

**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



## **Avaliação do Aumento da Eficiência Energética de uma Central de Frio**

**Ricardo Alexandre Costa Carreira Filipe**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientador: Professor José Luís Rosa de Almeida

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Cardoso Igreja

Vogais:

Professor José Luís Rosa de Almeida

Professor Victor Manuel Fernandes Mendes



**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**

## **Avaliação do Aumento da Eficiência Energética de uma Central de Frio**

**Ricardo Alexandre Costa Carreira Filipe**  
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientador: Professor José Luís Rosa de Almeida

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Cardoso Igreja

Vogais:

Professor José Luís Rosa de Almeida

Professor Victor Manuel Fernandes Mendes

## RESUMO

---

Com a elaboração deste trabalho é demonstrado que a utilização eficiente da energia elétrica em equipamentos de produção de frio poderá proporcionar grandes benefícios económicos e ambientais na medida em que os custos associados ao aumento de eficiência são inferiores aos da produção de mais energia.

Numa fase inicial é efetuada uma descrição teórica sobre o princípio de funcionamento do motor de indução e também dos variadores eletrónicos de velocidade. Nesta fase procedeu-se também ao levantamento dos principais planos e protocolos existentes a nível nacional, europeu e mundial para a implementação dos programas de aumento da eficiência energética das instalações.

Na fase posterior foram analisados os consumos energéticos da instalação frigorífica da empresa Gelpixe, com vista a elaboração de um estudo que promova o aumento da eficiência energética da empresa.

Verificou-se, todavia, que para aumentar a eficiência energética de uma instalação é necessário efetuar um estudo detalhado e rigoroso dos sistemas onde serão introduzidos os equipamentos a adquirir, visto que nalguns casos o investimento é significativo, sendo expectável e desejável recuperar o valor despendido no menor tempo possível.

Para tal foram realizadas simulações em *Matlab/Simulink*, com a finalidade de verificar se é possível poupar energia na central frigorífica em análise.

No seguimento das simulações conclui-se que a introdução dos variadores irá aumentar a eficiência energética da referida central frigorífica em cerca de 7% com um payback de 20 meses.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

Como resultado fica comprovado que a introdução dos variadores configura uma mais-valia no aumento da eficiência energética das instalações elétricas, apesar deste valor ser dependente dos equipamentos e processos.

**Palavras-chave:** eficiência energética, energia, consumo, variadores eletrônicos de velocidade, motor de indução.

## **ABSTRACT**

---

This work to demonstrate that the efficient use of electrical energy by cold producing equipments can bring economic and environmental benefits, since the costs of increasing the efficiency are lower than those of consuming more energy.

Firstly, we present a theoretical description of the induction motor working principle and of the electronic speed drive. We also proceeded to the identification of major plans and protocols at global, european and national level concerning the implementation of programs to increase facilities' energy efficiency.

Afterwards, we analyzed energy consumption of the refrigeration equipment of the company Gelpixe, in order to elaborate a study that can promote increased energy efficiency.

However, to increase the energy efficiency of a facility it is necessary to make a detailed and rigorous study of the systems, considering the value of the equipment to be purchased, knowing that, in some cases, the investment is significant and that it is expected and desirable to achieve the shortest payback.

So simulations were performed in *Matlab / Simulink*, in order to analyse if it is possible to save energy in the central refrigerating under review.

Considering the simulations we conclude that the introduction of variable speed drive will increase around 7% the energy efficiency of the mentioned refrigerating plant, with a payback of 20 months.

Thus it is confirmed that the introduction of variable speed drive is a sure option in increasing the energy efficiency of electrical installations.

**Keywords:** energy efficiency, energy, consumption, electronic drives of velocity, induction motor.

## AGRADECIMENTOS

---

A realização desta dissertação de mestrado é o culminar de um objetivo pessoal e a conclusão de mais uma etapa da minha formação académica. Contudo, a sua realização só foi possível com a ajuda e empenho de algumas pessoas, às quais deixo um sentido e profundo agradecimento.

Dirijo um especial agradecimento ao meu orientador, Engenheiro José Luís Rosa de Almeida, também meu professor na Licenciatura, por ter aceite este desafio, pela confiança e incentivos e pela total disponibilidade que sempre demonstrou. O seu apoio foi determinante na elaboração desta Dissertação.

À Área Departamental de Engenharia e Sistemas de Potência e Automação (ADESPA) e à Secção de Máquinas Elétricas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), em especial ao Engenheiro Paulo Almeida, pela sua disponibilidade e colaboração na realização deste trabalho.

Aos Colegas e Professores do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa que me apoiaram e ajudaram a concluir este ciclo da vida académica.

À Administração da Gelpex e ao Departamento de Manutenção, por me terem proporcionado as condições necessárias para realização de todo o trabalho de investigação.

Aos Meus Amigos, em especial ao António Lourenço, por toda a camaradagem e partilha de bons momentos e apoio incondicional que me prestou ao longo destes últimos anos.

À Minha Família, o meu agradecimento por acreditarem sempre em mim e pelos valores e ensinamentos que me transmitiram, que em muito definem aquilo que hoje sou.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

À Mónica, minha esposa, pelo apoio e compreensão diária, pela motivação e alento que sempre me inculuiu, pelas palavras de força e pelo afecto e amizade que há muito partilhamos. Por tudo, a minha sincera e profunda gratidão.

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

AC	Corrente alternada ( <i>Alternating Current</i> )
A	Ampere
ADENE	Agência para a Energia
CEMEP	Comité Europeu de fabricantes de máquinas elétricas e de sistemas eletrônicos de potência
CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão
CE	Comissão Europeia
Comp.	Compressor
DC	Corrente contínua ( <i>Direct Current</i> )
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FER	Fontes de energia renovável
GEE	Gases de efeito estufa
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MAR	Motor de alto rendimento
IAPMEI	Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação
rpm	Rotações por minuto
VEV's	Variadores eletrônicos de velocidade
V	Volt
UE	União Europeia
ECO-AP	Programa de Eficiência Energética na Administração Pública
PPEC	Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAC	Plano Nacional para as Alterações Climáticas

---

## ÍNDICE

---

Resumo .....	I
<i>Abstract</i> .....	III
Agradecimentos .....	IV
Lista de Abreviaturas.....	V
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização e conteúdos .....	3
<b>2. Sistemas Elétricos .....</b>	<b>5</b>
2.1. Motores elétricos na Indústria.....	5
2.2. Otimização de motores .....	8
2.3. Motores de alto rendimento .....	9
2.3.1. Generalidades .....	9
2.3.2. Análise económica.....	11
2.4. Variadores Eletrónicos de velocidade.....	12
2.4.1. Generalidades .....	12
2.4.2. Modelo de controlo dos variadores .....	16
2.4.3. Análise económica.....	22
<b>3. Eficiência energética .....</b>	<b>24</b>
3.1. Protocolo de Quioto .....	24
3.1.1. Protocolo de Quioto na União Europeia.....	25
3.2. Consumos de energia na União Europeia .....	26
3.3. Eficiência energética: vantagens .....	27
3.4. Programas de eficiência energética criados em Portugal .....	28
3.4.1. ECO-AP .....	28
3.4.2. PPEC (2011-2012).....	29
3.4.3. PNAC.....	29
3.5. Enquadramento de Portugal para Eficiência Energética .....	30
3.5.1. Estratégia Nacional para a Energia 2020 .....	32
3.5.2. Objetivos da Estratégia Nacional para a Energia 2020.....	34
3.5.3. PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética .....	36
<b>4. Eficiência energética na empresa Gelpixe .....</b>	<b>38</b>
4.1. Generalidades .....	38
4.2. Aumento da eficiência energética na central de ar comprimido.....	38
4.3. Eficiência energética na central frigorífica .....	43
4.3.1. Instalação frigorífica a 3 tubos .....	43

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

4.3.2. Alteração da instalação frigorífica a 3 tubos para 4 tubos .....	46
4.3.3. Funcionamento da instalação frigorífica .....	47
4.3.4. Princípio de funcionamento da instalação frigorífica utilizando Amoníaco (R717) .....	50
4.3.5. Funcionamento de um evaporador com descongelamento por gás quente .....	52
4.4. Compressores de Amoníaco .....	55
<b>5. Estudo para a Implementação do aumento da eficiência energética.....</b>	<b>58</b>
5.1. Motores de alto rendimento .....	58
5.2. Princípio de funcionamento da central.....	60
5.3. Soluções para a otimização da compressão .....	64
5.4. Simulação em Matlab/Simulink.....	66
5.4.1. Simulação tendo em conta opção 1 do capítulo 5.3 .....	69
5.4.2. Simulação tendo em conta opção 2 do capítulo 5.3 .....	73
5.4.3. Conclusões das simulações .....	76
<b>6. Conclusões .....</b>	<b>78</b>
<b>7. Bibliografia.....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Consumo de energia dos motores elétricos na Industria Portuguesa.....	5
Figura 2: Motor de Indução .....	6
Figura 3: Motor de Corrente Contínua.....	6
Figura 4: Balanço de um sistema energético .....	8
Figura 5: Classificação dos motores de indução.....	10
Figura 6: Rendimentos dos motores de indução.....	10
Figura 7: Constituição de um variador.....	16
Figura 8: Motores elétricos.....	20
Figura 9: Variadores de velocidade.....	21
Figura 10: Distribuição do mercado europeu de VEV's, entre os anos de 1998 e 2002 .....	22
Figura 11: Metas da União Europeia.....	33
Figura 12: Estratégia Nacional para a Energia 2020.....	35
Figura 13: Compressor de ar.....	38
Figura 14: Esquema da central frigorífica .....	44
Figura 15: Horário do ciclo semanal Verão .....	45
Figura 16: Horário do ciclo semanal Inverno.....	45
Figura 17: Molécula de Amoníaco.....	48
Figura 18: Diagrama PH com a linha de saturação e regiões de diferentes fases.....	48
Figura 19: Diagrama com estados do amoníaco.....	49
Figura 20: Diagrama de temperaturas de trabalho do amoníaco .....	49
Figura 21: Diagrama do circuito de frio .....	51
Figura 22: Esquema de válvulas do evaporador .....	54
Figura 23: Compressor Grasso série RC 12 .....	55
Figura 24: Motor de alto rendimento ABB .....	58
Figura 25: Planta de refrigeração da Gelpex .....	60
Figura 26: Circuito da baixa pressão.....	61
Figura 27: Circuito da média pressão.....	61

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

Figura 28: Compressor da baixa pressão .....	62
Figura 29: Relação da velocidade máxima e mínima.....	64
Figura 30: Configuração com a relação igual a 1 .....	65
Figura 31: Esquema de simulação em Simulink (sem variação).....	67
Figura 32: Esquema de simulação em Simulink (com variação).....	67

## ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

---

### TABELAS

Tabela 1: Classificação CEMEP-CE da eficiência dos motores elétricos.....	9
Tabela 2: Comparação de consumos entre motores de classe .....	11
Tabela 3: Variação de Velocidade-Parâmetros .....	13
Tabela 4: Emissões de CO <sub>2</sub> em Portugal e na EU-15 .....	31
Tabela 5: Prioridades para as metas 2020.....	35
Tabela 6: Resumo do ciclo de funcionamento anual.....	40
Tabela 7: Ciclo de funcionamento em 10 minutos.....	40
Tabela 8: Resumo da poupança energética com a introdução do variador .....	42
Tabela 9: Resumo do ciclo do funcionamento em vazio .....	43
Tabela 10: Consumo de energia e custos do compressor de 37kW .....	46
Tabela 11: Custos energéticos associados ao compressor de 37kW .....	47
Tabela 12: r.p.m. motor vs compressor (dados do fabricante) .....	55
Tabela 13: r.p.m.vs volume .....	56
Tabela 14: Compressão por escalões.....	57
Tabela 15: Poupança de um motor de alto rendimento.....	59
Tabela 16: Rotações máximas e mínimas com variação .....	65
Tabela 17: Potência e preços dos variadores a colocar nos compressores.....	65
Tabela 18: Resumo dos valores de tensão e da curva característica V/F....	69
Tabela 19: Resumo das simulações .....	76
Tabela 20: Resumo do ciclo de funcionamento.....	77
Tabela 21: Poupança espectável com a introdução dos variadores e o seu payback .....	77

### QUADROS

Quadro 1: Objetivos e metas da Estratégia Nacional para a Energia 2020.....	34
--	----

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 1: Relação entre a Tensão e Frequência.....	15
Gráfico 2: Relação entre o Torque e a Frequência .....	15
Gráfico 3: Relação entre a Potência e a Frequência.....	16
Gráfico 4: Potência instalada das centrais de produção de energia elétrica a partir de FER em 2009.....	26
Gráfico 5: Recursos energéticos na União Europeia.....	27
Gráfico 6: Intensidade energética de economia na UE .....	30
Gráfico 7: Evolução da pressão ao longo do tempo.....	41
Gráfico 8: Evolução da corrente ao longo do tempo .....	42
Gráfico 9: Relação entre o volume comprimido e consumo elétrico.....	56
Gráfico 10: Relação entre a velocidade e o volume comprimido.....	57
Gráfico 11: Gráfico de pressões no circuito da baixa pressão .....	62
Gráfico 12: Gráfico de pressões no circuito da média pressão .....	63
Gráfico 13: Evolução da velocidade no arranque do motor sem variação ...	68
Gráfico 14: Evolução da velocidade no arranque do motor com variação ...	68
Gráfico 15: Curvas características V/F .....	69
Gráfico 16: Corrente da curva V/F=8 no motor de 37kW .....	70
Gráfico 17: Corrente da curva V/F=9 no motor de 37kW .....	71
Gráfico 18: Corrente da curva V/F=8 no motor de 75kW .....	71
Gráfico 19: Corrente da curva V/F=9 no motor de 75kW .....	72
Gráfico 20: Evolução da compressão com variação na baixa pressão .....	73
Gráfico 21: Evolução da compressão com variação na média pressão .....	73
Gráfico 22: Corrente da curva V/F=8 no motor de 37kW .....	74
Gráfico 23: Corrente da curva V/F=9 no motor de 37kW .....	74
Gráfico 24: Corrente da curva V/F=8 no motor de 75kW .....	75
Gráfico 25: Corrente da curva V/F=9 no motor de 75kW .....	75

## **1. Introdução**

---

No primeiro capítulo são apresentados os objetivos e a motivação para estudo do aumento da eficiência energética de uma central de frio industrial.

No terceiro capítulo será efetuado um resumo dos planos de eficiência energética quer a nível mundial quer a nível nacional, onde foram colocadas metas a que os países se comprometeram em atingir.

No quinto capítulo será efetuado um estudo para verificar se a introdução de variadores eletrónicos de velocidade é uma mais-valia no acionamento dos motores dos compressores da central frigorífica.

Também é apresentada e descrita a organização desta dissertação e é efetuado um breve e ligeiro resumo de cada capítulo.

### **1.1. Motivação**

A energia elétrica, assim como outras formas de energia, não podem ser criadas nem destruídas, apenas transformadas. Presentemente, são ainda utilizados muitos métodos ineficientes de transformação de energia elétrica, métodos esses que desperdiçam e deixam de aproveitar parte da energia que se pretende utilizar.

Na atualidade, percebe-se que produzir mais energia para compensar aquela que se desperdiça tem um custo mais elevado do que maximizar aquela que já se encontra disponível. Além disso, contribuir para a preservação do meio ambiente não é mais somente uma bandeira ideológica, mas sim uma necessidade. A humanidade tem percebido cada vez mais o custo de uma degradação desordenada e insustentável através das alterações climáticas, da extinção de espécies e da qualidade da água.

Por sua vez, a conservação da energia elétrica evita a necessidade de ampliar a oferta de energia elétrica e as conseqüentes degradações ambientais associadas ao aumento desta oferta.

Com a elaboração deste trabalho pretende-se demonstrar que a utilização eficiente da energia elétrica poderá trazer grandes benefícios económicos e ambientais, efetuando-se para tal uma descrição detalhada dos sistemas onde serão introduzidos os equipamentos que permitem melhorar a eficiência da instalação em análise.

Na perspetiva da empresa consumidora de energia elétrica, os novos usos e a melhoria da eficiência energética estão correlacionados com os investimentos na substituição dos equipamentos menos eficientes por equipamentos novos e mais eficientes. A grande dificuldade para a realização de substituições como esta, está na informação, que o consumidor geralmente não tem, sobre quanto economizará de energia elétrica, e no custo, que nem sempre se mostra retornável em pouco tempo. Há casos de extremo desperdício onde certamente as modificações pagarão os investimentos em pouco tempo, mas também haverá modificações que dependem de incentivos tarifários para atrair o consumidor.

## **1.2. Objetivos**

O caso em estudo considera a central frigorífica da empresa Gelpixe S.A., integrada no complexo industrial. Esta central frigorífica tem uma potência elétrica total de 420kW e é constituída por seis compressores de frio a amoníaco, operando com dois níveis de pressão e temperatura, um a -33°C e a uma pressão de 1,10 bar e o outro a -6°C a uma pressão de 3,40 bar para garantir as temperaturas necessárias aos diferentes espaços climatizados e congelados.

- Circuito de baixa pressão – temperatura de evaporação -33°C e condensação -6°C, alimenta os evaporadores das câmaras de congelados. Dispõe de três compressores semelhantes acionados por três motores com 37kW de potência nominal.

- Circuito de média pressão – temperatura de evaporação  $-6^{\circ}\text{C}$  e condensação  $+35^{\circ}\text{C}$ , alimenta as serpentinas dos bancos de gelo. Dispõe de três compressores semelhantes acionados por três motores com 75kW de potência nominal.

Existem várias técnicas de otimização energética. Por conseguinte, a escolha da solução ideal implica uma análise detalhada do modo de funcionamento da central frigorífica, para avaliar os limites da aplicabilidade das soluções e da avaliação económica para a instalação de VEV's. No caso dos variadores de velocidade é importante distinguir se o sistema é controlado pelo aumento de carga ou pelo pedido de refrigeração do sistema, sendo que, nestes casos, uma alteração do ponto de funcionamento poderá levar à variação significativa do rendimento da central frigorífica.

### **1.3. Organização e conteúdos**

Esta dissertação esta organizada em seis capítulos, sendo eles: 1 – Introdução, 2 – Sistemas elétricos, 3 – Eficiência energética, 4 – Implementação do protótipo experimental, 5 – Resultados de simulação e experimentais, 6 – Conclusões.

No capítulo 1, *Introdução*, é efetuada uma descrição geral do principal tema abordado, qual a sua motivação, os seus objetivos principais e a organização dos conteúdos.

No capítulo 2, *Sistemas elétricos*, é efetuada a explicação dos sistemas elétricos utilizados durante a realização deste trabalho, nomeadamente o motor de indução e os variadores eletrónicos de velocidade.

No capítulo 3, *Eficiência Energética*, é efetuada a descrição dos principais protocolos e planos que promovem o aumento da eficiência energética a nível nacional, europeu e mundial. Todos estes protocolos e planos visam estimular e criar regras para que os países obtenham melhorias de eficiências.

No capítulo 4, *Eficiência energética na empresa Gelpeixe*, é efetuada a explicação dos sistemas onde já foram implementados equipamentos que reduziram o consumo de equipamentos existentes tais como a introdução do variador na central de ar comprimido, a instalação do quarto tubo na central frigorífica e a utilização dos motores de alto rendimento.

No capítulo 5, *Estudo para a Implementação do aumento da eficiência energética*, é efetuada a análise e comparação dos resultados obtidos em simulação numérica com os dados medidos na máquina.

No capítulo 6, *Conclusões*, é efetuado um resumo de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação realçando as diversas conclusões obtidas.

## 2. Sistemas Elétricos

---

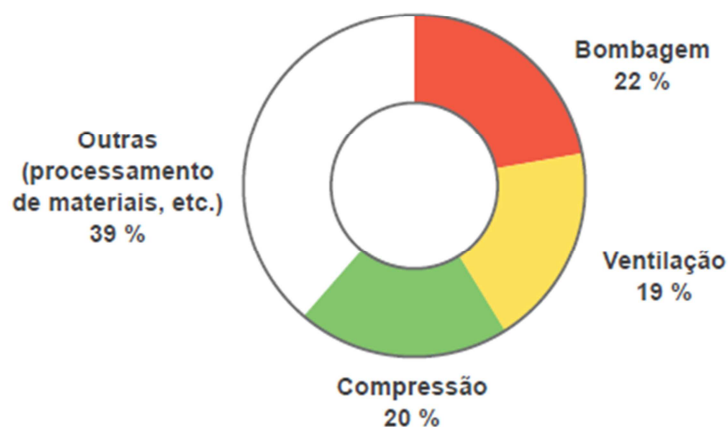
### 2.1. Motores elétricos na indústria

Da variedade de motores disponíveis, os motores elétricos são os mais utilizados pois combinam as vantagens da utilização da energia elétrica:

- Transporte fácil;
- Várias potências disponíveis;
- Limpeza e simplicidade de comando;
- Construção simples e robusta;
- Grande versatilidade de adaptação às mais diversas cargas.

Na União Europeia, estes equipamentos elétricos são os mais utilizados a todos os níveis da indústria, usando cerca de 70% da energia elétrica total consumida na indústria. Em Portugal representam uma percentagem de 70% do consumo energético nas indústrias e de 30% do consumo total do País.

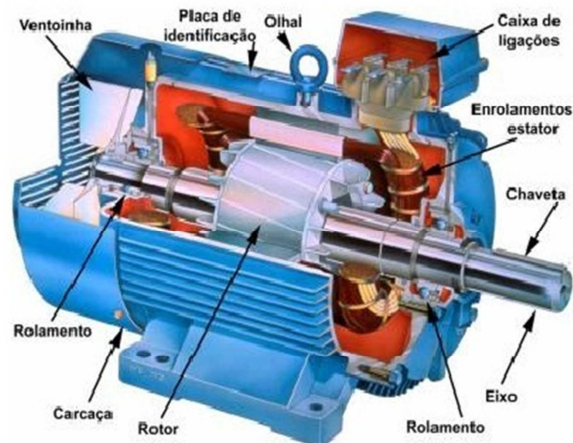
A Figura 1 demonstra como é efetuada a utilização dos motores elétricos na indústria portuguesa. Como se pode constatar os sistemas de movimentação de fluidos (sistemas de bombagem, ventilação e compressão de ar) representam 61% do consumo elétrico dos motores industriais.



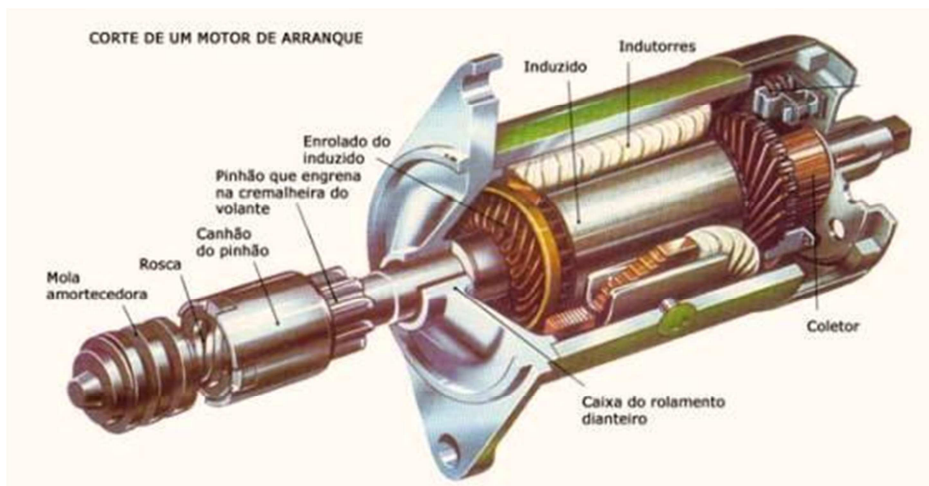
**Figura 1:** Consumo de energia dos motores elétricos na indústria portuguesa

## AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CENTRAL DE FRIO

Os motores elétricos são máquinas elétricas muito versáteis que se destinam a transformar a energia elétrica em energia mecânica, podendo ser alimentados em corrente alternada ou contínua. Por sua vez, os motores de corrente alternada são divididos em duas categorias: síncronos e assíncronos (de indução).



**Figura 2: Motor de Indução**



**Figura 3: Motor de Corrente Contínua**

Os motores de corrente contínua (DC) são motores com um custo mais elevado porque necessitam de uma fonte de corrente contínua ou de dispositivo que converta a corrente alternada em contínua. Estes motores funcionam com uma velocidade variável e são precisos e fáceis de controlar.

Em regra já são pouco utilizados e apenas quando é estritamente necessário e as exigências compensam o seu custo mais elevado.

Já os motores de corrente alternada (AC) são os mais utilizados porque o transporte da energia elétrica é efetuada em corrente alterna. O princípio de funcionamento baseia-se no campo girante que surge quando um sistema trifásico de correntes alternadas é aplicado em pólos desfasados de 120°.

Os motores síncronos funcionam à velocidade de sincronismo. Têm um circuito induzido que possui um campo constante pré-definido, e com isso aumentam a resposta ao processo de arrasto criado pelo campo girante. Estes motores são utilizados quando os processos industriais necessitam de velocidades estáveis, com cargas variáveis e para grandes potências, com binário constante.

Os motores assíncronos ou de indução funcionam com uma velocidade que depende do número de polos com que são constituídos. Devido á sua grande simplicidade, robustez, baixo custo e manutenção mínima, são os mais utilizados.

Estes motores estão instalados praticamente em quase todos os equipamentos industriais, como por exemplo em bombas, ventiladores, compressores de ar, centrais frigoríficas industriais, moinhos, elevadores, tapetes rolantes, máquinas de tração, etc.

Em muitos processos industriais os motores de indução não se encontram devidamente dimensionados para os sistemas em que estão inseridos, trabalhando em regimes variáveis ao longo do tempo. Estas situações ocorrem porque os motores são normalmente sobredimensionados para os sistemas que alimentam, tais como bombas, compressores, transportadores, etc.

Assim, para aumentar a eficiência destes sistemas de potência industriais têm sido estudadas novas tecnologias que permitam colmatar essas perdas, tais como o desenvolvimento de motores de alto rendimento, o desenvolvimento da eletrónica de potência com a generalização dos variadores de velocidade e dos arrancadores suaves (*softstart*) e a otimização dos sistemas de transmissão mecânica entre o motor e equipamento.

## 2.2. Otimização de motores

Nos processos industriais, a transformação da energia elétrica em energia mecânica apresenta sempre perdas, como demonstra a figura seguinte.



**Figura 4:** Balanço de um sistema energético

As perdas associadas aos motores elétricos são calculadas através do seu rendimento,  $\eta$ , que é igual à potência mecânica ( $P_{mec}$ ) disponível no veio do motor a dividir pela potência elétrica ( $P_{el}$ ) que lhe é fornecida.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} = \frac{P_{el} - \text{perdas}}{P_{el}} \quad (2.1)$$

As perdas associadas ao motor elétrico correspondem à energia que não é convertida em trabalho útil. As perdas podem ser: perdas térmicas no cobre por efeito joule, perdas magnéticas no ferro, perdas mecânicas e perdas extraviadas.

Para melhorar a eficiência energética do conjunto dos motores elétricos podem ser tomadas medidas para minimizar as perdas energéticas inerentes, tais como:

- Substituir os motores convencionais em fim de vida por motores mais eficientes;
- Avaliar o potencial da utilização de variadores de velocidade;
- Utilizar *softstart* para evitar os picos de corrente durante os arranques;
- Garantir uma boa manutenção dos motores, com lubrificações, boa ventilação; apertos mecânicos, etc;

- Evitar o sobredimensionamento dos motores e desligar os mesmos quando não estão a ser utilizados.

## 2.3. Motores de alto rendimento

### 2.3.1. Generalidades

Os motores de alto rendimento (MAR) apresentam um aumento do rendimento e do fator de potência em relação aos motores convencionais. A melhoria de rendimento destes motores varia entre os 3% e os 4%, podendo no entanto chegar aos 8%. Este aumento da eficiência é conseguido à custa da utilização de melhores materiais, melhores acabamentos e também pela alteração das características dimensionais do motor (aumento da secção dos condutores no estator, aumento do comprimento do circuito magnético, etc.).

O Comité Europeu de fabricantes de máquinas elétricas e de sistemas eletrónicos de potência (CEMEP) e a Comissão Europeia (CE) estabeleceram um acordo voluntário firmado em 1998, um esquema de rotulagem da eficiência do motor aplicado a motores de indução trifásicos de gaiola de esquilo, 2 a 4 pólos (400V, 50Hz, tipo de funcionamento S1), com potências úteis entre 1,1 a 75kW.

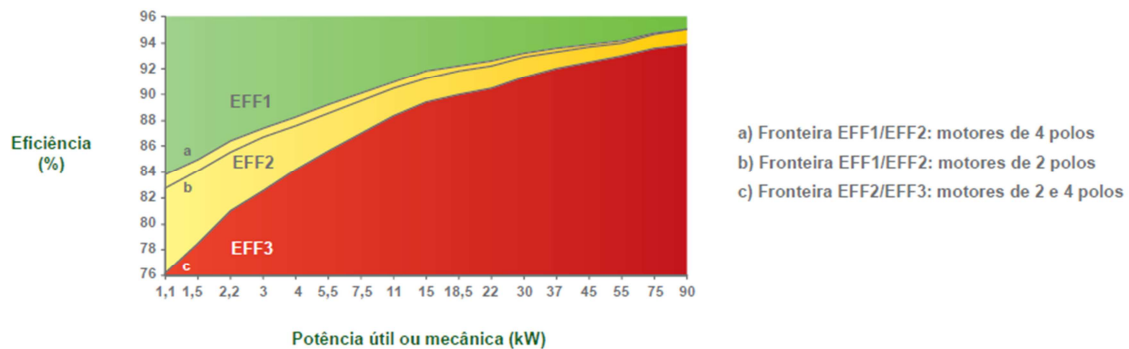
Na tabela seguinte é indicada a classificação e o esquema de rotulagem para os motores de indução.

**Tabela 1:** Classificação CEMEP-CE da eficiência dos motores elétricos

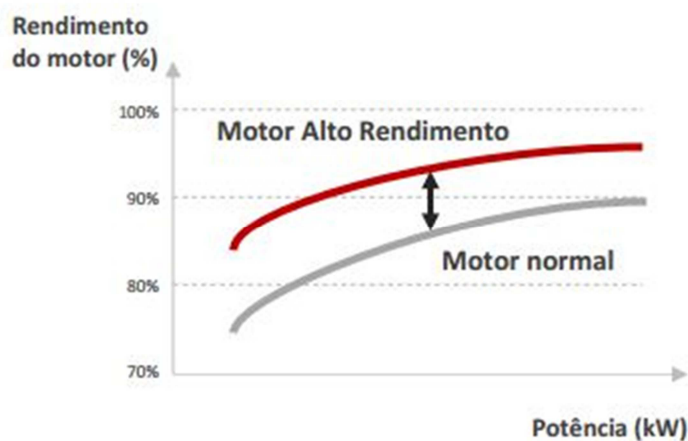
Classe de eficiência do motor	Denominação da classe
EFF3	Motores convencionais com eficiências menores
EFF2	Motores de eficiência melhorada
EFF1	Motores de alta eficiência

## AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA CENTRAL DE FRIO

Na figura seguinte apresenta-se a gama de potências abrangidas por esta classificação da eficiência dos motores das classes EFF1, EFF2, EFF3.



**Figura 5:** Classificação dos motores de indução



**Figura 6:** Rendimentos dos motores de indução

Com base na figura 6 e com a tabela 2 foi elaborado o estudo de comparação da eficiência energética com diferentes motores de várias potências num período de 4.000 horas.

Na tabela abaixo apresentada constata-se as diferenças de consumo.

**Tabela 2:** Comparação de consumos entre motores de classe

	Potência útil (kW)			
	4	22	45	75
Eficiência máxima do motor classe EFF3(%)	84,2	90,5	92,5	93,6
Consumo energético (MW.h/a)	19,0	97,2	194,6	320,5
Eficiência máxima do motor classe EFF1(%)	88,3	92,6	93,9	94,7
Consumo energético (MW.h/a)	18,1	95	191,7	316,8
Redução energética mínima (%)	4,6	2,3	1,5	1,2
Redução energética mínima (MW.h/a)	0,9	2,2	2,9	3,7

### 2.3.2. Análise económica

Os motores de alta eficiência têm uma construção mais cuidada por isso apresentam um custo adicional de cerca de 25% a 30% em relação aos motores convencionais. Face a este acréscimo deve ser sempre efetuada uma avaliação técnico-económica do investimento através de análise de custo benefício.

A avaliação económica inerente à substituição do motor convencional por um de alta eficiência é feita através do cálculo do tempo de recuperação do investimento (payback). Para o efeito utiliza-se a seguinte expressão (2.2):

$$\text{Tempo do retorno do investimento (anos)} = \frac{\Delta \text{Investimento (€)}}{\text{Economia anual (€ . a)}} \quad (2.2)$$

Em que  $\Delta \text{Investimento}$  é dado pela diferença entre o custo do motor de alta eficiência e custo de um motor convencional.

A economia anual é obtida por:

$$\text{Economia anual (€/ano)} = t C_{el} \left( \frac{P_{st}}{\eta_{st}} - \frac{P_{MAE}}{\eta_{MAE}} \right), \text{ sendo:} \quad (2.3)$$

t é o número de horas de funcionamento do motor num ano;

$C_{el}$  é o custo/preço médio da eletricidade em €/kW.h;

$P_{st}$  é a potência útil mecânica do motor standard em kW;

$\eta_{st}$  é o rendimento do motor standard (fração);

$P_{MAE}$  é a potência útil mecânica do motor de alta eficiência em kW ;

$\eta_{MAE}$  é o rendimento do motor da alta eficiência (fração).

Nas situações onde se procedeu à troca de um motor convencional por um de alta eficiência verificou-se ser a escolha acertada, visto que na maioria dos casos o investimento é amortizado em 1 a 2 anos para períodos de funcionamento de 4000h/ano e em cerca de 3 anos para 2000h/ano de funcionamento.

## **2.4. Variadores Eletrónicos de velocidade**

### **2.4.1. Generalidades**

Os variadores eletrónicos de velocidade (VEV's), também conhecidos por variadores de frequência, substituem com enormes vantagens todos os sistemas até agora utilizados para o arranque dos motores de indução, visto que dispõem de um grande número de variáveis que é possível ajustar, nomeadamente, o binário de arranque, tempo de arranque, tempo de paragem, velocidade de trabalho consoante a necessidade pretendida pela produção. O controlo da velocidade dos variadores de frequência tem-se manifestado muito vantajoso na maioria dos acionamentos industriais, permitindo uma melhor eficiência de todo o conjunto.

As cargas podem ser classificadas em três grupos, consoante o binário aumenta, diminui ou permanece constante com o aumento da velocidade. Visto que a potência mecânica é igual ao produto do binário pela velocidade angular,

variar a velocidade nos dois primeiros pode permitir uma redução significativa do consumo de energia.

A velocidade dos motores de indução é obtida pela frequência da tensão de alimentação, pelo número de polos que constituem o estator e pelo escorregamento obedecendo à seguinte equação (2.4):

$$n = \frac{120 f_1 (1 - s)}{p} \quad (2.4)$$

onde:

$n$  : velocidade de rotação mecânica (rpm);

$f_1$  : frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

$p$  : número de polos;

$s$  : escorregamento.

Ao analisar a equação da velocidade do motor verifica-se que podemos atuar em três parâmetros, com o intuito de variar a velocidade de um motor de indução. A tabela em abaixo apresenta as características de cada opção.

**Tabela 3:** *Variação de Velocidade-Parâmetros*

Variação de velocidade	
Parâmetro de variação de velocidade	Característica de aplicação
Número de polos	Variação discreta
	Sobredimensionamento da carcaça
Escorregamento	Variação contínua
	Perdas rotóricas
	Faixa de variação pequena
Frequência da tensão estatórica	Variação contínua
	Uso de Variadores de Velocidade

A utilização de (VEV's) é atualmente o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os variadores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, numa tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade

mecânica de rotação da máquina. O binário desenvolvido pelo motor de indução segue a equação (2.5):

$$T = K_1 \cdot \phi_m \cdot I_2 \quad (2.5)$$

O seu fluxo magnetizante (2.6), desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reactância dos enrolamentos estatóricos, vale:

$$\phi_m = K_2 \frac{V_1}{f_1} \quad (2.6)$$

onde :

T : binário disponível no eixo (N.m)

$\phi_m$  : fluxo de magnetização (Wb)

I<sub>2</sub>: corrente rotórica (A) à depende da carga

V<sub>1</sub>: tensão estatórica (V)

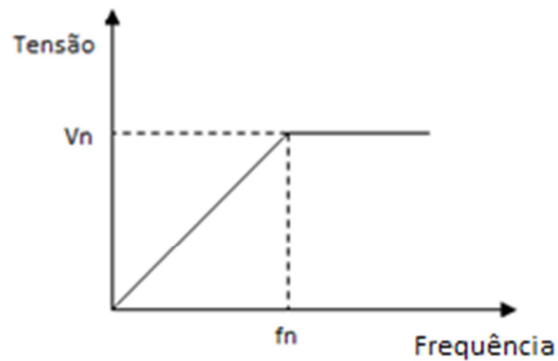
k<sub>1</sub> e k<sub>2</sub> : constantes que dependem do material e do projeto da máquina

Como a corrente depende da carga e esta é constante, por consequência a corrente também permanecerá constante. Assim, variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e o torque permanecem constantes.

As perdas do motor podem ser minimizadas de acordo com as condições de carga, mantendo-se constante o escorregamento da máquina em qualquer velocidade, para a mesma carga.

A partir das equações infra, obtém-se os gráficos abaixo apresentados.

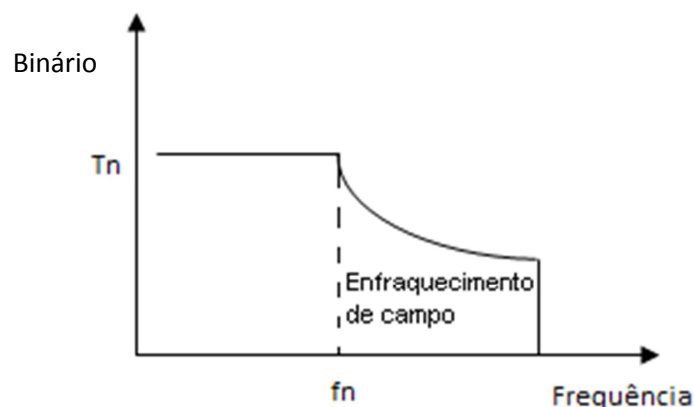
**Gráfico 1:** Relação entre a Tensão e Frequência



A variação da relação  $V/F$  é feita linearmente até a frequência base (nominal) do motor. Acima dessa, a tensão é máxima (igual à nominal) e permanece constante, havendo então apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor, conforme representado na figura anterior.

Assim, acima da frequência base caracteriza-se a chamada região de enfracimento de campo, pois ali o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando também a diminuição de torque. A curva característica binário x velocidade do motor acionado por inversor de frequência está representada no gráfico seguinte.

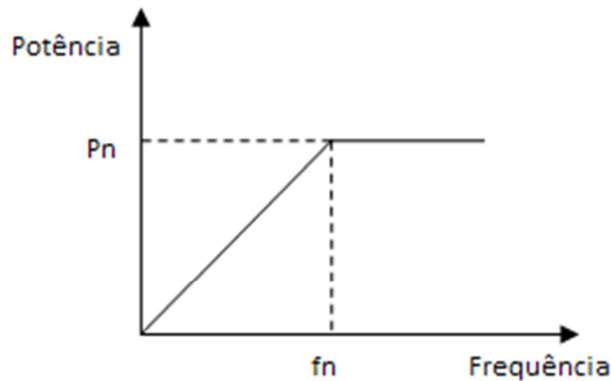
**Gráfico 2:** Relação entre o Binário e a Frequência



Verifica-se que o torque permanece constante até a frequência nominal (50Hz) e decresce rapidamente acima desta. Como Potência = Binário X Rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência nominal e

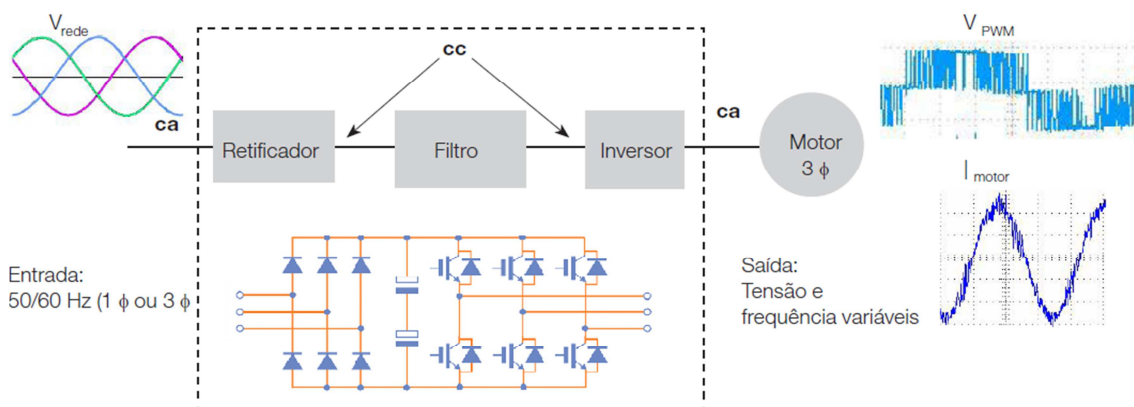
permanece constante acima desta, conforme se pode ser observar no gráfico seguinte.

**Gráfico 3:** Relação entre a Potência e a Frequência



### 2.4.2. Modelo de controlo dos Variadores

No mercado dos variadores existem basicamente dois modelos de controlo, o escalar e o vetorial. Estes são os que têm uma utilização mais comum devido à precisão e rigor de que são dotados. Os variadores com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso (PWM) são os que mais se utilizam para o acionamento dos motores de indução. Estes variadores são constituídos por um retificador (trifásico ao monofásico) que converte a tensão alternada em contínua e por um inversor que converte a tensão contínua em alternada, como se exemplifica na figura 7.



**Figura 7:** Constituição de um variador

O controlo escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/F constante, ou seja, o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante. É aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a variações de torque e velocidade. O controlo é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade faz-se em função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é lhe imposta.

Para melhorar o desempenho do motor nas baixas velocidades, alguns inversores possuem funções especiais como a compensação de escorregamento (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o *boost* de tensão (aumento da relação V/F para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estatórica), de maneira que a capacidade de torque do motor seja mantida. O controlo escalar é o mais utilizado devido a sua simplicidade e devido ao facto de que a grande maioria das aplicações não requer alta precisão e/ou rapidez no controlo da velocidade.

O controlo vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controlo do torque e da velocidade do motor. O controlo decompõe a corrente do motor em dois vetores, um produz o fluxo magnetizante e o outro produz torque, regulando separadamente o binário do fluxo. O controlo vetorial pode ser realizado em malha aberta ("*sensorless*") ou em malha fechada (com realimentação).

Os inversores vetoriais de fluxo estão divididos em duas categorias: com e sem realimentação. A realimentação ou "*Feedback*" permite "enxergar" o movimento do eixo do motor possibilitando controlar a velocidade com alta precisão e também o torque em velocidade zero. A operação com realimentação é também conhecida como controlo de malha fechada e sem realimentação como controlo de malha aberta. A realimentação é realizada utilizando um gerador de pulsos, também conhecido como "*Encoder*". Alguns equipamentos permitem a utilização dos dois modos, sendo necessário uma placa opcional para a operação de malha fechada.

A operação de malha aberta ou sem realimentação é também conhecida como "*Sensorless*". Nesse caso, o algoritmo de controlo torna-se mais complexo pois o inversor deve calcular através de artifícios matemáticos a velocidade real e o escorregamento do motor. A operação sem realimentação possui performance inferior à operação com realimentação.

A principal diferença entre os inversores escalares e vetoriais de fluxo deve-se à capacidade dos inversores vetoriais de fluxo de imporem o torque necessário ao motor, de forma precisa e rápida permitindo uma elevada velocidade de resposta dinâmica a variações bruscas de carga.

Com inversores escalares é necessária a queda de velocidade para aumento do torque, ou seja o torque produzido no motor é proporcional ao escorregamento. Nos inversores vetoriais de fluxo não existe praticamente redução de velocidade para aumento do torque, visto que o inversor irá impor uma tensão e uma frequência adequada para compensar a queda de velocidade e impor o binário necessário à carga. Em algumas aplicações é necessário que o motor trabalhe com folga de tensão visto que os inversores vetoriais de fluxo impõem o binário elevando a tensão sobre o motor. Caso a velocidade de trabalho seja a nominal e a regulação seja crítica, é necessário utilizar um motor com tensão nominal menor que a rede, como forma de se obter a folga necessária para a regulação.

Os equipamentos modernos apresentam várias unidades de controlo e comando digital que podem realizar diversas funções e análises tais como: autoteste de diagnóstico de falhas comunicação com unidades de automação externas, comando de pré-carga suave dos condensadores do circuito intermédio, comando de *chopper* que assegura a dissipação de energia de retorno, simulação do regime térmico do motor para efeitos de proteção, controlo explícito do binário e muitas outras tarefas.

Os variadores comercializados pretendem cobrir o maior leque de aplicações possíveis para tal oferecem diversas possibilidades de parametrização. Eis os principais tipos de parâmetros que se podem encontrar:

➤ **Relativos ao ondulator, ao motor e ao sistema movido**

- Gama de frequências de ajuste
- Frequência de comutação
- Parâmetros nominais do motor
- Característica da carga mecânica

➤ **Relativos ao comando**

- Configuração do sistema de controlo
- Forma da curva V/F
- Compensação da tensão a baixas frequências
- Compensação de escorregamento, da quantidade *ohmica*
- Reforço da  $U_0$  em regime transitório
- Controlador PID eventualmente incluído para controlo em cadeia fechada
- Ativação do variador com a máquina já a rodar
- Controlo explícito do binário
- Facilidade de autocomissionamento (medição e estimação automática de parâmetros do motor e carga mecânica pelo próprio variador)

➤ **Relativos a limitações e autoproteção:**

- Rampas limitadoras na referência (aceleração e desaceleração)
- Inversão do sentido de marcha
- Travagem regenerativa
- Eliminação de faixas de frequência que possam causar ressonâncias mecânicas
- Parâmetro de modelo térmico para proteção do motor
- Condições de arranque e de forma retoma de actividade perante cortes de energia
- Alarmes

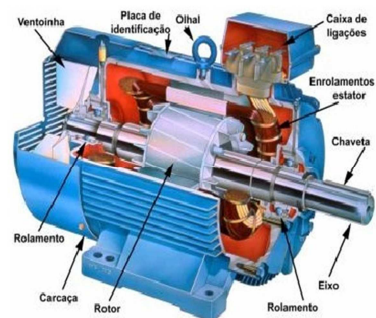
➤ **Relativos a interfaces:**

- Seleção da proveniência da entrada de referência (botões de painel local, sinal analógico interface, etc.)
- Seleção da unidade de parametrização (painel local comando remoto, etc.)
- Configuração de entradas e saídas discretas e analógicas
- Parâmetros de comunicação em série.

Apesar do controlo de velocidade com os VEV's conduzir ao melhoramento dos processos, ao menor desgaste dos motores de indução e do restante equipamento mecânico (devido aos arranques/paragens suaves) e a poupanças de energia significativas, estes podem também apresentar desvantagens.

Com efeito, consideram-se desvantagens da utilização dos VEV's a possibilidade de produção de interferências eletromagnéticas, a injeção de harmónicas de corrente na rede, a redução do rendimento e do tempo de vida útil dos motores de indução, provocada pelo aumento da temperatura e também pelo aparecimento de descargas parciais no seu isolamento e à circulação de corrente nos seus rolamentos.

Contudo, na atualidade, os motores já são projetados para serem alimentados por VEV's, tornando-se mais tolerantes aos fenómenos referidos anteriormente.



**Figura 8:** Motores elétricos

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 9:** Variadores de velocidade

Principais vantagens da utilização de VEV's nos motores de indução:

- Economia de energia até 50% com um valor médio de 20-25%;
- Prolongamento da duração, em consequência da redução de choques mecânicos e do maior tempo de vida útil da parte mecânica;
- Melhoria do factor de potencia, diminuindo assim a energia reactiva da instalação;
- Aumento da produtividade;
- Possibilidade de bypass em caso de avaria do variador;
- Amplas gamas de velocidades, binário e potência;
- Melhoria do processo de controlo e portanto da qualidade do produto.

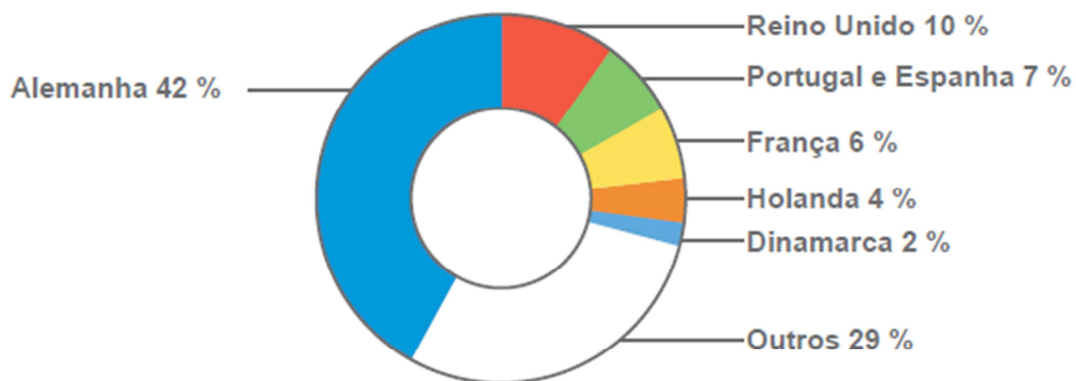
Desvantagens da utilização de variadores:

- Introdução de harmónicas na rede eléctrica;
- Colocação de filtros passa baixo;
- Redimensionamento da bateria de condensadores, visto que com a instalação dos VEV's o equipamento eléctrico passa de indutivo a capacitivo.

### 2.4.3. Análise económica

Desde alguns anos a esta parte e com a evolução da eletrónica de potência, os variadores de velocidade (VEV's) têm-se tornado mais atrativos economicamente. A melhoria dos seus componentes, desempenho e fiabilidade fazem com que o investimento se torne mais rentável energeticamente e assim se alcance um retorno mais rápido do investimento.

Devido à sua flexibilidade, alto rendimento, elevada fiabilidade e com custos cada vez mais baixos, os variadores têm vindo a conquistar uma maior cota de mercado como demonstra a seguinte figura.



**Figura 10:** Distribuição do mercado europeu de VEV's, entre os anos de 1998 e 2002

A rentabilidade dos VEV's varia com as horas de funcionamento, da potência do motor e o regime da carga aplicado ao motor. Este último torna-se mais relevante porque quanto mais varia o regime de carga maior será o potencial de economia de energia.

Ao equacionar a introdução de variadores é necessário efetuar um estudo de viabilidade económica, como forma de reduzir os gastos energéticos associados, logo ter-se-á de ter em conta uma redução global do rendimento do equipamento. Efetuar o controlo da velocidade permitirá garantir uma redução do consumo de energia visto que o equipamento irá trabalhar no regime mais apropriado para as necessidades impostas. Para potências mais baixas a redução económica dos VEV's decresce.

A poupança anual, para regimes de carga relativamente a uma situação inicial em que o controlo de velocidade é inexistente, pode ser dada pela equação seguinte (2.7).

(2.7)

$$Economia\ anual\ (\text{€}/ano) = \sum_i \left[ t_i C_{eli} \left( \frac{P_{Mi}}{\eta_{Mi}} - \frac{P_{VEV-Mi}}{\eta_{VEV-Mi}} \right) \right]$$

Onde:

$t_i$ : número de horas de funcionamento do motor no regime da carga  $i$  (h/ano)

$C_{eli}$ : custo médio da energia durante o período  $t_i$  (€ / kW.h)

$P_{Mi}$ : potência útil mecânica do motor no regime de carga  $i$  (kW)

$\eta_{Mi}$ : rendimento do motor no regime de carga  $i$  (fracção)

$P_{VEV-Mi}$ : potência útil mecânica do motor com VEV no regime de carga  $i$  (kW)

$\eta_{VEV-Mi}$ : rendimento do motor com VEV no regime de carga  $i$  (fracção)

### **3. Eficiência Energética**

---

#### **3.1. Protocolo de Quioto**

O protocolo Quioto é um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que agravam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, a principal causa do aquecimento global.

Por ele se propõe um calendário pelo qual os países-membros (principalmente os desenvolvidos) têm a obrigação de reduzir a emissão de gases do efeito estufa em, pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012, também chamado de primeiro período de compromisso (para muitos países, como os membros da UE, isso corresponde a 15% abaixo das emissões esperadas para 2008).

As metas de redução não são homogêneas a todos os países, colocando níveis diferenciados para os 38 países que mais emitem gases. Países em franco desenvolvimento (como Brasil, México, Argentina e Índia) não receberam metas de redução, pelo menos momentaneamente.

Para além do compromisso do protocolo de Quioto (até 2012) muitos países fixaram um período maior e objetivos em linha com as últimas recomendações internacionais referentes à estabilização da concentração de CO<sub>2</sub> a níveis de 450 partículas por milhão (ppm) (para isso é necessário que até 2050, os níveis de emissão de CO<sub>2</sub> existentes em 1990 sejam reduzidos para metade).

A redução dessas emissões deverá acontecer em várias atividades económicas. O protocolo estimula os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas ações básicas como reformar os setores de energia e transporte, promover o uso de fontes energéticas renováveis, eliminar mecanismos financeiros e de mercado inapropriados aos fins da Convenção, limitar as emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos, proteger florestas e outros sumidouros de carbono.

Se o Protocolo de Quioto for implementado com sucesso, estima-se que a temperatura global reduza entre 1,4°C e 5,8°C até 2100. Tal feito dependerá muito das negociações pós período 2008/2012, pois há comunidades científicas que afirmam categoricamente que a meta de redução de 5,2% em relação aos níveis de 1990 é insuficiente para a mitigação do aquecimento global.

### **3.1.1. Protocolo de Quioto na União Europeia**

O protocolo de Quioto foi o arranque que fixou e agendou objetivos quantitativos relativos à redução de emissões de CO<sub>2</sub>, com o compromisso claro de todos os países.

A União Europeia é um bom exemplo, ao confirmar em Março de 2007, o compromisso de alcançar uma redução de 20% antes de 2020 nos seus Estados-Membros (conhecido como 3 x 20: 20% de redução das emissões de CO<sub>2</sub>; melhorar em 20% os níveis de Eficiência Energética; 20% da produção de energia através de energias renováveis). O compromisso de redução de 20% poderá passar para 30% no caso de existir um acordo internacional após Quioto. Alguns países europeus preparam o compromisso de em 2050 o nível de emissões seja reduzido até 50%. Deste modo o contexto e as políticas de Eficiência Energética estarão presentes durante um período de tempo alargado.

Para atingir estes objetivos é necessário realmente mudar, fiscalizar, legislar e normalizar, devendo esses objetivos serem facilitados pelos governantes, que os deverão reforçar todos os dias.

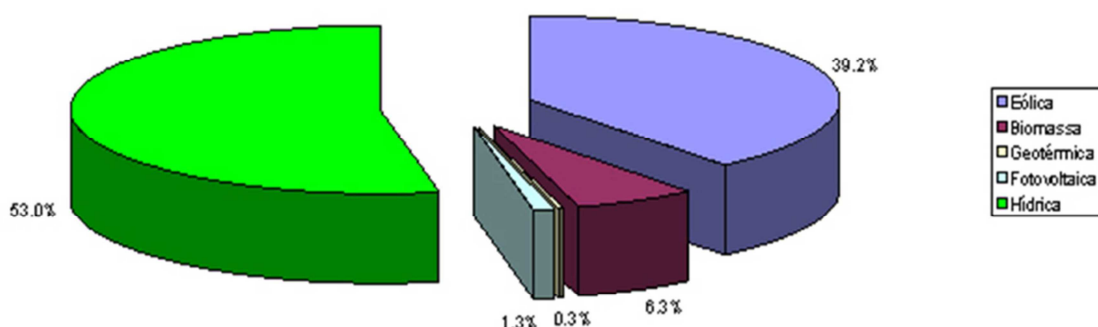
Em todo o mundo estão em vigor diferentes tipos de legislação e regras de utilização da energia com vista à obrigatoriedade das empresas, no que respeita à colocação em prática de comportamentos ambientais e de Eficiência Energética, criando incentivos fiscais e financeiros, para a sua implementação.

### 3.2. Consumos de energia na União Europeia

Em Portugal, o abastecimento de energia primária aumentou substancialmente desde 1990 (cerca de 55%) (DGEG, 2007). Este incremento consistiu sobretudo no aumento do fornecimento de petróleo (em 29% desde 1990) e de combustíveis sólidos (em 31% desde 1990) (DGEG, 2007). Em 1997, o GN foi introduzido pela primeira vez no abastecimento de energia primária de Portugal e, em 2005, a quota do gás no abastecimento total de energia atingiu os 14% (mantendo-se abaixo da média da UE-27) (DGEG, 2007). A diretiva europeia (Comissão Europeia, 2001) correspondente as fontes de energia renováveis estabelecia como meta 12% do consumo interno bruto de energia em 2010 na EU-15, onde a eletricidade representava 22%, mas com o alargamento de 2004 este valor passou para 25% para o ano de 2020 (Comissão Europeia, 2007).

Segundo a DGEG o valor real em 2009 para o contributo das energias renováveis no consumo total de energia primária foi de 20% contra 17,7% em 2008 (DGEG, 2010). As quotas percentuais de cada Fonte de Energia Renovável (FER) são apresentadas no gráfico 4.

**Gráfico 4:** Potência instalada das centrais de produção de energia elétrica a partir de FER em 2009 (DGEG, 2010)



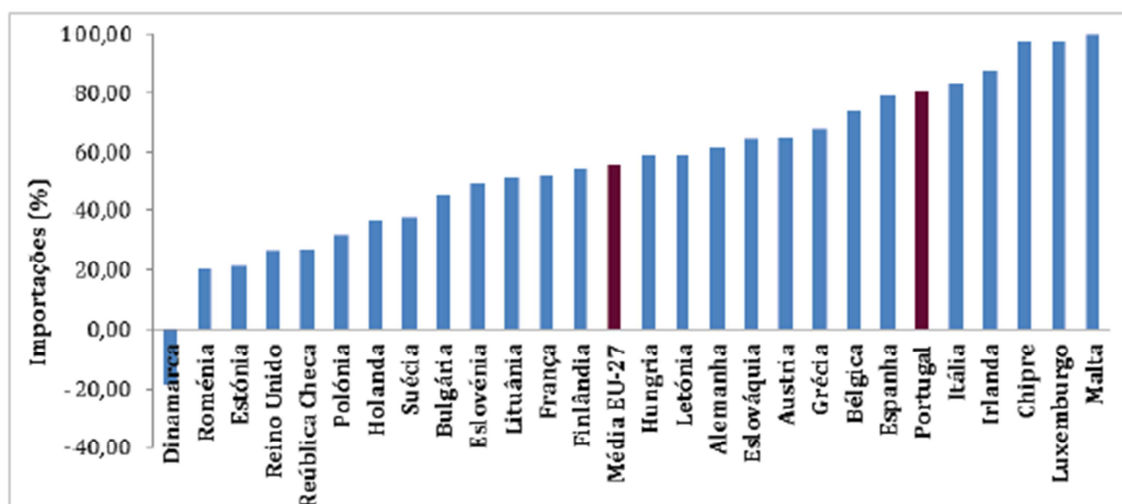
### 3.3. Eficiência energética: vantagens

A eficiência energética pode ser definida como a razão entre a energia útil entregue e a energia fornecida a um sistema energético. Para o sistema energético significa quanto menor for esta razão, maior o grau de eficiência de um dado equipamento.

Ao melhorar a eficiência energética de uma instalação melhoramos o impacto ambiental (nomeadamente de resíduos gerados) e incrementamos a poupança de água. Assim, é fundamental que existam incentivos ao investimento na eficiência energética que privilegiam a adoção destas soluções.

Uma das principais vantagens do investimento em eficiência energética prende-se com a diminuição da dependência energética externa (SGCIE-ADENE, 2010). A atividade económica encontra-se subordinada à importação de combustíveis fósseis e perspectivas flutuações de preço nos mercados internacionais, o que a torna mais vulnerável e menos competitiva. Como tal, a competitividade de um qualquer setor de atividade energeticamente intensiva, é afetada pela fração elevada da energia nos custos de produção.

**Gráfico 5:** Recursos energéticos na UE



Fonte: Eurostat

Tal como se constata no gráfico 5, Portugal é um país com fraca disponibilidade em recursos energéticos primários (Eurostat, 2011). A utilização eficiente da energia afigura-se assim como motor de desenvolvimento económico, com elevado potencial de poupança energética e financeira.

O investimento inicial que as medidas de eficiência energética acarretam é outra das vantagens associadas às mesmas. Os custos associados à redução da procura energética são geralmente mais reduzidos do que os custos associados à criação de um novo centro produtor.

A aposta em eficiência energética promove também a competitividade económica nacional ao gerar novos postos de trabalho. Este tipo de investimentos permite a criação de emprego especializado em setores energeticamente intensivos como a indústria, já que promove investimentos em tecnologias emergentes e requiere a monitorização e melhoria contínua dos sistemas energéticos de uma instalação.

Em suma, a utilização mais eficiente dos recursos energéticos contribui para uma economia mais eficiente e competitiva. Assegura ainda um fornecimento energético mais seguro e contribui para uma redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (SGCIE-ADENE, 2010).

### **3.4. Programas de eficiência energética criados em Portugal**

#### **3.4.1. ECO-AP**

O Programa de Eficiência Energética na Administração Pública, vulgarmente designado por ECO.AP, foi publicado dia 12 de Janeiro em Resolução do Conselho de Ministros e visa alcançar um aumento de 20% da eficiência energética até 2020. Este programa evolutivo traduz-se num conjunto de medidas de eficiência energética para execução a curto, médio e longo prazos nos serviços, organismos e equipamentos públicos. Estas medidas pretendem, também, alterar comportamentos e promover uma gestão racional dos serviços energéticos, nomeadamente através da contratação de empresas de serviços energéticos (Presidência do Conselho de Ministros, 2011).

### **3.4.2. PPEC (2011-2012)**

O Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de Energia Elétrica é um programa promovido pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) e tem como objetivo apoiar financeiramente iniciativas que promovam a eficiência e a redução do consumo de eletricidade nos diferentes consumidores.

Sendo os vários promotores a apresentar medidas, estas sujeitam-se a um competitivo concurso onde estão selecionadas medidas com a melhor ordem de mérito, de acordo com o estabelecido nas Regras do Plano de Promoção de eficiência no Consumo. Os benefícios sociais pretendem ser superiores aos custos. Através das 57 medidas selecionadas que serão implementadas por 20 promotores e que permanecerão até 2032, antecipa-se uma redução de 2244GWh (ou 830 mil ton CO<sub>2</sub>) de consumo acumulado no consumo anual de 750 mil famílias portuguesas e um custo unitário evitado de aproximadamente 0,008 €/kWh (valor inferior ao diferencial de custo da produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis face as centrais convencionais – 0,05 €/kWh) (ERSE, 2010).

### **3.4.3. PNAC**

O Plano Nacional para as Alterações Climáticas foi aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º104/2006, de 23 de Agosto, e pretendeu quantificar o esforço nacional das emissões de gases de efeito estufa (GEE), integrando um vasto conjunto de políticas e medidas que incidem sobre todos os segmentos de atividade. Este plano atribuiu responsabilidades na definição dos mecanismos de promoção de eficiência energética ao nível da procura da ERSE.

O novo PNAC 2020, para o período de 2013-2020, pretende garantir o cumprimento das metas nacionais respeitantes as alterações climáticas para os setores não abrangidos pelo Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), em articulação com o Roteiro Nacional de Baixo Carbono. Na Resolução n.º 93/2010, de 26 de Novembro, estabeleceu-se que o PNAC 2020

deveria consolidar e reforçar políticas e instrumentos previstos no PNAC 2006, definir novas políticas e instrumentos para limitar as emissões nos setores não CELE, assim como prever as responsabilidades de cada setor, o financiamento e os mecanismos de monitorização e controlo.

### 3.5. Enquadramento de Portugal para a Eficiência Energética

Um país que aspire ser competitivo economicamente tem obrigatoriamente de efetuar uma utilização eficiente da energia.

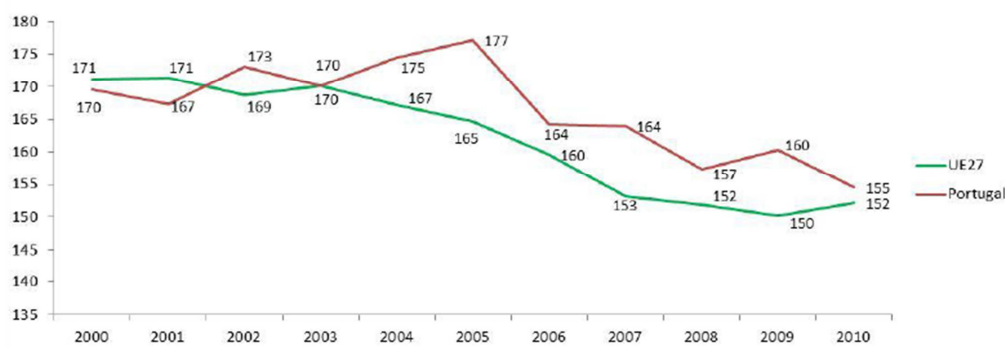
A intensidade energética é um indicador que traduz a incidência do consumo de energia final sobre o PIB. Quanto menor for este indicador maior é a eficiência energética global do país.

O gráfico seguinte (dados fornecidos pela Eurostat) demonstra a evolução da intensidade energética de Portugal em relação à média europeia que vem expressa em consumo de energia primária final (tep) por unidade de Produto Interno Bruto (PIB em milhão de euros).

Da análise do gráfico constata-se que desde 2000 a intensidade energética de Portugal divergiu significativamente da média europeia. No entanto, a partir de 2005 esta tendência inverteu-se devido ao efeito cumulativo da diminuição do consumo de energia final e do aumento do PIB.

**Gráfico 6:** Intensidade energética da economia na UE

**Evolução da intensidade energética da economia, na UE27 e em Portugal (kg equivalente de petróleo por 1000 Euro)**



Fonte: Eurostat

A economia portuguesa caracteriza-se por possuir uma intensidade energética e uma intensidade carbónica elevadas e uma dependência muito elevada da importação de energia primária (cerca de 85% da energia primária, com uma predominância do petróleo).

Há semelhança do que se verifica noutras economias com baixa eficiência energética, Portugal está muito dependente da importação de energia primária como petróleo, gás natural e carvão, fazendo com que a balança comercial portuguesa seja fortemente influenciada pelos preços destas matérias primas.

Ao longo dos últimos anos o preço destas matérias-primas tem vindo a aumentar significativamente. Como consequência deste aumento as empresas portuguesas têm vindo a perder competitividade.

Com a forte dependência destas matérias-primas de origem fóssil, Portugal apresenta uma emissão excessiva de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de outros gases de efeito estufa, sendo esta uma das principais causas da má eficiência no consumo de energia obtida pela queima de combustíveis fósseis.

Na senda do protocolo de Quioto, os países da União Europeia (15) comprometeram-se a efetuar uma redução das emissões destes gases de efeito de estufa em 8%, comparativamente às emissões de 1990.

Caso estas metas não fossem cumpridas até 2012 estes ficariam sujeitos a penalizações económicas (coimas pesadas), a par da diminuição do seu prestígio ambiental.

A tabela seguinte apresenta o valor das emissões de CO<sub>2</sub> em Portugal e a média dos países da UE-15 entre os anos de 2003 a 2005.

**Tabela 4:** Emissões de CO<sub>2</sub> em Portugal e na EU-15

Emissões CO <sub>2</sub>					% acima da meta Quioto 2005
	2003	2004	2005	Meta Quioto 2012	
<b>Portugal</b>	33,7	34,6	85,5	76,2	12,3
<b>EU-15</b>	4 215	4 227	4 192	3 925	6,8

Fonte: European environment Agency (EEA)

Da análise da tabela constata-se que em Portugal a quantidade de CO<sub>2</sub> libertado para atmosfera aumentou em relação aos países da UE-15. Portugal apresenta uma taxa de emissões de 12,3% acima do valor proposto para 2012, valor significativamente superior ao registado pelos países da EU-15 (6,8%). Estes valores mostram que os esforços de Portugal em diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> têm sido pouco eficazes. A predominância desta divergência em relação ao protocolo de Quioto para 2012 acarretará prejuízos para o país quer a nível ambiental, quer a nível económico.

Tendo por base estes pressupostos, verifica-se que Portugal necessita de aumentar a sua eficiência energética. Ao consegui-lo estará não só a contribuir para o crescimento económico e desenvolvimento industrial mas também para a manutenção de um nível de segurança no fornecimento energético e na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

### **3.5.1. Estratégia Nacional para a Energia 2020**

Na área da energia foram recentemente implementadas em Portugal políticas públicas que se baseiam num documento principal – Estratégia Nacional para a Energia<sup>1</sup> (ENE2020) e num documento acessório, mas igualmente representativo – Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC). A agenda da ENE tem como horizonte o ano de 2020 e está enquadrada no âmbito da União Europeia (UE), na vertente referente à energia e às alterações climáticas da Estratégia Europa 2020 (EU2020).

A figura 11 sintetiza as metas definidas pela ENE até 2020.

---

<sup>1</sup>Resolução do Conselho de Ministros N° 29/2010, de 15 de Abril

AValiação DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 11:** Metas da União Europeia

Portugal comprometeu-se a reduzir as emissões de gases com efeito estufa (GEE) em 20% (comparativamente ao nível atingido em 1990), aumentar em 20% a energia proveniente de fontes renováveis no consumo global final e reduzir o consumo energético em 20% por aumento da eficiência energética.

Nos últimos anos Portugal tem vindo a ocupar um lugar cimeiro, entre os principais líderes no desenvolvimento das energias renováveis e na promoção integrada da eficiência energética. Assim, a ENE 2020 constitui mais um impulso para que o país continue na liderança nesta sustentabilidade energética pelo cumprimento dos objetivos governamentais definidos e enquadrados nas políticas energéticas europeias, garantindo também a segurança de abastecimento e a desejada sustentabilidade económica e ambiental do modelo energético.

A ENE prevê alcançar até 2020 os resultados evidenciados no quadro 1, tendo definido objetivos e metas para os alcançar.

**Quadro 1: Objetivos e metas da Estratégia Nacional para a Energia 2020**

Reduzir a dependência energético de Portugal face ao Exterior	<ul style="list-style-type: none"><li>• Passar de 83%, em 2008, para 74% em 2020 equivalente a poupança de 95M barris de petróleo.</li></ul>
Cumprir os compromissos para 2020 assumidos por Portugal no contexto europeu	<ul style="list-style-type: none"><li>• 31% de fontes de energia renovável no consumo de energia final.</li><li>• Redução de 20% do consumo de energia final.</li></ul>
Reduzir o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Redução de 25% face a 2008 – equivalente á redução de importações de 2.000 M € anuais (2020).</li></ul>
Consolidar o cluter das energias renováveis em Portugal	<ul style="list-style-type: none"><li>• Assegurar um Valor Acrescentado Bruto de 3.800 M € em 2020.</li><li>• Criar mais 100.000 novos postos de trabalho, acrescer aos 35.000 já existentes.</li></ul>
Continuar a desenvolver os setores associados à promoção da eficiencia energética	<ul style="list-style-type: none"><li>• Assegurar a criação de 21.000 novos postos de trabalho.</li><li>• Gerar um investimento previsível de 13.000 M € até 2020 e exportações adicionais de 400M€.</li></ul>
Promover desenvolvimento sustentável	<ul style="list-style-type: none"><li>• Criar condições para o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas pelo País.</li></ul>

### 3.5.2. Objetivos da Estratégia Nacional para a Energia 2020

Em Portugal foi decidido criar cinco eixos estratégicos para a implementação do PNAC. Estes eixos incidem nas seguintes áreas fundamentais, conforme se ilustra na figura seguinte:

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 12:** Estratégia Nacional para a Energia 2020

**Tabela 5:** Prioridades para as metas 2020

EIXOS		PRIORIDADES
1	Agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira	A ENE 2020 constitui uma agenda para a competitividade, o crescimento e a independência energética e financeira do país.
2	Aposta nas energias renováveis	Uma aposta nas energias e nas fontes renováveis de forma a obter delas 31% de toda a energia e 60% da eletricidade consumida em Portugal em 2020.
3	Promoção da eficiência energética	Promoção da Eficiência Energética consolidando o objetivo de redução de consumo da energia final em 10% até 2015 e 20% em 2020.
4	Garantia da segurança de Abastecimento	Assegurar a garantia da segurança de abastecimento através da diversificação do “mix” energético, quer no que diz respeito às fontes quer às origens do abastecimento.
5	Sustentabilidade da estratégia Energética	Sustentabilidade económica e ambiental, promovendo a redução de emissões e a gestão equilibrada dos custos e dos benefícios da sua implementação.

### **3.5.3. PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética**

O Eixo 3 da Estratégia Nacional para a Energia 2020 – Promoção da eficiência energética é considerado um dos principais objetivos globais da política energética nacional. Está consubstanciado no Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) (documento atualmente em revisão), também designado “Portugal Eficiência 2015”, que integra as políticas e as medidas de eficiência energética a implementar até 2015.

Com efeito, até 2015 o PNAEE estabeleceu como meta a implementação de medidas de eficiência energética equivalentes a redução de 10% do consumo final de energia, nos termos previstos na Diretiva Nº 2006/32/CE de 5 de abril, do Parlamento Europeu e da Presidência Conselho Ministros relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos.

Este documento engloba um conjunto alargado de programas e respetivas medidas consideradas como fundamentais para que Portugal consiga alcançar os objetivos fixados na diretiva anteriormente referida, estabelecendo também a obrigatoriedade de cada Estado Membro publicar um plano de ação para a eficiência energética, estabelecendo nesse plano metas de 1% (como valor mínimo) de poupança de energia até ao ano de 2016.

A nível europeu foram criados alguns programas tais como *EU Emission Trading Scheme*, *Qenergy performance of Buiding Directive*, *Energy Using product directive* e *End use of energy & energy services directive*.

Portugal, seguindo os passos da União Europeia também implementou diversos planos como o Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão, o Plano Nacional de Eficiência Energética, o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios e o Plano de Promoção da Eficiência no Consumo.

Foi criada diversa legislação e esquemas de incentivos financeiros e fiscais a nível nacional e local, tais como a imposição de realização de auditorias, etiquetas de performance, códigos de edifícios, certificados de performance energética, obrigação dos distribuidores de energia terem clientes a poupar energia, acordos voluntários com a indústria, mecanismos financeiros de mercado (taxas de juro bonificadas) e esquema de incentivos e impostos.

Atualmente o acesso à energia é fundamental para o desenvolvimento das sociedades. No entanto, a maior parte dessa energia é proveniente de fontes fósseis tais como o carvão, o gás e petróleo, cujas reservas mundiais têm vindo a diminuir ao longo do século passado, devido à sua utilização intensiva. Caso o comportamento da sociedade em relação à utilização das fontes de energia não se altere, o futuro das gerações seguintes poderá estar comprometido.

Atendendo ao exposto, relança-se a necessidade de fazer uma utilização eficiente da energia, com uma aposta na utilização de fontes renováveis tais como sol, vento, água, geotérmica, entre outras.

## 4. Eficiência energética na empresa Gelpexe

---

### 4.1. Generalidades

No âmbito de eficiência energética a empresa tem vindo a implementar diversas soluções de redução do consumo de energia entre as quais, a instalação do variador na central de ar comprimido.

De seguida analisa-se um investimento concluído, nomeadamente, a central de ar comprimido e elabora-se um estudo de viabilidade económica para a central de frio.

### 4.2. Aumento da eficiência energética na central de ar comprimido

Um dos primeiros equipamentos a sofrer uma intervenção com vista ao aumento da eficiência energética foi o compressor de ar comprimido.



**Figura 13:** Compressor de ar

A empresa tem instalado um compressor da marca Kaeser ASD37, com uma potência elétrica de 22kW e com caudal de ar de 3,90m<sup>3</sup> /h. Como o consumo

existente no complexo fabril é cerca de 2/3 da capacidade do compressor, verifica-se que este está sobredimensionado para o consumo real.

Antes de instalar o variador o compressor tinha cerca de 21.000h de trabalho sendo que 1/3 dessas horas eram de trabalho em vazio. Desta forma, se considerarmos 10h de trabalho em 22 dias úteis durante 8 anos concluímos que o motor trabalhou 7.000h em vazio.

Identificou-se também uma situação de má eficiência energética no compressor. Existiam muitos arranques devido à relação do ar comprimido armazenado no reservatório e o regime do consumo, relativamente reduzido em relação à capacidade, provocando assim a sua paragem mas voltando a arrancar pouco depois, assim que atingia o valor pré-regulado.

Outra possibilidade de reduzir os arranques e paragens seria instalar um depósito de ar de maior capacidade mas devido à existência de fundos comunitários para aquisição de variadores, a empresa acabou por recorrer a esta opção.

Com a instalação do variador de velocidade no compressor conseguimos obter um melhor regime de funcionamento e uma melhoria nos tempos de paragem. Durante um dia de trabalho deixámos de ter as paragens sucessivas, tendo ficado o compressor a trabalhar a uma rotação menor (1800 rpm).

Com o ajuste na rotação conseguiu-se uma melhor relação entre o ar consumido e o produzido.

Com estes melhoramentos conseguimos uma maior poupança energética, porque o compressor a trabalhar a uma rotação menor consome menos 3 A do que sem variação, os arranques são mais suaves e alcançamos também uma poupança mecânica porque o compressor tem menos desgaste.

Durante o tempo em que o compressor esteve a trabalhar sem o variador houve um desperdício de energia estimado na seguinte tabela.

**Tabela 6:** *Resumo do ciclo de funcionamento anual*

Ciclo funcionamento	
Total de horas em vazio	7000 h
Pot. Do Compressor em vazio	9kW (15 A /fase)
Preço por hora	0,11 kW/€
Custo numa por hora	0.99 € /h
Total nos 8 anos	<b>6.930 €</b>

Durante o tempo em que compressor funcionou sem o variador houve um desperdício energético com um custo aproximado de 6.930€.

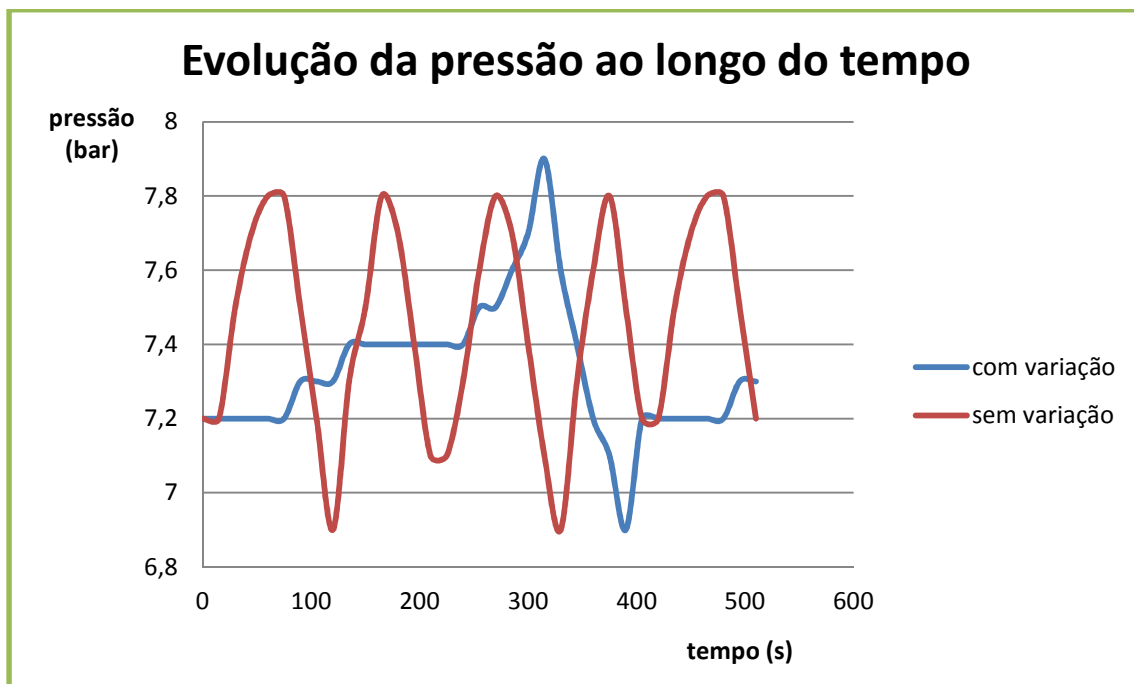
As seguintes tabelas e gráficos vêm demonstrar que da instalação de variadores de velocidades nos equipamentos decorrem vantagens quer do ponto de vista energético quer mecânico. Para demonstrar a eficácia do sistema considerou-se uma amostragem de 10 minutos com o compressor a trabalhar com e sem o variador.

**Tabela 7:** *Ciclo de funcionamento em 10 minutos*

	Com variação		Sem variação	
	Pressão (bar)	Corrente (A)	Pressão (bar)	Corrente (A)
0	7,2	36,6	7,2	39,4
15	7,2	36,6	7,2	39,4
30	7,2	36,6	7,5	40
45	7,2	36,6	7,7	40,9
60	7,2	36,6	7,8	41
75	7,2	36,6	7,8	16,4
90	7,3	36,7	7,5	14,5
105	7,3	36,7	7,2	16,5
120	7,3	36,7	6,9	39,6
135	7,4	37,1	7,3	40,6
150	7,4	37,1	7,5	40,8
165	7,4	37,1	7,8	21
180	7,4	37,1	7,7	15,3
195	7,4	37,1	7,4	14,2
210	7,4	37,1	7,1	39,6
225	7,4	37,1	7,1	40
240	7,4	37,1	7,3	40,5
255	7,5	37,1	7,6	40,7

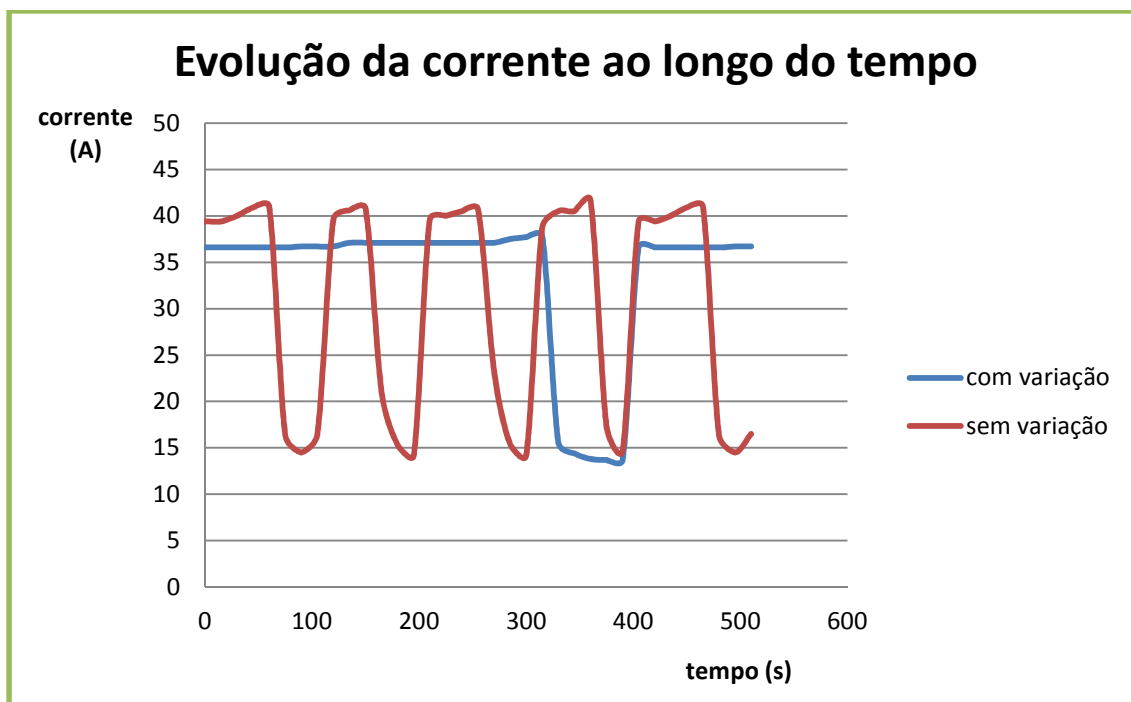
AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

270	7,5	37,1	7,8	23,3
285	7,6	37,5	7,7	15,4
300	7,7	37,7	7,4	14,2
315	7,9	37,8	7,1	38,7
330	7,6	15,6	6,9	40,5
345	7,4	14,4	7,3	40,5
360	7,2	13,8	7,6	41,7
375	7,1	13,7	7,8	17,3
390	6,9	13,7	7,5	14,7
405	7,2	36,6	7,2	39,4
420	7,2	36,6	7,2	39,4
435	7,2	36,6	7,5	40
450	7,2	36,6	7,7	40,9
465	7,2	36,6	7,8	41
480	7,2	36,6	7,8	16,4
495	7,3	36,7	7,5	14,5
510	7,3	36,7	7,2	16,5



**Gráfico 7:** Evolução da pressão ao longo do tempo

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Gráfico8:** Evolução da corrente ao longo do tempo

Na tabela seguinte está representado um resumo da poupança e do aumento da eficiência energética aplicado ao compressor de ar comprimido.

Através dos gráficos conseguimos verificar que temos uma diferença de 3 A entre o compressor a trabalhar com e sem variação e constatamos que por cada ciclo de seis minutos de trabalho temos 5 minutos em carga 1 em vazio.

**Tabela 8:** Resumo da poupança energética com a introdução do variador

Ciclo funcionamento	
Dif.de consumos	3 A
Total de horas por dia	10 h
Total de horas por dia em carga	9h
Total de horas em vazio	1h
Redução média de potência	1,6kW
Preço médio de energia	0,11 €/kWh
Poupança por hora	0,17 € /h
Poupança por mês	38,70€
Poupança por ano	<b>464,60 €</b>

Com a introdução do variador estimamos uma poupança de 464,60€ anuais em energia. Temos também de ter em conta a diminuição das horas em que o compressor deixa de trabalhar em vazio o que vai contribuir para uma maior eficiência.

Em suma, com a introdução do variador de velocidade na central de ar comprimido conseguiu-se diminuir a energia desperdiçada durante o tempo em que o compressor trabalhava em vazio.

Os resultados alcançados encontram-se indicados na tabela seguinte.

**Tabela 9:** *Resumo do ciclo do funcionamento em vazio*

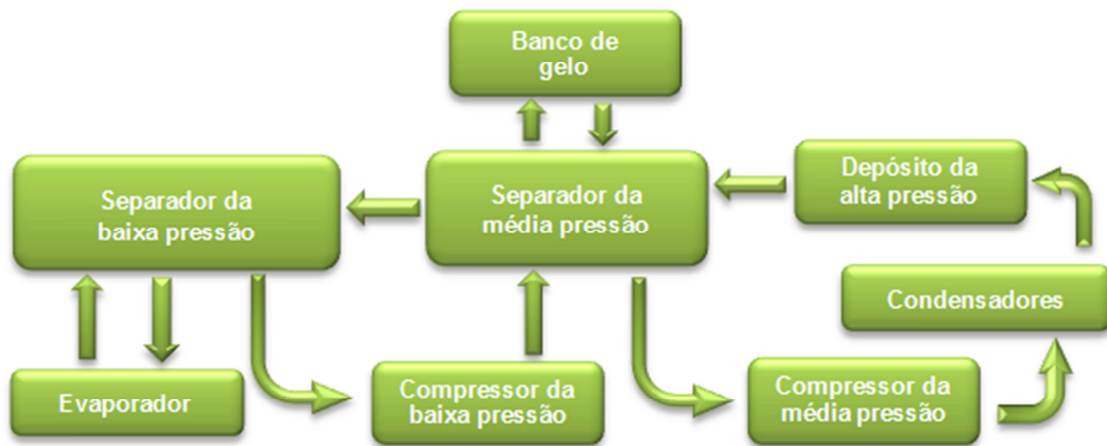
Ciclo funcionamento em vazio		
	sem variador	com variador
Total de horas por dia	10 h	10h
Total de horas por mês	220 h	220h
Total de horas por ano	2640 h	2640h
Total de horas em vazio por ano 1/3	880h	264h
Total de horas vazio mês	73 h	22 h
Potência do Compressor em vazio 9kW (15 A /fase)		
Energia desperdiçada por hora	0,99 € /h	0,99 € /h
Energia desperdiçada por mês	72,3€	21,8€
Energia desperdiçada por ano	878,4 €	261,3€

### 4.3. Eficiência energética na central frigorífica

#### 4.3.1. Instalação frigorífica a 3 tubos

Na central frigorífica em análise pretende-se conseguir a mesma capacidade de refrigeração utilizando menos energia (fazer o mesmo com menos).

De seguida, apresenta-se um resumo do princípio de funcionamento da instalação frigorífica.



**Figura 14:** Esquema da central frigorífica

No âmbito da eficiência energética foi elaborado um estudo para melhorar a eficiência das descongelações dos evaporadores das câmaras. Estas descongelações servem para desbloquear os evaporadores do gelo que vai acumulando ao longo dos períodos de refrigeração das câmaras.

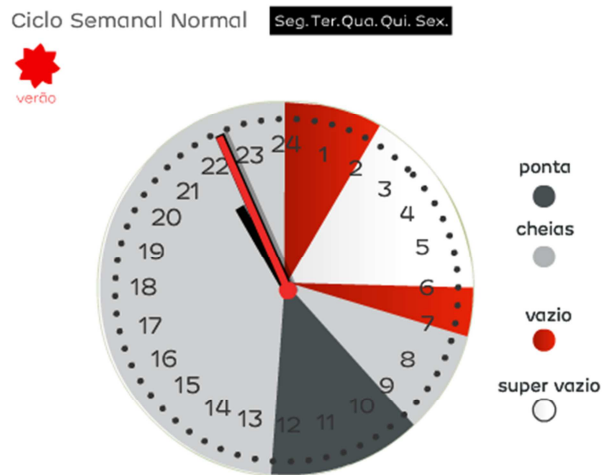
A referida eficiência irá reflectir-se ao nível da compressão, visto que na instalação inicial a distribuição do fluido refrigerante é feita a três tubos:

1. Tubo de aspiração (amoníaco líquido/gasoso)
2. Tubo de refrigerante líquido (amoníaco no estado líquido a  $-33^{\circ}\text{C}$ )
3. Tubo de gás quente (para efetuar as descongelações)

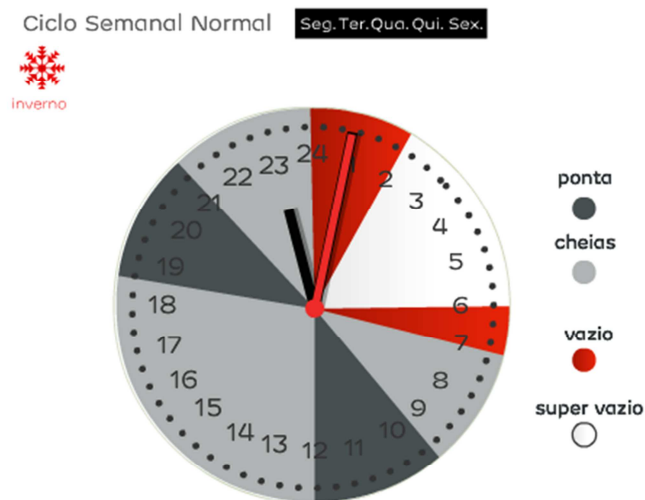
A vantagem de ter instalação a três tubos é ser mais económica do ponto de vista da instalação. No entanto, em funcionamento fica mais cara a nível energético pois obriga a que esteja o compressor de baixa pressão a funcionar quando estão a ocorrer as descongelações, pois o condensado das descongelações retorna pelo tubo de aspiração fazendo com que haja um aumento da pressão no sistema, obrigando a que um compressor da baixa arranque.

Esta instalação frigorífica está programada para não trabalhar nas pontas onde a energia é mais cara, ficando apenas restrita às descongelações.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 15:** Horário do ciclo semanal Verão



**Figura 16:** Horário do ciclo semanal Inverno

A tabela seguinte apresenta um resumo da energia consumida pelo compressor durante as descongelações nos períodos de Ponta, considerando um preço médio da energia de 0,11€ por kWh.

**Tabela 10:** Consumo de energia e custos do compressor de 37kW

Ciclo de Inverno		Ciclo de Verão	
Horas de ponta	655 h	Horas de ponta	393 h
Preço por hora	0,11€/kWh	Preço por hora	0,11€ /kWh
Potência Compressor	37 kW	Potência Compressor	37 kW
Total ciclo	2.665 €	Total ciclo	1.599 €
Total Ano	<b>4.264 €</b>		

Perante os resultados evidenciados na tabela, conclui-se que ao longo de um ano a empresa tem um custo com a energia motivado pelas descongelações de 4.264€.

Tendo em vista a eliminação deste custo foi elaborado um estudo para a implementação de um quarto tubo na instalação. Este quarto tubo tem como móbil fazer o retorno do gás das descongelações diretamente para o separador da média pressão. Assim, evitamos o arranque do compressor da baixa, visto que a pressão não aumenta no circuito da baixa.

Deste modo, quando a instalação estiver a trabalhar a quatro tubos a empresa alcançará uma poupança anual de 4.264€ porque o compressor da baixa deixará de trabalhar nas pontas.

#### **4.3.2. Alteração da instalação a 3 tubos para 4 tubos**

A alteração da instalação de 3 para 4 tubos dos vinte evaporadores das câmaras de congelados consiste na instalação de mais um colector interligando cada um dos evaporadores, ao separador da média pressão. Este colector permitirá canalizar os condensados provenientes das descongelações dos evaporadores para este separador.

Este sistema de descongelações tem sido muito pouco utilizado neste tipo de instalações. Todavia, com o aumento do preço da energia e com a procura de melhoria da eficiência energética cada vez mais se equaciona a sua utilização em construções novas bem como a conversão das mais antigas.

Com a introdução do quarto tubo e como este vai diretamente para o separador da média pressão, deixamos de ter o aumento de pressão no circuito da baixa provocado pelas descongelações. Deste modo, deixa de ser necessário ter um compressor da baixa pressão a trabalhar para diminuir esse aumento de pressão.

Ao efetuar os cálculos da poupança energética considerou-se que durante as 24 horas haveria sempre a necessidade de ter um compressor da baixa a funcionar com um consumo de 37kW para vencer a carga térmica, visto que as descongelações estão programadas ao longo das 24h (podendo estar em simultâneo 2 a 3 evaporadores em descongelação).

**Tabela 11:** Custos energéticos associados ao compressor de 37kW

Ciclo funcionamento	
Total de horas por dia	21 h
Total horas ano	7665 horas
Preço por hora	0,11 kW/€
Pot. Do compressor	37kW
Custo por hora	4,07 €
Total Ano	<b>31.196€</b>

Perante os resultados evidenciados na tabela, conclui-se que ao longo de um ano a empresa terá uma poupança energética de 31.196€ devido aos condensados das descongelações retornarem para o separador da média.

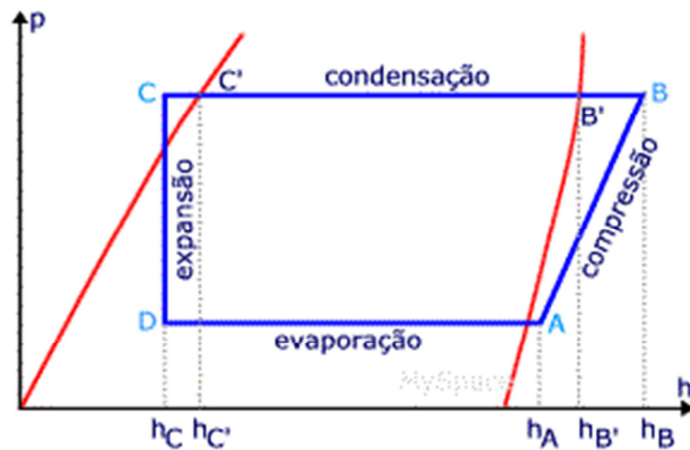
### 4.3.3. Funcionamento da instalação frigorífica

#### Elemento refrigerante Amoníaco (NH<sub>3</sub>)

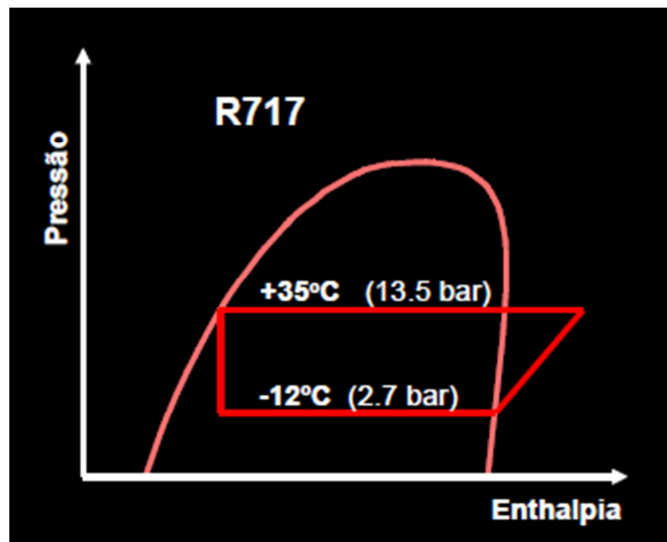
A amónia ou gás amónia, também denominado de amoníaco em solução aquosa, é um composto químico constituído por um átomo de nitrogénio(N) e três átomos de hidrogénio(H). Estes átomos distribuem-se numa geometria molecular piramidal, devido à formação de orbitais híbridos sp<sup>3</sup> e a fórmula química do composto é NH<sub>3</sub>.



AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 19:** Diagrama com os estados do amoníaco



**Figura 20:** Diagrama de temperaturas de trabalho do amoníaco

As evoluções apresentadas representam os quatro componentes que constituem um ciclo teórico de compressão a vapor. Assim temos:

Evolução 1-2: Compressão de vapor real comparada com a compressão isentrópica usada como referência (compressor)

Evolução 2-3: Calor removido do sistema (condensador)

Evolução 3-4: Líquido saturado transformado em líquido + vapor, devido a uma redução de pressão (válvula de expansão)

Evolução 4-0: Calor absorvido na área a refrigerar (evaporador)

Evolução 0-1: Sobreaquecimento do fluido frigorígeno na linha de aspiração (esta evolução é pequena em instalações reais mas tem de ser considerada para as condições da norma EN 12900).

#### **4.3.4. Princípio de funcionamento da instalação frigorífica utilizando Amoníaco (R717)**

A instalação frigorífica funciona num sistema inundado, com a utilização do amoníaco (R717) como o fluido frigorígeno.

A instalação possui um sistema de compressão dupla com três compressores na baixa pressão a operarem no regime (-33°C/-6°C) e outros três compressores na média pressão, que operam no regime (-6°C/+35°C). Utiliza-se este método de compressão para se evitar que à saída dos compressores não se atinjam temperaturas muito elevadas e perigosas.

O arrefecimento dos vapores comprimidos no andar da baixa pressão é obtido por injeção total de fluido da média pressão num depósito fechado.

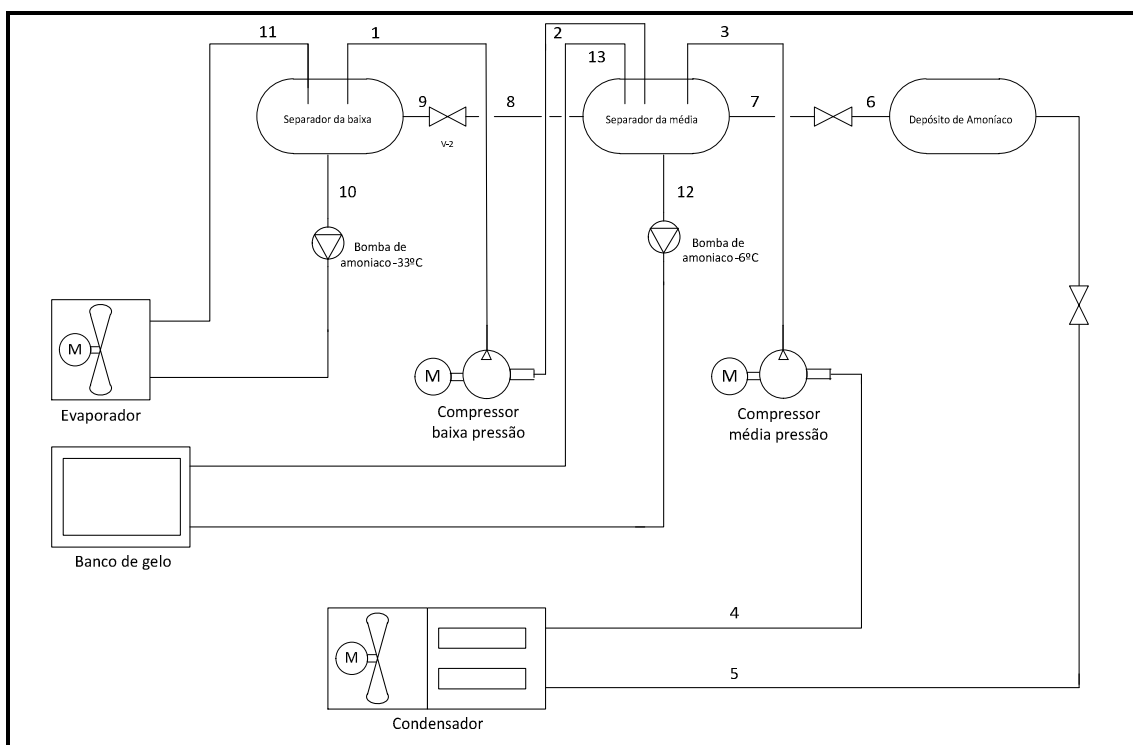
Com a utilização do condensador evaporativo é prática adotar-se uma temperatura de condensação de 14°C a 15°C acima da temperatura do bolbo húmido do ar exterior.

Os evaporadores são alimentados pelo fluido frigorígeno a partir de um separador da baixa pressão que está no estado líquido (-33°C) por bombeamento. O separador da média pressão será de injeção total com uma temperatura de -6°C, e o fluido da média pressão irá condensar num condensador evaporativo.

Nesta instalação utilizamos a temperatura que temos disponível no separador da média pressão (-6°C), para fazer o arrefecimento dos bancos de gelo. É a partir dos bancos de gelos que se faz climatização das zonas de carga (cais 1, cais 2 e corredores de circulação aos cais).

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

O esquema frigorífico de princípio e a sua representação no diagrama de Mollier do R717 encontram-se retratados na *Figura 21*.



**Figura 21:** Diagrama do circuito de frio

O amoníaco entra no compressor do primeiro andar no estado **1** como vapor saturado, é comprimido até à pressão intermédia no estado **2** e liberta vapor sobreaquecido no depósito da média pressão que se encontra a uma temperatura de  $-6^{\circ}\text{C}$ . Seguidamente, o fluido no estado de vapor saturado é aspirado pelo compressor do segundo andar de compressão no estado **3** e é comprimido até à pressão de condensação, para o estado **4**. Mais uma vez é considerado que a compressão é adiabática e reversível, isto é, isentrópica.

Depois, o fluido entra no condensador no estado de vapor sobreaquecido, onde diminui a temperatura libertando calor sensível. De seguida, dá-se a condensação a cerca de  $+35^{\circ}\text{C}$  com a libertação de calor latente.

O processo continua com o subarrefecimento do amoníaco ainda dentro do condensador, prolongando-se pelo depósito de líquido e da tubagem - estado **6**. O subarrefecimento é de  $10^{\circ}\text{C}$ .

O líquido subarrefecido sofre uma expansão para o depósito da média pressão com a consequente queda de pressão, formando-se uma mistura correspondente ao estado 7 que inicia o efeito refrigerante nesse depósito. O vapor saturado formado é aspirado pelos compressores de média pressão (estado 3).

Alguns do líquido no depósito da média pressão a  $-6^{\circ}\text{C}$  vaporizam-se com o calor fornecido na descarga do compressor de baixa pressão no depósito intermédio. O líquido comprimido - estado 8 - segue para o separador de líquido a  $-33^{\circ}\text{C}$ , através de outra válvula de expansão, dando origem a uma mistura de fluido com título, correspondente ao estado 9. A partir deste separador, o amoníaco líquido é bombeado a  $-33^{\circ}\text{C}$  até às válvulas de regulação de caudal de cada evaporador.

Por fim, o fluido sai para as bombas e é bombeado para os evaporadores. Aí evapora-se uma pequena parte e o fluido (mistura aproximada de 25% de gás e 75% de líquido) volta ao separador da baixa pressão, sempre com a ajuda da bomba. Esta circulação permanece até que se atinja a temperatura desejada nas câmaras.

É a partir do separador da média pressão que se faz o aproveitamento da temperatura disponível neste separador ( $-6^{\circ}\text{C}$ ). Para fazer o arrefecimento dos bancos de gelo, o princípio é o mesmo. O amoníaco é bombeado até às serpentinas do banco de gelo onde sofre a expansão e volta novamente ao separador da média.

#### **4.3.5. Funcionamento de um evaporador com descongelação por gás quente**

Em cada câmara frigorífica só descongela um evaporador de cada vez.

Quando estiver um evaporador a descongelar, mantêm-se a funcionar os outros evaporadores da câmara.

Para o efeito de descongelação utiliza-se um relógio de descongelação “*Defrost Timer*” que nos indica a altura de fazer a descongelação (de 8 em 8 horas nas câmaras). Utilizamos também um termóstato de fim de descongelação que está ligado ao evaporador. Quando a temperatura da serpentina atinge os +15°C a +20°C, a descongelação está terminada e o termóstato fim de descongelação faz com que o ciclo de descongelação termine.

O “*Defrost Timer*” provoca o fecho da eletroválvula da linha de líquido, mantendo-se a aspiração e os ventiladores em funcionamento. Passados três ou quatro minutos os ventiladores param e fecha-se a eletroválvula da aspiração, abrindo-se a eletroválvula do gás quente. A tubagem do gás quente passa primeiro pelo tabuleiro, descongelando-o e só depois é que faz a sua entrada na zona de aspiração do evaporador.

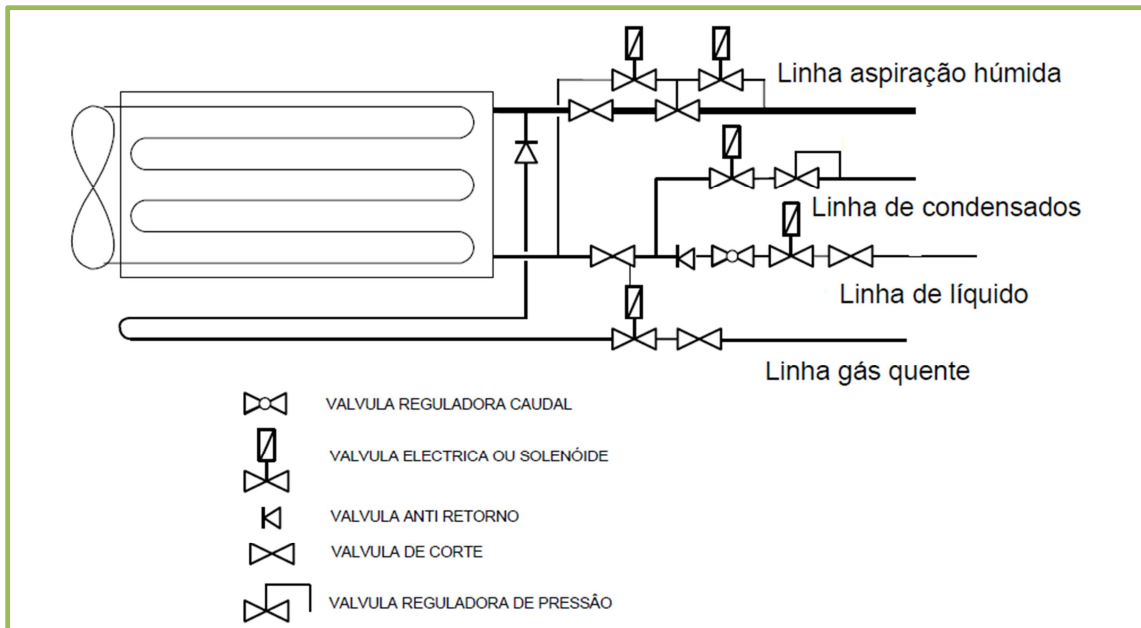
O gás quente percorre a serpentina do evaporador, descongelando-o. Ao sair pela linha de líquido, vê-se obrigado a seguir o caminho da linha de retorno de condensados por encontrar uma válvula anti-retorno pela frente.

Na linha de condensados existe uma válvula de controlo de pressão que deixa passar o fluido resultante da descongelação a jusante com uma pressão mais baixa para o separador.

Essa válvula permite-nos aumentar a pressão de descongelação do evaporador e, quando em ciclo normal, não deixa que nenhum líquido se escape por aquela linha.

Terminada a descongelação, a eletroválvula de gás quente fecha, abrindo-se a eletroválvula da aspiração para baixar a pressão no evaporador. Passado algum tempo abre a eletroválvula da linha de líquido.

Só quando as serpentinas atingirem uma temperatura perto da normal de funcionamento é que os ventiladores se colocam em marcha.



**Figura 22:** Esquema de válvulas do evaporador

Tendo em consideração a figura 22, apresenta-se um resumo do acionamento das eletroválvulas na sequência da descongelação em cada evaporador

“Defrost Timer” ou relógio no intervalo da descongelação.

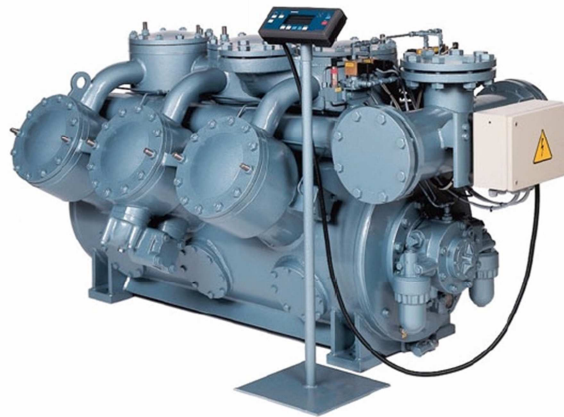
- 1 – Fecho das eletroválvulas de admissão e saída de NH<sub>3</sub>.
- 2 – Ventiladores parados e fecho de registos no evaporador.
- 3 – Abertura da eletroválvula de admissão de gás quente.
- 4 – Abertura da eletroválvula de saída de gás quente para o tubo de condensados.

Período de descongelação terminado.

- 1 – Fecho da eletroválvula de admissão de gás quente.
- 2 – Fecho da eletroválvula de saída de gás quente.
- 3 – Abertura das eletroválvulas de admissão e saída de NH<sub>3</sub>.
- 4 – Arranque dos ventiladores do evaporador após temporização regulável de 0 a 3 minutos.
- 5 – Os restantes evaporadores passam a operar em regime normal.

#### 4.4. Compressores de Amoníaco

Na Gelpeixe, S.A. estão instalados compressores alternativos da marca Grasso da série RC12 como mostra a figura 23.



**Figura 23:** Compressor Grasso série RC 12

Estes compressores estão preparados para trabalhar a diferentes rotações como vem demonstrado na tabela seguinte:

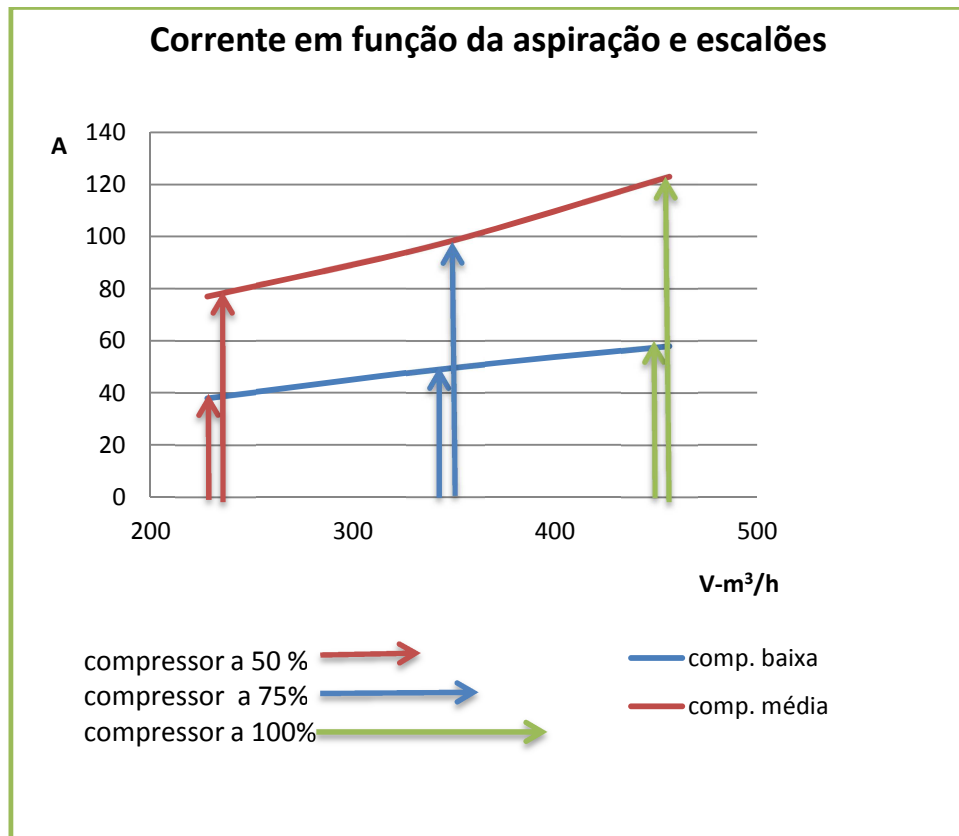
**Tabela 12:** r.p.m. motor vs compressor

r.p.m do motor	relação mecânica	r.p.m do compressor
1450	2,7	535
	2,5	600
	2,1	675
	2	720
	1,8	765
	1,7	860
	1,5	965

(dados do fabricante)

Na central frigorífica a relação que está em funcionamento é a de 1,7 ou seja o compressor trabalha a uma rotação de 860 rpm. Em ambos os circuitos a relação é a mesma.

O gráfico 9 demonstra o funcionamento da central frigorífica tendo em conta a aspiração do fluido refrigerante em relação à corrente consumida pelo motor elétrico (baixa pressão e média pressão) e ao n.º de escalões introduzidos.



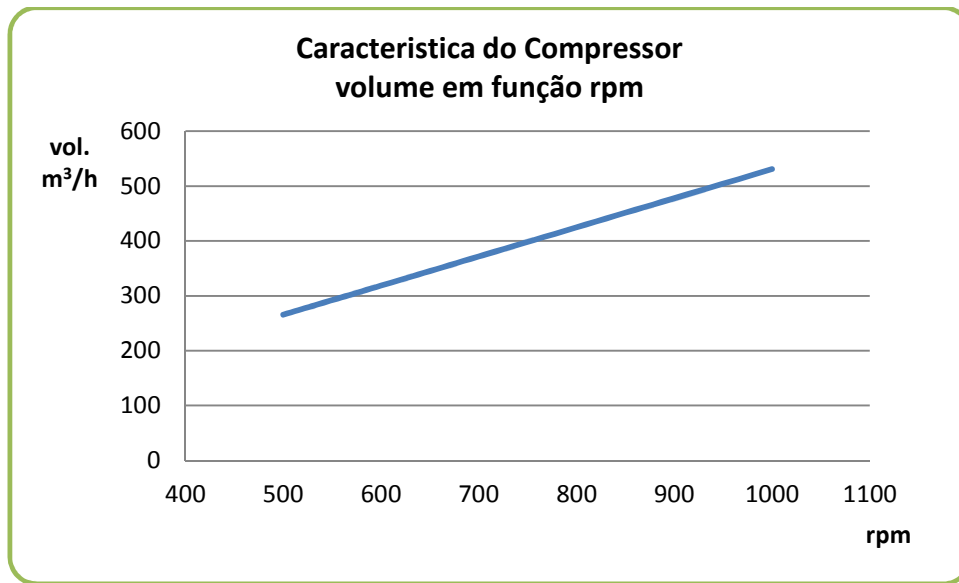
**Gráfico 9:** Relação entre volume comprimido e consumo elétrico

Nas tabelas e gráfico seguintes, apresentam-se as características dos compressores instalados na central frigorífica, considerando a relação entre os escalões e volume de fluido aspirado.

**Tabela 13:** r.p.m. vs volume

Compressor	
4 cilindros	
r.p.m	Volume
1000	531
860	457
700	372
600	319
535	284
500	266

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Gráfico 10:** Relação entre a velocidade e volume comprimido

**Tabela 14:** Compressão por escalões

Compressão por escalões				
Cilindros	rpm	Volume m³/h	Corrente (A)	
			C. baixa	C. média
2	860	228	38	77
3	860	342	49	97
4	860	457	58	123

## 5. Estudo para a Implementação do Aumento da Eficiência Energética

---

### 5.1. Motores de alto rendimento



*Figura 24: Motor de alto rendimento ABB*

Conforme já demonstrado nos capítulos anteriores, a substituição dos motores convencionais por motores de alto rendimento, alimentados por variadores, permite aumentar em muito a eficiência de uma instalação. Todavia, para implementar estas alterações é necessário efetuar investimentos significativos, pelo que, do ponto de vista económico é mais viável instalar os variadores tendo os motores em bom estado.

Na central frigorífica em estudo já houve a necessidade de proceder à substituição do motor elétrico no compressor n.º 1 (conforme já referido no capítulo 2.3). Tendo em consideração o n.º de horas que este iria trabalhar (cerca de 8000h/ano) a compra de um motor de alto rendimento afigurou-se como a melhor opção.

Na tabela seguinte vem demonstrada a poupança energética do motor.

**Tabela 15:** Poupança de um motor de alto rendimento

Motor de alto rendimento 37kW	
Total de horas de trabalho	8000 h
Potência poupada	2,5kW (4 A /fase)
Preço por hora	0,11 kW/€
Poupança por hora	0,28 € /h
Poupança por ano	<b>2.240 €</b>

Perante os resultados evidenciados na tabela, confirma-se que este motor consome menos 4 amperes em relação aos dois outros motores com a mesma potência. Com esta substituição do motor verifica-se uma poupança energética anual de 2.240€.

Como o motor de 37kW de alto rendimento teve um custo de 2.700€, o retorno do investimento é alcançado ao fim de 14 meses.

Na atualidade, o mercado oferece varias soluções, podendo as empresas escolher a solução técnica e economicamente mais viável para melhorar a eficiência energética das suas instalações.

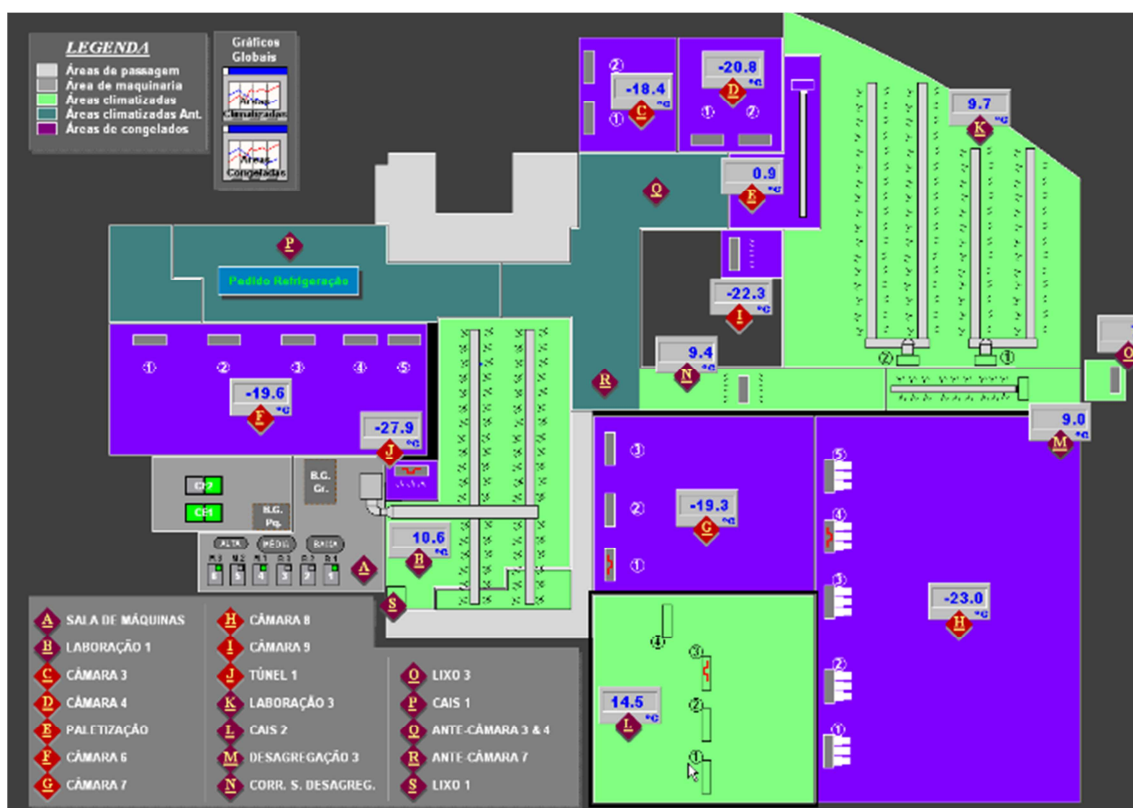
Contudo, a implementação de novos equipamentos deverá ser precedida de um ou vários relatórios técnicos que provem a viabilidade económica da introdução de novos equipamentos que promovam a eficiência energética. Nestas situações não é suficiente dizer-se que existirá poupança. É necessário demonstrar como esta se alcançará.

Não raras vezes, o investimento associado à promoção da eficiência energética tem algum peso na contabilidade das empresas e o *payback* muito recorrentemente estende-se por mais anos do que estava inicialmente previsto na compra do equipamento ou na instrução de novos sistemas.

## 5.2. Princípio de funcionamento da central

O autômato de comando da central frigorífica tem ao dispor vários parâmetros de visualização onde é possível ver *online* o funcionamento da central. São exemplo desses parâmetros os valores de pressão, temperatura, quantos compressores estão a trabalhar e o n.º de escalões que estão pedidos.

A figura 25 representa a planta de refrigeração da Gelpeixe.



**Figura 25:** Planta de refrigeração da Gelpeixe

No caso em estudo, na figura 26 e figura 27 está representado a pressão de *set point*, a pressão instantânea presente no circuito, n.º de escalões introduzidos e o sentido do fluido refrigerante nos circuitos da baixa e média pressão.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

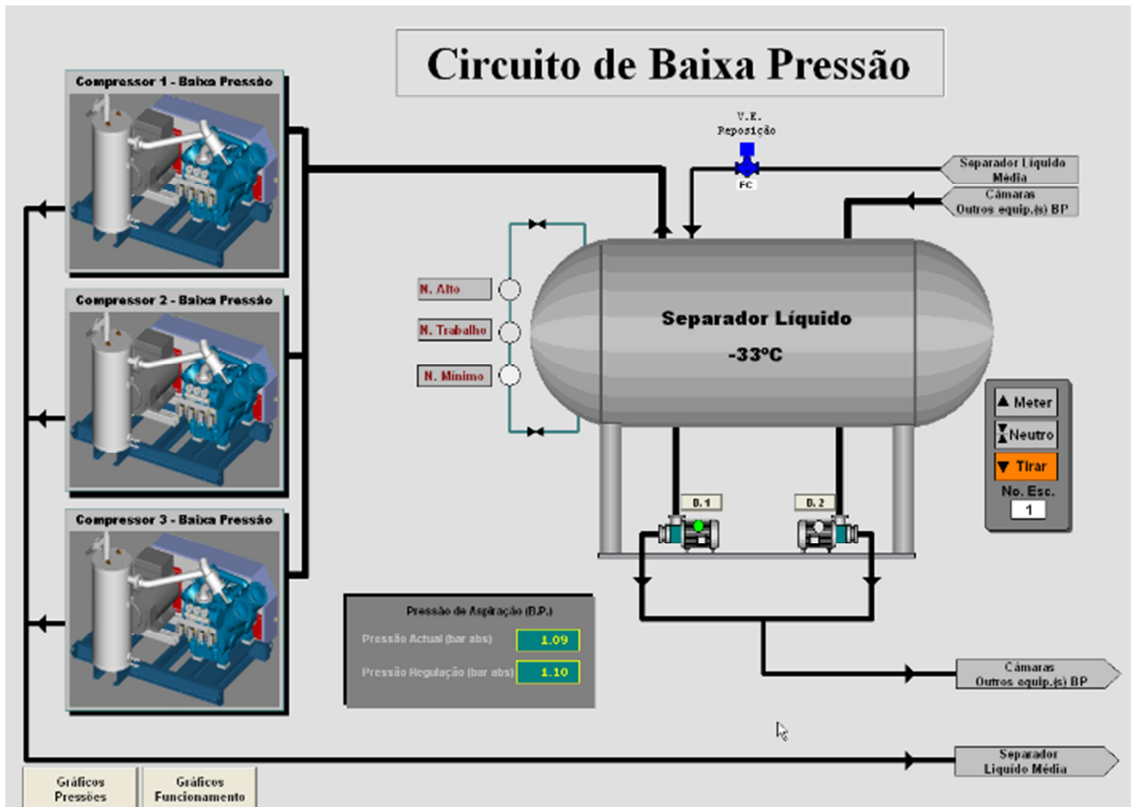


Figura 26: Circuito da Baixa Pressão

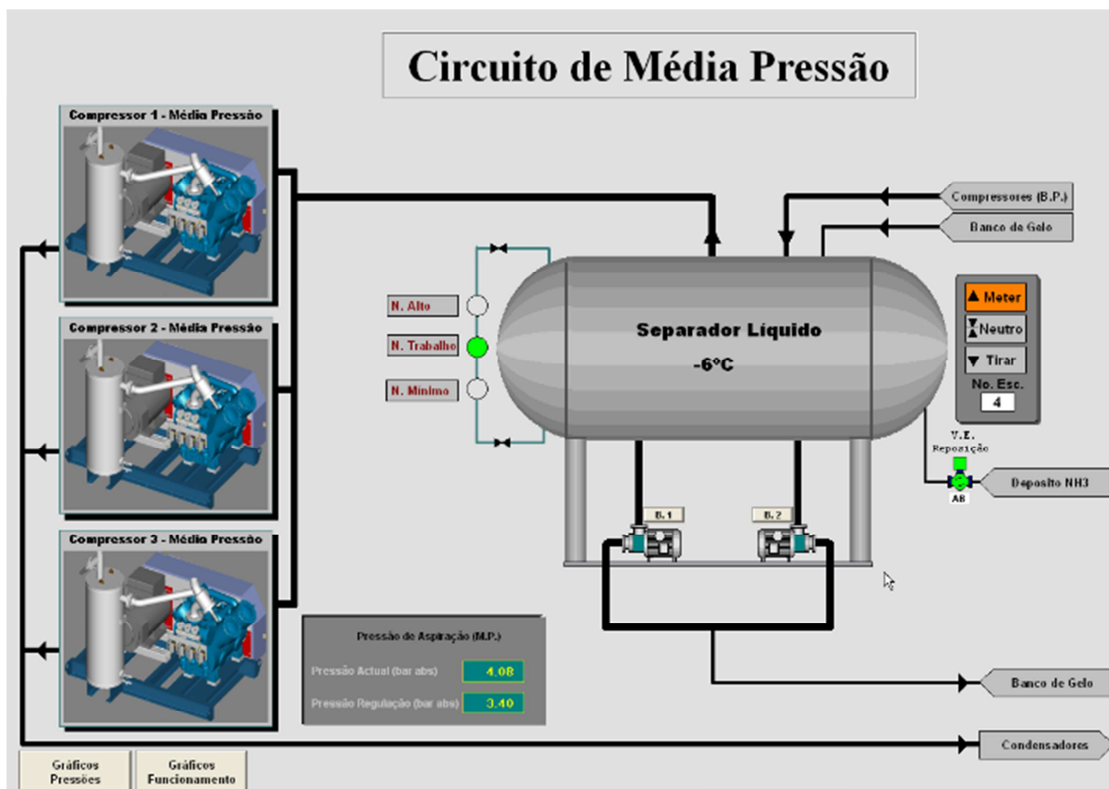


Figura 27: Circuito da Média Pressão

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

O autômato dispõe também de uma janela (figura 27) onde se podem verificar os consumos dos compressores, horas de funcionamento e o nº de escalões introduzidos.

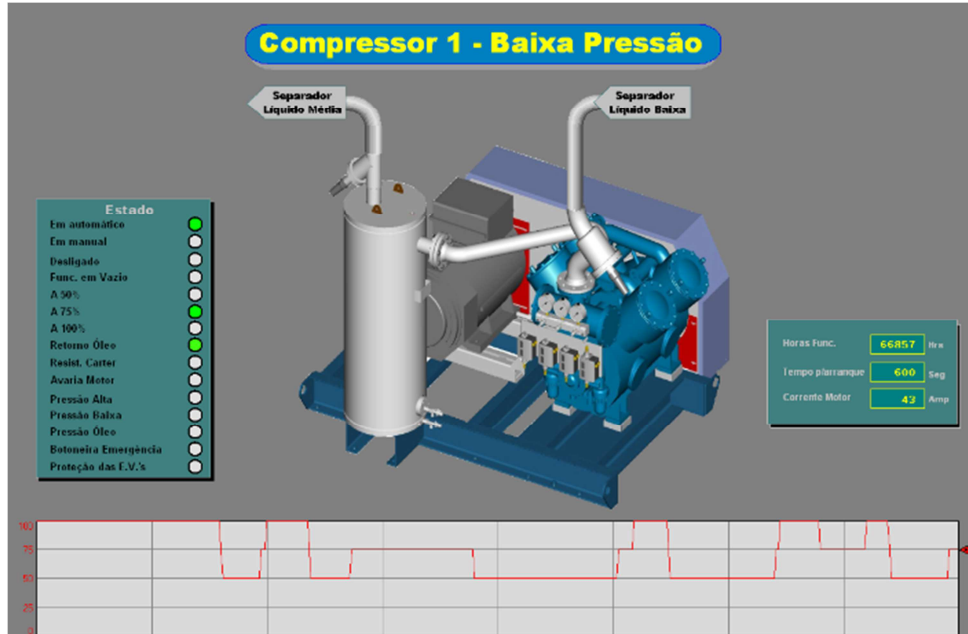


Figura 28: Compressor da Baixa Pressão

O gráfico abaixo apresentado demonstra o funcionamento do circuito da baixa pressão.

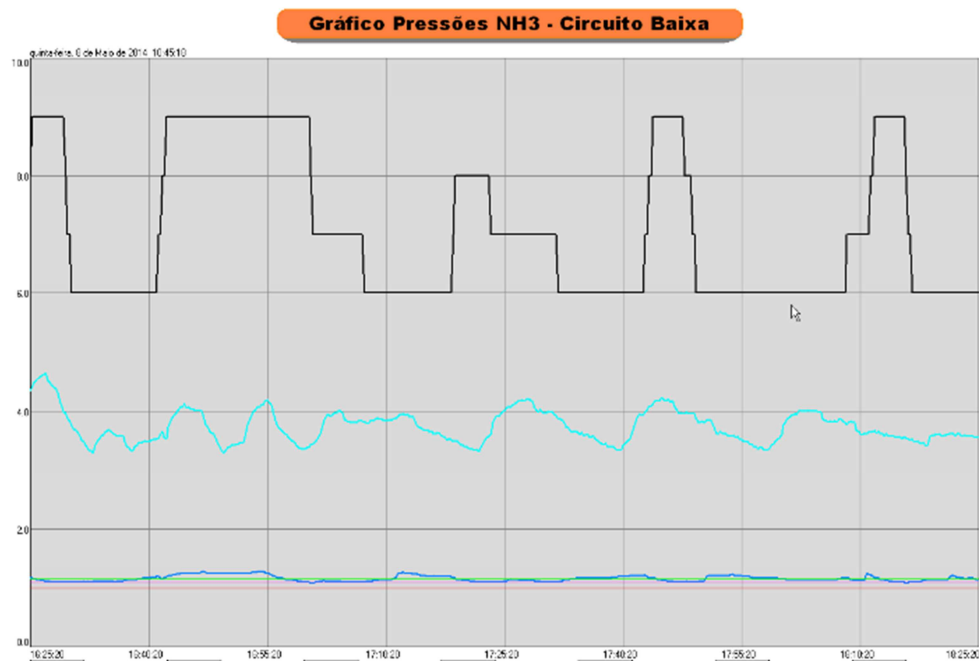


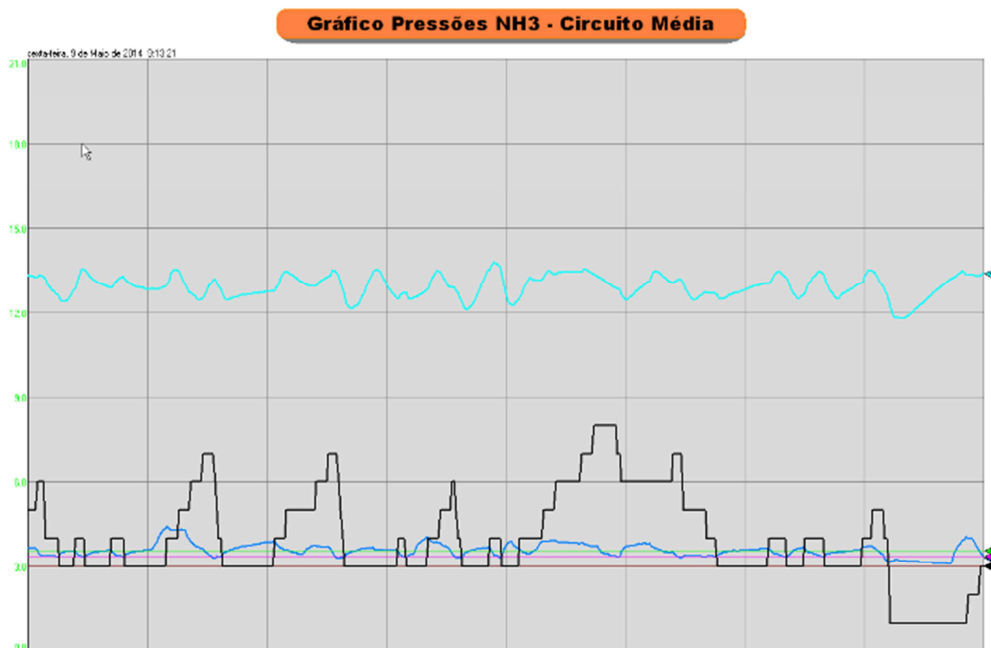
Gráfico11: Gráfico de pressões no circuito da baixa pressão

Este gráfico revela em cada instante a pressão de aspiração, a pressão no circuito da baixa e número de escalões que estão introduzidos para satisfazer o pedido de frio.

Os escalões estão representados pela linha a negro, podendo verificar-se que nalguns instantes temos a potência máxima de aspiração introduzida ou seja os três compressores a 100%.

Com a introdução da variação pretende-se atenuar as cristas que se vêem no gráfico (na parte dos escalões). Desta forma, quando a pressão começar a aumentar, a velocidade do compressor aumentará também para contrapor o aumento de pressão. Quando a pressão começar a diminuir a velocidade do compressor diminuirá também.

No gráfico seguinte vem demonstrado o funcionamento do circuito da média pressão.



**Gráfico12:** Gráfico de pressões no circuito da média pressão

No circuito da média pressão pretende-se efetuar exatamente o mesmo que foi efetuado no circuito da baixa pressão.

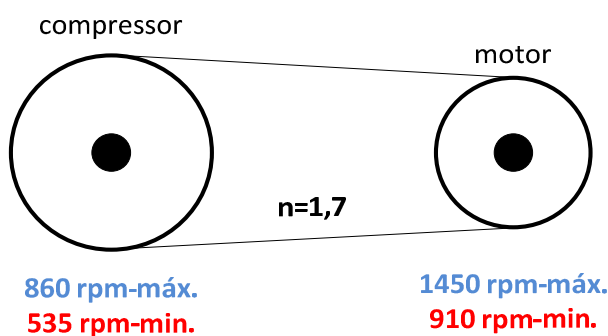
O gráfico acima exposto, corrobora, inequivocamente que um aumento de pressão provoca um aumento do n.º de escalões introduzidos.

### 5.3. Soluções para a otimização da compressão

Para executar a otimização do sistema com vista a uma maior eficiência energética temos duas opções:

1. Nesta opção mantém-se a mesma relação mecânica, fixam-se os escalões dos compressores nos 100%, introduzimos o variador e aqui sim fazemos a variação da velocidade consoante o aumento da pressão.

Esta alteração implica fazer alterações ao nível da programação / controlo, visto que a rotação no motor irá variar entre os 910 e 1450 rpm para satisfazer as necessidades de aspiração no circuito da baixa pressão quer no da média pressão.

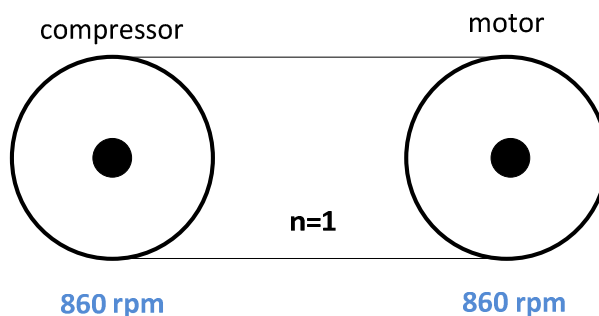


**Figura 29:** Relação da velocidade máxima e mínima

2. Nesta opção muda-se da poli de ataque do motor por uma igual ao do compressor, para ficarem com mesma relação ou seja  $n=1$ .  
Com a introdução do variador conseguimos efetuar o ajuste da rotação para que o compressor mantenha a rotação de 860 rpm.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

Esta alteração não implica alterações ao nível da programação / controlo do sistema existente, visto que não haveria variação na rotação do motor esta ficaria fixa nos 860 rpm.



**Figura 30:** Configuração com a relação igual a 1

Na tabela seguinte está demonstrada a relação entre a rotação do motor e rotação do compressor, com a introdução do variador de velocidade.

**Tabela 16:** Rotações máximas e mínimas com variação

r.p.m. comp.	rpm motor	Volume m <sup>3</sup> /h	Características
860	1450	457	
535	910	284	Equivale o comp. a 50% a 860 rpm

Na tabela seguinte encontram-se as referências e preços dos variadores a colocar nos motores dos compressores.

**Tabela 17:** Potência e preços dos variadores a colocar nos compressores

Potência Nominal (kW)	Potência Nominal (kW)	Variador Schneider	
Motor	Variador	Ref.	Preço
37	45	ATV61HD45N4	3.699€
75	90	ATV61HD90N4	6.231€

#### 5.4. Simulação em *Matlab/Simulink*

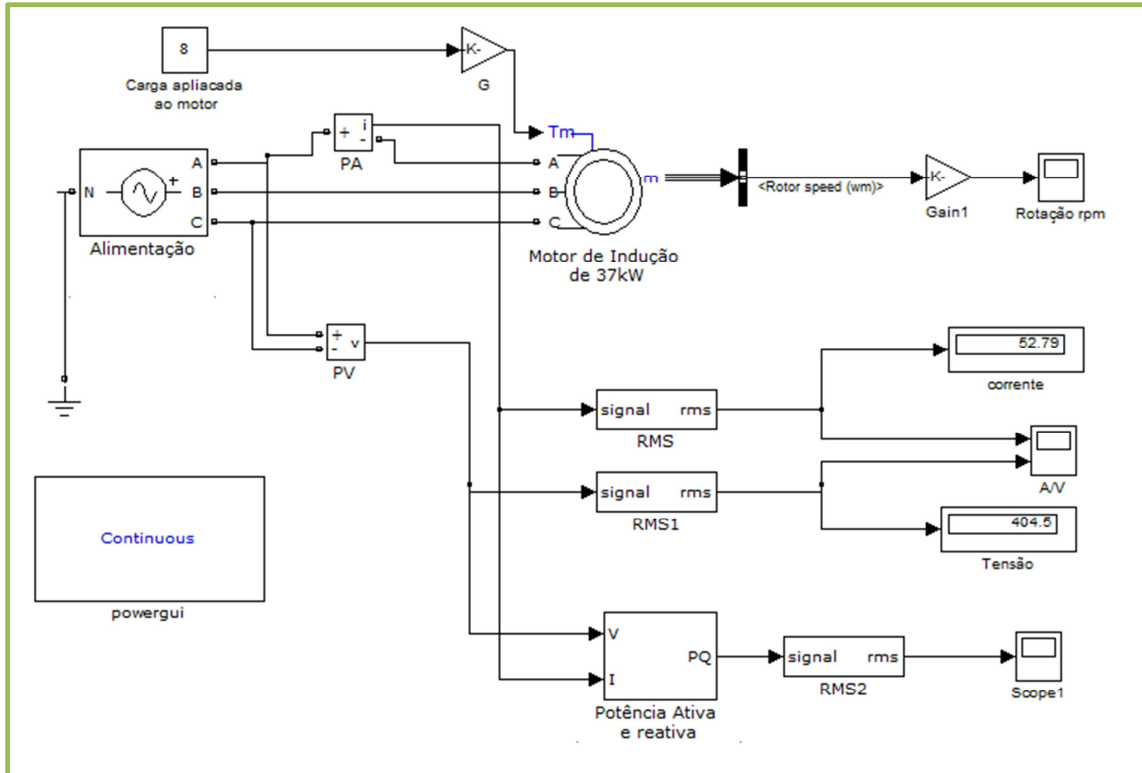
Para comprovar que a introdução de variadores de velocidade na central frigorífica vai provocar a diminuição do consumo energético, vamos recorrer à simulação em *MATLAB/SIMULINK*.



1. Inicialmente irá ser efetuada a simulação do compressor, com a ligação elétrica que tem na atualidade. Serão retirados os valores com o intuito de serem comparados com os valores que o compressor tem num funcionamento normal.
2. Na segunda simulação introduz-se o variador e retiram-se os valores de consumo para comparar com os do ponto anterior.
3. Analisam-se os resultados obtidos, com o intuito de confirmar se a introdução dos variadores é vantajosa para a instalação.

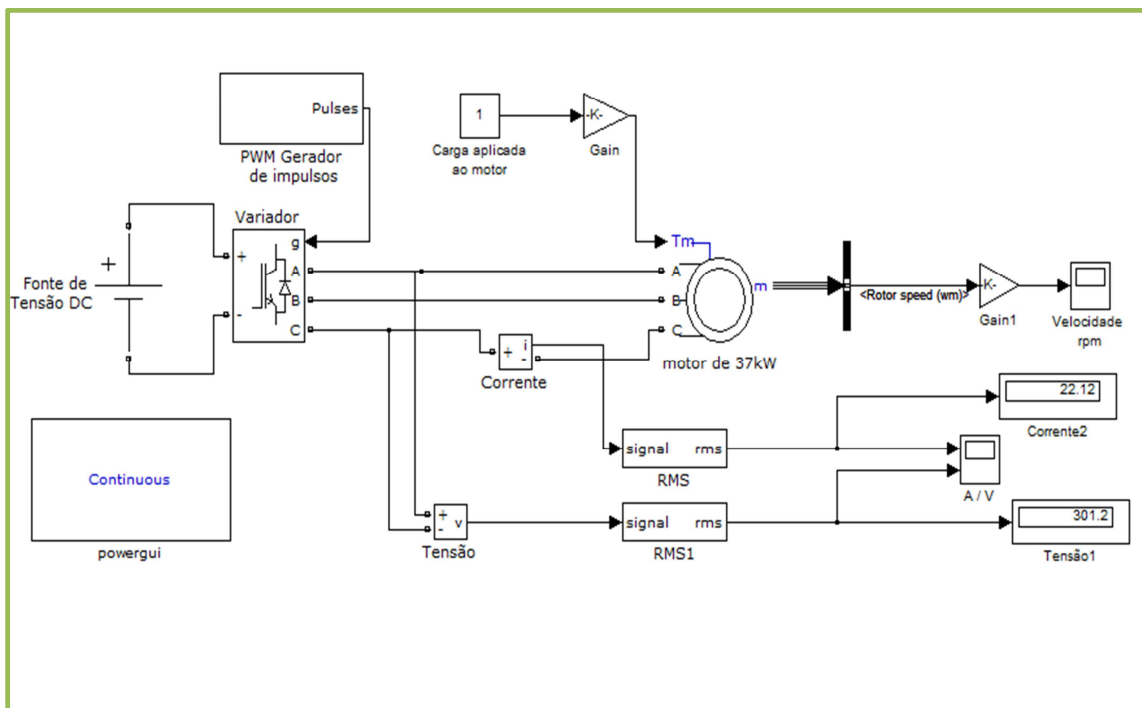
Na figura 30 apresenta-se o esquema em *matlab* da simulação do compressor da baixa pressão acionado por um motor de 37kW sem variador.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO



**Figura 31:** Esquema de simulação em Simulink (sem variação)

Em contraposição, na figura seguinte apresenta-se o esquema em *matlab* da simulação do compressor da baixa pressão accionado por um motor de 37kW com variador:

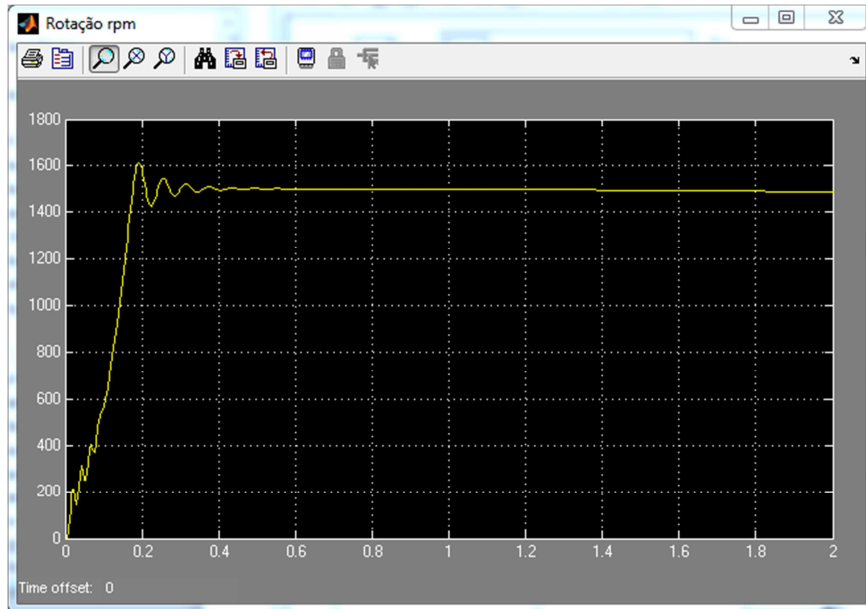


**Figura32:** Esquema de simulação em Simulink (com variação)

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

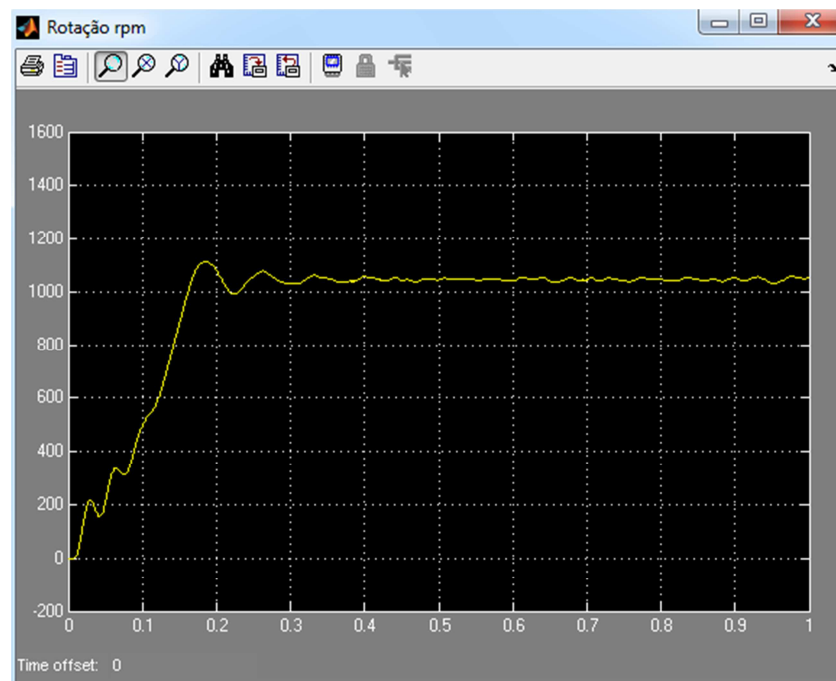
O gráfico seguinte representa o arranque do motor (sem variação) até atingir a velocidade nominal 1450 rpm (50Hz).

**Gráfico 13:** *Evolução da velocidade do motor no arranque sem variação*



No gráfico seguinte representa-se o arranque do motor (com variação) até atingir a velocidade nominal 1050 rpm (35Hz).

**Gráfico 14:** *Evolução da velocidade do motor no arranque com variação*



Pela análise do gráfico podemos constatar que ao introduzir o variador, conseguimos controlar a velocidade do motor e consequentemente a velocidade do compressor, possibilitando assim fazer o ajuste do compressor ao pedido de frio.

#### 5.4.1. Simulação tendo em conta opção 1 do capítulo 5.3:

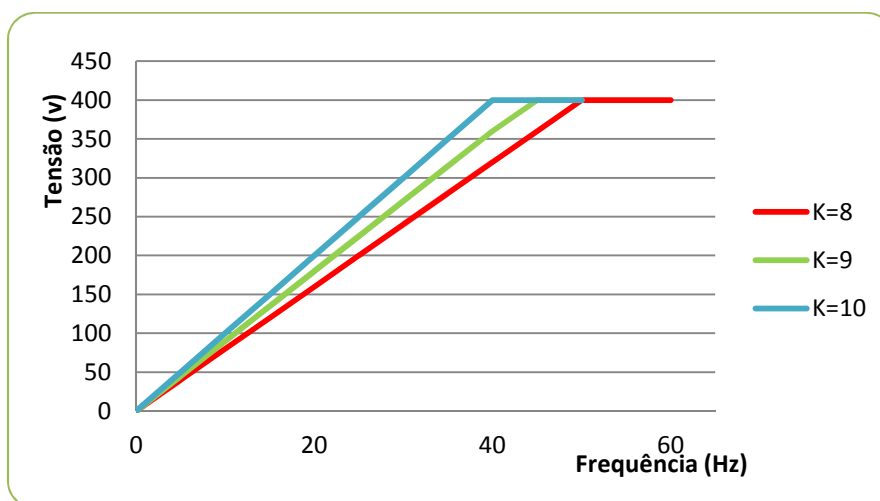
Nas simulações experimentais cujo objetivo é demonstrar que a instalação dos variadores é vantajosa, teve-se em conta o volume de gás a comprimir, as velocidades máximas e mínimas do compressor e curva característica a implementar no variador, como vem demonstrado na tabela 19 e no gráfico 15.

**Tabela 18:** Resumo dos valores de tensão e da curva característica V/F

Tensão (V)		Frequência Hz	rpm- motor	rpm- comp	volume m <sup>3</sup> /h
K=8	K=9				
400	400	50	1450	860	456
360	400	45	1305	774	441
320	360	40	1160	688	379
280	315	35	1015	602	286
249	279	31	902	535	191
240	270	30	870	516	184

K- Característica da curva V/F (controlo escalar)

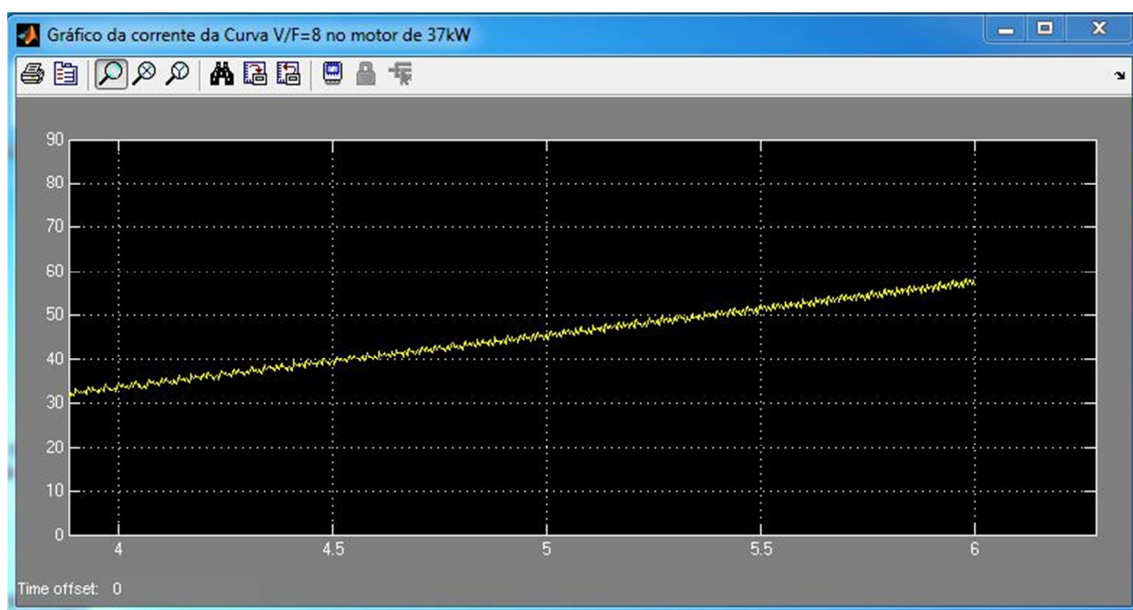
**Gráfico 15:** Curvas Características V/F



AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

Para se provar que a introdução dos variadores reduz o consumo de energia, nos motores de 37kW e 75kW, teve-se como referência o consumo do motor a trabalhar no regime nominal de carga e compararam-se os consumos em simulação com curva característica  $K=8$  (curva que acompanha o consumo do motor em regime normal de funcionamento). Utilizando a curva característica de  $K=9$  estamos a deslocar a curva  $V/F$  para a esquerda de  $K=8$ , aumentando assim o binário disponível, como vem representado no gráfico 15.

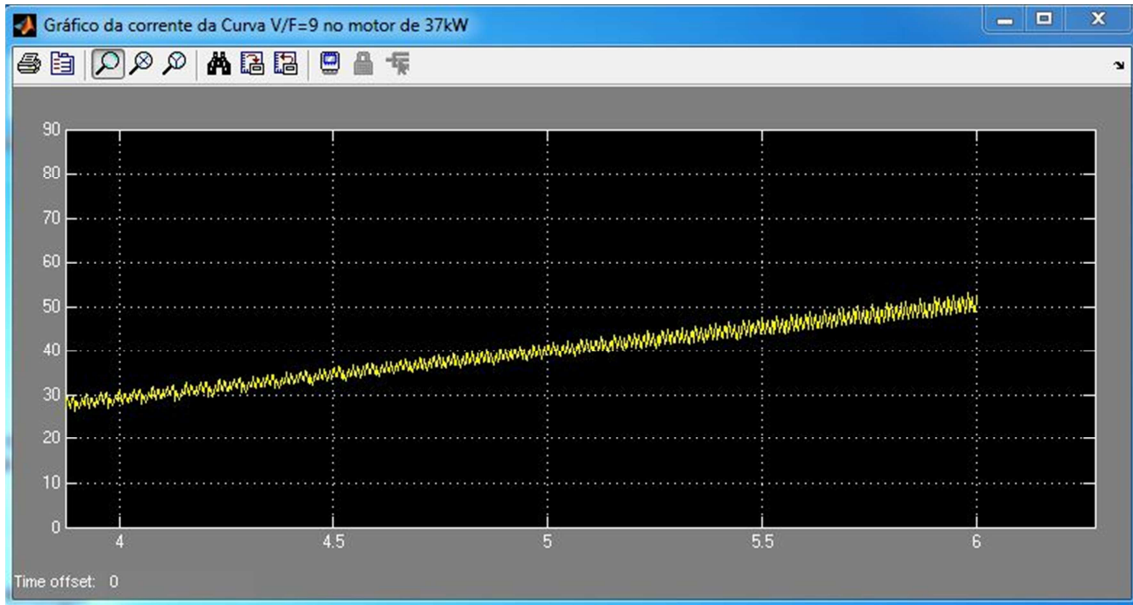
**Gráfico 16:** Corrente da curva  $V/F=8$  no motor de 37kW



(Tensão 400V - Frequência 50 Hz)

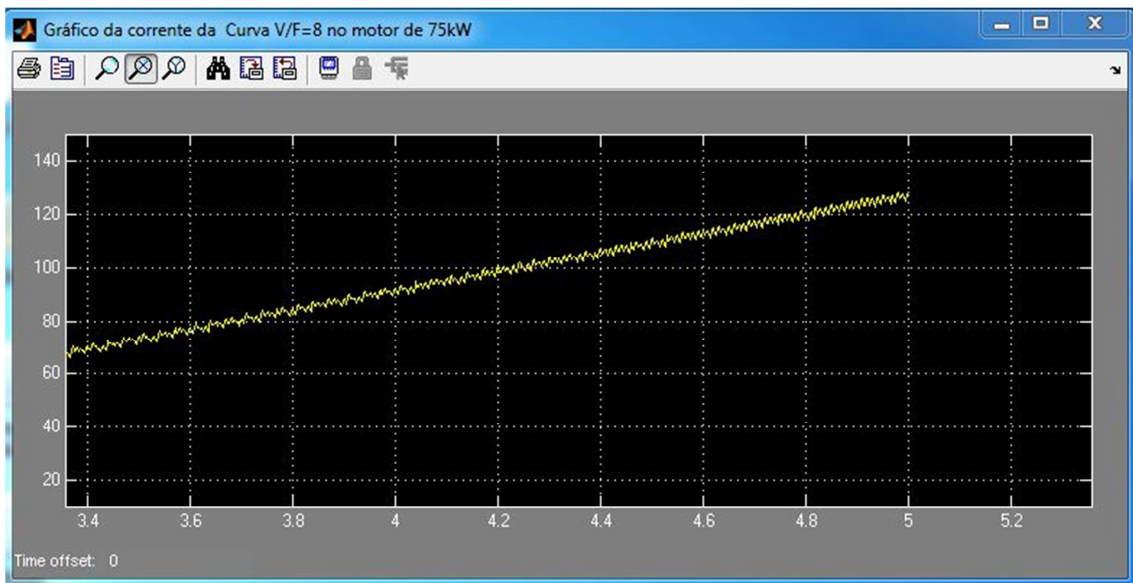
AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

**Gráfico 17:** Corrente da curva  $V/F=9$  no motor de 37kW



(Tensão 400V - Frequência 45 Hz)

**Gráfico 18:** Corrente da curva  $V/F=8$  no motor de 75kW



(Tensão 400V - Frequência 50 Hz)

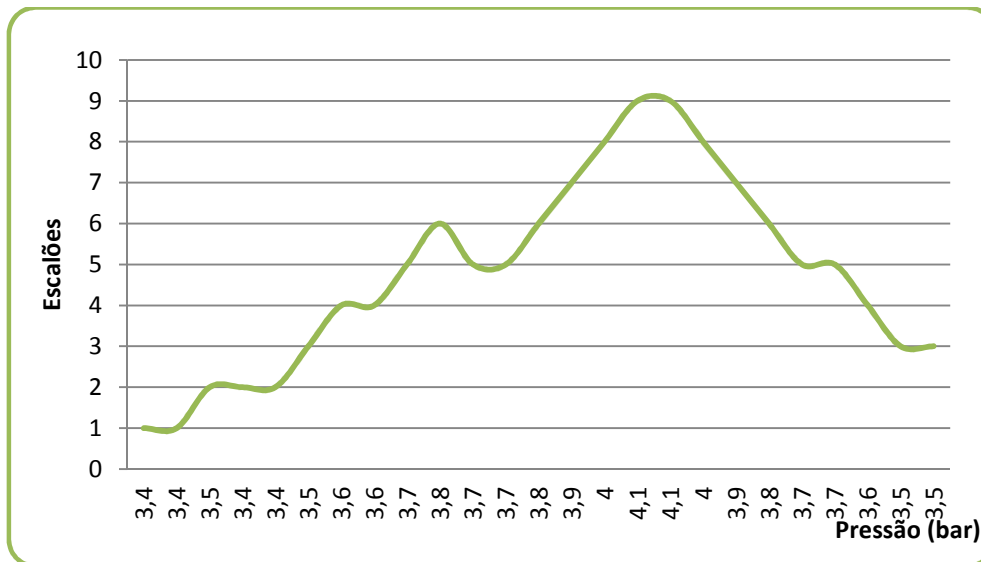


AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

**Gráfico 20:** Evolução da compressão com variação na baixa pressão



**Gráfico 21:** Evolução da compressão com variação na média pressão



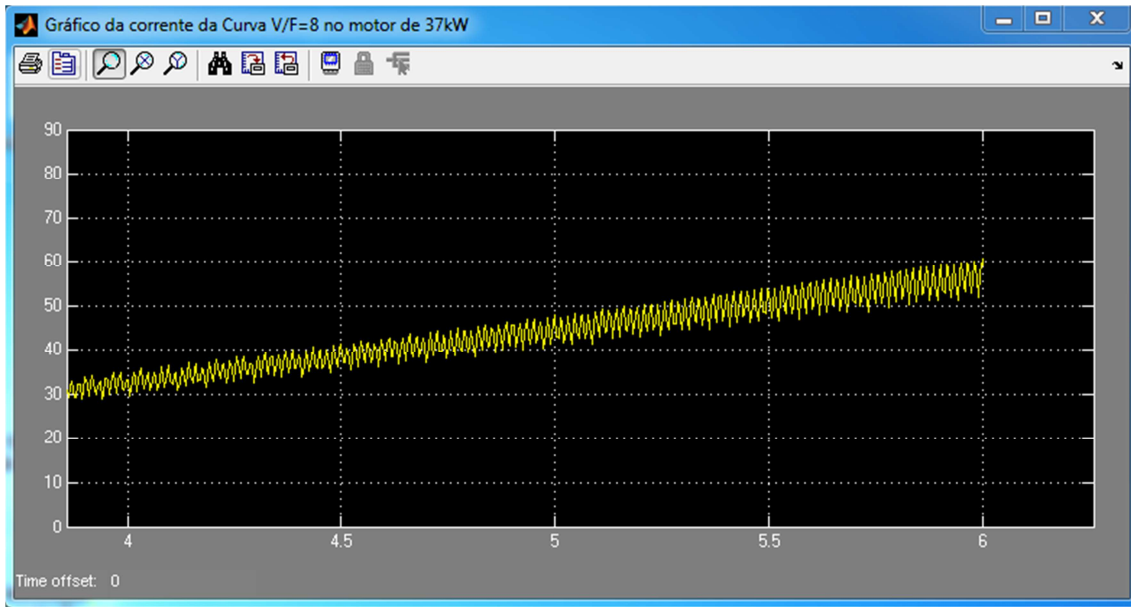
#### 5.4.2. Simulação tendo em conta a opção 2 do capítulo 5.3

Nesta simulação iremos apenas bloquear a velocidade do motor nas 900 rpm, sendo necessário trocar a poli do motor para obter uma relação de  $n=1$ .

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

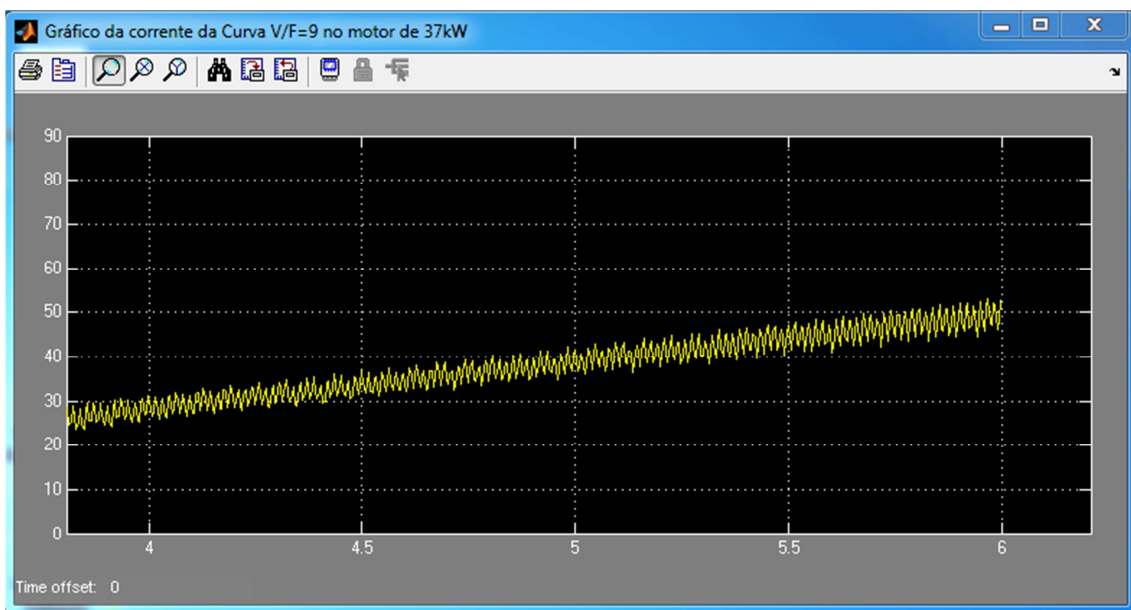
Continuaremos a utilizar o controlo escalar no variador e um  $V/F=9$ . Os resultados obtidos vêm demonstrados nos gráficos seguintes.

**Gráfico 22:** Corrente da curva  $V/F=8$  no motor de 37kW



(Tensão 249V - Frequência 31 Hz)

**Gráfico 23:** Corrente da curva  $V/F=9$  no motor de 37kW



(Tensão 279V - Frequência 31 Hz)



Após a análise dos resultados das simulações e da visualização dos gráficos pode verificar-se que no motor de 37Kw há uma redução de 4 amperes no consumo o que representa uma redução de 7% no consumo. O motor de 75kW apresenta uma redução de 15,5 amperes o que significa uma redução de 12% no consumo.

### 5.4.3. Conclusões das simulações

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo das simulações efetuadas nas duas opções.

**Tabela 19: Resumo das simulações**

Opção 1								
	Compressor 37kW				Compressor 75kW			
Curva V/F	K=8	K=9	dif	%	K=8	K=9	dif	%
Corrente (A)	57,08	53,01	4,07	7	127	118	9	7
Opção 2								
	Compressor 37kW				Compressor 75kW			
Curva V/F	K=8	K=9	dif	%	K=8	K=9	dif	%
Corrente (A)	57,08	52,8	4,28	8	127	111,5	15,5	12

Através das simulações efetuadas conclui-se que a opção 2 é aquela que apresenta a maior redução do consumo de energia. Contudo, esta opção mantém o sistema a funcionar como está ou seja com os escalões mecânicos.

Assim, apesar da poupança ser menor no motor de 75kW, a opção 1 afigura-se como a mais favorável pois vai permitir o ajuste do volume de gás a comprimir por aumento da pressão de entrada e assim aumentar a percentagem de energia poupada.

Na tabela precedente apresenta-se um resumo do ciclo de funcionamento num compressor da baixa e da média pressão.

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
DE UMA CENTRAL DE FRIO

**Tabela 20:** *Resumo do ciclo de funcionamento atual*

Ciclo funcionamento		
	Compressor da baixa	Compressor da média
Total de horas por dia	21 h	17 h
Total horas ano	7665 h	6200h
Preço por hora	0,11 kW/€	
Pot. do motor	37 kW	75kW
Custo por hora	4,07 €	8,25€
Total ano	<b>31.197€</b>	<b>51.150€</b>
Poupança por ano 7%	<b>2.184€</b>	<b>3.580€</b>

Por fim, a tabela seguinte evidência a poupança espectável que a introdução dos variadores iria trazer para a instalação.

**Tabela 21:** *Poupança espectável com a introdução dos variadores e o seu payback*

Ciclo funcionamento		
	Compressor da baixa	Compressor da média
Poupança por ano por compressor	2.184€	3.580€
Nº de variadores a instalar	3	3
Poupança total	6.552€	10.740€
Custo do variador	3.699€	6.231€
Custo Total	11.097€	18.693€
Payback (meses)	20	21

## 6. Conclusões

---

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado teve início com o estudo teórico do motor de indução trifásico e dos variadores eletrônicos de velocidade. Com este estudo concluiu-se que os motores de indução são das máquinas elétricas mais utilizadas na indústria, devido à robustez e fiabilidade e também ao aperfeiçoamento constante de que têm sido alvo com o intuito de aumentar o seu rendimento.

No caso dos VEV's também se constatou uma evolução significativa. Dispõem atualmente de grande versatilidade e vieram permitir que os motores de indução fossem aplicados em situações não viáveis no passado.

Seguidamente foi efetuado um levantamento dos protocolos e planos a nível nacional e mundial para o aumento da eficiência energética das instalações. Verificou-se que existe uma clara intenção de promover a melhoria do desempenho das instalações elétricas com vista à diminuição da pegada ecológica. Ficou evidente que essa necessidade é hoje uma realidade quer a nível ambiental quer a nível financeiro pelo que a mudança de comportamentos só depende da vontade de cada um de nós.

Muitas vezes a mudança que se impõe não se opera devido à falta de divulgação dos protocolos e benefícios existentes para a instalação de equipamentos que promovem o aumento da eficiência energética. Desta forma, cabe aos governos e às entidades promotoras a divulgação dessa informação para que mais empresas possam beneficiar desses incentivos.

Os gabinetes técnicos também desempenham um papel preponderante na divulgação dessa informação. Quando são chamados a efetuar estudos para implementação de equipamentos energeticamente eficientes devem fazê-lo de forma rigorosa, detalhada e responsável para que as empresas se sintam confiantes na realização do investimento. Não raras vezes os estudos mostram valores de poupança que a realidade vem depois desmentir.

O estudo efetuado na central de ar comprimido da Gelpixe vem comprovar esta realidade. Constatou-se que poupança energética alcançada com a introdução do variador é de 7% e não de 15 a 20% como indicado pelo fornecedor do equipamento.

Posteriormente foi apresentado o princípio de funcionamento da central frigorífica a amoníaco. Estas centrais são atualmente as mais utilizadas devido ao seu alto rendimento e à utilização do amoníaco como fluido frigorígeno. A utilização do amoníaco deve-se à sua fácil obtenção e ao seu COP elevado, isto é, uma central com uma potência elétrica de 100kW pode atingir uma potência de 400kW de frio.

Ficou evidente que a mudança de instalação de 3 tubos para 4 tubos trouxe grandes benefícios para a instalação, não só devido à poupança energética alcançada como também as descongelações dos evaporadores se tornaram mais eficientes.

O trabalho desenvolvido demonstrou como é importante quantificar com simulações a percentagem de poupança com a introdução dos variadores a utilidade apostar na eficiência energética nas instalações e também a importância em quantificar com simulações a percentagem de poupança com a introdução dos variadores.

O trabalho desenvolvido demonstrou também a utilidade de apostar na eficiência energética das instalações e a importância de quantificar com simulações a percentagem de poupança alcançada com a introdução dos variadores.

Através dos resultados obtidos através das simulações ficou evidente que a instalação de variadores nos compressores vem reduzir o consumo de energia na ordem dos 7% e vem melhorar o processo de compressão (ao suavizar o trabalho dos compressores deixam de existir os escalões e assim a necessidade de volume de gás a comprimir acompanha o aumento de pressão do sistema). Igualmente se alcançam ganhos ao nível dos arranques dos compressores uma vez que podemos utilizar uma rampa de aceleração e desta forma diminuem-se também os consumos.

É de salientar que a percentagem de energia poupada poderá ainda ser maior uma vez que o variador poderá ser ajustado ao melhor funcionamento da instalação frigorífica, pois que nas simulações a carga apresentava uma carga linear e não foi possível simular a energia poupada quando há variação da pressão de entrada.

O *payback* associado à instalação dos variadores situa-se nos 20 meses para os variadores a instalar nos compressores da baixa e de 21 meses para os variadores nos compressores da média. Os valores calculados para o *payback* apenas contemplam o valor do equipamento.

A substituição de motores mais antigos por motores de alto-rendimento é também uma opção a considerar, como ficou demonstrado nos cálculos efetuados no capítulo 5.1. Mais uma vez, como são equipamentos que trabalham muitas horas obtém-se um retorno do investimento em 14 meses.

Ao longo deste trabalho verificou-se também que em sistemas que trabalham muitas horas o *payback* do investimento nos variadores é menor, fornecendo assim maior segurança a quem faz esse investimento.

Finalmente, numa situação ideal em que a empresa optasse por substituir os motores antigos pelos de alto-rendimento em conjunto com a instalação de variadores, seria obtida uma redução cumulativa do consumo de energia da central frigorífica.

## 7. Bibliografia

---

**Matos, Paulo (2014)**, *“Princípio de funcionamento da central frigorífica”*, SAMIFI

**Costa, Nuno (2010)**, *“Auditoria Energética na Gelpeixe”*, CCEnergia

**Magueijo, Vitor; Fernandes, Cristina; Matos, Henrique; Nunes, Clemente; Calau, João; Carneiro, Jorge; Oliveira, Fernando**, *“Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto”*, Agência para Energia, 2010.

**IAPMEI, LNEG, ADENE, (2012)**, *“Estratégia de Eficiência Energética em Pequenas Médias Empresas”*, IAPMEI

**Chorincas, Joana (2013)**, *“Contributo das intervenções do QREN em contexto urbano para o aumento da eficiência energética”*, Observatório do QREN

**Rios, Ana (2008)**, *“Medidas de Eficiência Energética e Ambiental na Indústria”*, Dissertação de Mestrado em Tecnologias Ambientais, UTM

**Alves, Marina (2011)**, *“Desenvolvimento de um simulador de consumos de energia eléctrica ao nível do sector da habitação com capacidade para sugerir deslastre de cargas”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST

**Pereira, Sérgio (2012)**, *“Políticas para a Promoção da Eficiência Energética na Indústria Portuguesa”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais, UNL

**Dias, Joaquim (2012)**, *“Concepção de Instalações Frigoríficas em Expansão Directa versus Sistemas Inundados. Análise Energética das Soluções”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, ISEL

**Palma, João (1999)**, *“Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável”*, 2ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian

**Palma, João (2003)**, *“Fundamentos de Electrónica de Potência”*, Lisboa, ISEL

**Guerra, Matos**, *“Apontamentos de Produção de Frio e Refrigeração”*, Lisboa ISEL

**Francisco, António (2013)**, *“Motores Eléctricos”*, 5ª edição, ETEP-Edições Técnicas e Profissionais

**Oliveira, Paulo (2009)**, *“Curso de Automação Industrial”*, 3ª edição, ETEP-Edições Técnicas e Profissionais

#### **Sítios da Internet:**

Agência para a Energia: <http://www.adene.pt/textofaqs/industria>

Direção-Geral de Energia e Geologia: <http://www.dgeg.pt/>

Dicionário Priberam: <http://www.priberam.pt>

Energias de Portugal: <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/eficiencia-energetica>

Eficiência Energética: <http://www.eficiencia-energetica.com/>

*Matlab/Simulink*: <http://www.mathworks.com>

Portal da Eficiência Energética: <http://www.portal-eficienciaenergetica.com.pt/>

Portal da Energia: <http://www.portalenergia.com/category/producaoeficiencia/eficienciaenergetica/>