capítulo 6 - Aplicação Informática: Neste capítulo faz-se referência á aplicação desenvolvida, que pretende demonstrar a economia de energia possível pela aplicação de um VEV, e a avaliação do investimento através do cálculo do VAL e do TIR.

Capítulo 7 - Conclusão: Neste capítulo final pretende-se enunciar toda a consolidação de conceitos que se aprendeu e testou em matéria de Motores elétricos, VEVs e sua aplicação conjunta na promoção da melhoria de rendimento dos sistemas de climatização. Nele também se incluem algumas perspetivas para investigação futura que são consequência do processo de aprendizagem seguido ao longo de todo este trabalho mas que não puderam ser nele exploradas.

2. SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Os sistemas de climatização são cada vez mais um processo fundamental para a obtenção de conforto, bem-estar e qualidade de vida, e são também essenciais para que possamos desenvolver plenamente as atividades a que nos propomos. Com os avanços tecnológicos, os sistemas de climatização evoluíram e tornaram-se cada vez mais frequentes. Ainda hoje em dia, novos métodos de modernização, de aumento da eficiência e de controlo dos sistemas são constantemente introduzidos.

O objetivo base de um sistema de climatização passa por remover as cargas térmicas através da envolvente e as cargas térmicas interiores. O processo usual para remover a carga térmica é utilizando um fluido que atravessa o espaço a climatizar, sendo os fluidos mais utilizados os de ar e água (sistemas centralizados) e também os fluidos frigorigéneos (sistemas VRV e unitários). [5]

Em pequenos edifícios, como uma residência privada, esta tarefa é facilmente controlada por meio de ar condicionado e aquecedores. Quando se trata de edifícios maiores, como por exemplo escritórios, hotéis ou áreas industriais o problema torna-se mais complexo devido ao tamanho e disposição de cada edifício.

Os Sistemas de Climatização englobam princípios da termodinâmica e da transferência de calor, assim como os aspetos da mecânica dos fluidos, representando um campo de atividade mais alicerçado á área da engenharia mecânica. Não é intuito desta dissertação compreender o principio de funcionamento nem o dimensionamento deste tipo de sistemas assim como também não se pretende dar a conhecer todos os sistemas de climatização existentes mas somente aqueles que são mais comuns e cuja aplicação de variadores de velocidade seja possível, apresentando-os, fazendo referência á tipologia empregue atualmente, e tomando em consideração a legislação em vigor.

O Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE2013) tem na realidade uma influência muito grande no projeto e na manutenção dos sistemas de climatização, sobretudo no que diz respeito aos edifícios de serviços, tanto os novos como os existentes. Por este motivo, sempre que se propiciar, será feita uma alusão a algumas partes desse regulamento.

O regulamento define Sistema de Climatização como "... o conjunto de equipamentos coerentemente combinados com vista a satisfazer objetivos da climatização, designadamente, ventilação, aquecimento, arrefecimento, humidificação, desumidificação e filtragem do ar". [6]

São sistemas que podem variar significativamente de dimensão e apresentar diferentes funções, equipamentos e formas de funcionamento, no entanto, a maioria dos sistemas apresentam normalmente os mesmos componentes tal como exposto na Figura 2. [7]

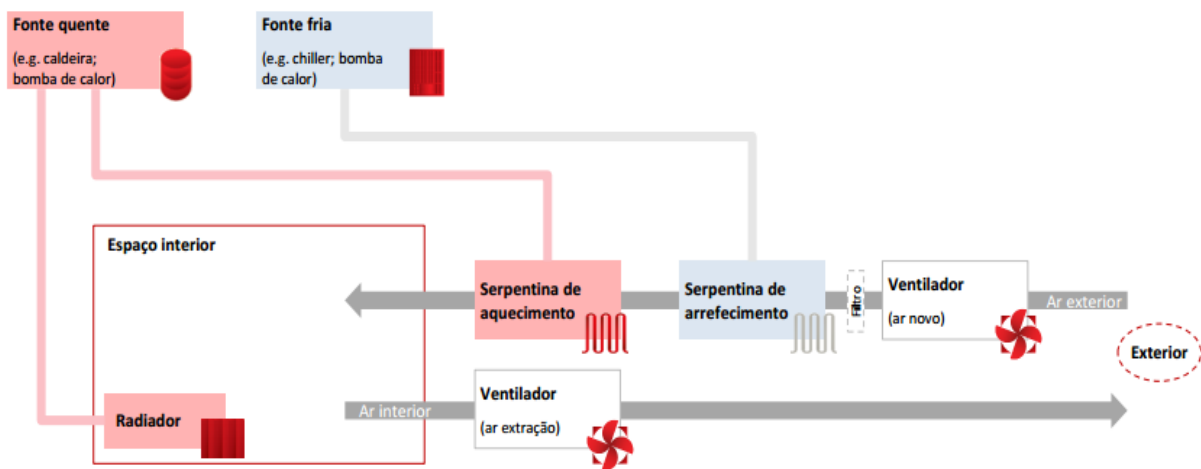


Figura 2 - Representação de um Sistema de Climatização AVAC

2.1. LEGISLAÇÃO APLICADA NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS

A primeira regulamentação portuguesa relativa á climatização de edifícios surgiu no início da década de noventa com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). O principal objetivo desse regulamento foi melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios e também restringir o consumo excessivo de energia. No ano de 1992, surge o Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RQSECE) e, em 1998, passa a denominar-se Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), nos quais foram estabelecidas exigências de conceção e instalação de sistemas tendo em vista a racionalização energética. [8]

Entretanto a nível europeu as questões relativas à eficiência energética e racionalização de energia foram-se acentuando, e num compromisso claro com o cumprimento dos acordos respeitantes do protocolo de Quioto, os Estados-Membros da Comunidade Europeia (CE) promoveram um conjunto de medidas com vista a promover a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios. Neste contexto surgiu a Diretiva Europeia 2002/91/CE, Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (EPBD), que estabeleceu uma série de requisitos com o objetivo de promover a melhoria do desempenho energético. No caso português surgiu o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE2006) que resulta da transposição da Diretiva n.º 2002/91/CE, com os seguintes diplomas legais: o Decreto-Lei n.º 78/2006, Decreto-Lei n.º 79/2006 e Decreto-Lei n.º 80/2006.

O Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de Abril aprovava o SCE2006, definindo o âmbito de aplicação, as entidades gestoras do sistema e respetivas normas gerais. O Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril aprovava o RSECE, estabelecendo os requisitos para a Qualidade do Ar Interior (QAI) e de renovação e tratamento de ar. Aplicava-se a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização definindo os requisitos que englobavam a eficiência e manutenção dos sistemas de climatização, a obrigatoriedade de auditorias e inspeções periódicas e a garantia da QAI. E por fim o Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril aprovava o RCCTE estabelecendo os requisitos de qualidade para novos edifícios de habitação e pequenos serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível de

isolamento de paredes e pavimentos, tipo de coberturas e superfícies vidradas, limitando perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos.

O SCE2006 juntamente com o RSECE e o RCCTE foram os três pilares sobre os quais assentou a legislação relativa à qualidade térmica dos edifícios em Portugal até 1 de Dezembro de 2013. Os esforços empregues na aplicação destes regulamentos contribuíram nos últimos anos para o destaque crescente dos temas relacionados com a eficiência energética e utilização de energia renovável nos edifícios, e para uma maior proximidade entre as políticas de eficiência energética, os cidadãos e os agentes de mercado. [6]

Entretanto em 2010 a diretiva EPBD é revista como Diretiva n.º 2010/31/CE trazendo consigo um conjunto de novos desafios. A publicação da Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios, reformulou o regime estabelecido pela Diretiva n.º 2002/91/CE de 16 de dezembro de 2002. A diretiva clarificou alguns dos princípios do texto inicial e introduziu novas disposições que visam o reforço do quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, à luz das metas e dos desafios acordados pelos Estados-Membros para o ano de 2020. [6]

A transposição para legislação nacional da Diretiva n.º 2010/31/UE, surgiu através de um novo diploma o Decreto-Lei n.º 118/2013 que revogou o Decreto-Lei n.º 78/2006, o Decreto-Lei n.º 79/2006 e o Decreto-Lei n.º 80/2006. O presente diploma assegurou não só a transposição da diretiva, mas também uma revisão da legislação nacional, proporcionando melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE2013), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). [6]

Esta nova legislação além de atualizar os requisitos de qualidade térmica, introduziu requisitos de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios. Estão, sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética, os sistemas de climatização, de preparação de água quente sanitária (AQS), de iluminação, de aproveitamento de energias renováveis de gestão de energia. [6]

Isto é verificado no Artigo 27.º do Decreto de Lei n.º118/2013 no qual refere que estes sistemas devem cumprir os requisitos de eficiência estabelecidos em Portaria n.º 349-B/2013 no ponto 4.2.

- a) " Os sistemas de ar condicionado, bombas de calor com ciclo reversível e chillers de arrefecimento, devem obedecer aos requisitos mínimos de eficiência indicados na Tabela 1, em função da sua classificação pela certificação Eurovent¹." [9]
- b) " No caso em que os sistemas referidos não se enquadrem na respetiva categoria Eurovent, mas cujo desempenho tenha sido avaliado pelo mesmo referencial normativo, aplica-se o requisito equivalente, em termos do Índice de Eficiência de Energia ²(EER) e o Coeficiente de Desempenho ³(COP), que resulta do definido na Tabela 1, tendo por base o menor valor do intervalo previsto na respetiva matriz de classificação indicada nas tabelas 2, 3, 4 e 5. [9]

Tabela 1 - Requisitos mínimos de eficiência das unidades de produção térmica [9]

Tipo de equipamento	Classe de eficiência mínima após...	
	entrada em vigor	31 dez 2015
Split, multissplit, VRF e compacto	C	B
Unidades do tipo <i>Rooftop</i>		
Unidades do tipo <i>Chiller</i> de compressão (Bomba de calor)		

¹ A Eurovent-Certification é uma organização europeia que certifica as performances de produtos de climatização e refrigeração, de acordo com as normas europeias e internacionais.

² Em inglês “Energy Efficiency Ratio” é o valor da potência da unidade em arrefecimento dividida pela potência elétrica que a unidade necessita para a execução do trabalho.

³ Em inglês “Coefficient Of Performance”, representa o rácio (quociente) entre a energia térmica (calor) fornecida por uma bomba de calor e a energia elétrica consumida pelo sistema.

Tabela 2 - Classificação do desempenho de unidades split, multi-split, VRF e compactas, com permuta ar - ar [9]

Classe	Unidades com permuta exterior a ar			
	Arrefecimento		Aquecimento	
	Unidades split, multissplit e VRF	Unidades compactas	Unidades split, multissplit e VRF	Unidades compactas
A	EER > 3,20	EER > 3,00	COP > 3,60	COP > 3,40
B	3,20 ≥ EER > 3,00	3,00 ≥ EER > 2,80	3,60 ≥ COP > 3,40	3,40 ≥ COP > 3,20
C	3,00 ≥ EER > 2,80	2,80 ≥ EER > 2,60	3,40 ≥ COP > 3,20	3,20 ≥ COP > 3,00
D	2,80 ≥ EER > 2,60	2,60 ≥ EER > 2,40	3,20 ≥ COP > 2,80	3,00 ≥ COP > 2,60
E	2,60 ≥ EER > 2,40	2,40 ≥ EER > 2,20	2,80 ≥ COP > 2,60	2,60 ≥ COP > 2,40
F	2,40 ≥ EER > 2,20	2,20 ≥ EER > 2,00	2,60 ≥ COP > 2,40	2,40 ≥ COP > 2,20
G	EER ≤ 2,20	EER ≤ 2,00	COP ≤ 2,40	COP ≤ 2,20

Tabela 3 - Classificação do desempenho de unidades split, multi-split e compactas, com permuta ar-água [9]

Classe	Unidades com permuta exterior a água			
	Arrefecimento		Aquecimento	
	Unidades split e multissplit	Unidades compactas	Unidades split e multissplit	Unidades compactas
A	EER > 3,60	EER > 4,40	COP > 4,00	COP > 4,70
B	3,60 ≥ EER > 3,30	4,40 ≥ EER > 4,10	4,00 ≥ COP > 3,70	4,70 ≥ COP > 4,40
C	3,30 ≥ EER > 3,10	4,10 ≥ EER > 3,80	3,70 ≥ COP > 3,40	4,40 ≥ COP > 4,10
D	3,10 ≥ EER > 2,80	3,80 ≥ EER > 3,50	3,40 ≥ COP > 3,10	4,10 ≥ COP > 3,80
E	2,80 ≥ EER > 2,50	3,50 ≥ EER > 3,20	3,10 ≥ COP > 2,80	3,80 ≥ COP > 3,50
F	2,50 ≥ EER > 2,20	3,20 ≥ EER > 2,90	2,80 ≥ COP > 2,50	3,50 ≥ COP > 3,20
G	EER ≤ 2,20	EER ≤ 2,90	COP ≤ 2,50	COP ≤ 3,20

Tabela 4 - Classificação do desempenho de unidades do tipo Rooftop [9]

Classe	Unidades com permuta exterior a ar		Unidades com permuta exterior a água	
	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento
A	EER > 3,00	COP > 3,40	EER > 4,40	COP > 4,70
B	3,00 ≥ EER > 2,80	3,40 ≥ COP > 3,20	4,40 ≥ EER > 4,10	4,70 ≥ COP > 4,40
C	2,80 ≥ EER > 2,60	3,20 ≥ COP > 3,00	4,10 ≥ EER > 3,80	4,40 ≥ COP > 4,10
D	2,60 ≥ EER > 2,40	3,00 ≥ COP > 2,60	3,80 ≥ EER > 3,50	4,10 ≥ COP > 3,80
E	2,40 ≥ EER > 2,20	2,60 ≥ COP > 2,40	3,50 ≥ EER > 3,20	3,80 ≥ COP > 3,50
F	2,20 ≥ EER > 2,00	2,40 ≥ COP > 2,20	3,20 ≥ EER > 2,90	3,50 ≥ COP > 3,20
G	EER ≤ 2,00	COP ≤ 2,20	EER ≤ 2,90	EER ≤ 3,20

Tabela 5 - Classificação do desempenho de unidades do tipo chiller bomba de calor de compressão [9]

Classe	Unidades com permuta exterior a ar		Unidades com permuta exterior a água	
	Arrefecimento	Aquecimento	Arrefecimento	Aquecimento
A	$EER \geq 3,1$	$COP \geq 3,2$	$EER \geq 5,05$	$COP \geq 4,45$
B	$3,1 > EER \geq 2,9$	$3,2 > COP \geq 3,0$	$5,05 > EER \geq 4,65$	$4,45 > COP \geq 4,15$
C	$2,9 > EER \geq 2,7$	$3,0 > COP \geq 2,8$	$4,65 > EER \geq 4,25$	$4,15 > COP \geq 3,85$
D	$2,7 > EER \geq 2,5$	$2,8 > COP \geq 2,6$	$4,25 > EER \geq 3,85$	$3,85 > COP \geq 3,55$
E	$2,5 > EER \geq 2,3$	$2,6 > COP \geq 2,4$	$3,85 > EER \geq 3,45$	$3,55 > COP \geq 3,25$
F	$2,3 > EER \geq 2,1$	$2,4 > COP \geq 2,2$	$3,45 > EER \geq 3,05$	$3,25 > COP \geq 2,95$
G	$EER < 2,1$	$COP < 2,2$	$EER < 3,05$	$COP < 2,95$

Um dos requisitos ao nível da eficiência energética e cujo teor incide na temática desta dissertação, já que remete para a utilização de VEVs em Sistemas de Climatização, é verificado em Portaria n.º 349-D/2013 no ponto 7.3.2. Nele é referido que os elementos propulsores dos fluidos de transporte (bombas e ventiladores), devem cumprir com os requisitos de eficiência previstos na Tabela 6, considerando as respetivas classificações de acordo com as normas em vigor CEI/EN 60034-30 e EN 13779, respetivamente para o motor elétrico e para a potência específica, conforme enquadramento dado pelo Regulamento N.º 640/2009 da Comissão Europeia, de 22 de julho de 2009, que dá execução à Diretiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 6 de julho de 2005, no que respeita aos requisitos de conceção ecológica para os motores elétricos. [10]

A União Europeia, através do organismo EU MEPS (European Minimum Energy Performance Standard), definiu um regime obrigatório para os níveis mínimos de eficiência dos motores elétricos de indução trifásicos, de velocidade simples, até 375 kW que sejam introduzidos no mercado europeu. Baseando-se essencialmente em duas normas, no caso, a norma CEI/EN 60034-2-1:2007 que define os métodos para determinar a eficiência dos motores elétricos e a norma CEI/EN 60034-30:2008 que especifica as classes de eficiência que devem ser adotadas, este novo regime obriga os fabricantes a apresentar a classe e valores de eficiência do motor na respetiva chapa de características e na documentação do produto, que deve indicar claramente o método de teste usado na determinação da eficiência. [11]

Tabela 6- Requisitos de eficiência energética de bombas e ventiladores [10]

Equipamento	Função	Potência [kW]	Motor elétrico - Classe IEC ⁽²⁾		Potência específica [W/(m ³ /s)]	
			entrada em vigor	1 de janeiro 2015	entrada em vigor	1 de janeiro 2015
Bombas	Climatização e AQS	0,75 a 7,5	IE2	IE2	-	
		≥ 7,5		IE3 ⁽¹⁾		
Ventiladores	UTA e UTAN	0,75 a 7,5	IE2	IE2	SFP5 ≥2000 - 3000	SFP4 ≥1250 - 2000
	Extração e Exaustão	≥ 7,5		IE3 ⁽¹⁾		

(1) Nível IE2, caso o motor esteja equipado com um variador de velocidade.

(2) Requisito aplicável apenas se o motor estiver classificado segundo a norma IEC60034-30.

De acordo com a norma CEI/EN 60034-30:2008 existem 4 níveis de rendimento: IE1 (rendimento standard), IE2 (alto rendimento), IE3 (rendimento “Premium”) e IE4 (rendimento “Super Premium”) como podemos verificar na Figura 3, sendo as classes IE1, IE2 e IE3 normativas, enquanto que a classe mais elevada IE4 é meramente informativa.

Na

Tabela 7, podemos verificar os níveis de rendimento exigido para as diversas classes de eficiência. Na mesma norma é referido também que a partir de 16 de Junho 2011, os motores não devem possuir níveis de rendimento inferiores a IE2 sendo que após 1 de Janeiro de 2015 os motores com potência nominal entre 7,5 e 375 kW não devem possuir níveis de rendimento inferiores a IE3 ou nível IE2 desde que equipados com um VEV. Refere também que a partir de 1 de Janeiro de 2017 todos motores com potência nominal entre 0,75 e 375 kW não devem possuir níveis de rendimento inferiores a IE3 ou nível IE2 desde que equipados com VEV. O objetivo visa reduzir o consumo de energia e outros impactos ambientais negativos de produtos que consomem energia elétrica. Ao mesmo tempo, pretende-se melhorar a uma escala global o nível de harmonização regulamentar em assuntos relacionados com a eficiência em equipamentos de força-motriz. [11]

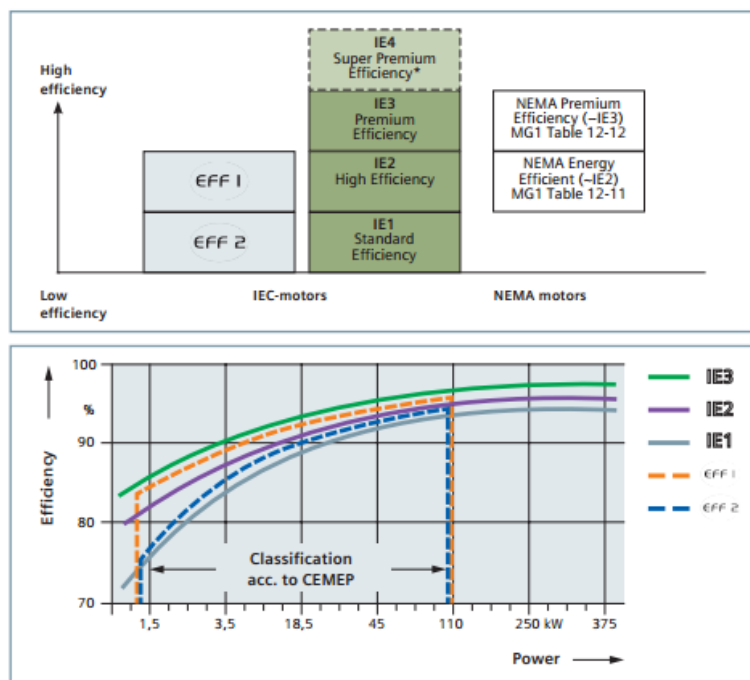


Figura 3- Classes de rendimento IE1, IE2, IE3 e IE4 para os motores de indução trifásicos comercializados no espaço europeu [12]

Tabela 7 - Níveis de rendimento exigidos para índice de classificação [13]

Output	IE1 - Standard Efficiency			IE2 -High Efficiency			IE3 - Premium Efficiency		
	Poles			Poles			Poles		
kW	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,0	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6
200 up to 375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

2.2. CLASSIFICAÇÃO DE UM SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Os sistemas de climatização podem ser ativos, caso recorram a energia elétrica ou combustíveis convencionais, ou passivos quando utilizam os recursos naturais para criar as condições de conforto.

Atualmente, a procura de sistemas passivos tem sido cada vez maior, já que apresentam consumos energéticos menores em comparação com os sistemas ativos, e além disso é prevista a sua promoção em termos legislativos no caso de Edifícios Novos e em Edifícios Sujeitos a Grande Intervenção, tal como referido no decreto de lei n.º118/2013 do n.º5 e n.º 6 do Artigo 26º e 28º respetivamente: " O recurso a sistemas passivos que melhorem o desempenho energético do edifício deve ser promovido, e o respetivo contributo considerado no cálculo das necessidades de energia do edifício, com base em normas europeias ou regras definidas pela Direção Geral de Energia e Geologia".

O SCE2013 define Sistema Passivo como o "...sistema construtivo concebido especificamente para reduzir as necessidades energéticas dos edifícios, sem comprometer o conforto térmico dos ocupantes, através do aumento dos ganhos solares, designadamente ganhos solares diretos, paredes de trombe⁴ ou estufas, na estação de aquecimento ou através do aumento das perdas térmicas, designadamente ventilação, arrefecimento evaporativo, radiativo ou pelo solo, na estação de arrefecimento". [6]

Relativamente aos sistemas ativos podemos segmenta-los da seguinte forma:

- Sistemas centralizados: sistemas de climatização em que os equipamentos de produção térmica se concentram numa instalação e num local distintos dos espaços a climatizar, sendo o frio, calor ou humidade transportados por um fluido térmico. Podem ser sistemas Tudo-Ar, Tudo-Água e Ar-Água; [6]
- Sistemas individuais: são na realidade um aparelho ou conjunto de aparelhos servindo apenas um espaço de um edifício. Estão neste caso os aparelhos de janela e os aparelhos "splits", por vezes designados por aparelhos divididos; [5]

⁴ Parede maciça que absorve a energia solar que nela incida ao longo do dia, armazenando-a e irradiando calor para o interior da habitação no período da noite

- Sistemas modulares: é um sistema que serve um conjunto de zonas de um edifício e que pode ser facilmente ampliado. Estão neste caso os sistemas de volume de refrigerante variável (VRV), em que existe apenas um circuito, o do refrigerante (primário), que vai até aos locais a climatizar. [5]

São os sistemas ativos aqueles que proporcionam maior impacto no ambiente de uma habitação ou edifício, no entanto são, também os responsáveis por grande parte da fatura energética da mesma e pelas emissões de gases poluentes na atmosfera. Sendo assim, é importante que o seu grau de eficiência energética seja tomado em consideração. Neste segmento os sistemas centralizados são aqueles em que a aplicação de VEVs apresenta melhores resultados.

2.3. SISTEMAS "TUDO AR"

Neste tipo de sistemas o frio ou calor é conduzido ao local a climatizar por ar sendo tratado previamente numa Unidade de Tratamento de Ar (UTA) e seguidamente distribuído por uma rede de condutas pelos locais que pretende climatizar. Os sistemas “tudo ar” podem ser divididos da seguinte forma:

- Sistemas com caudal de ar constante (VAC);
- Sistemas com caudal de ar variável (VAV);

Nos sistemas VAC, o caudal conduzido até ao local é constante, sendo efetuado apenas o controle de temperatura desse caudal. O ar em todas as divisões é recebido no mesmo estado, tal como podemos compreender por análise da Figura 4, pelo que quando se trata de um edifício com múltiplas divisões o caudal de ar insuflado em cada uma delas deve ser proporcional às respetivas cargas térmicas (de aquecimento e de arrefecimento), o que não permite o controlo da temperatura em cada divisão nem tem capacidade de se adaptar às variações de carga térmica que se podem verificar em cada uma delas. O sistema de controlo atua normalmente sobre as baterias de aquecimento e de arrefecimento da UTA em função da temperatura do ar na conduta de retorno, que é onde se obtém a temperatura média das divisões climatizadas.

Nos sistemas VAV é o caudal de ar que é ajustado, sendo a temperatura do ar insuflado constante. É a variação de caudal, efetuada nas unidades terminais, que permite compensar a carga térmica de cada local. Cada local ou cada zona, integrando locais com características idênticas de variação de carga térmica, dispõe de um termostato de ambiente

eletrónico ou de um controlador com sensor de temperatura de ambiente que abre ou limita os reguladores de débito variável de ar em função da variação de temperatura. Em regime de arrefecimento, o ar é insuflado a temperatura constante, sendo que se a temperatura ambiente aumenta, como consequência do aumento das fontes internas de calor o caudal de ar é aumentado e no caso contrário é diminuído até atingir o valor mínimo. Na Figura 5 está representado o esquema de princípio de uma instalação deste tipo.

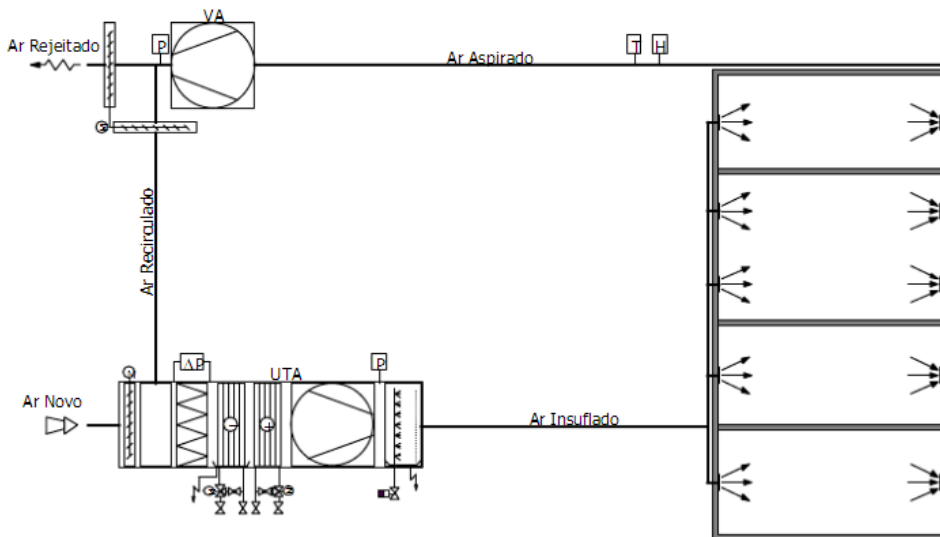


Figura 4 - Diagrama de Princípio de uma instalação de climatização “todo ar” de uma só zona

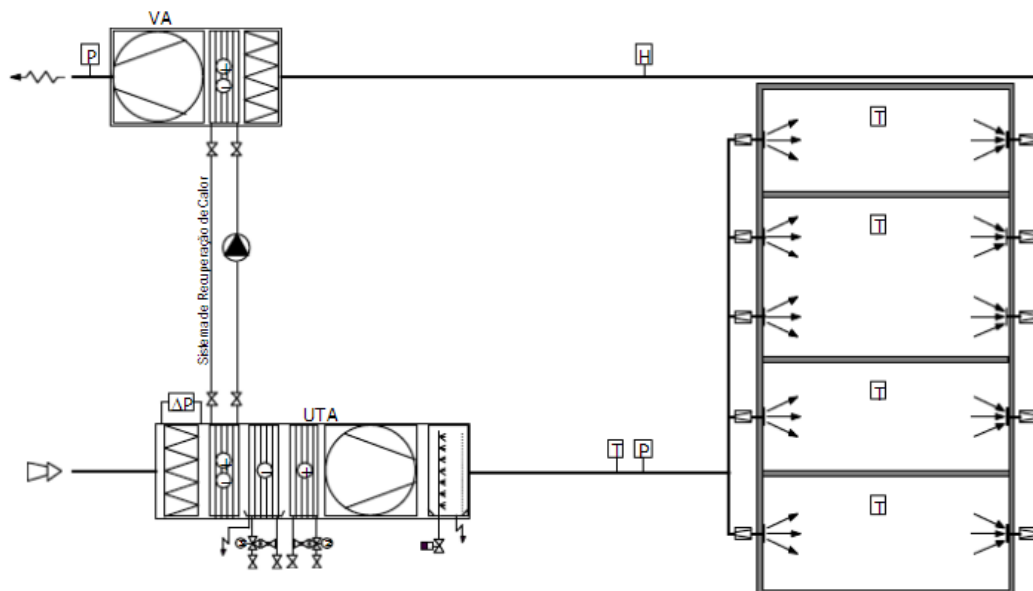


Figura 5 - Instalação do tipo VAV

A principal vantagem dos sistemas VAV tem a ver com a diminuição dos consumos de energia dos sistemas de aquecimento e de arrefecimento. Aliás a limitação de consumos de energia introduzida ainda no tempo de RSECE, aumentou a tendência para a instalação deste tipo de sistema. Para o controlo de um só local o termostato de ambiente eletrónico ou o controlador com sensor de temperatura ambiente envia a informação da temperatura do local para um VEV, que posteriormente regula os caudais de ar do ventilador da UTA e do ventilador de aspiração. No entanto quando o espaço a climatizar é constituído por várias zonas, temos somente uma conduta de insuflação, sendo o ar insuflado nos locais por meio dos reguladores de débito variável que abrem ou limitam o ar em função da temperatura de cada local. À medida que a temperatura atinge o valor pretendido, os reguladores tendem a fechar-se, aumentando respetivamente o valor da pressão estática na conduta de insuflação. Um sensor de pressão localizado na proximidade dos difusores, deteta este aumento, envia essa informação ao VEV, que por sua vez diminui a velocidade de rotação do ventilador da UTA. No sentido inverso se a temperatura do local aumenta, os reguladores tendem a abrir no sentido de aumentar o caudal de ar insuflado, o que diminui por sua vez a pressão estática na conduta de insuflação. O VEV aumenta então a velocidade do ventilador da UTA. O intuito deste sistema de controlo é manter a pressão estática na conduta de insuflação, o mais baixa possível. Na Figura 6 temos uma representação deste método.

Uma outra metodologia bastante aplicada, consiste na aplicação de sensores de CO₂ de forma a garantir a renovação e a qualidade do ar interior. Quando um espaço está ocupado são detetados níveis de CO₂, que devem ser colmatados por insuflação de ar novo pelo que o VEV regula esse caudal de ar insuflado em função dos níveis obtidos. Por sua vez quando os ocupantes abandonam esse local, o sensor deteta uma diminuição dos níveis de CO₂, diminuindo por sua vez a velocidade do ventilador, diminuindo o caudal de ar insuflado. Este método de controlo é muito utilizado nos sistemas de ventilação forçada e extração de ar em parques de estacionamento ou tuneis rodoviários para controlo dos níveis de poluentes químicos, garantindo a renovação de ar e a extração de fumos tóxicos.

No que concerne aos sistemas VAC, a implementação de um VEV altera a fundamentação própria do sistema. Por norma é feita uma passagem para um controlo VAV.

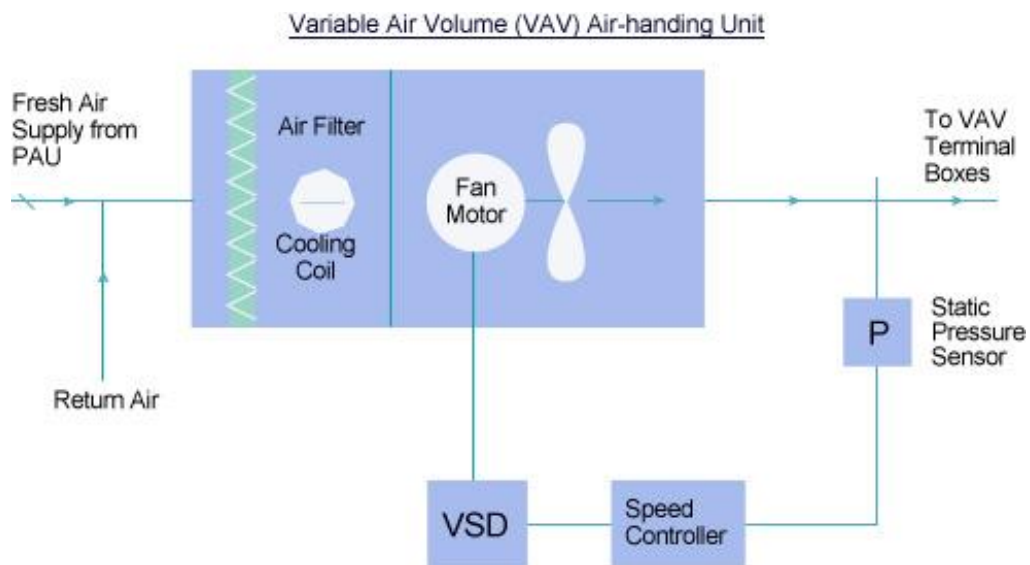


Figura 6 - Controlo de uma UTA por um VEV cuja variável de controlo são sensores de Pressão Estática [4]

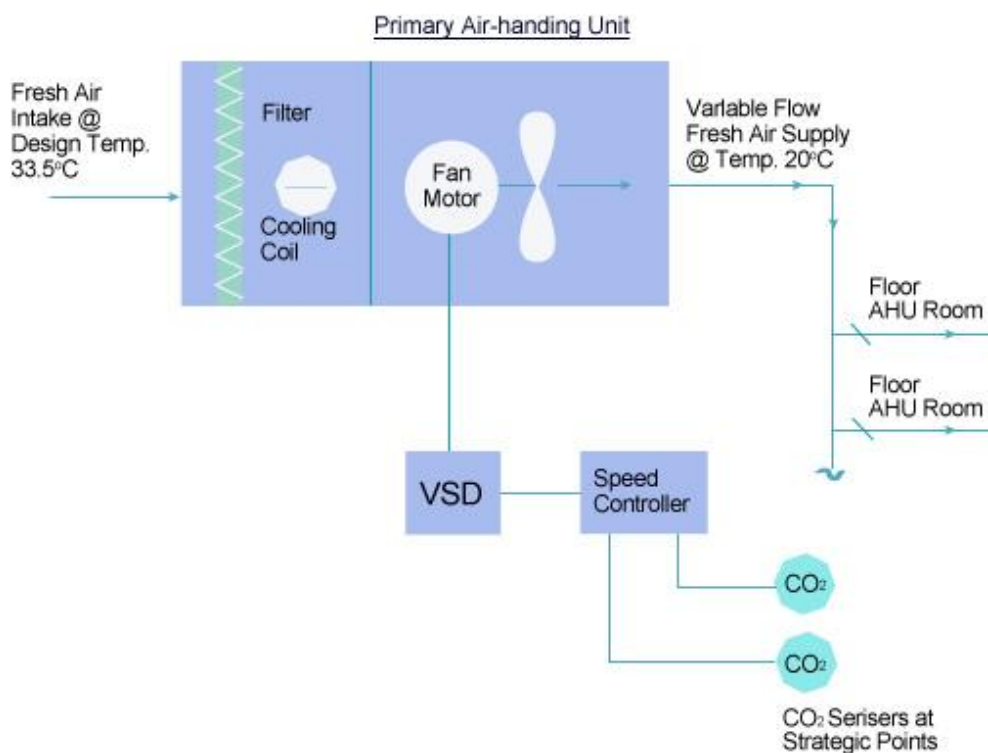


Figura 7 - Controlo de uma UTA por um VEV cuja variável de controlo são sensores de CO₂ [4]

2.4. SISTEMAS AR E ÁGUA

Em alternativa aos sistemas “tudo-ar”, podemos utilizar a água como fluido intermédio para transporte da energia calorífica de e para os locais a climatizar. Assim, as cargas térmicas de cada local são compensadas não por ar tratado numa UTA, seja ela central ou de zona, mas sim por um equipamento local que aquece ou arrefece o ar ambiente diretamente a partir de água, respetivamente aquecida ou arrefecida. Esses equipamentos locais podem ser pequenas unidades de tratamento de ar designadas por ventiloconvectores, injectoconvectores ou vigas arrefecidas, consoante possuem ou não ventilador, ou uma rede de tubos integrada no pavimento, nas paredes ou no teto da divisão. Assim, os sistemas que utilizam água como fluido intermédio podem classificar-se da seguinte forma:

- Sistemas de climatização com ventiloconvectores e vigas arrefecidas:
 - Sistemas com 2 tubos;
 - Sistemas com 4 tubos;
- Climatização com pavimentos radiantes (arrefecidos ou aquecidos);
- Climatização com paredes ou tetos radiantes (arrefecidos ou aquecidos).

A grande vantagem destes sistemas é a de permitirem uma regulação individual da temperatura em cada local climatizado, com a limitação para os sistemas a dois tubos de não possibilitarem a seleção entre frio e calor num mesmo instante. No que toca ao aquecimento, água é aquecida centralmente numa caldeira ou numa bomba de calor. Quanto ao arrefecimento da água ele é feito por um grupo arrefecedor de água denominado por chiller. Quando o grupo arrefecedor de água é reversível (bomba de calor) ele pode efetuar o arrefecimento da água no Verão e o seu aquecimento no Inverno.

A legislação atual não impõe a utilização de VEVs em Chillers em termos de aplicação direta, no entanto os sistemas de bombagem de água, primários e secundários, realizados por bombas centrífugas devem obrigatoriamente cumprir esses requisitos.

Existem três formas possíveis de conceber uma instalação de AVAC deste tipo, e são elas o Sistema de Caudal Constante, o Sistema de Caudal Variável Primário/Secundário e por último o Sistema de Caudal Variável no Circuito Primário. De entre estes o Sistema de Caudal Variável Primário/Secundário é aquele que mais é aplicado atualmente e por sua vez aquele cuja utilização do VEV apresenta mais benefícios.

O Sistema de Caudal Variável Primário/Secundário, é dividido essencialmente em dois circuitos distintos que se encontram fisicamente divididos por um terceiro circuito, denominado circuito bypass que é responsável pela separação física entre o circuito primário e o secundário.

No circuito primário a água flui em regime de caudal constante ao longo do circuito apoiado por bombas centrífugas, até ao chiller que é o responsável pela produção de água arrefecida. As bombas centrífugas são sempre sobre dimensionadas como forma de segurança sendo o caudal controlado por válvulas ou atuando mecanicamente no motor diminuindo a velocidade de rotação assegurando que o caudal de circulação se mantém constante. Não sendo tão usual como a aplicação no circuito secundário, a aplicação de VEVs no circuito primário permite a variação de caudal de acordo com as necessidades, o que permite obter uma economia de energia assinalável.

O circuito secundário é responsável pela distribuição de água pelos ventiloconvectores. Neste circuito, um sensor de pressão mede as variações de pressão diferencial e envia para o VEV essa informação, de forma a variar a frequência da energia eléctrica transmitida ao motor eléctrico que comanda a bomba que por sua vez irá variar o caudal fornecido, tal como podemos verificar na Figura 8.

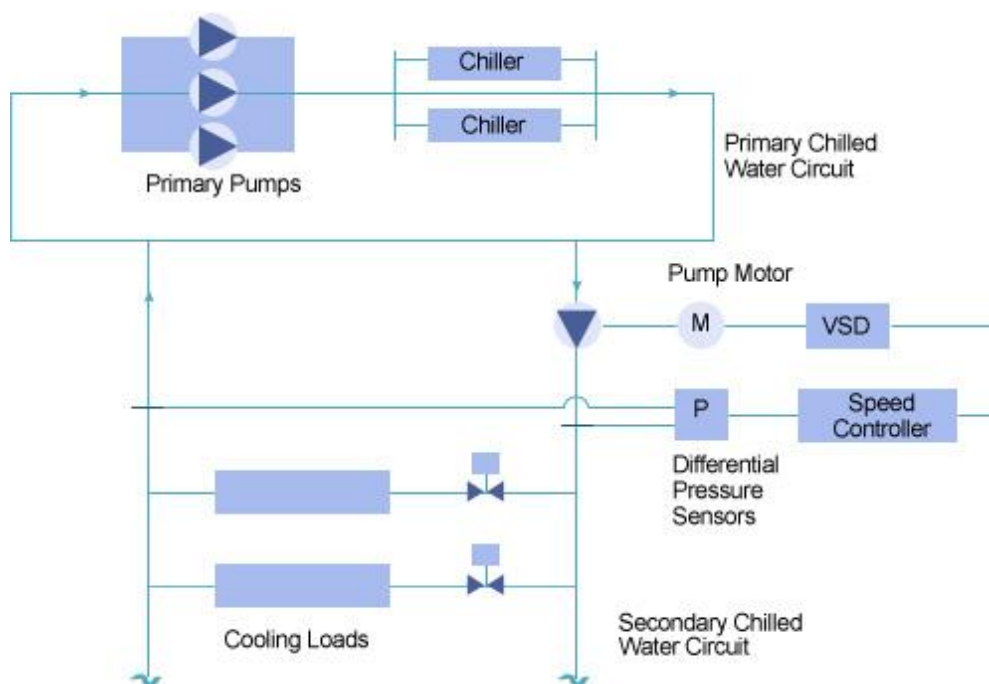


Figura 8 - Controlo do caudal de água no chiller por um VEVs [4]

Os ventiloconvectores são pequenas unidades de tratamento de ar terminais, constituídos por um filtro de ar, um ventilador (normalmente do tipo tangencial), um ou dois permutadores (de tubos alhetados do tipo água ar), integrados numa estrutura adequada e equipados com os respetivos acessórios.

O motor elétrico que aciona o ventilador tem normalmente 3 velocidades, permitindo adequar o caudal de ar às variações de carga térmica. São geralmente dimensionados para a velocidade média do ventilador, já que na velocidade mais elevada o seu nível de ruído é demasiado elevado. Os ventiloconvectores são normalmente instalados em consola (na vertical e encostados a uma parede) com móvel (caixa exterior), ou em teto falso (na horizontal e sem caixa exterior).

2.5. COMPONENTES DE UM SISTEMA AVAC

A climatização de um edifício é conseguida através de um sistema de equipamentos ditos principais montados numa base e interligados, com controlo e acessórios próprios ao que denominamos no seu geral sistema de climatização. Obviamente que cada equipamento tem características próprias, sendo estes também constituídos por outros equipamentos auxiliares como por exemplo, Compressores, Permutadores, Ventiladores e Bombas. Estes últimos podem mesmo ser utilizados individualmente como é disso caso os sistemas de extração ou exaustão que são somente constituídos por ventiladores, ou por apoio nas condutas de circulação de ar ou água.

A aplicação de VEVs incide no controlo destes equipamentos auxiliares, que por sua vez afetam o comportamento de todo o processo dos equipamentos principais. O controlo processa-se diretamente nos motores elétricos que fazem parte destes equipamentos, que são a base principal de todo o seu funcionamento.

A legislação atual tal como pudemos constatar na Tabela 6 admite a necessidade da instalação de VEVs para bombas e ventiladores do qual se agrupam as UTA, UTAN e para efeitos de Extração e Exaustão em motores com classe de eficiência inferior a IEF3. No entanto a aplicação de VEVs, em Chillers e mesmo nas atuais Torres de Arrefecimento Evaporativo, permitem a otimização da configuração alcançando um set point ótimo garantindo uma economia de processo e energia assinalável.

3. MOTORES ELÉTRICOS

É enorme a variedade de máquinas elétricas existentes atualmente na indústria, comércio e mesmo no utilizador doméstico. A diversidade de tarefas a executar, condições de utilização, características dos locais, exigências económicas e exigências técnicas impõem caso a caso, características específicas para cada máquina a utilizar. Se considerarmos as questões técnicas as grandezas elétricas que normalmente condicionam a escolha de determinada máquina elétrica rotativa são: o tipo de corrente (contínua ou alternada), a tensão utilizada, a frequência ou gama de frequências, a velocidade ou gama de valores, a potência útil, o rendimento elétrico, o binário motor útil, o binário de arranque, o binário resistente, a corrente nominal e a corrente de arranque. A escolha de determinada máquina é sempre feita considerando estas questões respondendo assim o mais possível á situação que se pretende colmatar. [14]

No que concerne aos sistemas de climatização, os seus principais constituintes têm necessariamente acoplados motores elétricos. Também os circuitos de circulação de ar, de arrefecimento de água e de aquecimento de água, que dele fazem parte, dependem do funcionamento de motores elétricos, tal como podemos verificar na Figura 9. As máquinas de corrente alternada são nestes casos de longe as mais utilizadas especialmente as máquinas assíncronas de corrente alternada trifásicas.

Existem para todos os efeitos dois tipos principais de máquinas de corrente alternada: as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas. A máquina denomina-se síncrona quando roda á velocidade de sincronismo, isto é, à velocidade n que resulta da aplicação da equação 1, em que f é a frequência de alimentação da rede e p o número de pares de pólos da máquina. [14]

$$n_s = \frac{f}{p} . \quad (1)$$

A máquina assíncrona por outro lado roda a uma velocidade diferente da velocidade de sincronismo e é na atualidade o motor de uso mais corrente nas mais variadas aplicações industriais, comerciais e domésticas devido á sua simplicidade, robustez, fiabilidade e baixo custo. [15]

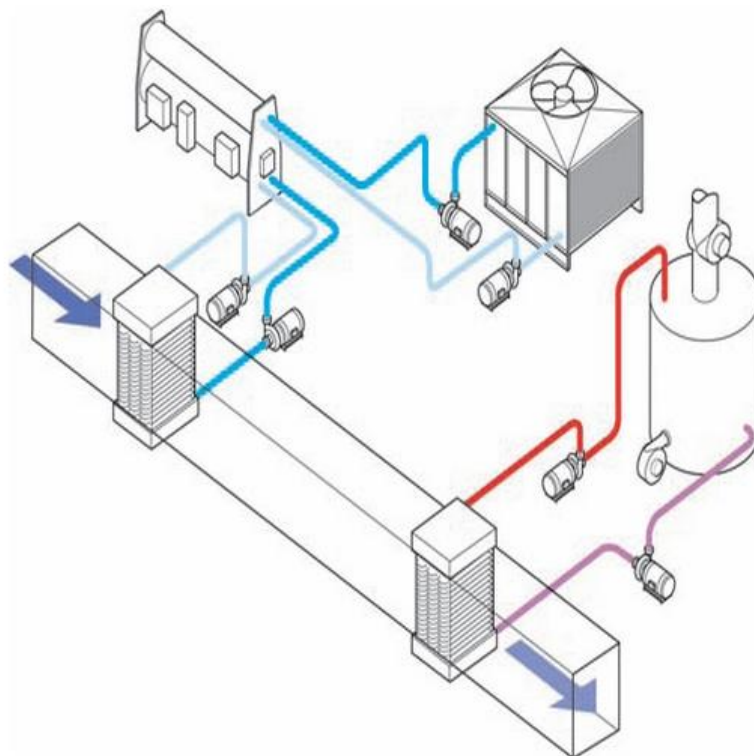


Figura 9 - Os principais componentes de um sistema de climatização: a circulação de ar, circuitos de arrefecimento de água e circuitos de aquecimento de água

3.1. MÁQUINA ASSÍNCRONA DE CORRENTE ALTERNADA

A máquina assíncrona é constituída por uma massa metálica fixa - estator - com ranhuras na periferia interior onde está instalado um enrolamento induzido, e por uma massa metálica rotativa - rotor - que pode ser de dois tipos, rotor bobinado (Figura 10.b) ou rotor em gaiola de esquilo (Figura 10.a). O rotor em gaiola de esquilo, de uso muito mais generalizado, é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto circuitarão os condutores. No caso do rotor bobinado, este possui um enrolamento semelhante ao do estator, cujos terminais estão ligados a anéis metálicos isolados, montados sobre o veio, sendo a corrente conduzida ao exterior através de escovas de carbono que deslizam sobre os anéis. A distância entre o rotor e o estator, conhecida como entreferro, é bastante reduzida de forma a reduzir a corrente em vazio da máquina e portanto as perdas, mas também para aumentar o fator de potência em vazio. [14] [15]

A aplicação de um sistema trifásico de tensões ao enrolamento do estator resulta no entreferro num fluxo magnético girante, o qual induz no enrolamento do rotor uma força eletromotriz (f.e.m). Uma vez que o rotor está em curto circuito (rotor em gaiola) ou fechado através de circuito exterior (rotor bobinado), esta f.e.m dá origem a correntes que circulam no rotor, produzindo binário motor. O rotor apoiado num veio transmite à carga a energia mecânica produzida. [15] [14]

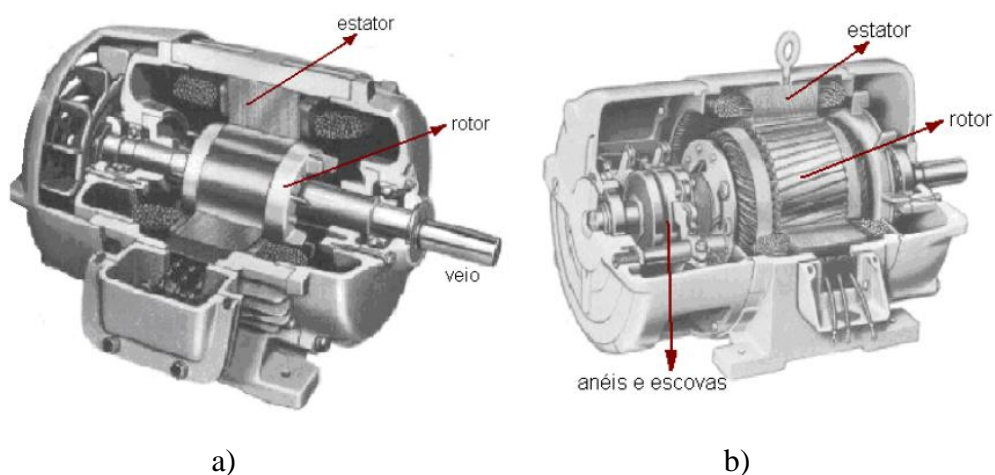


Figura 10 - Corte de motor de indução com a) Rotor em gaiola de esquilo e b) Rotor bobinado.

[16]

Tal como referido, o rotor do motor assíncrono roda a uma velocidade n_r inferior á velocidade de sincronismo n_s dada na equação 1. De fato, a velocidade do rotor nunca poderia ser igual à velocidade de sincronismo. Se o fosse, os condutores do rotor não poderiam cortar as linhas de força do campo magnético girante pelo que não haveria correntes induzidas no rotor nem interação entre o campo e o rotor pelo que o motor não funcionaria. [17]

Esta diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade de rotação do rotor expressa por unidade (p.u) ou em percentagem designa-se por escorregamento s e é dada pela equação demonstrada em 2, sendo que w_r e w_s são as velocidades angulares correspondentes a n_r e n_s respetivamente.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{w_s - w_r}{w_s} . \quad (2)$$

O valor do escorregamento tem na realidade implicações assinaláveis no rendimento da máquina elétrica. Sabemos que, quanto maior o escorregamento, maiores as perdas, sendo menor o rendimento do motor, pelo que quanto mais a velocidade de rotação se aproximar da velocidade de sincronismo, melhor será o rendimento do motor (menor é o deslizamento) e sabendo-se que o escorregamento diminui com a potência, portanto quanto maior a potência melhor o rendimento apresentado pelo motor. [18]

O rendimento do motor elétrico de indução é aliás uma das maiores preocupações nos dias que correm. Os motores elétricos são responsáveis por grande parte da energia consumida nos segmentos onde são aplicados, e portanto, são equipamentos sobre os quais é preciso encontrar soluções que garantam um menor consumo de energia, garantindo a mesma ou até uma melhor disponibilidade de serviço.

Tem sido enorme o investimento por parte dos fabricantes na procura de soluções que melhorem o rendimento elétrico do motor, cumprindo assim as metas estabelecidas de acordo com a legislação em vigor.

Nesse sentido, encontram-se já disponíveis no mercado os chamados motores de “perdas reduzidas”, ou também denominados de “alto rendimento”

3.2. MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

A eficiência de um motor é dada pelo seu rendimento, ou seja, pela relação entre a quantidade de energia elétrica que absorve e a quantidade de energia mecânica que produz e pode ser calculada pela expressão seguinte:

$$\eta = \frac{\text{Potência mecânica (kW)}}{\text{Potência absorvida (kW)}} = \frac{\text{Potência mecânica (kW)}}{\text{Potência mecânica (kW)+Perdas (kW)}} \quad (3)$$

Como se pode depreender, pela fórmula enunciada o motor elétrico transforma a potência elétrica absorvida em potência mecânica, que se traduz por sua vez em binário no veio do motor, e uma pequena parcela de perdas que são inerentes ao funcionamento do próprio motor como podemos verificar na Figura 11. Na consideração do balanço energético as perdas que ocorrem num motor de indução são essencialmente as seguintes:

- Perdas no ferro: perdas magnéticas nas laminações do núcleo, histerese e correntes parasitas de Foucault.
- Perdas mecânicas: perdas por atrito no sistema de transmissão e ventilação.
- Perdas no estator: perdas por efeito de Joule devido á circulação de corrente nos enrolamentos do estator.
- Perdas no rotor: perdas por efeito de joule devido á circulação de corrente nas barras e anéis do rotor, dependentes do material, secção e comprimento do mesmo.
- Perdas adicionais: devidas às imperfeições na distribuição dos fluxos magnético.

O aumento do rendimento de um motor elétrico passa essencialmente, pela limitação do valor destas perdas, e a única forma de o conseguir é melhorando os aspetos construtivos e utilizando materiais de melhor qualidade. Os métodos para atingir esse pressuposto variam de fabricante para fabricante, no entanto podemos referir os seguintes [19]:

- Chapas metálicas de alta qualidade, geralmente de aço silício;
- Enrolamentos especiais, que produzem menores perdas nos estatores;
- Rotores tratados termicamente, que minimizam as perdas nos rotores;
- Maior volume de cobre, o que reduz a temperatura de operação;
- Anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas por efeito de joule;
- Projeto de ranhuras do motor otimizados para incrementar o rendimento;
- Altos fatores de enchimento das ranhuras que melhorem a dissipação do calor.

A equação seguinte permite calcular a poupança que se obtém com um motor de elevado rendimento em comparação com um motor standard. [11]

$$\text{Poupança} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{STD}}} - \frac{1}{\eta_{\text{EE}}} \right) \times P_N \times N \times \text{€/kWh} \quad (4)$$

em que,

- η_{EE} representa o rendimento do motor
- η_{STD} representa o rendimento do motor de elevada eficiência
- P_N representa a potência nominal do motor
- N indica o número de horas de funcionamento anual
- €/kWh traduz o preço da energia elétrica

Se pretendermos conhecer o tempo de recuperação do investimento suplementar devido à instalação de motores de alto rendimento, este pode ser calculado através da seguinte expressão: [11]

$$N = \frac{\Delta I}{\Delta P \times K \times t} \quad (5)$$

em que,

- N Tempo de recuperação do investimento (horas)
- Δt Diferença de custos
- ΔI Variação das perdas entre os dois motores
- K Preço do kWh
- T Tempo de utilização (horas)

A opção por motores de elevado rendimento acarreta, custos de investimentos sempre superiores ao investimento em motores standard, por esse motivo só se torna economicamente vantajosa a aposta neste tipo de motores quando existe a necessidade de substituição de um motor ou quando se está a dimensionar uma nova instalação. Quase nunca a substituição de um motor standard, a funcionar corretamente, por um motor de elevado rendimento se torna economicamente vantajosa. Essa hipótese poderá ser considerada se o motor tiver um elevado número de horas de funcionamento anual. Nestes

casos o acréscimo de custos dos motores de alto rendimento pode ser recuperado através da economia de energia elétrica que proporcionam. [11]

Outra consideração prende-se com fato do motor elétrico, pese embora seja o componente de maior consumo, ser apenas um dos componentes que fazem parte de uma máquina elétrica. Componentes como por exemplo o VEV, a Transmissão Mecânica e o Dispositivo de Uso Final, fazem normalmente parte integrante. Por isso, apesar dos novos motores de alto rendimento possuírem uma eficiência melhorada, a eficiência total do sistema depende de todos os componentes que o compõem como podemos verificar por análise da Figura 13. Apenas atuando ao nível de cada módulo, será possível otimizar a eficiência global do sistema. Por esse motivo, não se deve apenas investir na compra de um motor de elevada eficiência, quando existirem problemas de eficiência nos outros componentes do sistema. [11]

É essencial também compreender o regime de funcionamento ao qual o motor estará exposto e garantir a adequação da potência à máquina que ele aciona. Uma grande parte das aplicações em que se utiliza força motriz beneficiaria, em termos de consumo de eletricidade e desempenho global, se a velocidade do motor se ajustasse as necessidades do processo. [11]

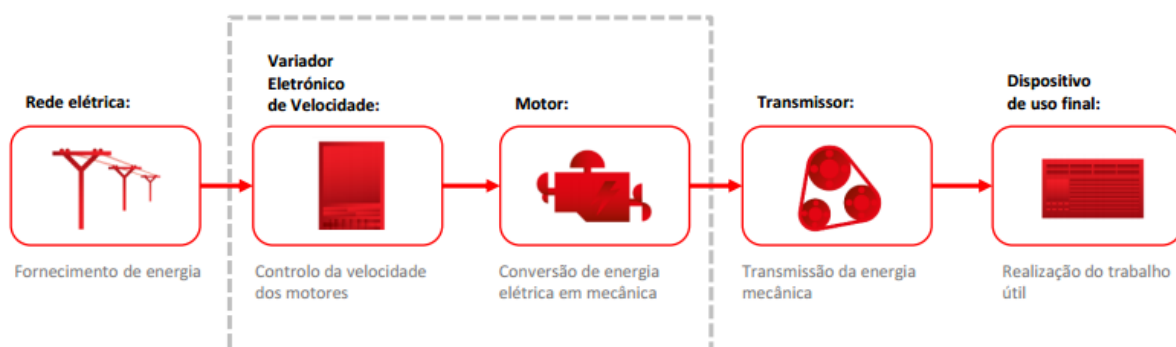


Figura 13 - Eficiência global de um sistema eletromecânico. [21]

3.3. MODELO DE UMA MÁQUINA ASSÍNCRONA DE CORRENTE ALTERNADA

Uma das formas de melhor conhecer o princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico, é traçando um circuito equivalente de forma a conduzir a análise da operação e facilitar o cálculo do desempenho. Segundo [15], a máquina assíncrona, pode ser modelada por um esquema monofásico equivalente em T como se pode verificar na figura seguinte.

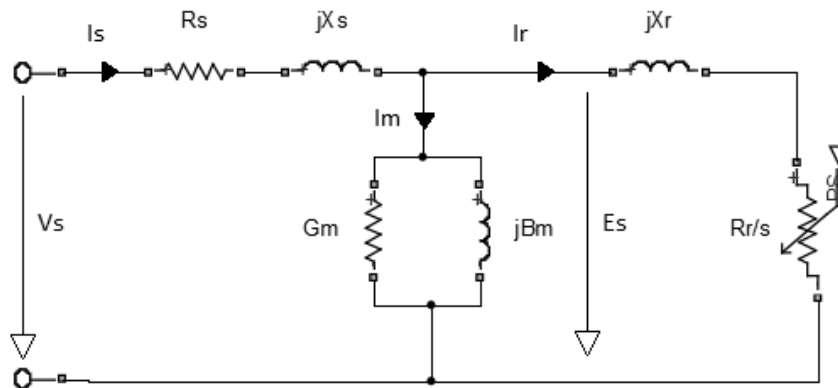


Figura 14 - Esquema monofásico equivalente em T da máquina assíncrona

Aplicando uma tensão V_s ao enrolamento estático e subtraindo as quedas de tensão $R_s I_s$, devido à resistência dos condutores, e $jX_s I_s$, devida à reactância de dispersão, resulta a f.e.m. E_s , a qual corresponde ao fluxo girante no entreferro θ onde ω_0 é a frequência angular da rede.

$$E_s = j\omega_0 N_s \theta = j\omega_s N_s \theta . \quad (6)$$

A corrente de magnetização I_m necessária ao estabelecimento deste fluxo tem duas componentes - uma em fase e a outra em quadratura - as quais circulam na condutância G_m e na susceptância B_m , respetivamente. Devido á diferença de velocidade do campo girante e a do rotor, é induzida no enrolamento deste uma f.e.m. E'_r com a frequência angular do escorregamento:

$$s\omega_s = \omega_s - \omega_r . \quad (7)$$

e amplitude complexa:

$$E'_r = j(\omega_s - \omega_r) N_r \theta = js\omega_s N_r \theta . \quad (8)$$

Usando a equação 5, vem:

$$E'_r = \frac{s N_r}{p N_s} E_s . \quad (9)$$

N_s e N_r são o número de espiras dos enrolamentos do estator e do rotor respectivamente (para uma máquina de rotor em gaiola de esquilo, o número de espiras N_r deve ser entendido como o de um enrolamento bobinado equivalente).

Referindo a f.e.m. induzida no rotor ao estator, resulta:

$$E_r = p \frac{N_s}{N_r} E'_r = s E_s . \quad (10)$$

Sendo R_r e X_r a resistência e a reactância de dispersão do enrolamento do rotor, respectivamente, referidas ao estator (X_r é a reactância à frequência síncrona; á frequência de escorregamento será sX_r), podemos escrever:

$$E_r = s E_s = R_r I_r + j(sX_r) I_r . \quad (11)$$

ou seja:

$$E_s = \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right) I_r . \quad (12)$$

Esta equação justifica a modelação do rotor no esquema equivalente da Figura 14.

A potência consumida na resistência fictícia R_r/s corresponde à potência transferida para o rotor P_r - igual à potência fornecida pela rede menos as perdas no estator e no circuito magnético:

$$P_r = 3 \frac{R_r}{s} I_r^2 . \quad (13)$$

A potência mecânica (desprezando as perdas por atrito) é por seu lado, igual a P_r deduzida das perdas no rotor:

$$P_M = P_r - 3 R_r I_r^2 = 3 \frac{1-s}{s} R_r I_r^2 . \quad (14)$$

Face a este resultado o esquema equivalente pode ser modificado conforme se mostra na figura, obtendo-se um esquema em L no qual a resistência $R_R(1 - s)/s$ modela a carga mecânica.

A corrente de magnetização calcula-se por:

$$I_m = (G_m + jB_m)V_s . \quad (15)$$

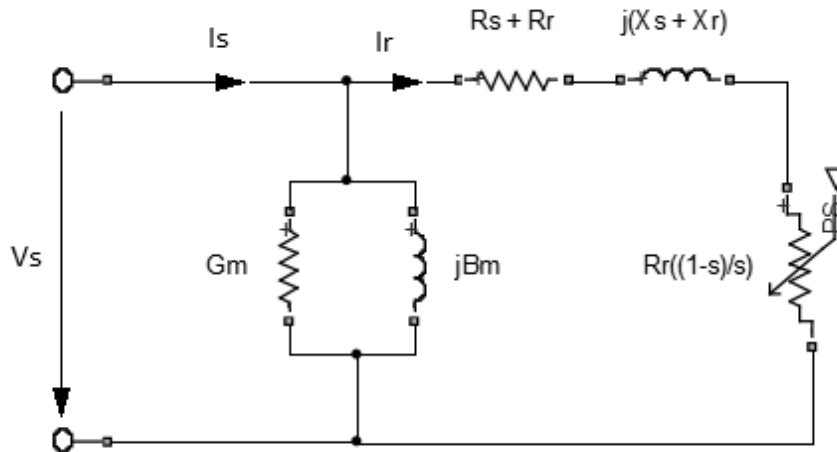


Figura 15 - Esquema monofásico equivalente em L da máquina assíncrona

A corrente no rotor I_r pode calcular-se por:

$$I_r = \frac{V_s}{R_s + \frac{R_r}{s} + j(X_s + X_r)} . \quad (16)$$

A corrente no estator I_s é a soma desta com a corrente de magnetização I_m :

$$I_s = I_m + I_r . \quad (17)$$

A potência ativa pedida à rede é:

$$P_s = 3G_m V_s^2 + 3 \left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) I_r^2 . \quad (18)$$

donde resulta para o rendimento:

$$\eta = \frac{P_M}{P_s} = \frac{\frac{1-s}{s} R_r I_r^2}{G_m V_s^2 + \left(R_s + \frac{R_r}{s} \right) I_r^2} . \quad (19)$$

O motor assíncrono representa uma carga indutiva para a rede de alimentação, consumida potência reativa dada por:

$$Q_s = -3B_m V_s^2 + 3(X_s + X_r)I_r^2 . \quad (20)$$

Para além da potência, interessa calcular o binário:

$$T = \frac{P_M}{\omega_r} = \frac{P_M}{\omega_s(1-s)} . \quad (21)$$

Substituindo P_M dada na equação 14, vem:

$$T = \frac{3R_r I_r^2}{s\omega_s} . \quad (22)$$

Da equação 16, obtém-se:

$$I_r^2 = \frac{V_s^2}{(R_s R_r / s)^2 + (X_s X_r)^2} . \quad (23)$$

Substituindo na equação 22, vem que para o binário:

$$T = \frac{3V_s^2}{\omega_s} \frac{R_r / s}{(R_s + R_r / s)^2 + (X_s + X_r)^2} . \quad (24)$$

O binário de arranque corresponde a:

$$T_{arr} = \frac{3V_s^2}{\omega_s} \frac{R_r}{(R_s + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2} . \quad (25)$$

Quanto ao binário máximo obtém-se:

$$T_{máx} = \frac{3V_s^2}{2\omega_s} \frac{1}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}} . \quad (26)$$

A corrente de arranque do motor pode atingir valores da ordem de seis a sete vezes o valor da corrente nominal. Nesta situação $W_r = 0$, logo $s = 1$. Do esquema equivalente, desprezando a corrente de magnetização, obtém-se:

$$I_s^{arr} = \frac{V_s}{R_s + R_r + j(X_s + X_r)} . \quad (27)$$

3.4. ARRANQUE MOTORES DE INDUÇÃO

A maior parte dos motores de indução são suficientemente robustos para arrancarem diretamente da rede, no entanto, um consumo de corrente, seis a sete vezes superior à corrente nominal do motor durante a fase inicial de arranque, pode ter efeitos nocivos, tanto para o motor como para a própria instalação elétrica. Para reduzir a corrente de arranque, o que é especialmente importante em motores de potência elevada, podem usar-se, um autotransformador regulável, um arrancador estrela-triângulo, um arrancador suave ou ainda um VEV. Em todo o caso, a intenção é elevar a tensão, e por conseguinte, diminuir a corrente no instante de arranque.

3.4.1. ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR

No arranque por autotransformador, é utilizado um transformador ou um autotransformador trifásico para auxiliar o arranque por variação da tensão de alimentação.

3.4.2. ARRANQUE ESTRELA-TRIÂNGULO

No caso do arranque estrela triângulo, estando o enrolamento do motor normalmente ligado em triângulo, o motor por meio do arrancador estrela triângulo liga-o inicialmente em estrela, pelo que a tensão aplicada vem elevada do fator $\sqrt{3}$, e por sua vez o binário vem reduzido a um terço. Após o motor atingir uma velocidade suficiente, o enrolamento é ligado automaticamente em triângulo. Antes da utilização dos conversores eletrônicos este era o método de arranque mais comum.

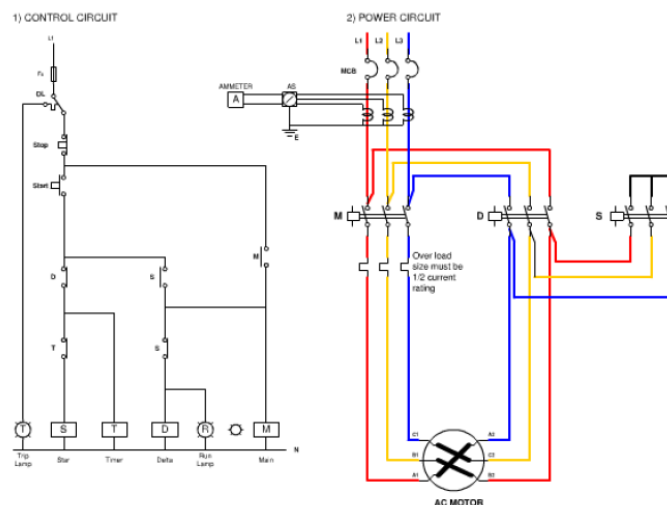


Figura 16 - Diagrama de comando e de potência de um arrancador estrela triângulo [16]

3.4.3. ARRANCADOR SUAVE

Com o desenvolvimento tecnológico na área dos semicondutores e circuitos integrados a aplicação de componentes eletrônicos no comando de sistemas de potência nomeadamente no comando de máquinas elétricas permitiu o comando da máquina elétrica mas também a regulação e controlo de algumas das grandezas da máquina nomeadamente: a regulação de velocidade, regulação da tensão aplicada, controlo de correntes máximas, controlo de temperaturas, travagem das máquinas entre outras. [14]

O Arrancador Suave, também conhecido como Soft-Starter, é um equipamento eletrónico destinado á aceleração e desaceleração de motores de indução trifásicos, permitindo assim obterem-se arranques e paragens suaves. Trata-se de um dispositivo eletrónico normalmente composto por tirístores acionados por um bloco eletrónico de controlo, a fim de controlar a tensão de arranque de motores de corrente alternada trifásicos. O arrancador suave controla a tensão sobre o motor através de um circuito de potência, constituído por 2 a 6 tirístores SCRs, variando o ângulo de disparo dos mesmos e consequentemente variando a tensão eficaz aplicada ao motor permitindo assim controlar a corrente de arranque do motor, proporcionando um "arranque suave", de forma a não provocar quedas de tensão elétrica bruscas na rede de alimentação, como ocorre em arranques diretos. [22]

Estes executam um controlo através de malha aberta, onde o arrancador simplesmente efetua o arranque de forma linear com base numa tensão de início (arranque) e um tempo de arranque, o qual dita o tempo necessário para chegar á tensão nominal e assim executar a respetiva rampa, ou através de malha fechada em que o arrancador dispõe de feedback (leitura) do motor, carga e rede, permitindo dessa forma controlos avançados tais como ajustes das rampas de aceleração e desaceleração além de garantir a proteção eletrónica do motor, entre outras características.

Um outro equipamento que oferece mais disponibilidade de serviço que o arrancador suave é o VEV. O VEV permite o controlo contínuo da velocidade de motores de indução e será objeto de fundamentação no próximo capítulo.

4. VARIADORES DE VELOCIDADE

O controlo da velocidade dos motores elétricos sempre teve em mente a otimização do processo produtivo e a otimização de recursos energéticos. A possibilidade de variar a velocidade e o binário de um motor e por outro lado a carga acionada apresenta benefícios vários.

Sabe-se que a maior parte das máquinas funciona a uma velocidade fixa, independente da carga acionada, isto é, não se atende aos pontos de funcionamento em que o rendimento ou o fator de potência são máximos, desperdiçando deste modo energia. Ora através de reguladores eletrónicos como é o caso do VEV consegue-se regular a velocidade para o valor ideal correspondente ao máximo rendimento e geralmente também ao máximo fator de potência para cada carga acionada.

Outra das principais vantagens tem a ver com a existência de elevadas correntes de arranque, transitórias tal como já foi mencionado. Estas correntes embora de curta duração, são de fato muito prejudiciais para o equipamento e provocam interferências na rede. O VEV possibilita um arranque repetidas vezes, com maior facilidade, com menos distúrbios para o motor e rede, eliminando picos de tensão provenientes de métodos de arranque.

O VEV permite também um melhor controlo de todo o processo onde está inserido sendo possível pequenos ajustes na operação garantindo maior precisão o que implica que as necessidades de manutenção serão por isso reduzidas, já que a melhor capacidade de controlo de todo o processo garante menores danos e desgaste tanto no motor como na máquina acionada. Além disso o VEV funciona como proteção integrada á máquina que se pretende controlar garantindo proteção térmica, proteção contra sobretensões e quedas de tensão, desequilíbrios de fases ou curto circuitos entre fases e entre fase e a terra. Estes entre outros benefícios garantem ao VEV lugar de destaque na obtenção de elevados parâmetros de eficiência energética e uma disponibilidade de funções assinalável.

A aplicação de VEVs em máquinas elétricas CA é hoje uma prática quase constante. No entanto ainda á poucos anos o motor de CC era a única opção considerada quando era necessário o controlo da velocidade do motor, mesmo que os custos de aquisição e manutenção de um motor CC fossem significativamente superiores quando em comparação com um motor CA. O motores de CA funcionavam de acordo com a frequência imposta da rede, e por isso a uma velocidade fixa ou quase fixa no caso dos motores síncronos e assíncronos respetivamente, sendo por isso desajustados quando havia a necessidade de variação da velocidade do motor.

Os progressos ao nível da eletrónica de potência mais concretamente ao nível dos semicondutores, possibilitando um melhor processamento de energia, permitiu modular a frequência e a tensão, garantindo as condições necessárias ao controlo da velocidade dos motores de indução. Aliás os VEV diferem essencialmente no tipo conversão de energia que neles ocorrem sendo que estes podem dividir-se em conversores indiretos como são disso caso os Inversores por Fonte de Tensão (IFT) e os Inversores por Fonte de Corrente (IFC) ou ainda em conversores diretos como é caso do Cicloconversor.

Eles podem variar também nas estratégias de controlo que podem realizar. Existem neste campo vários tipos de estratégias de controlo utilizadas. Dado que a descrição de cada tipologia de controlo se tornaria demasiado extensa, será apresentado o Controlo Escalar (V/Hz) e o Controlo Vetorial por Orientação de Campo, já que estas estratégias se encontram disponíveis em praticamente todos os Variadores disponíveis no mercado, sendo que relativamente aos restantes para melhor compreensão dos mesmos deverá ser consultada a referência. [23]

4.1. TIPOLOGIA DE UM VARIADOR DE VELOCIDADE

Os Conversores de Potência podem ser de vários tipos e apresentar diferentes tipologias, no entanto seguem normalmente a seguinte estrutura, dividida em três partes, sendo a primeira para o tipo de retificação de entrada, a segunda para o tipo de controle do circuito intermédio e a terceira para a sua saída. A Figura 17 mostra um diagrama simplificado dos principais blocos de um Conversor de Potência.

Os Cicloconversores por exemplo não efetuam retificação de sinal na sua entrada efetuando apenas uma conversão direta do tipo CA-CA, permitindo obter á saída uma tensão alternada de amplitude e frequência diferentes, possibilitando por isso a variação de velocidade de máquinas CA. Os Cicloconversores antecederam de certa forma os atuais conversores de potência e são ainda utilizados para converter a frequência da rede numa frequência mais baixa. São essencialmente usados por máquinas de alta potência com operação a baixas frequências normalmente abaixo dos 25 Hz. [24]

Os atuais VEV pelo contrário apresentam a tipologia descrita. Numa primeira parte uma ponte retificadora ligada à rede, assegura a conversão CA-CC. Seguidamente um circuito intermédio, que consiste num filtro de tensão, formado por bobinas e condensadores limitam a modulação de tensão que passa para o inversor e por fim o inversor efetua uma inversão CC-CA, cujo o objetivo é fornecer uma tensão no caso do IFT ou corrente alternada no caso do IFC, com frequência, forma e amplitude definidas por um circuito de comando. Nas Figura 18 e Figura 19, temos a representação de um diagrama simplificado de um IFT e um IFC ambos trifásicos.

A inversão CC-CA no caso do IFT pode ser conseguida através de transístores de potência mais concretamente do tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Como os transístores funcionam como interruptores "liga ou desliga", dependendo da combinação de interruptores abertos ou fechados e do tempo que cada combinação permanece num determinado estado pode se obter á saída do inversor formas de onda diferentes.

Os inversores de frequência atuais utilizam largamente esta estratégia conhecida por PWM Sinusoidal (Sinusoidal Pulse With Modulation).

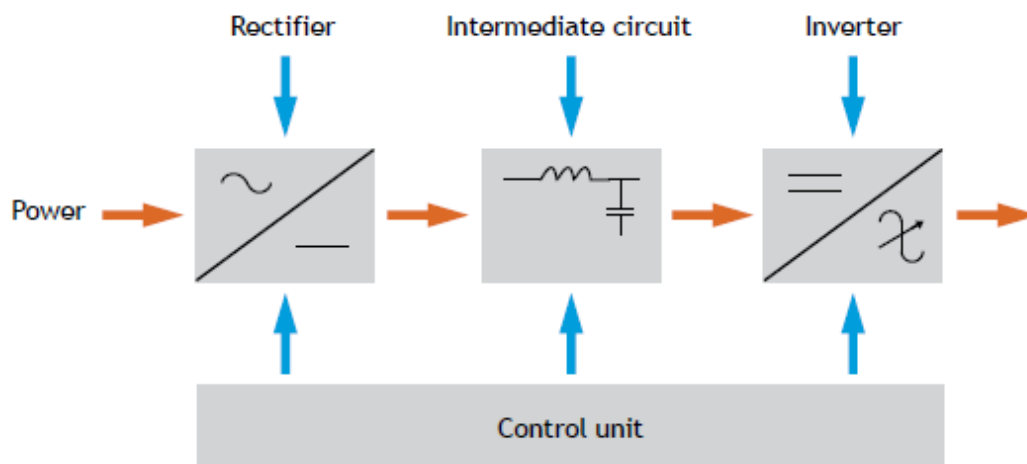


Figura 17 - Configuração geral de VEV's [25].

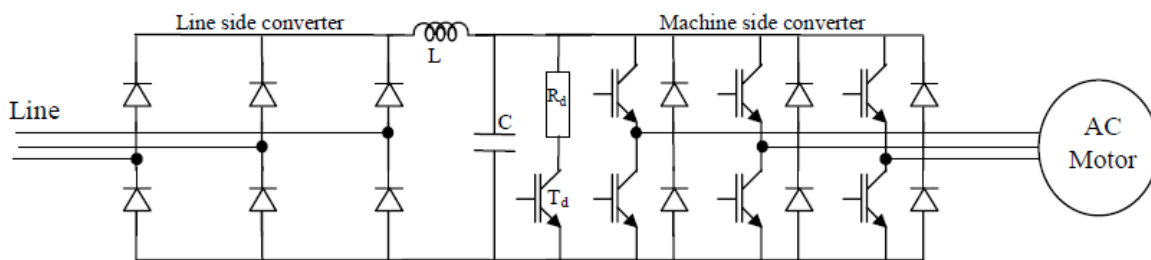


Figura 18 - Diagrama simplificado de um IFT trifásico

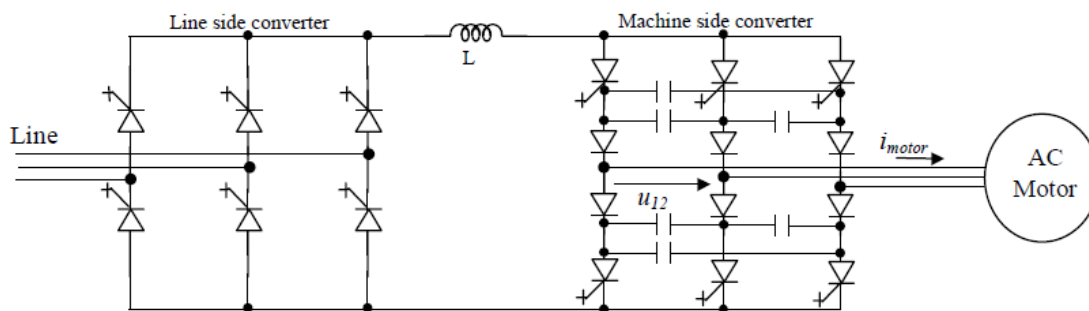


Figura 19 - Diagrama simplificado de um IFC trifásico

4.2. CONTROLO ESCALAR

O controle escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência que impõe ao motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/Hz constante. Este método é largamente utilizado devido á sua simplicidade e também porque a maioria das aplicações não requer alta precisão ou rapidez no controlo da velocidade.

Como foi referido no capítulo 3, a aplicação de um sistema trifásico de tensões ao enrolamento do estator resulta no entreferro num fluxo magnético girante, o qual induz no enrolamento do rotor uma f.e.m. Os conversores aplicados nos atuais VEV possibilitam transformar a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis que será aplicada aos enrolamentos do estator. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade de rotação da máquina.

O Binário desenvolvido pela máquina segue a seguinte equação:

$$T = K_1 \times \Phi \times I_r . \quad (28)$$

E o fluxo girante no entreferro, desprezando as quedas de tensão, devido à resistência dos condutores e a reactância de dispersão é dada da seguinte forma:

$$\Phi = K_2 \times \frac{V_s}{f} . \quad (29)$$

Como podemos compreender, controlar a tensão no estator permite controlar o fluxo no entreferro. No entanto também sabemos que o binário e o fluxo variam em função da frequência e da tensão. Admitindo-se, que a corrente depende da carga e que essa é constante, variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação do motor, o fluxo e consequentemente, o binário permanecem constantes. O motor fornece assim um ajuste contínuo de velocidade e binário em relação à carga mecânica. Este tipo de controlo é aplicado em Inversores do tipo IFT assim como IFC. Dado que os Inversores do tipo IFT são mais aplicados será feita a alusão ao controlo escalar nestes inversores.

4.2.1. CONTROLO ESCALAR EM MALHA ABERTA

Na Figura 20, podemos verificar um esquema de implementação de controlo escalar em malha aberta que preenche a tipologia descrita de um inversor do tipo IFT, sendo a sua constituição um estágio retificador, um filtro LC, e um inversor do tipo PWM.

Analisando o esquema exposto verificamos que a frequência ω_e^* é o sinal de entrada e também a principal variável de controlo do sistema e representa a velocidade de sincronismo, que é para todos os efeitos o que temos mais próximo da velocidade do rotor não tomando em consideração o escorregamento. Podemos por isso dizer que neste esquema a velocidade do rotor é na realidade a principal variável a controlar. O sinal de tensão que é aplicado ao estator do motor é gerado a partir da relação de tensão/frequência de forma que o fluxo girante no entreferro permaneça constante. Para a produção do ângulo θ_e^* a frequência ω_e^* de comando é integrada e os sinais de tensão são as expressões representadas no esquema. A tensão de impulso V_o tem como finalidade compensar a queda de tensão na resistência estatórica que para frequências baixas têm influência no cálculo da corrente. Quando em baixas velocidades, de forma a manter o binário constante, na operação V/Hz constante, aumenta-se a tensão de saída do inversor.

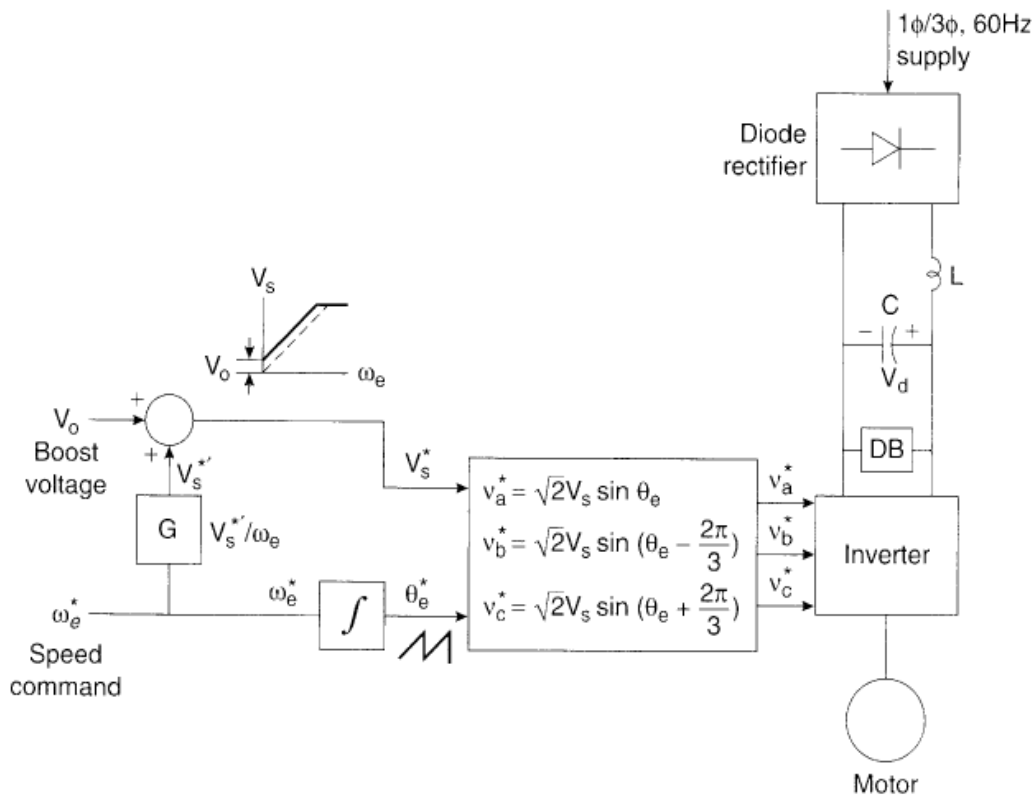


Figura 20 - Esquema de implementação do controle V/Hz em malha aberta [23]

A Figura 21 representa o desempenho deste tipo de controle. Nele podemos constatar que um aumento gradual da frequência, aumenta proporcionalmente a velocidade do motor, tal como indicado nos pontos 1,2,3,4,5,6,7. A variação da relação V/Hz é feita linearmente até a frequência nominal do motor. Acima dessa frequência, a tensão é máxima (igual à nominal) e permanece constante como representado na figura pela componente V_s , havendo então apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor. É nessa zona que ocorre a denominada região de enfraquecimento representada pela linha a tracejado, pois ali o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando também a diminuição do binário.

Se considerarmos os efeitos de variação do binário e da tensão escolhendo o ponto 3 como o ponto inicial de operação, um aumento do binário resistente até ao ponto T_L' , diminuirá a velocidade do rotor do motor de w_r para w_r' . Consideremos agora que estamos a operar no ponto a, numa outra curva do binário/velocidade. Se ocorrer uma diminuição da tensão aos terminais do motor, ocorrerá também uma diminuição da velocidade correspondente ao ponto b.

O modo de operação do controle V/Hz em malha aberta pode ser entendido por análise das Figura 22 e Figura 23. Quando o comando de frequência é incrementado de um pequeno valor, a sequência de passos do controlador são: ir do passo inicial (1) para o de binário máximo (2), após atingida a velocidade desejada (3) voltar o binário para o mínimo exigido pela carga (4). Caso seja proporcionado uma diminuição no sinal de frequência existe a ação de frenagem dinâmica. [26]

As conclusões que pode-se chegar pela observação das figuras é que a velocidade do rotor é dependente do momento de inércia da carga aplicada, interferindo assim nas respostas de aceleração/desaceleração do controlador. O controlador pode ser levado para regiões de instabilidade pela imposição de uma grande variação da velocidade de comando. Existe ainda a possibilidade de melhora da performance do controlador pela inserção de estimativas de inércia da carga e deslizamento, e também considerações das constantes do motor. [26]

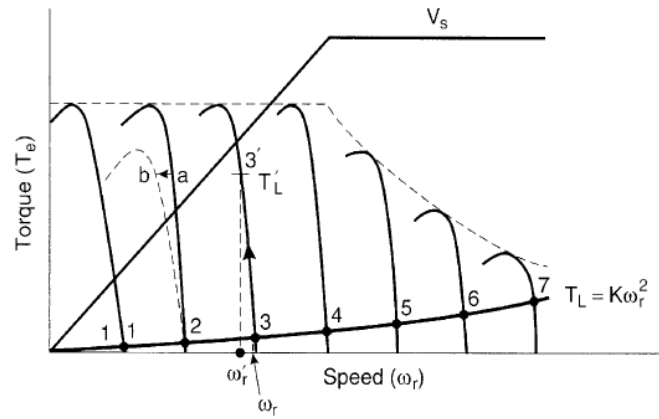


Figura 21 - Curvas de Binário/Velocidade demonstrado o efeito das variações de frequência, binário e tensão [23]

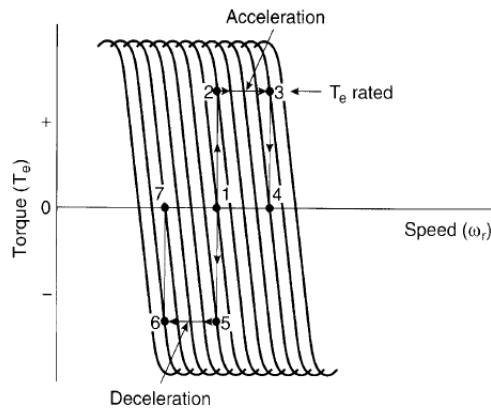


Figura 22 - Características Aceleração/Desaceleração com controlo V/Hz em função do binário e da velocidade [23]

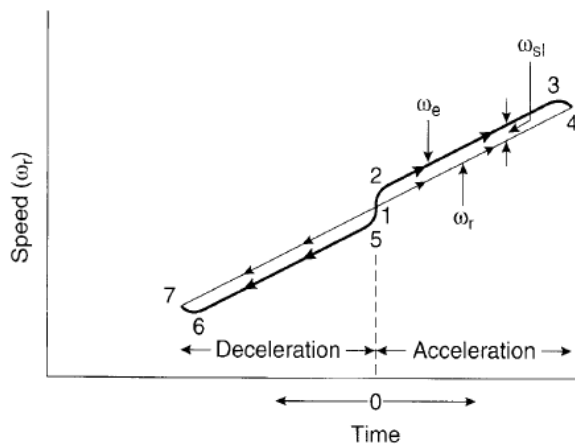


Figura 23 - Características Aceleração/Desaceleração com controlo V/Hz em função do tempo [23]

4.2.2. CONTROLO ESCALAR EM MALHA FECHADA

O principal problema do controlo em malha aberta V/Hz é a falta de precisão no controle de velocidade, pelo simples fato de se assumir que a velocidade do rotor é igual á velocidade de sincronismo, não tomando em consideração o escorregamento.

Um método que permite ultrapassar esta questão pode ser verificado por análise da Figura 24, em que temos um controlo de malha fechada com compensação de escorregamento. A estratégia passa por manter o valor do escorregamento constante, e para isso é necessário antes de mais conhecer a velocidade do rotor, para que se possa atuar nesse sentido. A velocidade do rotor pode ser obtida por meio de um aparelho denominado encoder. O encoder, é um dispositivo eletromecânico que conta ou reproduz pulsos elétricos a partir do movimento rotacional do seu eixo. São, utilizados para conversão de movimentos rotativos ou deslocamentos lineares em impulsos elétricos de onda quadrada, que geram uma quantidade exata de impulsos por volta numa distribuição perfeita dos pulsos ao longo dos 360 graus do seu eixo.

Conhecendo-se a velocidade do rotor é possível efetuar uma comparação com o sinal de comando e por sua vez o erro gerado isto é o valor do escorregamento, é processado com o uso de um controlador, do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID). Temos então que a frequência do estator é obtida pela soma da velocidade atual do rotor mais o valor do escorregamento.

Um incremento na frequência de comando, o motor acelera, com um valor de escorregamento limitado até atingir uma velocidade estabilizada, e por sua vez um escorregamento constante. Quando ocorre um decremento na frequência de comando o variador entra em paragem regenerativa e abranda com deslizamento constante negativo.

Um outro método passível de ser aplicado, que melhora significativamente o controlo da velocidade é aplicando ao controlo previamente descrito, o controlo do fluxo e do binário do motor como podemos verificar na Figura 25. Além do método de compensação do escorregamento é efetuada uma estimação do fluxo e do binário através da tensão e da corrente aos terminais do motor.

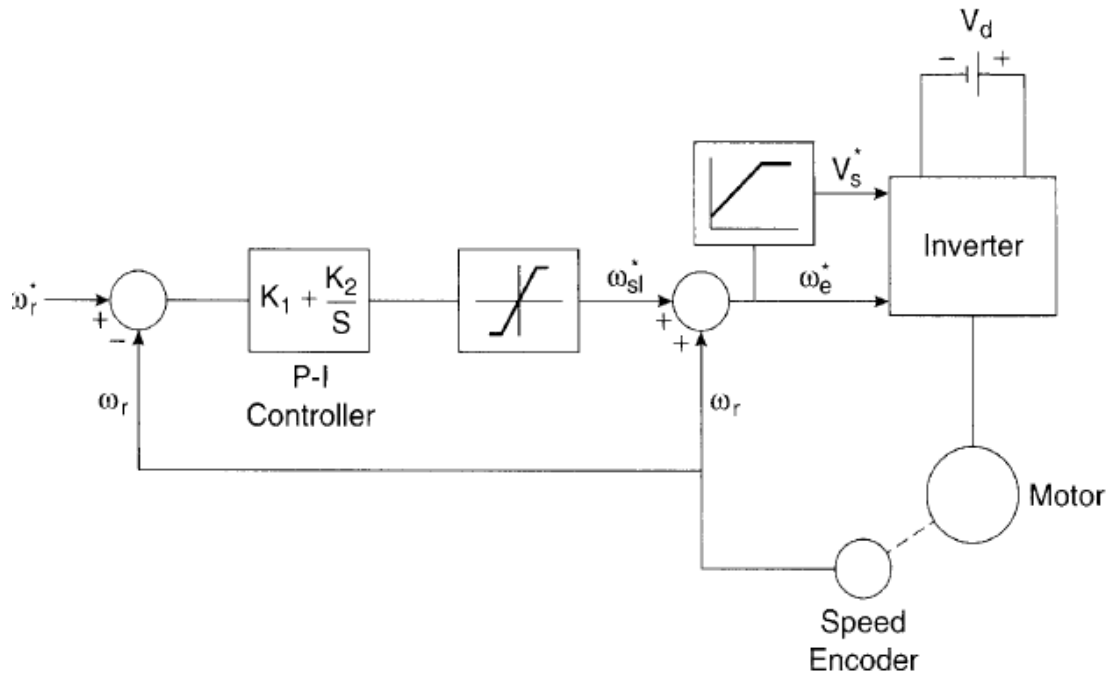


Figura 24 - Esquema de implementação do controle V/Hz em malha fechada com compensação de escorregamento [23]

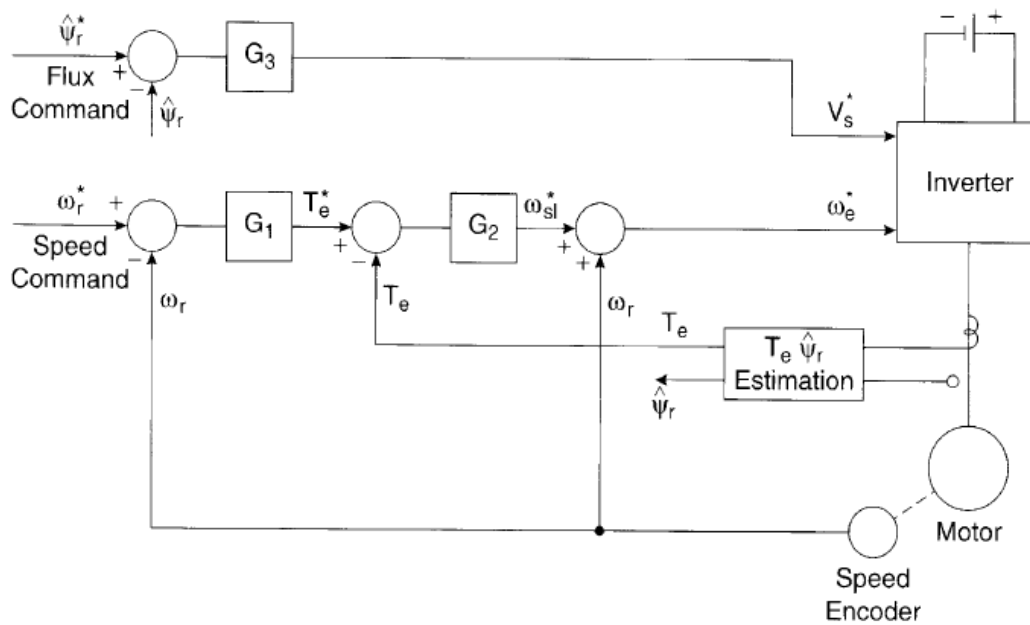


Figura 25 - Esquema de implementação do controle V/Hz em malha fechada com controle de fluxo e binário [23]

4.3. CONTROLO VETORIAL

O controle vetorial é altamente recomendado em aplicações em que é necessário alta performance dinâmica, repostas rápidas e alta precisão de regulação de velocidade e para situações em que o motor deva fornecer um controle preciso de binário para uma faixa extensa de condições de operação. As máquinas CC com sistemas de controlo em malha fechada já atendiam a essas solicitações e, no acionamento em potência sempre representaram a solução ideal. Elas eram frequentemente utilizadas devido á proporcionalidade da corrente da armadura, do fluxo e do binário que permitem um meio direto para o seu controlo. Para entender o controle vetorial é por isso necessário antes de mais compreender o principio de funcionamento do motor CC, pois este método tem como base uma analogia com o controle de máquinas CC, no qual o controlo do binário e de velocidade são efetuados de maneira independente. Para realizar esses controlos os enrolamentos do estator e do rotor são alimentados por duas fontes de tensão independente. [27]

Idealmente o controlo vetorial de um motor de indução, opera de modo similar a um motor CC com excitação separada. A Figura 26 (a) (b) explica essa analogia. Numa máquina CC desprezando o efeito de armadura e saturação no fluxo, o binário é expresso da seguinte forma:

$$T_e = K'_t \times I_a \times I_f = K'_t \times \psi_f \times \psi_a. \quad (30)$$

em que:

I_a	Corrente na armadura
I_f	Corrente no campo
K'_t	Constante
ψ_f	Fluxo de Campo
ψ_a	Fluxo da armadura

Como se percebe o controlo do binário da máquina CC é controlado pela amplitude das duas correntes I_a e I_f . Podemos por sua vez também verificar pela Figura 26 (a) que o fluxo produzido pelo enrolamento de campo ψ_f , produzido pela corrente de campo I_f , é perpendicular ao fluxo magnetomotriz ψ_a , produzido pela corrente na armadura I_a .

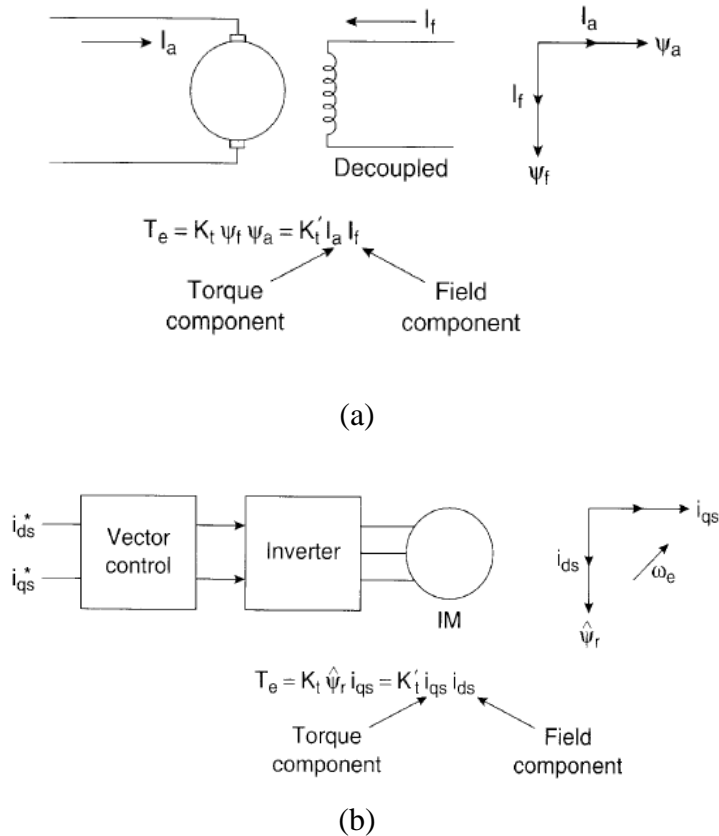


Figura 26 - (a) Motor CC excitado separadamente, (b) Motor controlado vectorialmente [23]

No caso do motor de indução podemos verificar na Figura 26 (b) que o motor de indução de forma análoga ao motor CC também pode ser controlado separadamente por duas correntes, i_{ds}^* e i_{qs}^* e a ideia consiste em manter a perpendicularidade entre as componentes do campo criados pelas duas correntes.

Como foi referido no estudo do Modelo de uma Máquina Assíncrona de Corrente Alternada a corrente de magnetização I_m necessária ao estabelecimento do fluxo girante no entreferro tem duas componentes - uma em fase e a outra em quadratura. A corrente direta i_{ds} está relacionada com o fluxo eletromagnético no motor, enquanto que a corrente de quadratura i_{qs} está diretamente relacionada com o binário eletromagnético produzido no eixo do motor. Como estas correntes são representadas por vetores que giram na velocidade síncrona quando vistas de um referencial estacionário, faz-se uma transformação de referencial de forma a transformá-las para o referencial síncrono. No referencial síncrono estes vetores transformam-se em valores CC proporcionais à

amplitude dos respectivos vetores. No caso a corrente i_{ds}^* representará I_f e a corrente i_{qs}^* representará I_a . Sendo assim o binário pode ser expresso da seguinte forma:

$$T_e = K_t \times \hat{\psi}_r \times I_{qs} = K'_t \times I_{ds} \times I_{qs}. \quad (31)$$

onde $\hat{\psi}_r$ é o valor de pico da onda sinusoidal. A analogia com o máquina CC só é possível se i_{ds} estiver orientada, isto é, alinhada com o fluxo $\hat{\psi}_f$, sendo i_{qs} perpendicular aos dois como é possível verificar na Figura 26 (b) assumindo assim a mesma ortogonalidade que ocorre no controlo de máquinas CC. Isto significa que quando i_{qs}^* é controlado, afeta a apenas corrente i_{qs} , mas não o fluxo $\hat{\psi}_r$, e por sua vez quando se controla i_{ds}^* , este permite o controlo do fluxo $\hat{\psi}_r$ mas não afeta a componente de corrente i_{qs} . Esta estratégia denominada Controlo Vetorial por Campo Orientado permite assim controlar independentemente o fluxo e o binário no motor atuando nas correntes i_{ds} e i_{qs} respetivamente mantendo a sua perpendicularidade.

O principio de funcionamento assenta no conhecimento inicial da posição do fluxo do rotor ψ_r , que está a θ_f (ângulo de campo) da referencia do estator como podemos verificar na Figura 27. Isto implica que é necessário determinar inicialmente a posição angular do fluxo θ_f (ângulo de campo) que se quer orientar. A aquisição da posição instantânea θ_f pode ser escrita como:

$$\theta_f = \theta_r + \theta_{sl}. \quad (32)$$

onde θ_r e θ_{sl} são a posição do rotor e o ângulo de escorregamento respetivamente, sendo que em termos de velocidade angular pode ser escrita como:

$$\theta_f = \int (w_r + w_{sl}) dt = \int w_s dt. \quad (33)$$

A classificação do controle vetorial é aliás definida pelo modo de aquisição do ângulo de campo. A aplicação de um sensor de velocidade (encoder) é possivelmente o método mais utilizado. Conhecendo-se a velocidade angular do rotor, por meio da fórmula descrita na

equação 33 conseguimos obter o ângulo de campo. No entanto existe assim como no caso do controle escalar em malha aberta a possibilidade de estimar a velocidade. Este tipo de controle é efetuado sem a utilização de sensores de velocidade ou de posição, daí a denominação Sensorless, mas sim por métodos de estimação da velocidade com o apoio de avançados microprocessadores. Existem inúmeros métodos de estimação, com são disso caso o cálculo por Escorregamento, Síntese direta das equações de estado, Sistema Adaptativo Referenciado (MRAS), Velocidade adaptável á observação de Fluxo, Filtro de Kalman Extendido, Abertura de Harmónicas, ou por algoritmos que estimam a velocidade baseados na corrente e tensão aos terminais do motor. A desvantagem é que estes métodos além de complexos são altamente dependentes dos parâmetros do motor e necessitam de extrema exatidão, no cálculo da velocidade. Para tal é necessário conhecer ou calcular os parâmetros do motor que são normalmente referidos nos dados da placa do motor ou através da folha de dados do motor fornecida pelo fabricante, e são consistentes com os dados obtidos em conformidade com sistema equivalente do motor referido no capítulo 3.3. Nesse sentido muitos inversores vêm com estes valores pré programados para diferentes motores, enquanto outros utilizam rotinas de auto ajuste para calcular estes parâmetros.

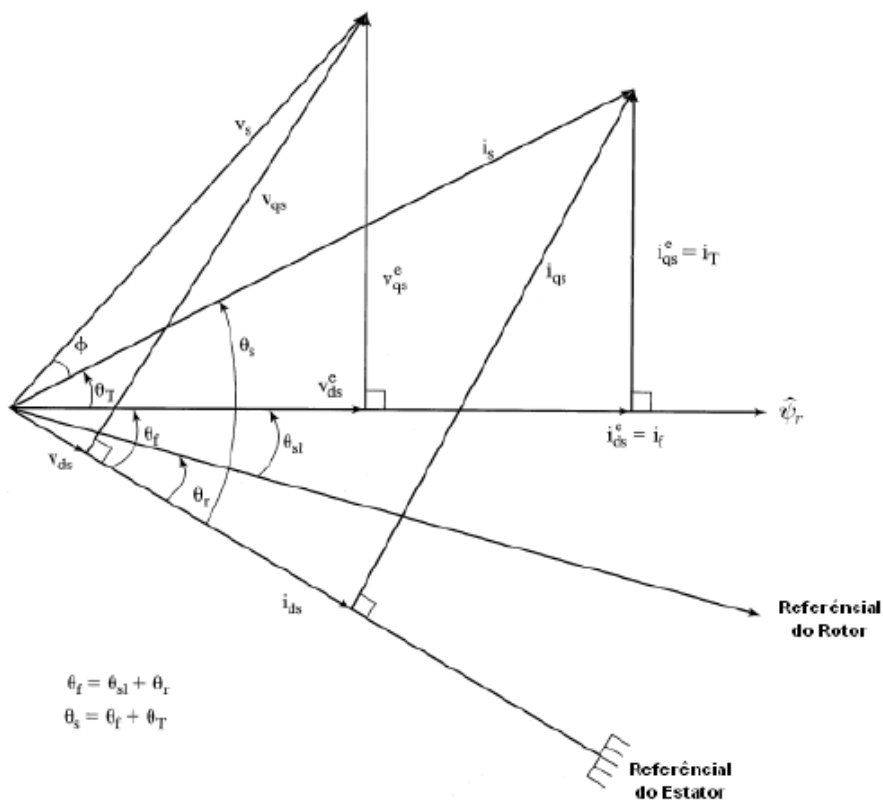


Figura 27 - Diagrama fasorial do controle vetorial [28]

Após o cálculo do ângulo de campo, para proporcionar o desacoplamento entre os controles de binário e do fluxo é necessário transformar o modelo da máquina de indução em um modelo similar ao da máquina CC tal como descrito. O controle é executado através das componentes d-q das correntes de campo e quadratura, oriundas da transformação trifásica $\alpha\beta$ estacionária e em seguida para coordenadas d-q com podemos verificar na Figura 28. Considerando uma máquina de indução de três fases simétricas com os eixos as-bs-cs em regime estacionário desfasados de um ângulo $2\pi/3$, o objetivo é transformar estas três variáveis $\alpha\beta$ da estrutura de referência estacionária em duas fases na estrutura d-q de referencia de rotação síncrona e vice versa.

Considerando que inicialmente a posição do fasor do fluxo do rotor ψ_r , é conhecido, ele está a θ_f da referência estacionária. As correntes de fase são então transformadas para eixos d e q em referência síncrona pela transformação pelo que temos:

$$\begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta_f & \sin \left(\theta_f - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_f + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \theta_f & \cos \left(\theta_f - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_f + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (34)$$

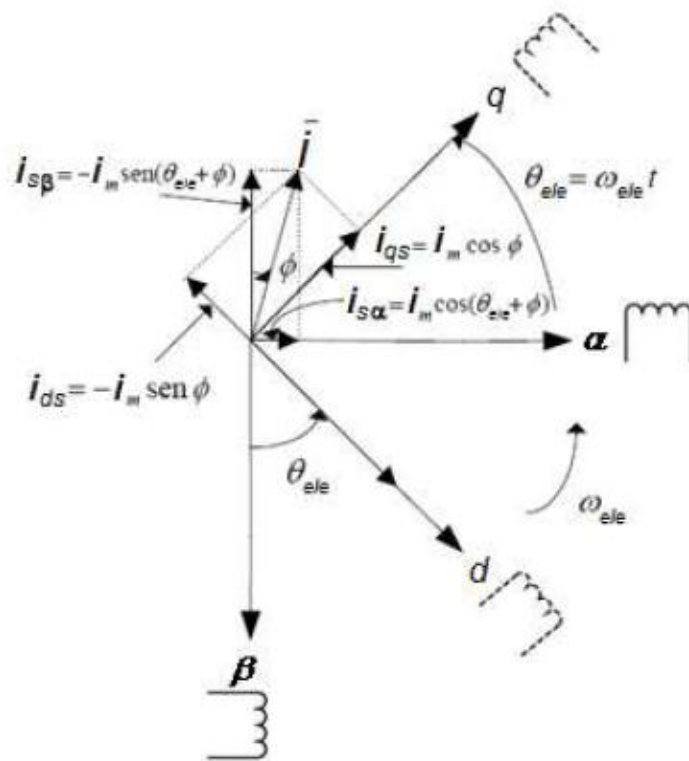


Figura 28 - Transformação da referência estacionária $\alpha\beta$ para referencia de rotação síncrona d-q

sendo a corrente do estator, i_s , derivada como:

$$i_s = \sqrt{(i_{qs}^e)^2 + (i_{ds}^e)^2} \quad (35)$$

e o seu ângulo:

$$\theta_s = \arctan \left\{ \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \right\} \quad (36)$$

onde i_{qs}^e e i_{ds}^e são as projeções da corrente do estator nos eixos d e q. A amplitude da corrente do estator é indiferente à referencia usada como mostrada na Figura 27. O algoritmo do controlo vetorial segundo a referência [28], é:

- I. Obter o ângulo de campo:
- II. Calcular a componente da corrente produtora de fluxo, i_f^* , para o fluxo θ_f^* requerido. Pelo controle dessa corrente de campo, o fluxo é controlado;
- III. Para θ_r^* e T_e^* requerido, calcular a componente produtora de binário i_T^* . Controlando a componente do binário quando o fluxo no rotor é constante resulta em um controlo independente do binário eletromagnético;
- IV. Calcular a amplitude da corrente do estator, i_e^* , pela soma vetorial do i_T^* e i_f^* ;
- V. Calcular o ângulo do binário pelas componentes da corrente do estator, $\theta_T = \arctan \left\{ \frac{i_T^*}{i_f^*} \right\}$;
- VI. Somar θ_T e θ_f para obter a corrente no estator;
- VII. Usando a amplitude e ângulo do estator, as correntes de comando são encontradas, transformando de qdo para abc:

$$i_{as}^* = i_s^* \sin \theta_s$$

$$i_{bs}^* = i_s^* \sin \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_{cs}^* = i_s^* \sin \left(\theta_s + \frac{2\pi}{3} \right)$$

- VIII. Essas correntes são aplicadas ao motor produzindo o fluxo e binário requeridos.

5. CONSIDERAÇÕES NA INTERAÇÃO REDE - VEV - MOTOR

No cenário atual são utilizados todos os meios para garantir que os recursos investidos sejam rentabilizados da melhor forma possível, otimizando-se processos e evitando-se perdas desnecessárias. A evolução de equipamentos tais como o VEV, proporcionaram uma melhoria significativa no rendimento, controle e na diminuição de custos na execução de tarefas. Contudo, estes equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares. Um sistema elétrico é dito linear quando é possível descrevê-lo mediante um conjunto de equações diferenciais lineares de coeficientes constantes. Isto significa que quando alimentado com tensões sinusoidais, as correntes dos diversos ramos serão igualmente sinusoides da mesma frequência (regime permanente). Caso tal não suceda, as correntes virão distorcidas e, assim, também as tensões de alimentação se desviarão da forma sinusoidal desejada. [29]

A geração de harmônicos pode ser considerado o maior problema relacionado com a aplicação de VEVs. Estes equipamentos perturbam e são suscetíveis de serem perturbados, sendo por isso necessário estabelecer limites para essas perturbações.

5.1. INTERAÇÃO ENTRE A REDE E O CONVERSOR

Os Harmônicos são tensões ou correntes sinusoidais cuja frequência corresponde a um múltiplo inteiro da frequência a que o sistema de alimentação está preparado para operar em condições normais de funcionamento, o que origina formas de onda distorcidas. Toda a função periódica $Y(t)$ (de frequência f) pode decompor-se numa soma de sinusoides de frequência $h \times f$ (h inteiro), onde h é a ordem harmónica ($h \geq 1$). Y_0 é o valor da componente contínua normalmente nula (valor médio). A componente de ordem 1 é a componente fundamental.

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \text{sen}(2\pi \cdot h \cdot f + \varphi_h) . \quad (37)$$

sendo o seu valor eficaz,

$$Y_{\text{ef}} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_h^2 + \dots} . \quad (38)$$

Os harmônicos são, habitualmente, medidos não individualmente, mas coletivamente tendo como denominação Taxa Global de Distorção Harmónica (THD), que consiste no valor eficaz da corrente ou tensão do somatório de todas as frequências de harmónico, dividido pelo valor eficaz da corrente ou tensão da frequência padrão utilizada como sendo o resultado da seguinte expressão:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} . \quad (39)$$

De acordo com a norma NP EN 50160, as tensões harmónicas podem também ser avaliadas de forma individual considerando a sua amplitude relativa U_h (h representa a ordem do harmónico) em relação à tensão à frequência fundamental U_1 . Os sinais harmónicos são como podemos verificar nas Tabelas Tabela 8 e Tabela 9, de ordem par ou de ordem impar e têm uma sequência que pode ser positiva, negativa ou nula. Os harmônicos frequentemente encontradas nos casos de redes trifásicas, na prática as mais incômodos, são os harmônicos de ordem ímpar pois do ponto de vista dos cabos elétricos trifásicos de Baixa Tensão (BT) verifica-se um acréscimo das perdas no condutor de retorno (neutro), pois as correntes não se anulam entre si, somando-se no neutro podendo em certos casos atingir valores elevados colocando o condutor do neutro em sobrecarga, constituindo isso um problema para a instalação e equipamentos a ela ligados. Daí que os

harmônicos múltiplos de 3ª ordem têm uma tensão relativa normalizada mais restritiva como podemos verificar na Tabela 9.

Tabela 8 - Classificação dos harmônicos quanto á ordem e á sequência [30]

Harmónico	Fundamental	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
Frequência (HZ)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabela 9 - Limites para as tensões harmónicas individuais, expressas em % da tensão nominal, de acordo com a norma NP EN 50160 [31]

Harmónicos ímpares				Harmónicos pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem h	Tensão relativa %	Ordem h	Tensão relativa %	Ordem h	Tensão relativa %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Nota: Os valores correspondentes aos harmónicos de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicados nesta tabela.

De forma geral, considera-se que o retificador do VEV produz harmônicos característicos de ordem $h = np \pm 1$ no lado CA, ou seja, na rede (p é o número de pulsos do conversor e $n = 1, 2, 3$). Assim, no caso da ponte retificadora com 6 díodos (6 pulsos), os principais harmônicos gerados são o 5ª e o 7ª, cujas amplitudes podem variar de 10% a 40% da fundamental dependendo da impedância de rede. Já para 12 pulsos (12 díodos) os harmônicos mais expressivos são o 11ª e o 13ª. Os harmônicos superiores geralmente possuem menor amplitude e por isso são mais fáceis de filtrar. [32]

Os harmônicos propagam-se na alimentação perturbando outro tipo de equipamentos e podem causar perdas suplementares e aumento de temperatura nos elementos do sistema de alimentação (máquinas, transformadores, cabos, bancos de condensadores). e também produzir interferências eletromagnéticas (IEM) que podem ser interferências irradiadas principalmente no cabo do inversor para o motor comprometendo a interação do conversor com o motor, bem como ruído nos cabos de alimentação. [30]

5.2. INTERAÇÃO ENTRE O CONVERSOR E O MOTOR

O motor de indução submetido a uma tensão PWM, proveniente de um VEV, estará sujeito a componentes de frequência acima da frequência fundamental as denominadas tensões harmônicas tal como podemos verificar na Figura 29. Dependendo da modulação PWM empregue, da frequência de comutação e de outras particularidades do controle, os harmônicos aplicados a máquinas rotativas podem causar aquecimento, vibrações, binários pulsantes ou ruído. O sobreaquecimento rotórico é o principal problema associado à distorção da tensão. As perdas nas máquinas elétricas dependem do espectro da tensão de alimentação. As perdas no núcleo podem tornar-se significativas para motores de indução alimentados por inversores que produzem harmônicos de frequências elevadas. O aumento da temperatura de funcionamento dos motores reduzirá o tempo de vida médio dos mesmos. Os harmônicos também contribuem para a geração de ruído audível. [33]

Não existe normalização quanto aos valores limites de distorção harmônica de tensão e corrente. No entanto, as normas consideram o aumento das perdas do motor devido à utilização do VEV. Por consulta a norma IEC 60034-17, esta refere que as características de desempenho das aplicações com motores de indução alimentados por conversores de frequência são influenciadas por todo o sistema, compreendendo a fonte de alimentação, o conversor, o motor, a carga mecânica e o equipamento de controle. Os métodos recomendados para a determinação do rendimento do motor estão dados na IEC 60034-2 (método de separação de perdas para motores > 150 kW e medição de entrada-saída para motores 150 kW). As perdas em vazio (incluindo as perdas suplementares) devem ser medidas se possível com o mesmo método de modulação e frequência de comutação que o conversor produzirá com plena carga. A determinação do rendimento global do sistema (motor + conversor) por medição entrada-saída é também aplicável, sob acordo entre fabricante e utilizador. Nesse caso, o rendimento do motor não poderá ser determinado separadamente. [32]

O efeito da variação de velocidade sobre o rendimento do motor pode ser entendido a partir da análise do gráfico da Figura 30 que representa a potência útil do motor alimentado por conversor em função da sua frequência de operação, um gráfico constante com o controle V/Hz já apresentado.

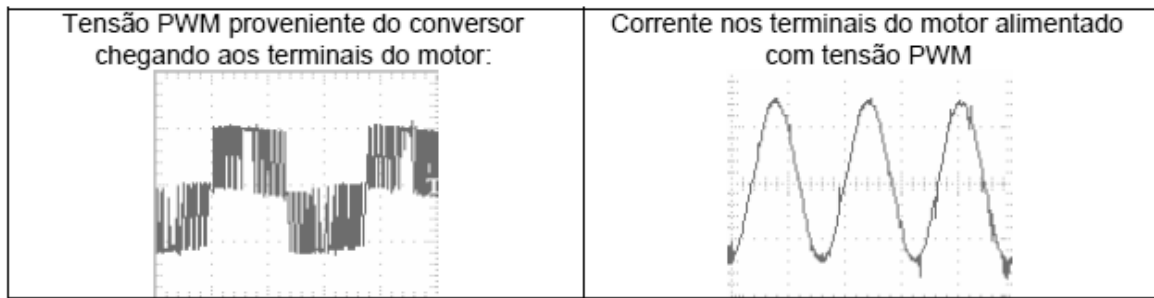


Figura 29 - Formas de onda de tensão e corrente aos terminais do motor, quando sob alimentação PWM [32]

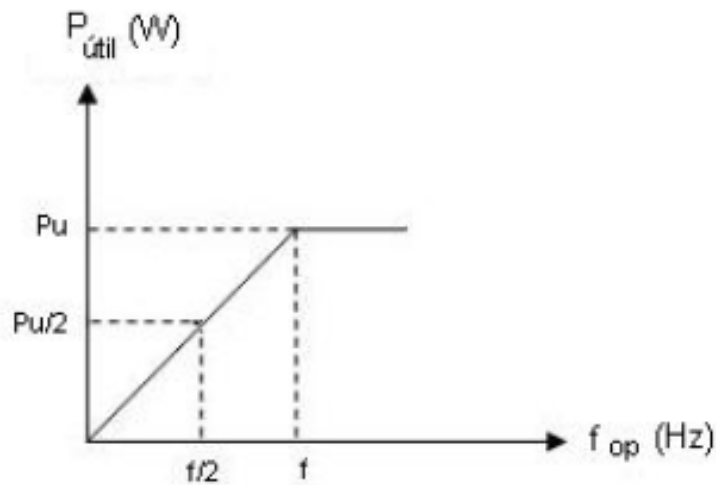


Figura 30 - Potência útil do motor alimentado por conversor em função da sua frequência de operação [32]

Se considerarmos uma diminuição da frequência, ocorrerá respectivamente uma diminuição da potência útil e da velocidade do motor. Considerando que as perdas do motor são compostas fundamentalmente pelas Perdas por Efeito de Joule que dependem da corrente ao quadrado e as Perdas no Ferro que dependem da frequência, uma diminuição da respectiva frequência diminuirá o valor das Perdas no Ferro, no entanto as Perdas por efeito de Joule praticamente se mantêm constantes para uma carga de binário constante, de modo a não haja significativa variação global das perdas. Dado que as Perdas por efeito de Joule compreendem a maior componente de perdas, podemos por isso dizer que para uma diminuição da frequência e correspondente diminuição da velocidade do motor, o rendimento elétrico do motor diminui. Este fator tem impacto assinalável na viabilidade económica do sistema Motor+VEV.

5.3. VIABILIDADE ECONÓMICA NA IMPLEMENTAÇÃO DE UM VEV

Para avaliar a viabilidade económica da implementação de um VEV num determinado motor de indução, como forma de reduzir os gastos energéticos associados, é importante entrar em linha de conta com a redução global do rendimento. Se por um lado o controlo da velocidade pode permitir poupanças energéticas bastante significativas em determinados tipos de carga (e.g. bombas e ventiladores centrífugos), o facto de tal ser conseguido por intermédio de um dispositivo que introduz perdas adicionais conduz à redução do valor dessa poupança energética. Refira-se que o próprio rendimento do VEV tende a decrescer à medida que o seu fator de carga decresce. A poupança anual, para i regimes de carga, relativamente a uma situação inicial, em que o controlo de velocidade é inexistente, pode ser dada pela Equação 40 [30]:

$$S = \sum \left[\frac{P_{iMI}}{n_{iMI}} - \frac{P_{iVEV-MI}}{n_{iVEV-MI}} \right] \times h_i \times c_i . \quad (40)$$

em que:

S representa a economia de energia (€/ano),

n_{iMI} é o rendimento do MI (decimal),

$n_{iVEV-MI}$ é o rendimento do sistema MI-VEV (decimal),

P_{iMI} é a Potência do MI sem VEV (kW),

$P_{iVEV-MI}$ é a Potência do MI com VEV (kW),

h_i são os períodos de funcionamento (horas/ano)

c_i é o custo médio do kWh para o período h (€/kWh)

Os critérios habitualmente utilizados para avaliar os investimentos são o Valor Atual Líquido (VAL) e a Taxa Interna de Rentabilidade. Relativamente ao VAL este é definido como a soma algébrica do valor atual de todos os cash flows do projeto, sendo o seu critério de aceitação $VAL > 0$, e é dada pela seguinte equação [34]:

$$\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+a)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+a)^j} . \quad (41)$$

em que:

C_j - fluxo monetário líquido no ano j

I_t - Custo do investimento

a - taxa de atualização

A taxa interna de rentabilidade (TIR) é um indicador usado para medir a rentabilidade de projetos de investimento. Quanto mais elevada for a TIR, maior a rentabilidade do projeto, e é para todos os efeitos o valor da taxa de atualização que anula o VAL, sendo o seu critério de aceitação o $TIR > \text{Taxa de atualização}$ [34].

$$\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+TIR)^j} - \sum_{j=0}^{n-1} \frac{I_j}{(1+TIR)^j} = 0 . \quad (42)$$

O fluxo monetário C_j englobará no nosso caso a economia de energia e as despesas de operação e manutenção anuais (DOM). O custo do investimento I_t é para todos os efeitos a aquisição do VEV.

6. APLICAÇÃO INFORMÁTICA

Como já foi referido, o processo usual para remover a carga térmica através da envolvente e as cargas térmicas interiores é utilizando um fluído que atravessa o espaço a climatizar, sendo os fluídos mais utilizados os de ar e água e também os fluidos frigorigéneos. O objetivo base na conceção do sistema de climatização, é pois conseguir mover as quantidades de ar e ou água necessárias, com o menor consumo de energia possível. Estando o sistema implementado de acordo com a natureza e condições do local resta-nos por isso atuar em termos da eficiência do sistema. Praticamente todos os equipamentos que fazem parte de um sistema de climatização, têm acopladas bombas centrifugas, compressores e ou ventiladores do tipo centrifugo ou axial. Como pudemos constatar os VEV's representam a técnica mais apropriada para sistemas que utilizem uma elevada gama de velocidades e necessitem de um controlo preciso dessas velocidades. Em termos de resposta, as bombas centrifugas e os ventiladores controlados por VEV podem responder a mudanças de estado de uma forma mais rápida e fiável que aqueles controlados por válvulas e dampers. Uma vez que têm a capacidade de poder igualar a velocidade do motor aos requisitos da carga, podem ser obtidas reduções significativas nos consumos, o que representa para os sistemas de climatização, uma economia de energia assinalável. Os VEVs podem também fazer os motores de indução trabalhar mais depressa que as suas gamas de velocidade normais desde que os motores possam suportar velocidades de operação mais elevadas. Como tal, os VEVs têm a capacidade de aumentar

o alcance operacional útil de compressores, bombas e ventiladores. Para muitas aplicações que são limitadas pela capacidade dos ventiladores e bombas a utilização apropriada de um VEV em conjunto com o motor pode aumentar os limites mais altos e mais baixos da gama de utilização. É por isso necessário compreender antes de mais, como variam os principais parâmetros de funcionamento de bombas e ventiladores de forma a calcular a economia de energia possível por aplicação de um VEV.

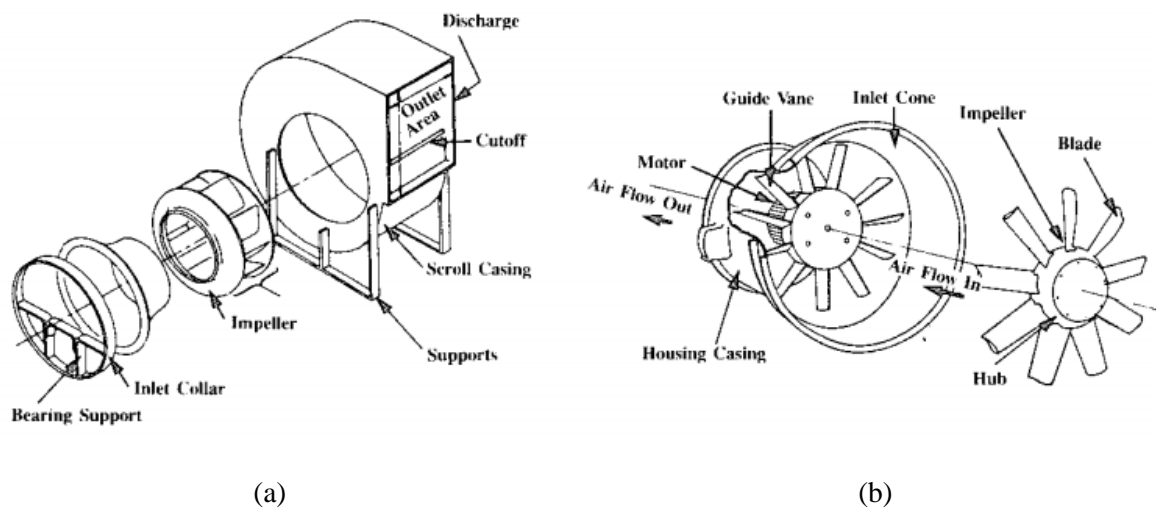


Figura 31 - Representação gráfica de um Ventilador (a) Centrifugo, (b) Axial

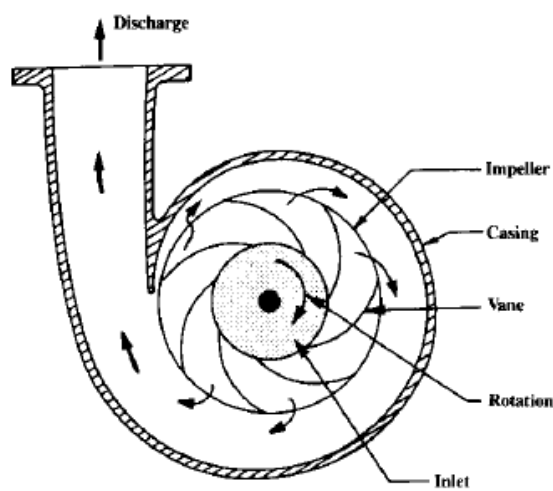


Figura 32 - Representação gráfica de uma bomba centrifuga

6.1. VENTILADORES

Nos sistemas de climatização o motor elétrico trabalha normalmente á sua potência nominal, ventilando o caudal máximo, sendo esse caudal posteriormente controlado por válvulas ou dampers. Nestes casos o motor não consegue dar resposta a situações em que a necessidade de caudal é inferior ao que realmente é preciso e por sua vez o consumo energético é irremediavelmente superior ao que é necessário. O VEV por controlo do motor elétrico, permite regular o caudal de ar necessário, consumindo este a potência estritamente necessária, permitindo assim uma economia de energia superior. A legislação atual como pudemos verificar na Tabela 6, assume a necessidade de implementação de VEVs em motores de classe IEF2 nos sistemas de Exaustão e Extração a partir de Janeiro de 2015 de forma a colmatar as perdas energéticas por falta de rendimento da instalação. No entanto o VEV além de garantir uma economia de energia superior permite um melhor controlo de todo o processo sendo um equipamento essencial para garantir a melhor performance do sistema de climatização. Para equipamentos em que o consumo da unidade de ventilação é elevado o VEV deve ser entendido como uma ferramenta quase que obrigatória. A potência consumida num ventilador dito ideal, isto é, sem perdas, é dada pela seguinte expressão [35]:

$$P_{mec} = \frac{(Q \times PTD)}{1000} . \quad (43)$$

No entanto considerando as perdas no sistema VEV-Motor-Ventilador, a expressão é dada da seguinte forma [35]:

$$P = \frac{(Q \times PTD)}{n_{iMi} \times n_{iVEV} \times n_{iVEN} \times 1000} . \quad (44)$$

em que a eficiência do ventilador pode ser obtida através da seguinte expressão [35]:

$$n_{iVEN} = \frac{P_{mec}}{P_{ven}} . \quad (45)$$

Q - Caudal, [l/s];

PTD - Pressão Total diferencial, em [Pa];

P - Potência absorvida, em [kW];

P_{mec} - Potência mecânica, em [kW];

P_{ven} - Potência consumida pelo ventilador, em [kW];

1000 - Conversão de unidades.

6.2. BOMBAS CENTRIFUGAS

A altura manométrica de uma bomba representa a altura que uma bomba consegue elevar um determinado líquido. Para situações como a demonstrada na Figura 33 em que não existe diferença geométrica entre os dois pontos de medição, a seguinte fórmula mostra a relação da pressão (p) e a altura manométrica (H):

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} \quad (46)$$

em que:

H - altura manométrica em [m];

p - pressão em [Pa = N/m²];

ρ - densidade do líquido em [kg/m³];

g - aceleração da gravidade em [m/s²];

No entanto, por norma existe diferença geométrica na altura manométrica entre os dois pontos de medição, como é caso representado na Figura 34, sendo por isso necessário compensar essa diferença. Além disso, se as dimensões de abertura dos dois pontos de medição são diferentes, este facto também afeta o cálculo da altura manométrica, passando a expressão a ser descrita da seguinte forma:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + (h_2 - h_1) + \frac{8 \times Q^2}{g \times \pi^2} \times \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right) \quad (47)$$

em que:

Q - caudal de volume em [m³/h]

D - diâmetro da porta em [mm]

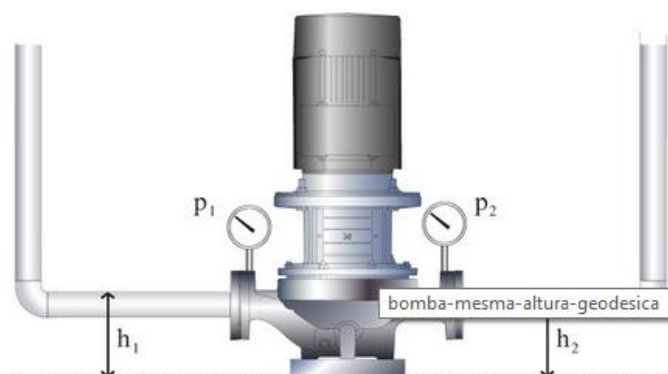


Figura 33 - Bomba com a mesma altura geométrica na medição de pressão [36]

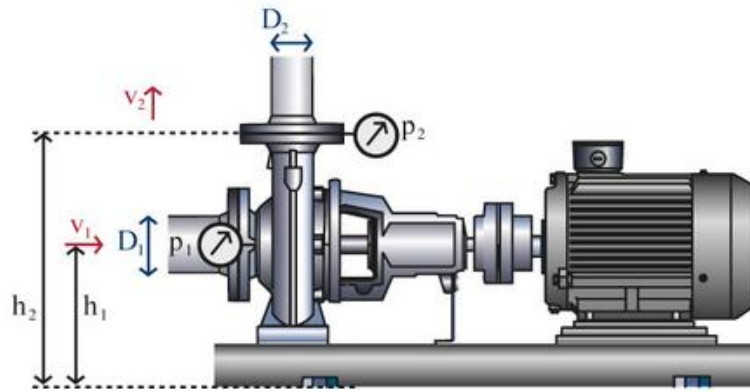


Figura 34 - Bomba com diferente altura geométrica e diferentes dimensões de abertura nos dois pontos de medição de pressão [36]

No caso das bombas centrífugas nas mesmas condições às apresentadas no caso do ventilador a potência necessária para mover um volume de água específico contra a pressão total do sistema é dada pela seguinte expressão [35]:

$$P_{mec} = \frac{(Q \times H)}{367} . \quad (48)$$

No entanto considerando as perdas no sistema VEV-Motor-Bomba, a expressão é dada da seguinte forma [35]:

$$P = \frac{(Q \times H)}{n_{iMi} \times n_{iVEV} \times n_{iBC} \times 367} . \quad (49)$$

em que em que a eficiência da bomba pode ser obtida através da seguinte expressão [35]:

$$n_{iBC} = \frac{P_{mec}}{P_{bom}} . \quad (50)$$

n_{iBC} - Eficiência da bomba centrífuga;

P_{ven} - Potência consumida pela bomba, em [kW];

A eficiência da bomba é calculada da mesma forma que vemos na situação do ventilador, alterando-se somente de 1000 para 367 por uma questão de conversão das unidades.

6.3. DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO

O interesse no desenvolvimento desta aplicação, recai sobre o conhecimento da economia de energia e viabilidade económica garantida por aplicação de um VEV num ventilador ou bomba centrífuga.

O interface com o utilizador foi desenvolvido de forma a ser o mais amigável possível. O simulador encontra-se programado em MATLAB recorrendo à ferramenta GUI (Graphical User Interface). Esta ferramenta permite a construção de ambientes interativos para o utilizador, facilitando o uso mesmo para não especialistas.

A Figura 35 ilustra o ambiente de trabalho da aplicação desenvolvida.

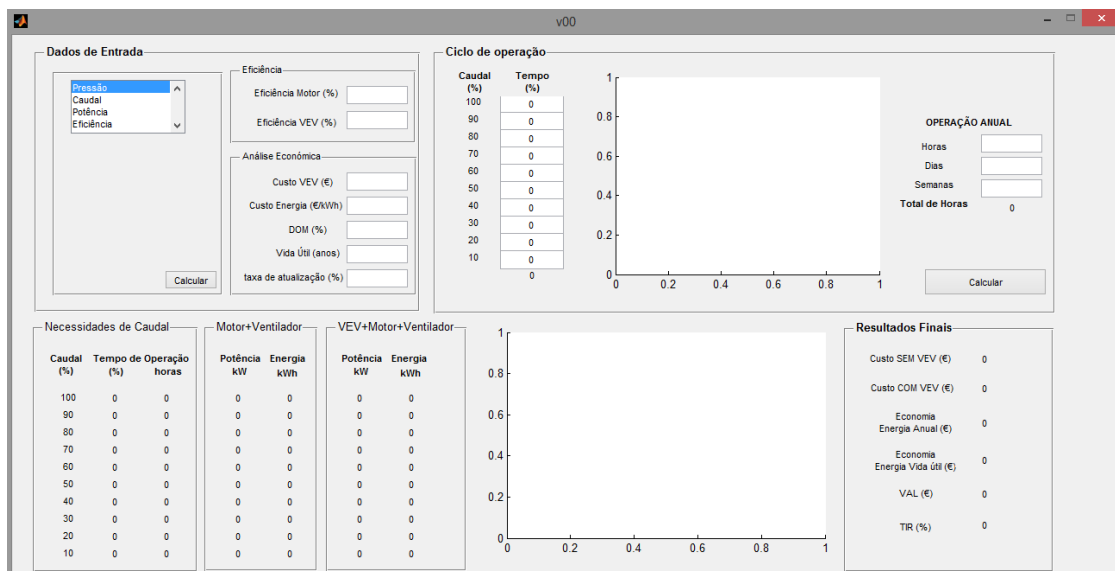


Figura 35 - Ambiente de trabalho do simulador

A aplicação é fundamentalmente dividida em quatro setores. Num primeiro estágio temos os dados de entrada. Incidindo nas fórmulas apresentadas no caso dos ventiladores e das bombas centrífugas a aplicação apresenta como dados de entrada os parâmetros representados na Figura 36. A aplicação apresenta uma listbox para seleção do parâmetro que se pretende calcular, sendo para isso aplicada a equação 43. Por exemplo se necessitarmos de conhecer o valor de caudal, este será dado em relação á potência no veio do motor, á pressão e á eficiência do ventilador. Caso queiramos conhecer o valor da potência, esta será dada em relação ao caudal, à pressão e à eficiência, e assim consecutivamente para a pressão ou a eficiência.

Dados de Entrada

Pressão Caudal Potência Eficiência	Eficiência
Pressão (Pa) <input type="text" value="2000"/>	Eficiência Motor (%) <input type="text" value="90"/>
Caudal (l/s) <input type="text" value="2000"/>	Eficiência VEV (%) <input type="text" value="98"/>
Potência (kW) <input type="text" value="4.21053"/>	Análise Económica
Eficiência (%) <input type="text" value="95"/>	Custo VEV (€) <input type="text" value="1250"/>
<input type="button" value="Calcular"/>	Custo Energia (€/kWh) <input type="text" value="0.18"/>
	DOM (%) <input type="text" value="6"/>
	Vida Útil (anos) <input type="text" value="15"/>
	taxa de atualização (%) <input type="text" value="7"/>

Figura 36 - Dados de entrada Caso Ventilador

Posteriormente o cálculo será sempre feito em relação à potência, que irá ser afetada pela eficiência do motor, a eficiência do VEV, e a eficiência do próprio ventilador tal como exposto na equação 42. Estes dados que são inseridos pelo utilizador vão influir na potência absorvida pelo sistema.

No mesmo quadro apresenta-se para inserção de dados o Custo do VEV e o custo de Energia, as despesas com operação e manutenção (DOM), a vida útil do equipamento e a taxa de atualização.

Num segundo quadro temos, o ciclo de operação que vai ser definido pelo utilizador. Nele serão inseridas as necessidades de caudal e o tempo em percentagem em que esse caudal será necessário até perfazer os 100%, pelo que o utilizador dever ter isso em consideração. Numa outra secção temos o tempo de operação dividida em horas, dias e semanas que nos dará o tempo total de operação em horas assumindo-se que será o tempo de utilização durante um ano, para posterior análise de consumos e de economia de energia durante a vida útil do sistema.

Para melhor compreensão da aplicação nas Figuras 37, 38 e 39, apresenta-se o resultado dos exemplos de inserção de valores acima indicados.

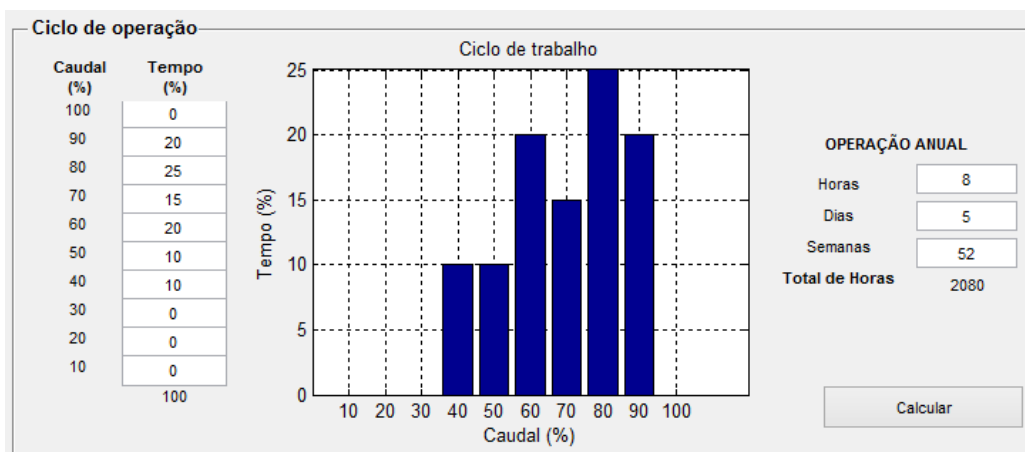


Figura 37 - Ciclo de Operação Caso Ventilador

Necessidades de Caudal			Motor+Ventilador		VEV+Motor+Ventilador	
Caudal (%)	Tempo de Operação (%)	horas	Potência kW	Energia kWh	Potência kW	Energia kWh
100	0	0	4.67837	0	4.77384	0
90	20	416	4.67837	1946.2	4.29646	1787.33
80	25	520	4.67837	2432.75	3.81907	1985.92
70	15	312	4.67837	1459.65	3.34169	1042.61
60	20	416	4.67837	1946.2	2.86431	1191.55
50	10	208	4.67837	973.101	2.38692	496.479
40	10	208	4.67837	973.101	1.90954	397.184
30	0	0	4.67837	0	1.43215	0
20	0	0	4.67837	0	0.954769	0
10	0	0	4.67837	0	0.477384	0

Figura 38 - Comparação de consumo energético trabalhando com o motor, e por aplicação do VEV
Caso Ventilador

Resultados Finais

Custo SEM VEV (€)	1751.58
Custo COM VEV (€)	1408.38
Economia Energia Anual (€)	343.2
Economia Energia Vida útil (€)	5148
VAL (€)	1192.7425
TIR (%)	20

Figura 39 - Resultado obtidos para o caso do Ventilador

Como se pode verificar a aplicação apresenta uma comparação de consumos por aplicação do VEV. Por um lado temos o consumo de potência e energia do sistema Ventilador+Motor que para todos os efeitos apresenta o mesmo consumo de potência pois o motor trabalha a volume constante. No segundo caso temos a aplicação do Sistema Ventilador+Motor+VEV, que apresenta uma variação de consumo com a alteração de caudal que vai sendo necessária.

Como resultados finais a aplicação apresenta os consumo totais com e sem a utilização do VEV, a economia de energia obtida em termos anuais e também em relação ao prazo de vida útil do equipamento sendo este definido pelo utilizador. Apresenta também o Valor atual líquido (VAL), e a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).

No caso das bombas centrífugas o procedimento é praticamente igual, apenas sendo alteradas as dimensões dos parâmetros e a componente Pressão por Altura Manométrica que é a unidade de medida nestes casos, tal como verificamos anteriormente na análise das bombas centrífugas.

Nesse sentido as figuras 40, 41 e 42 representam um exemplo de cálculo para as bombas centrífugas.

Dados de Entrada	
Altura manométrica	▲
Caudal	
Potência	
Eficiência	▼
Alt. Manométrica (m)	20
Caudal (m3/h)	40
Potência (kW)	2.22432
Eficiência (%)	98
Calcular	
Eficiência	
Eficiência Motor (%)	90
Eficiência VEV (%)	98
Análise Económica	
Custo VEV (€)	1250
Custo Energia (€/kWh)	0.18
DOM (%)	7
Vida Útil (anos)	12
taxa de atualização (%)	7

Figura 40 - Dados de entrada Caso Bomba

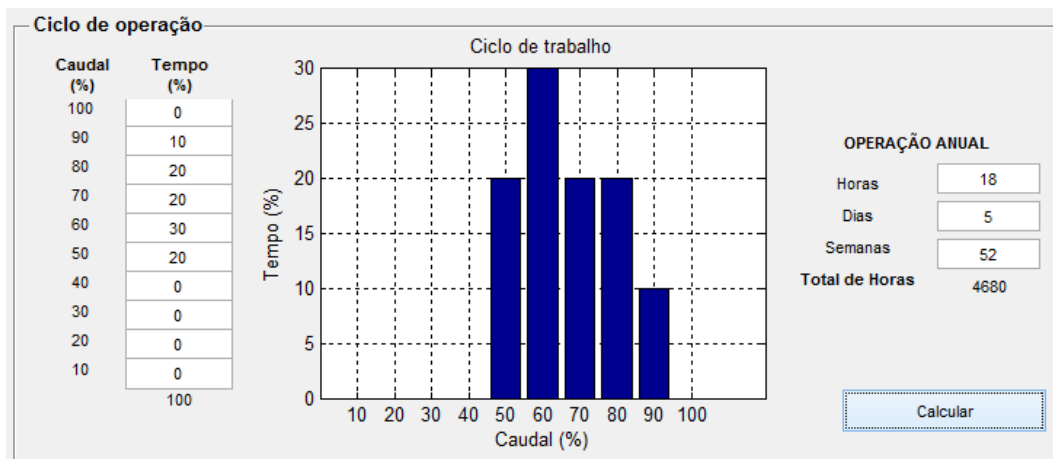


Figura 41 - Ciclo de Operação Caso Bomba

Resultados Finais

Custo SEM VEV (€)	2081.97
Custo COM VEV (€)	1613.81
Economia Energia Anual (€)	468.16
Economia Energia Vida útil (€)	5617.92
VAL (€)	1773.463
TIR (%)	29

Figura 42 - Consumo de energia Caso Bomba

7. CONCLUSÃO

O que esta dissertação tentou expor foi até que ponto é proveitosa a aplicação de VEV nos sistemas de climatização. Tomando em consideração que a legislação atual tenta a todos os níveis diminuir os consumos energéticos nesta área o VEV apresenta-se como uma ferramenta importante na obtenção de valores de economia de energia bastante significativos. O que a aplicação informática tentou demonstrar foi que dadas as fortes oscilações nas necessidades de ventilação ou mesmo no volume de caudal de água, a possibilidade regular o caudal de ar necessário, consumindo o motor a potência estritamente necessária, apresenta-se como um fator fulcral na diminuição do consumo de energia que tem afetado os edifícios e por sua vez a sociedade em geral. Obviamente que estas condições são ideais, mas permitem antever a economia de energia obtida por inserção de um VEV num sistema.

Nesta dissertação fica a faltar uma possível implementação prática que permita analisar melhor a matéria desenvolvida. Dadas as fortes potencialidades da aplicação de VEVs em sistemas de climatização AVAC, marcas como a Weg e outras têm já disponíveis no mercado VEVs próprios para implementação nesta área atendendo às diversas necessidades de aquecimento, ventilação, ar-condicionado e refrigeração. Um desses exemplos o CFW701, da mesma marca e modelo do VEV disponível no laboratório de máquinas, o CFW700 apresenta funcionalidades tais como, a função Fire Mode, Modo

bypass, Economia de energia, Proteção contra ciclos curtos, Bomba seca, Correia partida, Alarme troca de filtro, Controlador PID (principal) para controle do motor, Modo Dormir para PID Principal, Controlador PID Externo 1 e Controlador PID Externo 2.

Uma das possíveis implementações deste VEV seria o controle do ventilador de uma UTA, a partir de sensores de pressão na conduta de insuflação, ou sensores de temperatura local, permitindo variar o caudal de ar insuflado e consecutivamente a potência aos terminais do motor. Dado que esta análise experimental seria o controle de um processo em malha fechada em que o VEV iria comparar um setpoint, com a variável do processo e controlar a rotação do motor para tentar eliminar qualquer erro e manter a variável do processo igual ao setpoint, a função Regulador PID disponível no CFW700, consegue cumprir perfeitamente as condições de uma implementação desse género.

Dado que esta análise teria de levar em conta, questões tais como a equação de Darcy-Weisbach, as affinity laws ou as curvas características do ventilador, tratar-se-ia de uma melhoria significativa na fundamentação desta temática.

Referências Documentais

1. ADENE. [Online] <http://www.adene.pt/>.
2. Semana Informática. [Online] <http://www.semanainformatica.xl.pt/infra-estrutura/infra-estrutura/eficiencia-energetica-climatizacao>.
3. Emerson Industrial. [Online] <http://www.emersonindustrial.com>.
4. Energyland. [Online] http://www.energyland.emsd.gov.hk/en/appAndEquip/equipment/air_conditioning/vsd.html.
5. Roriz, Luis. Introdução aos Sistemas de Climatização Activa. [Online] <http://web.ist.utl.pt/luis.roriz/MyPage/introClimatiza.swf>.
6. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Diário da República. *Decreto-Lei n.º 118/2013*. Lisboa : s.n., 20 de Agosto de 2013.
7. McQuiston, Faye C e Parker, Jerald D. *Heating, Ventilating, and Air Conditioning Analysis and Design*. Richmond, TX, U.S.A. : Wiley, 1993.
8. Machado, Tiago Daniel Rodrigues Maia. *Desempenho e eficiência de sistemas de climatização hospitalares em edifícios existentes*. Porto : FEUP, 2013.
9. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Diário de República. *Portaria n.º 349-B/2013*. Lisboa : s.n., 29 de Novembro de 2013.
10. Diário da República. *Portaria n.º 349-D/2013*. Lisboa : s.n., 2 de Dezembro de 2013.
11. Carvalho, José Beleza e Brandão, Roque Filipe. Accionamentos Eficientes de Força Motriz. Nova Classificação. *Neutro À Terra*. 2010.

12. Siemens. A giant step towards an energy-efficient future. *Siemens*. [Online] [Citação: 15 de Maio de 2014.] http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/industry/idt/low-voltage_induction_motors.pdf.
13. WEG. Programas para Eficiência Energética. *WEG*. [Online] [Citação: 24 de Julho de 2014.] http://www.weg.net/green/_files/Diretivas-Globais-de-Eficiencia-Energetica_-_Apresentacao.pdf.
14. Matias, José Vagos Carreira. *Máquinas Eléctricas de Corrente Alternada*. Lisboa : Didáctica Editora, 1997.
15. Paiva, José Pedro Sucena. *Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica*. s.l. : IST Press, 2011.
16. Costa, José Dores. *Apontamentos de Máquinas Eléctricas*. 2010.
17. L.Bessonov. *Electricidade Aplicada para Engenheiros*. Porto : Edições Lopes da Silva, 2000.
18. Alves, Mário Ferreira. *ABC das Máquinas Eléctricas*. s.l. : ISEP, Março de 2003.
19. Freire, Olivia. [Online] 2013. http://prezi.com/6h54_1gaeuyo/caracteristicas-dos-motores-de-alto-rendimento/.
20. Paiva, José Eduardo Monney de Sá. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. [Online] 02 de Setembro de 2014. http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/eduardop/MqE/mqe_acetatos.htm#maqassinc.
21. EDP. [Online] 2014. https://energia.edp.pt/pdf/pme/MotoresAltoRendimento_EDP_PME.pdf.
22. Motor Control. [Online] <http://www.motorcontrol.pt/>.
23. K.Bose, Bimal. *Modern Power Electronics and AC Drives*. s.l. : Prentice Hall PTR, 2002.
24. Anibal Almeida, Fernando Ferreira, Paula Fonseca. *VSD for electric motor systems*. 2001.

25. Trust, Carbon. Variable speed drives. *Introducing energy saving opportunities for business*.
26. Passos, Lucio Sanchez. *Desenvolvimento de Aplicações Industriais Baseadas na Integração de Sistemas de Corte e Proteção e Variação de Velocidade*. Porto : s.n., 2009.
27. Franchi, Claiton Moro. *Inversores de Frequência, Teoria e Aplicações*. São Paulo : Editora Érica Ltda, 2010.
28. Krishnan, R. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001.
29. Silva, Henrique Jorge de Jesus Ribeiro da. Harmónicos em Instalações Eléctricas - Causas, efeitos e normalização. *Neutro à Terra*. Outubro de 2008.
30. Barata, Nuno Alexandre. *Ferramentas de Estimativa de Poupança Energética em Motores Industriais com Variadores de Velocidade*. Porto : s.n., 2012.
31. Dias, Fernando Mauricio Teixeira De Sousa. Sebenta Unidade Curricular de Qualidade de Serviço em Sistemas Eléctricos de Energia. *Qualidade da Tensão*. Porto : ISEP.
32. Pires, Waldiberto de Lima. *Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM*. s.l. : Weg Equipamentos Eléctricos S.A. – Divisão Motores, 2006.
33. schneider electric. schneider electric. [Online] <http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>.
34. Castro, Rui M.G. *Introdução à avaliação económica de investimentos*. Lisboa : INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO , 2003.
35. Energy, Mines and Resources Canada. *Fans and Pumps*. 16 de 10 de 2014.
36. Hidraulicart. [Online] 2014. <http://www.hidraulicart.pt/>.
37. Santos, Joana Carvalho dos. *Avaliação da qualidade do ar em jardins de infância*. Porto : FEUP, 2010.
38. McDowall, Robert. *Fundamentals of HVAC Systems*. s.l. : Elsevier, 2006.

39. Aníbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira, Paula Fonseca, Fernando Oliveira. *Considerações Técnico-Económicas sobre Variadores Electrónicos de Velocidade*.
40. Subida, António. Montagem e Conservação de Componentes Eléctricos em AVAC. <http://electricidade.com.pt>. [Online] [Citação: 26 de Maio de 2014.] <https://cld.pt/dl/download/1d3e2726-5a73-45a7-bc2f-7a2f418b932e/TUTORIAL%20SISTEMAS%20ELETRICOS%20AVAC.pdf>.
41. M.Kostenko e L.Piotrovski. *Máquinas Eléctricas de Corrente Alternada Volume II*. Porto : Edições Lopes da Silva, 1979.
42. Guedes, Manuel Vaz. O Motor de Indução Trifásico seleção e aplicação. s.l. : FEUP, Novembro de 1994.
43. Borges, André Emanuel de Andrade Cardoso. Estudo e Optimização Energética dos Novos Centros Comerciais à Luz da Nova Regulamentação. Porto : s.n., Novembro de 2007.
44. Chaves, Flávio. Instalações de Climatização e Refrigeração. s.l. : Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, 2009.
45. Correia, Paulo Jorge de Figueiredo. O Impacto dos Problemas de Qualidade de Energia em Instalações Eléctricas - O Caso Particular das Perturbações Harmónicas. Coimbra : Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade de Coimbra, Janeiro de 2007.
46. Monteiro, Victor. *Ventilação na Restauração e Hotelaria*. s.l. : LIDEL, 2009.
47. *VSDs and Their Effect on System Components*. TRANE. 2011. Trane Engineers Newsletter LIVE! Series.
48. WEG. *Inversor de Frequência CFW700 - Manual de Programação e Manutenção*. 2011.
49. Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República. *Decreto-Lei n.º 79/2006*. Lisboa, Portugal : s.n., 4 de Abril de 2006.

50. Piovani Chillers. [Online] 2014.
<http://www.piovanchillers.com/Ecosmart/pt/tecnologia/bomba-d--gua-de-processo-controlado-por-inversor>.
51. Ecocasa. [Online] http://ecocasa.pt/construcao_content.php?id=23.
52. Ecotreecity. [Online] <http://www.ecotreecity.com/>.
53. The Engineering Toolbox. [Online] 2014. <http://www.engineeringtoolbox.com/>.
54. ABB. Technical guide No. 4. *Guide to variable speed drives*. 12 de Maio de 2011.
55. Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República. *Decreto-Lei n.º 118/2013*. 2013.
56. M.S.Francisco, António. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. [Online] http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20el%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf.
57. MotorControl. [Online] <http://www.motorcontrol.pt/index.php?id=430>.
58. Soler Palau &. [Online] 2014. <http://www.solerpalau.pt/>.
59. Sousa, João. O paradigma da eficiência energética dos edifícios. [Online] http://www.edificioseenergia.pt/contents/artigorevista/opinia-and-771o_oet.pdf.