



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade De Engenharia

Metodologia de Controlo Preditivo para Otimização Energética de Equipamentos Domésticos no Sector Residencial

David José Santos Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Doutor João Paulo da Silva Catalão
Co-orientador: Doutor Edris Pouresmaeil

Covilhã, Junho de 2015

This work was supported by FEDER funds (European Union) through COMPETE and by Portuguese funds through FCT, under PEst-OE/EEI/LA0021/2013. Also, the research leading to these results has received funding from the EU 7th Framework Programme FP7/2007-2013 under grant agreement no. 309048.



Dedicatória

Aos meus Pais e irmão pela motivação e apoio que me fizeram crescer.

Agradecimentos

Em primeiro lugar um agradecimento especial é dedicado ao meu orientador, Prof. Dr. João Paulo da Silva Catalão, pois sem a sua disponibilidade não me seria concedida esta oportunidade fantástica que foi escrever este trabalho sob sua orientação.

Um grande obrigado ao meu co-orientador, Prof. Dr. Edris Pouresmaeil, pois sem a sua persistência este trabalho também não seria possível.

De realçar o meu grande bem-haja ao Laboratório Sistemas Sustentáveis de Energia (*SES-Sustainable Energy Systems laboratory*), localizado na Universidade de Beira Interior; laboratório associado com o “Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores - Investigação e Desenvolvimento” (INESC-ID), pois sem os recursos disponibilizados pelo laboratório seria impossível levar a cabo este trabalho.

Ao Dr. Eduardo Rodrigues, os meus sinceros agradecimentos pela disponibilidade mostrada em me motivar e ajudar a querer alcançar sempre mais e melhor.

Um obrigado especial à Mariana pela sua disponibilidade em me ajudar ao nível linguístico.

Finalmente, um obrigado a toda a minha família, pelas horas em que ouviram as minhas lamentações, pois o sacrifício é compensador.

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo principal implementar a técnica de controlo preditivo em algumas cargas residenciais. Pretende-se que a técnica de controlo preditivo seja implementada nas cargas residenciais, para que se possa conseguir um melhor aproveitamento da energia, e uma conseqüente redução da conta da eletricidade. Uma vez que o sector residencial tem um grande impacto percentual ao nível do consumo energético mundial, e uma redução de energia consumida neste sector é algo necessário, para reduzir os gases com efeitos de estufa que advêm da produção de eletricidade.

Para tal efeito, foram então feitas simulações com a duração de 24 horas, em cargas residenciais como o ar condicionado, o termoacumulador e o frigorífico. Cada carga é modelada em tempo discreto, e para tal foram sempre utilizados parâmetros reais, com o objetivo de aproximar os resultados o mais próximo possível da realidade. Assim, foi possível aplicar a técnica de controlo preditivo em algumas cargas como o ar condicionado. Outras cargas como a máquina de lavar roupa, foram simuladas para serem observados os seus efeitos ao nível de consumo e eficiência energética quando juntos com outros equipamentos. Durante a aplicação do controlo preditivo, este foi estudado de tal forma que foi possível aprofundar os conhecimentos sobre ele e assim, explorar funções adicionais que levaram à obtenção de resultados melhorados acima do que era previsto inicialmente. Foi ainda desenvolvido um programa para prever cenários de consumo ótimo, em função das cargas utilizadas nas habitações.

Os resultados foram todos obtidos a partir do software *Matlab/Simulink* onde foi utilizada a *toolbox* do controlo preditivo (*MPC*). Todos os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, tendo em conta o objetivo inicial de reduzir a energia consumida e conseqüentemente reduzir o custo da eletricidade.

Palavras-chave

Controlo Preditivo, *MPC*, Gestão da Procura, Pesos Variáveis

Abstract

This thesis aims to implement model predictive control technique in some residential appliances. The goal is to apply model predictive control technique in residential loads, to get a better use of energy, and a consequent reduction of the electricity bill. The residential sector has a large percentage impact on the world energy consumption and an energy reduction consumed in this sector, is something necessary to reduce greenhouse gas effects arising from the production of electricity.

To that end, simulations were then made with the last 24 hours, in some residential appliances like air conditioning, water heater and the washing machine. Each appliance is modeled in discrete time, and for that it was always used real parameters, for the purpose of bringing as close as possible to reality results. Thus it was possible to apply model predictive control technique in some loads like air conditioning, and other loads such as washing machine, this were simulated to observe its effects on consumption and energy efficiency when put together with other equipment. During the application of model predictive control, this has been studied in such a way that it was possible to increase the knowledge about it, and so exploring additional roles, and because of that it was possible to get improved results over what was originally planned. It was also developed a program for predicting optimal consumption scenarios, depending on the appliances used in buildings.

The results were all obtained from the Matlab / Simulink software which was used the toolbox of predictive control (MPC). All results were satisfactory, taking into account the initial goal of reducing energy consumption and consequently reduce the cost of electricity.

Keywords

Model Predictive Control, MPC, Load Management, Variable Weights

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Siglas	xvi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Gestão da Procura	4
1.3. Estrutura Elétrica dos Preços	5
1.4. Revisão da Literatura	6
1.4.1. Técnica de Controlo Preditivo	6
1.4.2. Conceito de Gestão da Procura	9
1.5. Objetivos do Trabalho	10
1.6. Organização da Dissertação	11
Capítulo 2	12
Identificação do Sistema	12
2.1. Descrição dos Sistemas	12
2.1.1. Modelo Físico da Casa	12

2.1.2.	Modelo Físico do Ar Condicionado	16
2.1.3.	Modelo Físico do Termoacumulador	17
2.1.4.	Modelo Físico do Frigorífico.....	18
2.1.5.	Cargas Independentes.....	18
2.1.6.	Produção de Energia local Local	20
2.2.	Termóstato	21
Capítulo 3		23
Técnica de Controlo Preditivo		23
3.1.	Estratégia de Controlo do <i>MPC</i>	23
3.2.	Problema de Otimização	25
3.3.	Estratégia de Controlo do <i>MPC</i>	30
Capítulo 4.....		32
Simulação e Resultados Experimentais.....		32
4.1.	Termóstato VS <i>MPC</i>	32
4.1.1.	Ar Condicionado	32
4.1.2.	Termoacumulador	34
4.1.3.	Frigorífico.....	36
4.2.	Estudo da Variação dos Pesos e Tempo de Amostragem	38
4.2.1.	Ar Condicionado	39
4.2.2.	Termoacumulador	44
4.2.3.	Frigorífico.....	48
4.3.	<i>MPC</i> com Pesos Variáveis.....	52

4.3.1.	Ar Condicionado	52
4.3.2.	Termoacumulador	55
4.3.3.	Frigorífico.....	57
4.4.	Introdução da Geração Local	59
4.5.	Gestão da Procura	60
4.6.	Previsão de Cenários para o Setor Residencial.....	62
Capítulo 5	66
Conclusões e Trabalhos Futuros	66
5.1.	Conclusões	66
5.2.	Contribuições.....	66
5.3.	Trabalhos Futuros.....	67
5.4.	Trabalhos Resultantes desta Dissertação	68
Bibliografia	69
ANEXOS	73
A.	Anexo A.....	74
B.	Anexo B.....	76
C.	Anexo C	77

Lista de Figuras

Figura 1.1 Nível de emissão dos gases com efeito de estufa dos maiores grupos económicos desde 1970 a 2012 [3].....	2
Figura 1.2 Eletricidade final consumida União Europeia-27 em 2010, [10].	3
Figura 1.3 Técnicas para gestão da procura, adaptado de [12].	5
Figura 1.4 Preço da eletricidade em função das horas do dia.....	6
Figura 1.5 Classificação dos vários métodos de controlo para sistemas <i>HVAC</i> , adaptado de [19].....	7
Figura 2.1 Interface gráfica do simulador utilizado em [36].....	12
Figura 2.2 Circuito térmico equivalente para uma divisão, adaptado de [36].	13
Figura 2.3 Resistência térmica, adaptado de [37].	15
Figura 2.4 Representação da máquina de Carnot para um AC, adaptado de [36].	17
Figura 2.5 Circuito equivalente para o termoacumulador, adaptado de [36].	18
Figura 2.6 Consumo de eletricidade no setor residencial na EU-27 em 2009, adaptado de [10].	19
Figura 2.7 Descrição esquemática do funcionamento e estratégia de controlo do termóstato.	21
Figura 2.8 Zona de operação do Termóstato.	22
Figura 3.1 Estratégia de predição, adaptado de [51].	24
Figura 3.2 Estrutura básica do <i>MPC</i> , adaptado de [47].	24
Figura 3.3 Esquema de controlo do <i>MPC</i> no <i>Simulink</i>	25
Figura 3.4 Descrição esquemática do funcionamento e estratégia de controlo do <i>MPC</i>	31

Figura 4.1 Ar condicionado controlado com o Termóstato.....	33
Figura 4.2 Ar condicionado controlado com o <i>MPC</i>	33
Figura 4.3 Termoacumulador controlado com o Termóstato.	35
Figura 4.4 Termoacumulador controlado com o <i>MPC</i>	35
Figura 4.5 Frigorífico controlado com o Termóstato.....	37
Figura 4.6 Termoacumulador controlado com o <i>MPC</i>	37
Figura 4.7 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,12$	41
Figura 4.8 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,12$	41
Figura 4.9 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,12$	41
Figura 4.10 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	42
Figura 4.11 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	42
Figura 4.12 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	42
Figura 4.13 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	43
Figura 4.14 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	43
Figura 4.15 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	43
Figura 4.16 <i>WH</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,155$	45
Figura 4.17 <i>WH</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,155$	45
Figura 4.18 <i>WH</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,155$	45
Figura 4.19 <i>WH</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	46
Figura 4.20 <i>WH</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	46
Figura 4.21 <i>WH</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	46
Figura 4.22 <i>WH</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	47

Figura 4.23 <i>WH</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	47
Figura 4.24 <i>WH</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,20$	47
Figura 4.25 <i>RF</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	49
Figura 4.26 <i>RF</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	49
Figura 4.27 <i>RF</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,10$	49
Figura 4.28 <i>RF</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	50
Figura 4.29 <i>RF</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	50
Figura 4.30 <i>RF</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,05$	50
Figura 4.31 <i>RF</i> : Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,15$	51
Figura 4.32 <i>RF</i> : Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,15$	51
Figura 4.33 <i>RF</i> : Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,15$	51
Figura 4.34 <i>AC</i> : Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo. ...	53
Figura 4.35 Ar condicionado controlado por três tipos de controlo.	54
Figura 4.36 <i>WH</i> : Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo. ..	55
Figura 4.37 Termoacumulador controlado por três tipos de controlo.....	56
Figura 4.38 <i>RF</i> : Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo.....	57
Figura 4.39 Frigorífico controlado por três tipos de controlo.	58
Figura 4.40 Curva de potência dos painéis fotovoltaicos.....	59
Figura 4.41 Cenário típico do consumo residencial.	60
Figura 4.42 Possível cenário de implementação residencial.....	61
Figura 4.43 Cenário 1: Distribuição do consumo 8 habitações.	63
Figura 4.44 Cenário 2: Distribuição do consumo 8 habitações com BP.....	63

Figura 4.45 Cenário 3: Distribuição do consumo 20 habitações.	64
Figura 4.46 Cenário 4: Distribuição do consumo 20 habitações com BP.	64
Figura B.1 Ar condicionado controlado com termóstato(3,5kW).....	76
Figura B.2 Ar condicionado controlado com o MPC(3,5kW).....	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Valor das constantes térmicas para uma divisão.	16
Tabela 4.1 Ar condicionado: consumo de energia vs. método de controlo	34
Tabela 4.2 Termoacumulador: consumo de energia vs. método de controlo.	36
Tabela 4.3 Frigorífico: consumo de energia vs. método de controlo.....	38
Tabela 4.4 Produção de energia.....	59
Tabela 4.5 Consumo típico residencial.....	60
Tabela 4.6 Possível consumo residencial.	61
Tabela A.1 Constantes para o modelo de uma divisão.....	74
Tabela A.2 Constantes para o modelo do termoacumulador.	75
Tabela A.3 Constantes para o modelo do frigorífico.	75
Tabela B.1 Ar condicionado: consumo de energia vs. método de controlo.	76
Tabela C.1 Distribuição do consumo para 8 habitações.	77
Tabela C.2 Distribuição do consumo para 8 habitações mais BP.....	77
Tabela C.3 Distribuição do consumo para 20 habitações.....	78
Tabela C.4 Distribuição do consumo para 20 habitações mais bomba da piscina.	79

Lista de Acrónimos

A. Parâmetros

C_{in}	<i>Thermal capacitance of the indoor air</i>
C_p	<i>Specific heat of water</i>
C_w	<i>Thermal capacitance of the wall</i>
m	<i>Mass of water</i>
Q_{in}	<i>Heat to be extracted</i>
R_c	<i>Thermal resistance of windows</i>
R_w	<i>Thermal resistance of walls</i>
S	<i>Binary variable</i>
SP	<i>Set-point</i>
T_{inlet}	<i>Inlet water temperature</i>
UA	<i>Characteristics of fiber glass</i>
η	<i>Efficiency</i>

B. Variáveis

$Q_{ac,ht}$	<i>Thermal source</i>
Q_{in}	<i>Heat to be extracted</i>
Q_{eg}	<i>Electric power</i>
T_w	<i>Temperature of the wall</i>
T_{in}	<i>Temperature in the room</i>
T_{amb}	<i>Ambient temperature</i>

Lista de Siglas

AC	<i>Air Conditioner</i>
BTU	<i>British Thermal Units</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
MIMO	<i>Multi Input Multi Output</i>
WH	<i>Water Heater</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MV	<i>Measured Variable</i>
OV	<i>Output Variable</i>
QP	<i>Quadratic Program</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
ST	Sample Time
TH	<i>Thermostat</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

A energia elétrica é algo essencial ao nosso cotidiano uma vez que, sem ela, já praticamente nada se move. Contudo, para que esta chegue até ao setor residencial, serviços e setor industrial, tem de ser transformada. Para que tal aconteça, são utilizados processos subjacentes que prejudicam o meio ambiente. Como por exemplo as centrais termoelétricas, que produzem este bem que faz mover uma economia, têm como consequência a emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Apesar de hoje em dia alguma da produção elétrica já ser efetuada por meios alternativos, que produzem assim eletricidade sem emitir gases com efeito de estufa, sendo isto apenas possível através de recursos renováveis, como é o caso da luz solar.

Partindo do princípio que, a principal fonte de energia do planeta é a luz solar, deparamo-nos que é esta que possibilita a vida e também é através desta que se forma o vento, o que nos permite uma grande produção de eletricidade com 0% de emissões de carbono.

Porém, apesar da vantagem da não existência emissões, estas fontes de energia renováveis não são constantes, mostrando-se bastantes flutuantes e incontroláveis [1]. Apesar disso, este tipo de produção através de energias renováveis, em alguns países na Europa, ainda não chega aos 30% da energia elétrica total consumida [2].

Os cientistas já provaram que o aumento global da temperatura é proporcional à constituição duradoura dos gases com efeito de estufa na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono [3]. Para que a temperatura, até 2100, aumente apenas 2°C em relação às temperaturas registadas hoje em dia, têm de ser reduzidas as emissões de CO₂ em cerca de 10% no ano de 2030 em relação a 2010, e em 2050 as reduções devem rondar os 55% em relação a 2010 [3].

Através da figura 1.1, pode dizer-se que houve um aumento das emissões de CO₂ para 53 e 54 Gt CO₂ em 2011 e 2012 respetivamente [3]. Ou seja, através destes dados, sabe-se que as emissões de CO₂ a nível global têm vindo a aumentar, apesar de diminuir em alguns grupos económicos. Posto isto, para que a temperatura suba apenas 2°C, existe a necessidade de reduzir estas emissões urgentemente.

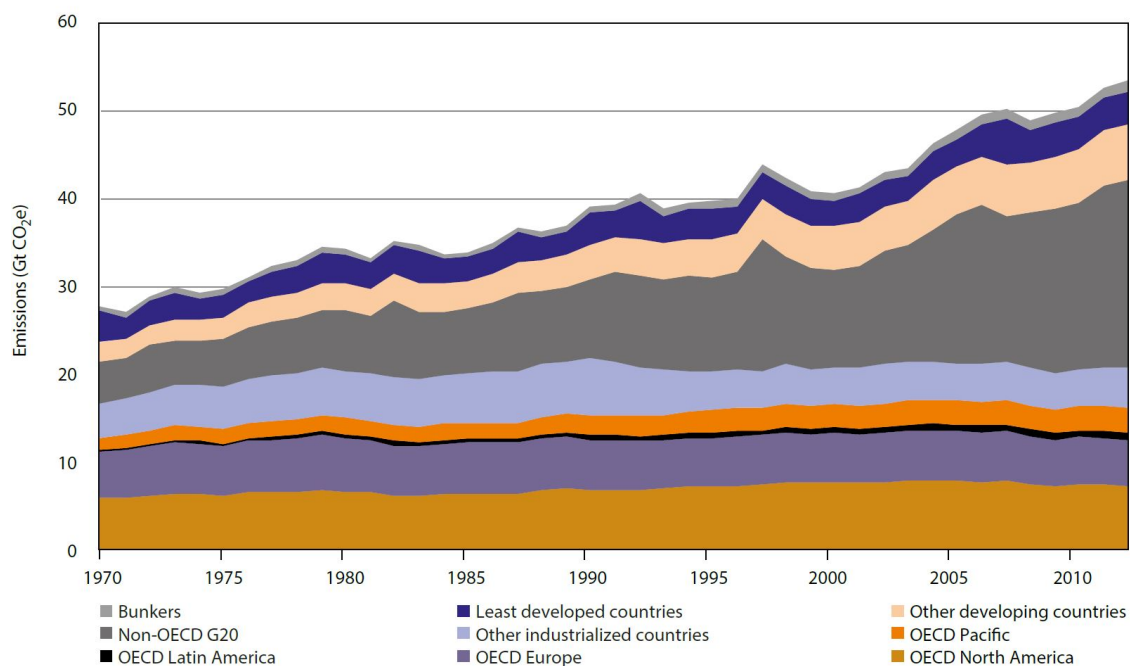


Figura 1.1 Nível de emissão dos gases com efeito de estufa dos maiores grupos económicos desde 1970 a 2012 [3].

Assim sendo, das várias opções existentes para reduzir as emissões de CO₂, podem destacar-se duas, sendo a primeira, forçar cada vez mais a produção de eletricidade através de energias renováveis, pois estas existem em praticamente todos os países. Tendo em conta que, hoje em dia, conseguimos produzir energia tirando partido de várias fontes (do vento, das marés, dos rios, do calor interno da terra, do sol, etc.), muito dificilmente, um país não terá pelo menos uma das fontes renovável para produzir eletricidade.

A segunda possibilidade será a otimização da energia consumida, isto porque, globalmente, a eficiência energética representa cerca de 40% de uma potencial redução dos gases com efeito de estufa, e isto pode ser feito a um custo inferior a 60 € por tonelada de dióxido de carbono equivalente [4].

Ao longo dos anos, tanto no setor industrial como no residencial, os equipamentos utilizados foram melhorados, não só mecanicamente para terem melhores rendimentos, mas eletronicamente para se obterem melhores consumos e controlos. Ao nível industrial, cada vez mais as empresas procuram a solução mais energética possível [5], sendo isto também uma repercussão da atual crise que se vive.

Ao ser abordado a procura energética mundial, o sector residencial sozinho consome cerca de 35,3% de energia, dos quais 75% servem para aquecimento da água e do espaço [6]. Ao nível da União Europeia, (figura 1.2), o sector residencial consome cerca de 30% da energia total, enquanto que o sector residencial nos Estados Unidos consome cerca de 40% na energia usada [7], porque, de acordo com [8], este setor residencial representa 8% do Produto Interno Bruto mundial, o que o torna uma componente chave na economia global.

Consequentemente, o setor residencial contribui com uma substancial fonte de CO₂, resultado proveniente de 2.9 Gton de emissões diretas e de 3.8 Gton de emissões indiretas, devido à eletricidade. Como aparece descrito em [9], apesar da recente crise económica verificada nos países desenvolvidos, tendo esta levado a um declínio na construção, o consumo total de energia no setor residencial continua a aumentar, uma vez que, apesar das cargas residenciais terem evoluído bastante ao nível do consumo, tendo desta forma, um rendimento cada vez maior, o número de cargas está a aumentar. Contudo, todas as cargas novas que têm vindo a aparecer, costumam ser utilizadas por maiores períodos de tempo, para além disso, existem cada vez mais novas funções nestas cargas que requerem a utilização de mais energia [10].

Deste modo, é economicamente, socialmente e ambientalmente significativo reduzir o consumo energético neste setor. Estudos recentes [8] reclamam que, com o uso de políticas adequadas de eficiência energética, pode-se chegar a uma redução de 44% das emissões em 2025. Em [11], são descritas algumas recomendações uteis para serem aplicadas por cada governo em vários sectores, como os transportes, edifícios, entre outros.

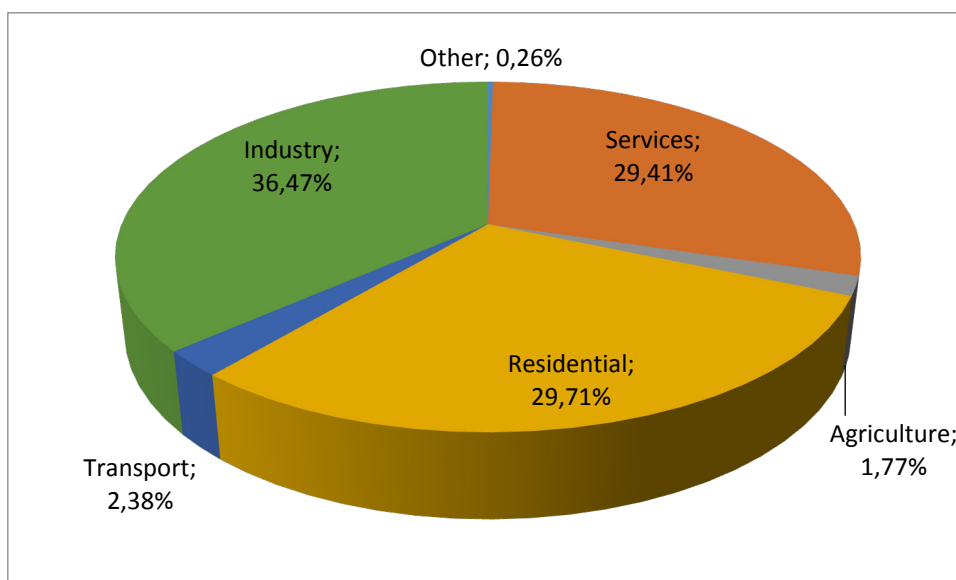


Figura 1.2 Eletricidade final consumida União Europeia-27 em 2010, [10].

Assim, resultado de algumas tensões militares e políticas, onde as maiores reservas naturais de combustíveis fósseis estão localizados e, juntamente com um medo crescente relativo à ocorrência de desastres naturais numa maior escala, tendo em conta que estes ocorrem cada vez mais em locais aleatórios por toda a parte, devido, em grande parte, a estes gases de efeito estufa, as pessoas estão cada vez mais conscientes de que têm de existir ações direcionadas para enfrentar este cenário complexo, feito pelos humanos.

Deste modo, a crescente procura pela energia elétrica a partir das cargas residenciais pode aumentar o stress sobre a rede elétrica. Mas, parte da procura pode ser suprimida pela integração de geração de energia local para as cargas, mas também pode ser melhorado o consumo através da técnica de controlo preditivo para que se otimize a energia do ponto de vista da carga, para que assim seja alcançado um equilíbrio entre a produção e a procura.

Assim, com a aplicação da técnica de controlo preditivo para otimização de energia nas cargas residenciais pode reduzir-se o custo de energia do ponto de vista do cliente e ao mesmo tempo reduzir o stress na rede a partir do ponto de vista da rede elétrica.

1.2. Gestão da Procura

Seguindo a linha de pensamento anteriormente descrita sobre a otimização de energia, observamos que esta pode ser feita de várias maneiras, sendo uma delas reduzir o consumo desligando as cargas que não estão em uso. Sendo e parecendo algo banal é, sem dúvida, um tipo de otimização. Uma outra maneira é a gestão da procura elétrica, isto é, conseguir gerir, de uma forma eficaz, a procura de eletricidade.

Este fenómeno de gestão apareceu tendo em conta a evolução da sociedade, ou seja, devido a uma crescente evolução populacional e também, em grande, ao setor industrial, pois quando este está mais ativo é quando o preço da eletricidade é mais caro, uma vez que existe uma grande procura. (Esta altura corresponde ao pico das curvas na figura 1.3.).

Para isso ser colmatado, muitas vezes em países com algumas centrais hidrelétricas, a procura é satisfeita por estas centrais, tendo em conta que conseguem colocar eletricidade na rede de uma forma quase instantânea, ao contrário das centrais térmicas que levam algumas horas. Daí que o perfil da procura deva ser o mais linear possível para evitar a importação de eletricidade nestes casos de pico e, ao mesmo tempo distribuir mais a procura ao longo do dia para reduzir os custos de geração porque, quanto maior for a produção necessária mais elevado é o preço da eletricidade.

Mas, sabendo que o setor industrial por vezes não tem capacidade para alocar as cargas, existe a necessidade de aplicar com mais certeza este sistema no setor residencial, pois é um nicho onde esta gestão é aplicada com uma maior facilidade por ser mais fácil dispor as cargas que se querem utilizar. Contudo, isso nem sempre é possível devido às necessidades de cada um. Portanto, uma melhor gestão da procura pode ser feita aplicando técnicas de alocação de cargas com se mostra na figura 1.3.

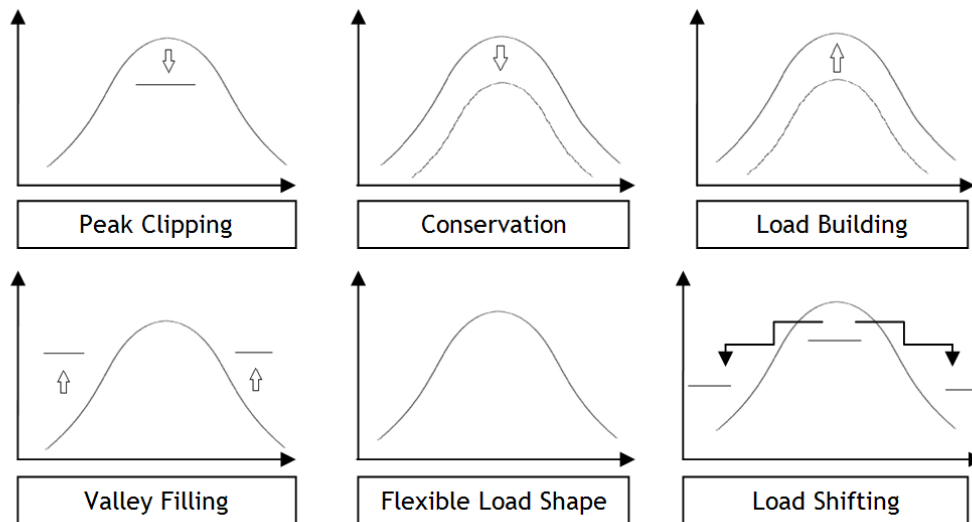


Figura 1.3 Técnicas para gestão da procura, adaptado de [12].

Este tipo de gestão da procura é abordado com mais detalhe em [12] e [13]. Algumas destas técnicas como o *Load Shifting*, o *Valley Filling* e o *Peak Clipping*, vão ser aplicadas mais à frente com o intuito de mostrar a sua aplicabilidade e as suas vantagens.

1.3. Estrutura Elétrica dos Preços

Para que seja implementada a alocação de cargas, têm de ser criadas três diferentes períodos de preços, de modo a incentivar o setor residencial a gerir melhor o consumo durante esses mesmos períodos de preços. Assim, como é mostrado na figura 1.4, passam a existir três períodos horários: horas de vazio, horas de cheias e horas de ponta.

As horas de vazio são, principalmente, as horas do período noturno e fins-de-semana sendo, neste caso, utilizado o preço mais baixo por kWh.

As horas de cheias e as de ponta são as que têm o preço mais alto por kWh, contudo, o preço nas horas de ponta é ligeiramente superior, pois é durante esse período que se registam os maiores consumos de eletricidade.

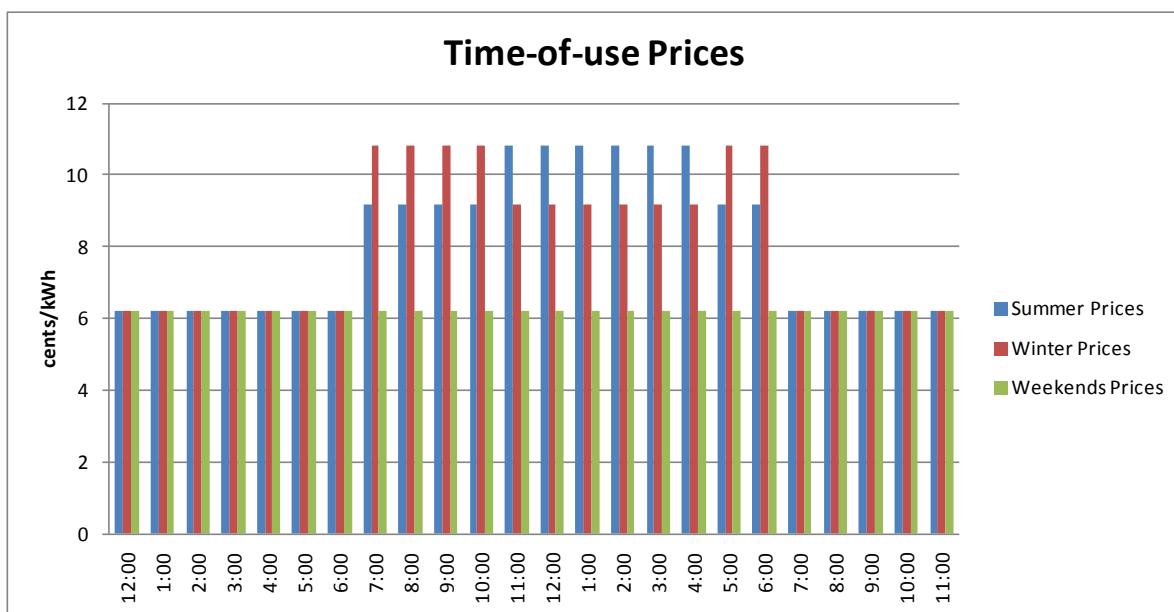


Figura 1.4 Preço da eletricidade em função das horas do dia.

1.4. Revisão da Literatura

Nesta secção são apresentadas as investigações mais relevantes que pertencem aos tópicos da técnica de controlo preditivo e gestão da procura. Para as seguintes referências da literatura, a sigla “MPC”, substitui o termo em Português, “técnica de controlo preditivo”, por uma questão de facilidade de leitura.

1.4.1. Técnica de Controlo Preditivo

A técnica de controlo preditivo tornou-se uma ferramenta de sucesso, desde a sua inserção nos processos industriais complexos por volta dos anos 70, contudo, mais recentemente, esta técnica tem sido convocada para resolver problemas de controlo de otimização com restrições, como por exemplo na área da fabricação avançada, energia, ambiente, medicina, etc. [14].

Todavia, atualmente ainda existem alguns problemas para a técnica de controlo preditivo, sendo alguns deles detalhados em [14], contudo, alguns desses problemas podem ser enfatizados, sendo exemplo a rara aplicação desta técnica em processos industriais não lineares, como é o caso da industrial do papel.

Uma outra desvantagem é a necessidade de fornecer parâmetros de projeto artificiais que só podem ser testados posteriormente e através de um grande número de simulações. Para além disso, esta técnica é principalmente utilizada em processos dinâmicos lentos e, precisa nos casos mais complexos, de um ambiente apropriado com computadores de alto desempenho, restringindo consideravelmente a generalização da sua aplicação a campos mais amplos.

Genericamente, pode ser dito que a *MPC* é comparável a um ser humano. Isto é, o ser humano, antes de planear alguma coisa, costuma pensar em todas as consequências prováveis e assim ver se o resultado pode ser, ou não, longe do desejado.

Assim o *MPC* funciona com o mesmo princípio, uma vez que este trabalha com a previsão do comportamento futuro sobre um horizonte de previsão e sob algumas restrições. Esta técnica tem por base o controlo ótimo, e o seu conceito básico é prever comportamentos do sistema e, posteriormente, otimizar a predição para produzir a melhor decisão [15].

Na literatura podem ser encontradas múltiplas aplicações da técnica de controlo preditivo no sector residencial [16] [17] [18], com o objetivo de melhorar o conforto térmico, baixar a procura de eletricidade nas horas de ponta, reduzir os custos da eletricidade, entre outros objetivos sempre com o foco virado para a otimização.

A figura 1.5 representa uma possível classificação para controlos de *HVAC* onde se insere a técnica de controlo preditivo [19]. Neste mesmo trabalho, é feita uma revisão de todos os métodos de controlo, dando grande ênfase ao *MPC* para controlar sistemas de *HVAC*. Ao ser enfatizado o *MPC*, são descritos vários fatores que influenciam o seu desempenho, assinalando algumas lacunas na investigação do mesmo, sendo ainda sugeridas futuras investigações sobre o tema.

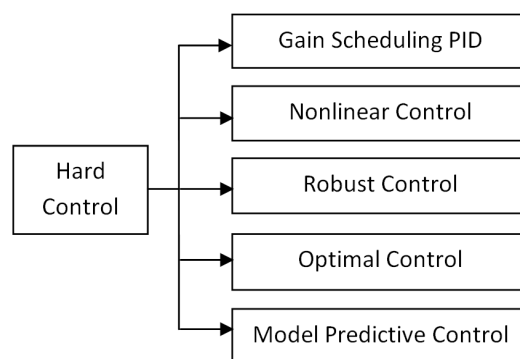


Figura 1.5 Classificação dos vários métodos de controlo para sistemas *HVAC*, adaptado de [19].

Dentro desta classificação, analisada com mais detalhe em [19], destaca-se o *MPC* como sendo a técnica mais promissora, por causa das suas componentes capazes de integrar distúrbios, restrições e estratégias de conservação da energia dentro da formulação do controlador [19].

Em [20] é descrita uma visão geral sobre a origem do *MPC*. Ao serem referenciados vários livros sobre o tema, é possível ter-se uma ideia da grande ferramenta que é este controlador, pois é mais enfatizado o futuro do *MPC* do que o seu passado, uma vez que este abre novas necessidades em áreas de identificação de sistemas, monitorização, etc.

No trabalho realizado em [21], é aplicado um *MPC* para gerir a programação das cargas residenciais, através da inclusão de métodos de previsão e de atualização da informação.

Para tal, a programação das cargas é dividida em três categorias. Uma das categorias são as cargas flexíveis, como por exemplo, a máquina de lavar roupa e a máquina de lavar louça, uma vez que estas cargas dependem da solicitação do utilizador, quando este carrega, ou não no botão de ligar. Uma outra categoria é a programação de baterias, pois estas podem funcionar de dois modos, como uma carga quando recebem energia elétrica ou como fornecedora de energia elétrica. A última categoria é referente às cargas controladas através de um termóstato, como é o caso do ar condicionado e do termoacumulador.

Em [13] é aplicado um *MPC* para termoacumuladores que otimiza tanto o custo como o erro da temperatura, considerando a previsão do tempo e o conforto dos utilizadores. Através deste *MPC* é feita uma gestão da procura para o consumo dos termoacumuladores incluindo uma maximização da utilização dos painéis fotovoltaicos instalados. Para que assim seja encontrada a melhor previsão para este sistema, foi utilizado um sistema de programação linear.

No trabalho feito em [7], o *MPC* é aplicado em sistemas de arrefecimento com o objetivo de minimizar o consumo da energia, desde que se cumpram as necessidades de refrigeração do terreno assim como as restrições subjacentes. Para tal, são pressupostas várias hipóteses sobre o sistema de refrigeração para o *MPC* e para o circuito *RC* equivalente, para as janelas e paredes. Este controlador foi assim validado experimentalmente para vários cenários na Universidade da Califórnia.

No trabalho feito em [22], é desenvolvido um *MPC* para a aplicação a uma casa solar. O objeto de estudo é um quarto com uma geometria simples, e com altos valores de isolamento, representando uma sala típica encontrada numa casa solar passiva. O *MPC* é assim aplicado a um sistema de aquecimento por piso radiante.

Na investigação feita em [23], o *MPC* é utilizado para controlar um sistema de refrigeração. Este sistema é, assim, aplicado a um espaço que tem apenas duas temperaturas, uma para quando o espaço está ocupado e outra para quando não está. Para este sistema, a variável que o *MPC* faz variar é o caudal da água do sistema. Em relação aos distúrbios, estes contemplam a meteorologia e a ocupação do espaço. Aqui, o objetivo principal é que se faça uma minimização da eletricidade usada e que se minimizem os custos operacionais. Neste trabalho foi utilizado uma estrutura de preços idêntica à fig.1.4.

No âmbito do trabalho desenvolvido em [24], são aplicados dois *MPC* 's, um para controlar a temperatura e um outro para a concentração de CO₂. Para isso, foi construído um modelo para controlar a temperatura de uma divisão e um outro modelo para a concentração de CO₂.

No trabalho realizado em [25], é proposto um *MPC* para controlar sistemas *HVAC* sobre preços da eletricidade em tempo real. Contudo, neste trabalho para o *MPC* receber o *feedback* da temperatura dentro da casa, é utilizado o sistema não linear *Hammertein-Wienner*, para que, assim, o *MPC* possa gerar um sinal AC para comandar a carga. Esta simulação da análise do *MPC* foi desenvolvida em *Simulink/MATLAB*.

Podem ainda encontrar-se mais aplicações do *MPC*, [26] [27] [28]. Finalmente, em [29], é feita uma revisão geral da conceção do *MPC*, desde a sua formação linear, baseada na programação quadrática, até aos mais avançados *MPC* 's que se conhecem, como o *MPC* Explícito, e o *MPC* Híbrido.

1.4.2. Conceito de Gestão da Procura

O conceito de gestão da procura foi introduzido na década de 70 para reduzir os custos de funcionamento e, ao mesmo tempo, manter a fiabilidade da rede elétrica [30]. Como se pode ver anteriormente, existem seis tipos de gestão da procura, sendo a técnica de *Load Shifting* a mais eficaz [12].

Esta técnica (*Load Shifting*), que se caracteriza pela transferência das cargas, destaca-se das outras técnicas porque trabalha com a independência das cargas. Ou seja, se for considerada, por exemplo, a iluminação, este é um tipo de carga que não pode variar a sua altura de ligar, uma vez que precisamos dela sempre que necessário, quando se está em casa. Por outro lado, a máquina de lavar roupa ou a máquina de lavar loiça pode ser ligada a qualquer hora do dia ou às 13h ou às 21h, o que leva a concluir que este tipo de carga pode ser alocada para outra hora, algo simples de fazer que reduz a procura nas horas de ponta e ajuda a reduzir o stress na rede.

Na literatura desta área podem ser encontradas várias técnicas de gestão da procura assim como diferentes algoritmos [30] [31] [32]. No trabalho feito em [33], são analisados os impactos de uma gestão da procura sobre a economia e impacto ambiental, realizado ao nível Europeu. Já em [34], são discutidos os benefícios e os desafios que a gestão da procura trás, contudo este trabalho discute apenas estes assuntos dentro do contexto do Reino Unido.

Hoje em dia, com a introdução do veículo elétrico, a gestão da procura é uma matéria com uma grande importância, isto porque, se hoje, grande parte da população de um país decidisse comprar um veículo elétrico, os nossos sistemas de energia não seriam capazes de carregá-los, todos ao mesmo tempo. Então, para se estar preparado para isso é preciso mudar o consumo, otimizando-o, e um bom ponto de partida será, como já foi dito anteriormente, começar a otimização em todas as habitações pois gerir a procura elétrica tem um papel significativo nos mercados da eletricidade [35].

Pode então concluir-se que, após esta revisão, o sector residencial é um sector com grande importância pois é nele que foram feitas algumas das aplicações do *MPC* nestes últimos anos.

Contudo, são precisos alguns desenvolvimentos para além destes, e para tal é preciso estudar a sua aplicação em cada carga, de modo a perceber-se o desenvolvimento que cada uma tem. Assim, posteriormente, poderá ser feita uma otimização do mesmo modelo. Para além da aplicação do *MPC*, existe também a possibilidade de calcular possíveis cenários de aplicação da técnica de gestão da procura.

1.5. Objetivos do Trabalho

Nesta dissertação o principal objetivo é aplicar uma forma diferente de controlo às cargas daquilo que é o usual, de modo a otimizar o consumo de energia elétrica no sector residencial, tendo como base a finalidade de fornecer aplicações úteis sobre consumos, um passo importante para o funcionamento da rede elétrica europeia nos próximos anos. Para tal, é proposto que seja estudado a técnica de controlo preditivo e que seja implementado no trabalho apresentado em [36].

Portanto, os objetivos podem resumir-se da seguinte forma:

- Estudar a técnica de controlo preditivo, para otimização de energia consumida no setor residencial.
- Aplicar esta técnica através da *Toolbox* do *Matlab*, *MPC*.

- Aprofundar os conhecimentos sobre o *MPC* para se poderem otimizar os consumos, com base em diferentes objetivos, adicionando também a geração local.
- Aplicar a técnica de gestão da procura para estudar os seus efeitos.
- Prever possíveis cenários de implementação da gestão da procura no sector residencial.

1.6. Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida da seguinte forma:

Como já exposto, o capítulo 1 da presente dissertação apresenta o enquadramento da mesma na atual situação que preocupa os diversos governos, que são as emissões de CO₂ para a atmosfera, estando este tema justificado de seguida com valores que alertam para a necessidade de otimizar consumos. Sendo este motivo suficiente para se estudar formas de otimizar o consumo, neste caso aplicando a técnica de controlo preditivo. Neste capítulo, é ainda apresentada uma revisão da literatura sobre a otimização através do controlo preditivo e através da alocação de cargas pela técnica da gestão da procura.

No capítulo 2, são expostas as formulações matemáticas relativas a todas as simulações feitas. Começando pelas deduções para se obter um esquema equivalente de cada carga a utilizar.

No capítulo 3, aborda-se a matemática subjacente ao funcionamento do controlador (*MPC*) que foi utilizado, sendo esta deduzida para o caso específico desta dissertação.

No capítulo 4, são expostas todas as simulações relevantes para cumprir o objetivo desta dissertação. Neste capítulo são também discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões e contribuições deste trabalho mas, ao mesmo tempo, são identificadas novas ideias e diretrizes para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Identificação do Sistema

Neste capítulo é apresentado o sistema que foi utilizado para simular a técnica de controlo preditivo, pois esta foi aplicada a algumas cargas residenciais como o ar condicionado, o termóstato e o frigorífico. Todas estas cargas foram modeladas para se assemelharem o mais possível à realidade.

Todo este trabalho assenta no simulador utilizado em [36], cuja interface gráfica é mostrada na figura 2.1.

2.1. Descrição dos Sistemas

2.1.1. Modelo Físico da Casa

Grande parte da modelação de uma casa é influenciada pelas propriedades térmicas de cada elemento constituinte, tendo em conta que o consumo de energia é ditado pela resposta térmica de cada material. Assim, como em seguida se verá, a retenção de ar quente/frio na casa depende das características de cada material. Ao considerarmos a casa como um todo, o seu desempenho varia ainda bastante consoante a geometria de cada divisão.

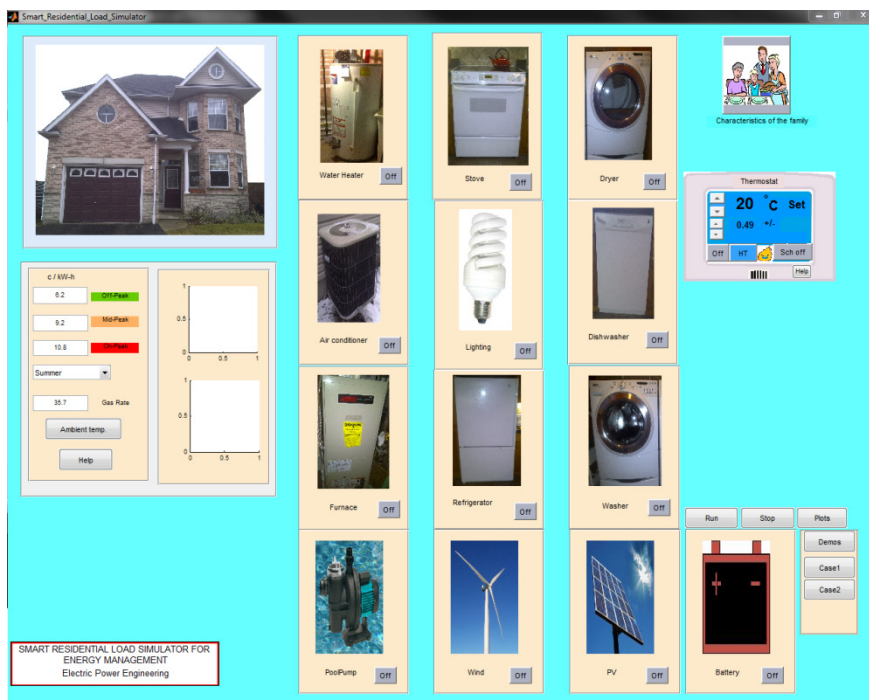


Figura 2.1 Interface gráfica do simulador utilizado em [36].

Para se ter um comportamento de simulação bastante parecido ao real, é desenhado um circuito equivalente de uma divisão da casa para que depois seja possível a reprodução para uma casa inteira. Na figura 2.2 é representado a equivalência de uma divisão para um circuito elétrico.

Onde C representa a capacidade térmica de cada material, ou seja, a propriedade que mede a capacidade de armazenamento de calor. Esta capacidade térmica C é definida como a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância, um grau (equação (2.1)).

$$C = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (2.1)$$

Onde Q é o calor transferido para a amostra, m a massa e ΔT a variação da temperatura resultante. Analogamente pode calcular-se esta capacidade por unidade de volume ficando:

$$C_v = \frac{Q}{V \Delta T} \quad (2.2)$$

Onde V é o volume da amostra. Contudo a capacidade térmica volumétrica está relacionada com o calor específico c_p e a densidade ρ , logo vem que:

$$C_v = \rho * c_p \left(\frac{J}{m^3 K} \right) \quad (2.3)$$

Em adição à capacidade térmica de cada material, existe ainda as perdas de calor devido à resistência térmica de cada material.

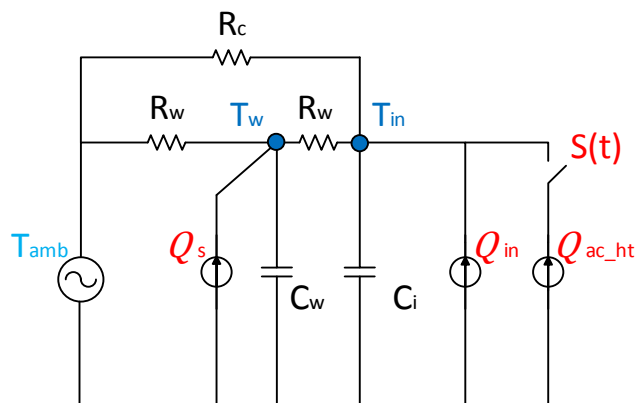


Figura 2.2 Circuito térmico equivalente para uma divisão, adaptado de [36].

A condução é um modo de transferência de energia que ocorre através das partículas com mais energia de uma substância para as suas adjacentes que têm um nível menor de energia, e pode ser expressa segundo a *Lei de Fourier* da condução de calor [37]:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Onde a quantidade de calor transferido por unidade de tempo é dada por \dot{Q} , k é a condutividade térmica do material, A é a área normal à direção da transferência de calor e dT/dx é o gradiente da temperatura. Para se obter o calor transferido por unidade de área vem que:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Ao ser considerada uma condução de calor estacionária através de um plano suficientemente grande com espessura $\Delta x = L$, área A e com a diferença de temperaturas ao longo da parede $\Delta T = T_2 - T_1$, temos que:

$$q = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (2.6)$$

Onde o fluxo de calor q que atravessa o vidro de espessura L é proporcional a ΔT (diferença de temperaturas). Simplificando temos que:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.7)$$

Onde:

$$R = \frac{L}{kA} \left(\frac{W}{K} \right) \quad (2.8)$$

Sendo este R a resistência à transferência de calor, pois cada material irá responder com diferentes resistividades ao fluxo de calor que é imposto.

Para que se possa modelar todos estes fenômenos é feita uma equivalência elétrica do sistema. Esta pode ser analisada juntamente com a sua representação através da figura 2.3.

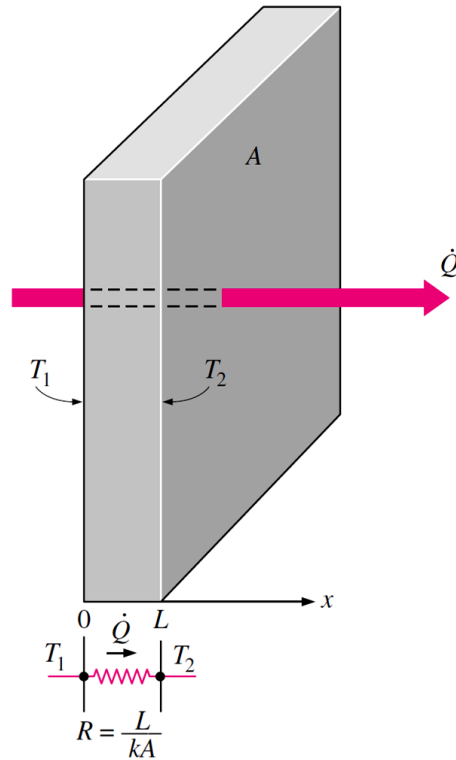


Figura 2.3 Resistência térmica, adaptado de [37].

Logo, o valor de R é proporcional ao seu comprimento L na direção da transferência de calor, e inversamente proporcional à sua superfície de transferência de calor A e a sua condutividade térmica k .

Assim, ao ser considerado a Figura 2.1 e [38] [39], conseguem-se obter as seguintes equações diferenciais (2.9)(2.10):

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{Q_s}{C_w} + \frac{T_{out}}{R_w C_w} + \frac{T_{in}}{R_w C_w} - \frac{2T_w}{R_w C_w} \quad (2.9)$$

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{(Q_{in} - Q_{ac_{ht}}) S(t)}{C_{in}} - \frac{T_{in}}{C_{in}} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_c} \right) + \frac{T_w}{R_w C_{in}} - \frac{T_{out}}{R_c C_{in}} \quad (2.10)$$

Onde T_{out} é considerada a temperatura exterior, as características térmicas da divisão são caracterizadas por R_w e R_c como sendo a resistência térmica das paredes e das janelas respectivamente. Já a capacidade térmica das paredes é representada por C_w e do ar interior por C_{in} . A fonte de calor é identificada como $Q_{ac_{ht}}$ e S representa uma variável binária utilizada para os estados de ligado (1) e desligado (0).

As propriedades dos materiais nos edifícios influenciam bastante o consumo de energia e, como referido, todos eles têm uma condutividade térmica diferente, desde as paredes, o chão, o telhado e as janelas.

Para se obterem os valores das capacidades e resistências térmicas são utilizadas as equações (2.9)(2.10) e as constantes definidas no anexo A, resultando assim nas constantes da tabela 2.1.

Tabela 2.1 Valor das constantes térmicas para uma divisão.

Constante	Valor	Unidades
R_c	$3,4294 * 10^{-6}$	$\left(\frac{J}{K}\right)$
R_w	$1,5553 * 10^{-5}$	$\left(\frac{J}{K}\right)$
C_{in}	443797	$\left(\frac{J}{K}\right)$
C_w	1644060	$\left(\frac{J}{K}\right)$

2.1.2. Modelo Físico do Ar Condicionado

O equipamento do ar condicionado é regularmente especificado pela sua capacidade em termos de BTU ou kW. Esta capacidade pode ser definida como a quantidade de energia usada pelo equipamento para remover calor do ar e assim, regular a temperatura de uma divisão ou de uma casa inteira.

Neste trabalho, foi considerado um ar condicionado central que divide a sua configuração usando condutas para arrefecimento para uma ou mais divisões. Este tipo de configurações de ar condicionado tem uma capacidade que varia entre os 9000-60000 BTU [36].

A modelação do ar condicionado pode ser representada esquematicamente pelo diagrama do fluxo de calor na Figura 2.4.

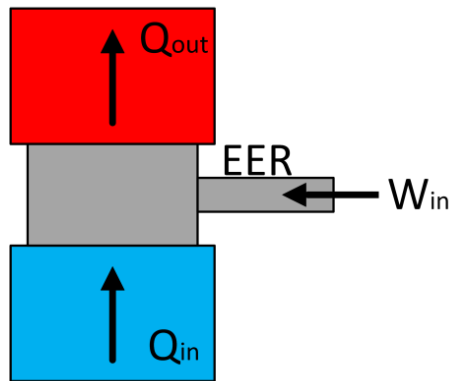


Figura 2.4 Representação da máquina de Carnot para um AC, adaptado de [36].

O rácio de eficiência energética (*EER*) indica a quantidade de arrefecimento que é dada pelo ar condicionado:

$$EER = 3,412 \frac{-Q_{in}}{W_{in}} = \frac{Q_{in}}{Q_{in} - Q_{out}} \quad (2.11)$$

Onde Q_{out} é a energia requisitada para extrair o calor Q_{in} das divisões. Já W_{in} representa a energia eléctrica requerida para que este trabalho se realize.

2.1.3. Modelo Físico do Termoacumulador

O termoacumulador é um depósito de água cilíndrico protegido por uma boa camada de isolamento para que esta não arrefeça rapidamente. Este tipo de sistema é utilizado com mais frequência nos países com clima mais frio, pois assim é possível ter sempre água quente imediata. Este tipo de sistema pode ser simulado usando o modelo térmico clássico usado em [40].

Na figura 2.5, é mostrado o circuito utilizado para o termoacumulador que assim compreende o peso da água m , o calor específico da água C_p , as características do isolamento C_w, UA , a potência nominal Q_{eg} e o rendimento η [40].

Normalmente o rendimento dos termoacumuladores eléctricos ronda os 85-94% [36].

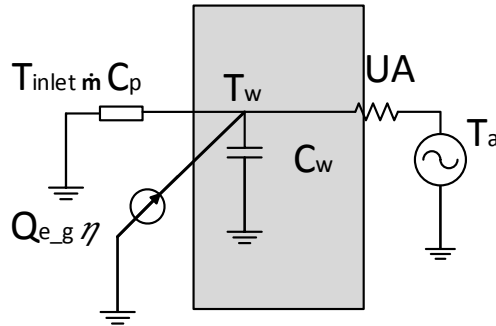


Figura 2.5 Circuito equivalente para o termoacumulador, adaptado de [36].

A equação seguinte representa então a energia usada pelo termoacumulador no modelo implementado neste trabalho:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{mC_p}{C_w} T_{inlet} + \frac{UA}{C_w} T_{amb} - \frac{UA + mC_p}{C_w} T_w + Q_{eg} \quad (2.12)$$

Onde T_w representa a temperatura na parede do depósito, T_{inlet} é a temperatura da água que entra no termoacumulador, e T_{amb} é a temperatura ambiente que rodeia o depósito.

Analogamente, como é feito para o modelo físico da casa, para se obter os valores das capacidades térmicas, é utilizada a equação (2.12) e as constantes definidas no anexo A, resultando assim na constante da tabela 2.2.

Constante	Valor	Unidades
C_w	769910	$\left(\frac{J}{K}\right)$

2.1.4. Modelo Físico do Frigorífico

O modelo físico do frigorífico é modelado neste trabalho como sendo uma divisão de uma casa ao nível de constantes térmicas, como analisado anteriormente, com a diferença do isolamento utilizado. Estas constantes estão assim definidas no anexo A.

2.1.5. Cargas Independentes

Como assinalado anteriormente, consideram-se cargas independentes todo o tipo de cargas em que a sua utilização está dependente do utilizador, e não estando constantemente ligada. Dentro deste tipo de cargas foram escolhidas para simular as seguintes: Máquina de lavar loiça; Máquina de lavar roupa; Máquina de secar roupa e Bomba da piscina.

2.1.5.1. Máquina de Lavar Louça

A máquina de lavar louça tornou-se um equipamento indispensável numa cozinha com o passar dos anos, pois a sociedade vive cada vez mais para o trabalho e algumas das tarefas que antigamente se faziam manualmente, hoje não se perde tempo a fazê-las. Apesar deste equipamento não ser dos que mais consome ao nível global da casa, esta utilizada uma grande quantidade de energia por um curto período de tempo, cerca de 1,5 kW.

2.1.5.2. Máquina de lavar Roupa

A máquina de lavar roupa é provavelmente dos equipamentos mais utilizados globalmente, uma vez que esta requer energia elétrica utilizada principalmente para fazer rodar o motor e uma parte para aquecer a água. Contudo, grande parte da água utilizada é água fria para a lavagem [41] [42]. Esta categoria de equipamento costuma ter um consumo que ronda os 1 kW.

Na figura 2.6 pode observar-se os consumos em termos de percentagem que cada carga utilizada no universo residencial.

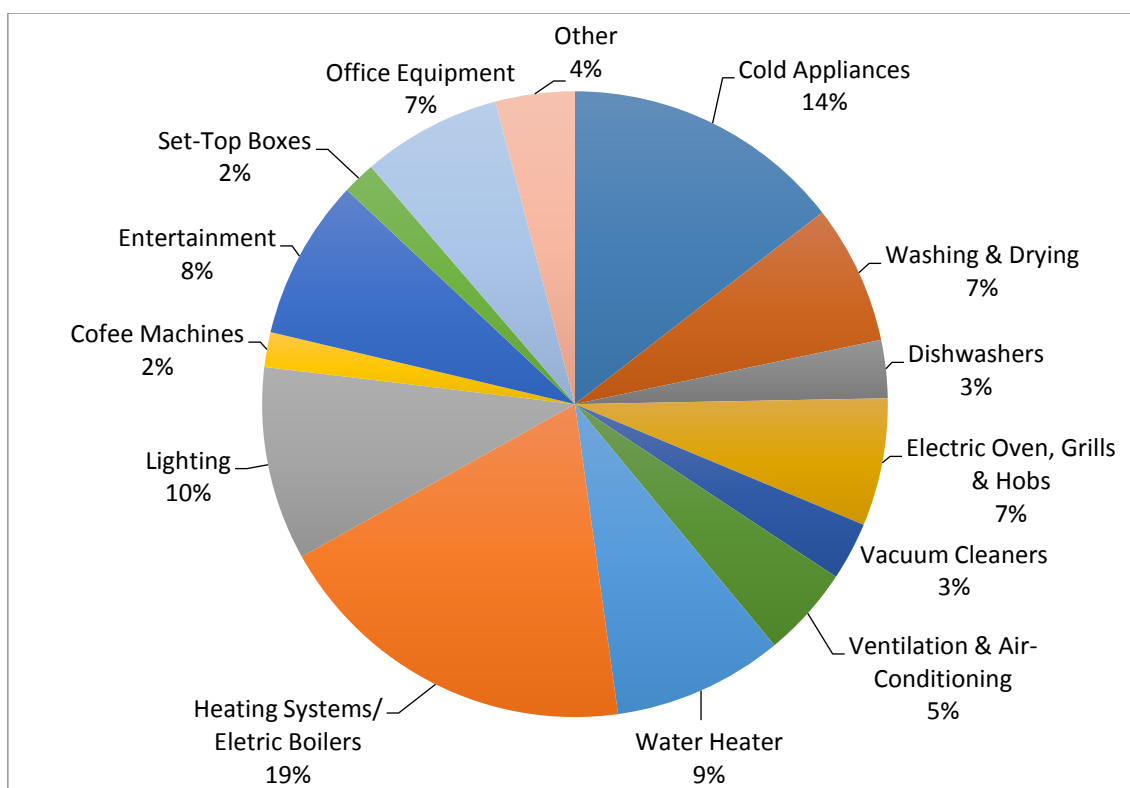


Figura 2.6 Consumo de eletricidade no setor residencial na EU-27 em 2009, adaptado de [10].

2.1.5.3. Máquina de Secar Roupa

A máquina de secar roupa é principalmente utilizada em países com climas bastantes frios pois, nestes países, é difícil de secar a roupa devido às temperaturas exteriores. Este tipo de cargas consome grandes quantidades de energia numa casa pois, regra geral, costumam ter uma potência nominal de 3 kW.

2.1.5.4. Bomba da Piscina

A bomba da piscina é um equipamento indispensável nas habitações onde existe uma piscina pois, para que a água mantenha os níveis adequados de qualidade esta tem de circular cerca de 4 a 8 horas por dia dependendo do tamanho da piscina.

Para tal, geralmente, a bomba usa uma potência nominal de 500 W. Este tipo de bombas são pré programadas para terem programas ON/OFF ao longo do dia, usando assim sistemas eletromecânicos para que esta tarefa se realize.

2.1.6. Produção de Energia Local

Em quase todas as habitações pode ser implementado um pequeno painel fotovoltaico ou até mesmo uma pequena turbina eólica que, apesar de não fornecerem energia elétrica suficiente para alimentar todas as cargas, conseguem reduzir em parte a eletricidade comprada à rede. Em algumas horas do dia, a geração local até poderia conseguir suprimir toda a procura da eletricidade mas fatores como a luminosidade e velocidade do vento que não se conseguem alterar, fazem com que as garantias de eletricidade ainda fiquem um pouco aquém do desejado.

Logo, para que a instalação seja viável, é necessário observar todas estas variáveis que se relacionam com o clima, desde horas de exposição solar a velocidades anuais de vento e horas de maior consumo, para saber se é possível ter algum lucro através do investimento feito.

No trabalho feito em [43], podem ser analisadas as várias vantagens ao nível ambiental e financeiro da integração deste tipo de sistemas, enquanto que no trabalho feito em [44], é possível analisar os tempos de retorno para o investimento feito em relação instalação fotovoltaica.

Apesar deste tópico não ser abordado com alguma profundidade nesta dissertação, a sua inclusão nas simulações é bastante relevante pelos seus efeitos como mais à frente se analisará.

2.2. Termóstato

Algumas das cargas anteriormente descritas na secção anterior, nomeadamente o ar condicionado, o frigorífico e o termoacumulador, são normalmente controlados por termóstatos, uma vez que, o objetivo deste tipo de controlo é manter a temperatura do ar ou água dentro de predefinidos valores, também chamado de faixa de conforto.

Na figura 2.7 é descrito esquematicamente o funcionamento geral do termóstato. Inicialmente existem três cargas o ar condicionado, o termoacumulador e o frigorífico, que estão sujeitos a agentes externos (distúrbios) como a temperatura ambiente (T_{amb}), consumo de água, entre outros.

Todas as cargas são controladas por três termóstatos diferentes e, como se pode observar, cada termóstato envia para diferentes cargas um sinal ON/OFF. Mas para que este sinal seja processado o termóstato tem que ter em conta quatro fatores; o *set-point*/referência que o utilizador definiu para o sistema, a temperatura a que se encontra o que se quer controlar (T_{in}), e ainda os limites a que esta temperatura opera o limite superior (T_{max}) e o limite inferior (T_{min}). Estes limites definem assim o intervalo de histerese do termóstato, que será abordado de seguida.

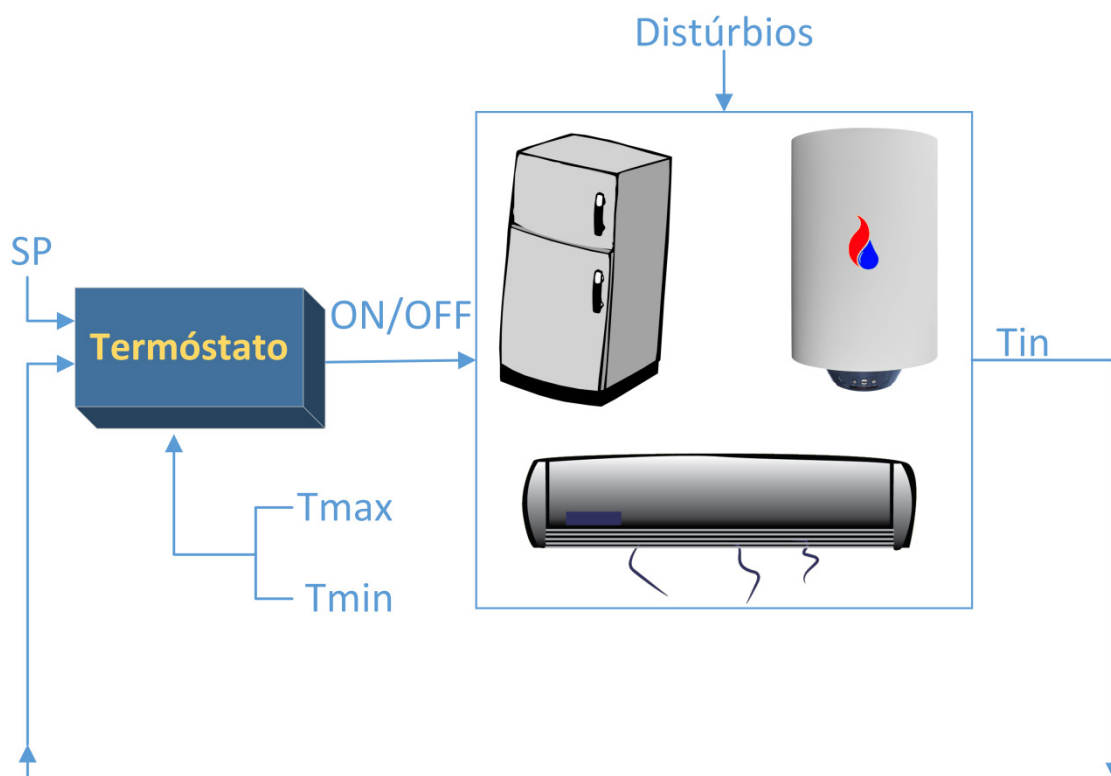


Figura 2.7 Descrição esquemática do funcionamento e estratégia de controlo do termóstato.

Assim, o termóstato é um dispositivo que permite que a temperatura de cada carga possa oscilar entre o limite superior e inferior da temperatura desejada. Normalmente, o utilizador tem a possibilidade de ajustar esta temperatura mas, em alguns casos, consegue também controlar a faixa da amplitude da temperatura.

Para que seja possível manter a comutação ON/OFF constantemente, o termóstato está equipado com uma função de histerese que o divide em quatro regiões de operação. Quando a temperatura detetada atinge um ponto dentro da banda de histerese, o estado resultante depende do estado anterior. Por outro lado, fora da banda do termóstato, o estado de saída é fixo. Ou seja, quando o limite superior é alcançado vindo do limite inferior, o estado da saída pode ser configurado para ligar a alimentação, no caso do frigorífico por exemplo. Este fenómeno pode ser observado através da figura 2.8.

À medida que o tempo avança a temperatura varia entre os dois limites definidos por defeito da carga ou então definidos pelo utilizador.

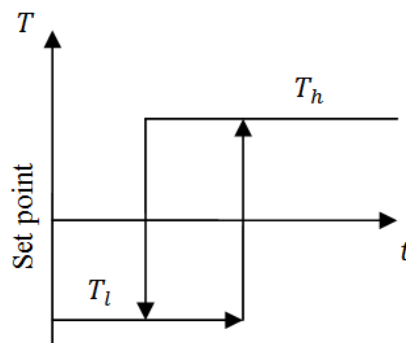


Figura 2.8 Zona de operação do Termóstato.

Capítulo 3

Técnica de Controlo Preditivo

Devido à sua grande versatilidade e altos desempenhos, a técnica de controlo preditivo tem vindo a ser estudada por vários autores ao longo dos últimos anos nos seus livros [15] [45] [46] [47] [48].

É com base nestes livros e na Toolbox do Matlab Model Predictive Control [49] [50], que neste capítulo é descrito o funcionamento geral do MPC e é deduzido a sua formulação geral de funcionamento para os casos simulados.

3.1. Estratégia de Controlo do MPC

A metodologia que é característica à família do MPC tem a estratégia definida como exemplificado pela figura 3.1, onde as saídas futuras são determinadas segundo o horizonte de predição, e estas saídas previstas $y(n+k|n)$ para $k=1 \dots P$ dependem assim dos valores conhecidos até ao instante n (entradas e saídas passadas) e ainda das entradas futuras $u(n+k|n)$, $k=0 \dots P-1$.

Na figura 3.1, as entradas passadas são expressas por uma linha contínua e as entradas futuras são expressas por uma linha a traço interrompido.

O conjunto de sinais de controlos futuros é assim calculado através da otimização de um determinado critério com a finalidade de manter o processo o mais próximo possível à trajetória de referência (que pode ser a própria referência ou uma aproximação a esta). Este critério, geralmente, assume a forma de uma função quadrática dos erros entre o sinal da saída prevista e da trajetória prevista [47].

O sinal de controlo $u(n|n)$ (*Manipulated Variables* na figura 3.1) é enviado para o processo, enquanto os sinais de controlo seguintes calculados são rejeitados, porque no instante de amostragem seguinte $y(n+1)$ já é conhecido, o processo que envolve então a predição é assim repetido com este novo valor e todas as sequências são atualizadas. Assim, o $u(n+1|n+1)$ é calculado (o que, em princípio, será diferente para $u(n+1|n)$, devido à nova informação disponível) usando o conceito “*Receding horizon*” [47].

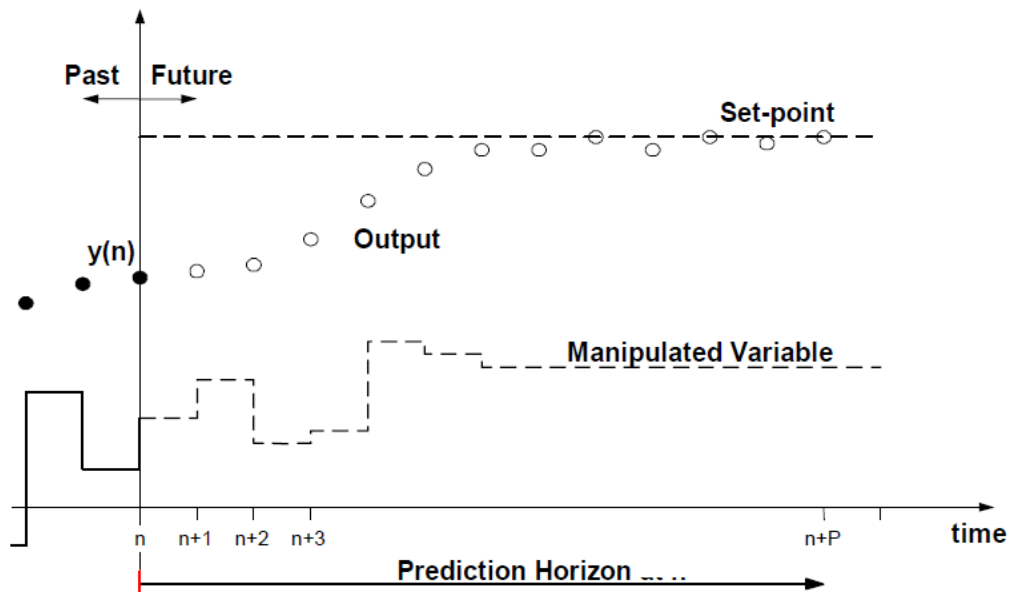


Figura 3.1 Estratégia de previsão, adaptado de [51].

De modo a que a estratégia do MPC seja implementada, a sua estrutura é representada pela figura 3.2. Assim, existe um bloco que representa o modelo encarregue de prever as saídas com base nos valores de entrada, sendo estes os valores atuais e os passados. Estas ações que são calculadas pelo otimizador que, por sua vez, tem em conta a função de custo, as restrições e ainda os erros futuros.

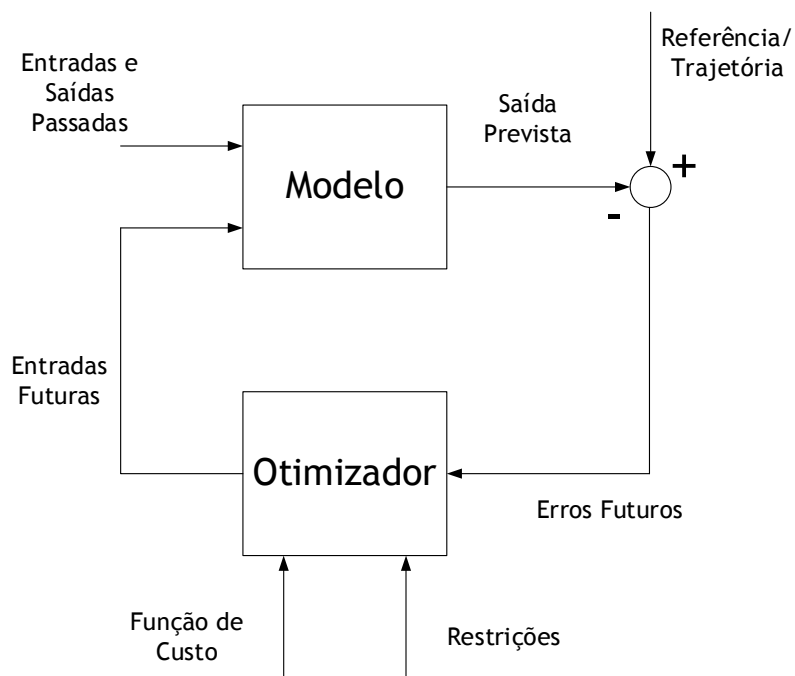


Figura 3.2 Estrutura básica do MPC, adaptado de [47].

Como todas as simulações foram feitas em ambiente do *Simulink*, toda a estrutura apresentada do *MPC* tem por base o bloco que este *software* fornece, sendo esta estrutura esquematizada na figura 3.3.

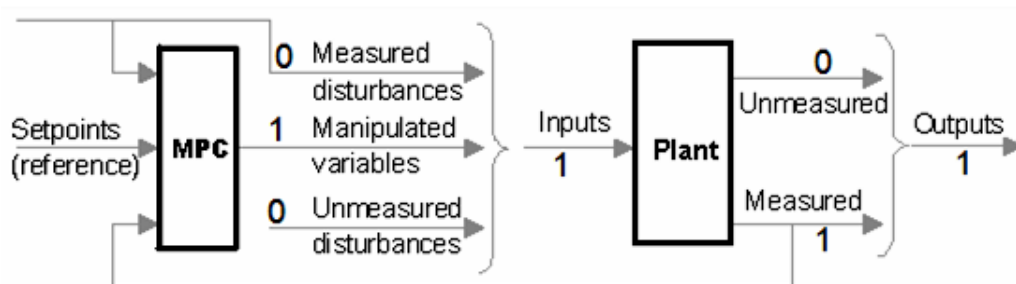


Figura 3.3 Esquema de controle do *MPC* no *Simulink*.

Normalmente, este bloco é utilizado para sistemas SISO e MIMO. Contudo, para o caso estudado, este configura-se segundo um esquema SISO (figura 3.3), isto porque existe apenas uma entrada e uma saída, sendo a entrada no controlador (*MO* - *Measured Output*) a temperatura que se quer controlar, seja da água ou do ar, e a sua saída (*MV* - *Measured Variables*) é um sinal que modela a potência que tem de ser fornecida ao sistema para que a temperatura a controlar se encontre dentro dos parâmetros desejados.

Ou seja, as saídas do *MPC* (*MV* - *Measured Variables*) são escolhidas para que a predição da resposta tenha as características desejadas.

3.2. Problema de Otimização

O *MPC* é uma ferramenta de otimização usada para controlar diversos tipos de processos. O seu processo de otimização produz uma sequência de controles ótimos segundo um horizonte finito de passos futuros, levando assim os sistemas à desejada referência e, ao mesmo tempo, satisfazendo todas as restrições indicadas de seguida.

A formulação do *MPC* em equações de espaço de estados representa várias vantagens, desde a facilidade de representar sistemas multivariáveis à sua análise detalhada em malha fechada. Assim, o sistema que é controlado pode ser descrito na forma *LTI* (*Linear Time Invariant*) onde as equações seguem o modelo:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3.2)$$

Onde x é o vetor dos estados do sistema, u é o vetor das entradas, y é o vetor das saídas. A é a matriz de estado, B é a matriz das entradas e C é a matriz das saídas.

Tendo em conta que para dado intervalo k o modelo dos estados é $x(k)$ é sabido. Assim, é possível calcular no novo vetor de entrada para alimentar o sistema, tendo sempre em conta as restrições.

A função de custo do *MPC* na sua forma *standard* pode ser escrita da seguinte forma (3.3). Esta equação resulta da soma de três termos, em que cada um deles tem um objetivo diferente para o resultado final. A prioridade de cada termo é definida pelos respetivos pesos como se verá de seguida.

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_\varepsilon(z_k) \quad (3.3)$$

Onde z_k é a decisão do *QP* a cada intervalo de controlo, e a solução é usada para controlar as *MV* aplicados no sistema.

$$z_k = [u(k|k) \ u(k+1|k) \ \dots \ u(k+P-1|k) \ \varepsilon_k] \quad (3.4)$$

O primeiro termo de (3.3) é usado para minimizar o erro que a temperatura tem em relação à sua referência, isto é, ajuda a que a saída da temperatura final esteja perto ou igual à referência. O segundo termo é aplicado para controlar os incrementos das *MV*, também chamado de *Rate Weight* porque este penaliza a variação dos incrementos em vez do valor acumulado. O terceiro termo está relacionado com a violação das restrições, sendo utilizado para amortecer as restrições. Normalmente, este último termo é usado apenas quando existem mais *OV* do que *MV*.

Assim ao ser especificada a equação (3.3) é obtido o seguinte resultado:

$$J(z_k) = \sum_{i=1}^P \{ \omega^y [r(k+i) - y(k+i)] \}^2 + \sum_{i=1}^M \{ \omega^{\Delta u} \Delta u(k+i-1) \}^2 + \rho_\varepsilon \varepsilon_k^2 \quad (3.5)$$

Relativamente ao primeiro termo $y(k+i)$, este representa os estados das saídas futuras, sendo conseqüentemente $r(k+i)$ o seu respetivo *SP* ou referência. P é o horizonte de predição (prediction horizon), e ω^y é o peso responsável por dar ou não mais importância ao primeiro termo.

O segundo termo $\Delta u(k+i-1)$ é definido como a sequência futura de movimentos de controlo. M é o horizonte de controlo (*control horizon*), e $\omega^{\Delta u}$ é o peso responsável por dar mais importância ao segundo termo. No terceiro termo ρ_ε é um peso para penalizar as violações das restrições e ε_k é uma variável de folga no intervalo de controlo k .

Para valores de ω^y maiores do que $\omega^{\Delta u}$, a saída resultante do sistema estará perto da referência, contudo se o valor de ω^y decrescer, a diferença para a referência do sistema será maior. Para motivar o controlador a utilizar incrementos mais pequenos nas MV o valor de $\omega^{\Delta u}$ deve ser incrementado.

Assim sendo, a função de custo a ser minimizada tem as seguintes restrições abaixo especificadas:

$$y_{min}(i) - \varepsilon_k V_{min}^y(i) \leq y(k+i|k) \leq y_{max}(i) + \varepsilon_k V_{max}^y(i), i = 1:P \quad (3.6)$$

$$u_{min}(i) - \varepsilon_k V_{min}^u(i) \leq u(k+i-1|k) \leq u_{max}(i) + \varepsilon_k V_{max}^u(i), i = 1:P \quad (3.7)$$

Na restrição (3.6), o valor de y_{min} e de y_{max} representam o limite inferior e superior das saídas futuras do sistema respetivamente. Os parâmetros V são constantes adimensionais do controlador. Para valores grandes de V_{min} e de V_{max} as restrições são mais fáceis de satisfazer. Na segunda equação das restrições (3.7) o valor de u_{min} e de u_{max} são o limite inferior e superior para as MV respetivamente.

O algoritmo usado pela *toolbox* do MPC utiliza diferentes formas de resolver o problema dependendo da presença de restrições. Para o caso de não haver restrições, isto é, se todos os limites tiverem valor infinito então, a variável de folga é também removida de (3.6)(3.7) e o problema é resolvido analiticamente.

Se isto não acontecer é então utilizado um QP para resolver a equação. Assim, para esse caso, são utilizadas as seguintes matrizes, assumindo que $d(k) = n_d(k)$ é um ruído branco Gaussiano, vem :

$$x \leftarrow \begin{bmatrix} x \\ z_k \end{bmatrix}, A \leftarrow \begin{bmatrix} A & B_k \bar{C} \\ 0 & \bar{A} \end{bmatrix}, B_u \leftarrow \begin{bmatrix} B_u \\ 0 \end{bmatrix}, B_d \leftarrow \begin{bmatrix} B_d \bar{D} \\ \bar{B} \end{bmatrix}, C \leftarrow [C \ D_d \bar{C}] \quad (3.8)$$

Portanto, o modelo de predição fica:

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_v v(k) + B_d n_d(k) \quad (3.9)$$

$$y(k) = Cx(k) + D_v v(k) + D_d n_d(k) \quad (3.10)$$

Por questões de simplicidade, considera-se a predição de trajetórias futuras no modelo no instante de tempo $k = 0$. Com $n_d(i) = 0$ para todas as predições no instante i , vem que:

$$y(i|0) = C \left[A^i x(0) + \sum_{h=0}^{i-1} \left(A^{i-1-h} B_u \left(u(-1) + \sum_{j=0}^h \Delta u(j) \right) + B_v v(h) \right) \right] + D_v v(i) \quad (3.11)$$

Esta equação faculta a solução:

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ \dots \\ y(p) \end{bmatrix} = S_x x(0) + S_{u1} u(-1) + S_u \begin{bmatrix} \Delta u(0) \\ \dots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix} + H_v \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Onde:

$$S_x = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^p \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{pn_y \times n_x}, S_{u1} = \begin{bmatrix} CB_u \\ CB_u + CAB_u \\ \dots \\ \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{pn_y \times n_u} \quad (3.13)$$

$$S_u = \begin{bmatrix} CB_u & 0 & \dots & 0 \\ CB_u + CAB_u & CB_u & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u & \sum_{h=0}^{p-2} CA^h B_u & \dots & \sum_{h=0}^{p-1} CA^h B_u \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{pn_y \times n_u} \quad (3.14)$$

$$H_v = \begin{bmatrix} CB_v & D_v & 0 & \dots & 0 \\ CAB_v & CB_v & D_v & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{p-1} B_v & CA^{p-2} B_v & CA^{p-3} B_v & \dots & D_v \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{pn_y \times (p+1)n_v} \quad (3.15)$$

Considerando $[z_0; \dots; z_{m-1}]$ como sendo as variáveis otimização livres no problema de otimização (para o presente caso de uma só MV os valores de $z_0; \dots; z_{m-1}$ são escalares), a função de custo a ser otimizada vem que:

$$\begin{aligned} J(z, \varepsilon) = & \left(\begin{bmatrix} u(0) \\ \dots \\ u(p-1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{target}(0) \\ \dots \\ u_{target}(p-1) \end{bmatrix} \right)^T + \begin{bmatrix} \Delta u(0) \\ \dots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix}^T W_{\Delta u}^2 \begin{bmatrix} \Delta u(0) \\ \dots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix} \\ & + \left(\begin{bmatrix} y(1) \\ \dots \\ y(p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix} \right)^T W_y^2 \left(\begin{bmatrix} y(1) \\ \dots \\ y(p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix} \right) + \rho_\varepsilon \varepsilon^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Onde:

$$W_u = \text{diag}(\omega_{0,1}^u, \omega_{0,2}^u, \dots, \omega_{0,n_u}^u, \dots, \omega_{p-1,1}^u, \omega_{p-1,2}^u, \dots, \omega_{p-1,n_u}^u) \quad (3.17)$$

$$W_{\Delta u} = \text{diag}(\omega_{0,1}^{\Delta u}, \omega_{0,2}^{\Delta u}, \dots, \omega_{0,n_u}^{\Delta u}, \dots, \omega_{p-1,1}^{\Delta u}, \omega_{p-1,2}^{\Delta u}, \dots, \omega_{p-1,n_u}^{\Delta u}) \quad (3.18)$$

$$W_y = \text{diag}(\omega_{1,1}^y, \omega_{1,2}^y, \dots, \omega_{1,n_y}^y, \dots, \omega_{p,1}^y, \omega_{p,2}^y, \dots, \omega_{p,n_y}^y) \quad (3.19)$$

Por fim, ao ser substituído $u(k), \Delta u(k), y(k), J(k)$ a função de custo pode ser reescrita da forma:

$$\begin{aligned}
J(z, \varepsilon) = & \rho_\varepsilon \varepsilon^2 + z^T K_{\Delta u} z \\
& + 2 \left(\begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix}^T K_r + \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix} K_v + u(-1)^T K_u + \begin{bmatrix} u_{target}(0) \\ \dots \\ u_{target}(p-1) \end{bmatrix}^T K_{ut} \right. \\
& \left. + x(0)^T K_x \right) z + constant
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Considerando de seguida os limites nas entradas, no incremento das entradas e nas saídas, juntamente com a restrição $\varepsilon \geq 0$:

$$\begin{bmatrix} y_{min}(1) - \varepsilon V_{min}^y(1) \\ \dots \\ y_{min}(p) - \varepsilon V_{min}^y(p) \\ \Delta u_{min}(0) - \varepsilon V_{min}^{\Delta u}(0) \\ \dots \\ \Delta u_{min}(p-1) - \varepsilon V_{min}^{\Delta u}(p-1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y(1) \\ \dots \\ y(p) \\ \Delta u(0) \\ \dots \\ \Delta u(p-1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_{max}(1) + \varepsilon V_{max}^y(1) \\ \dots \\ y_{max}(p) + \varepsilon V_{max}^y(p) \\ \Delta u_{max}(0) + \varepsilon V_{max}^{\Delta u}(0) \\ \dots \\ \Delta u_{max}(p-1) + \varepsilon V_{max}^{\Delta u}(p-1) \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Similarmente ao que foi feito com a função de custo, ao ser substituído $u(k)$, $\Delta u(k)$, $y(k)$ obtém-se:

$$M_z z + M_\varepsilon \varepsilon \leq M_{lim} + M_v \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix} + M_u u(-1) + M_x x(0) \tag{3.1}$$

Onde as matrizes M_z , M_ε , M_{lim} , M_v , M_u , M_x são obtidas através o limite superior e inferior. Depois de as matrizes serem construídas o problema de otimização é resolvido a cada intervalo de tempo k .

Para o caso do MPC sem restrições, com os limites retirados a solução ótima é computorizada analiticamente da forma:

$$z^* = -K_{\Delta u}^{-1} \left(\begin{bmatrix} r(1) \\ \dots \\ r(p) \end{bmatrix}^T K_r + \begin{bmatrix} v(0) \\ \dots \\ v(p) \end{bmatrix} K_v + u(-1)^T K_u + \begin{bmatrix} u_{target}(0) \\ \dots \\ u_{target}(p-1) \end{bmatrix}^T K_{ut} + x(0)^T K_x \right) \tag{3.1}$$

O MPC define que:

$$\Delta u(k) = z_0^*, u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{3.1}$$

Para o caso de um problema com restrições, o QP solucionador do MPC converte o problema de otimização para a forma geral de um QP:

$$\text{Min} \left(f^T x + \frac{1}{2} x^T H x \right) \quad (3.22)$$

Sujeito a:

$$Ax \leq b \quad (3.23)$$

Onde $x^T = [x^T \ \varepsilon]$ são as decisões, H é a matriz Hessiana, A é uma matriz de coeficientes de restrições lineares, f e b são vetores. As matrizes H e A são constantes. Durante a inicialização o controlador computa estes, e recupera-os do computador quando precisa. Este assim computa os vetores variantes no tempo f e b no início de cada instante de controle.

Esta *toolbox* usa o algoritmo KWIK [52], para resolver o *QP*, que requer que a matriz Hessiana seja definida e positiva.

3.3. Estratégia de Controle do MPC

A figura 3.4 representa esquematicamente o funcionamento do MPC para controlar cada carga. O princípio de controle é semelhante ao do termóstato representado anteriormente pois, neste caso, também vão existir três MPC's, uma para cada carga, com a principal função de manter a temperatura do ar ou água perto da sua referência.

Como já analisado, o MPC utiliza vários dados para que tal aconteça, como as restrições as previsões, os pesos, a função de custo, entre outros, pois são estes mesmos dados que permitem que o MPC seja tão bem sucedido.

Assim, o MPC ao receber o valor da temperatura que quer regular e, tendo em conta as variáveis que lhe são fornecidas, este ministra um sinal para que o objetivo de alcançar a referência de concretizado.

Este sinal de saída, como se pode ver na figura 3.4, é depois modelado pelo bloco MPB (Modelador de potência binário), que trabalha apenas com dois níveis ou zero ou um. Este bloco é fundamental para que a saída se torne única e exclusivamente num sinal ON/OFF. Este fim é alcançado porque a saída tem apenas estes dois níveis. O que o MPB faz é simplesmente modelar em frequência o sinal de saída do MPC para que tenha mais ou menos duração.

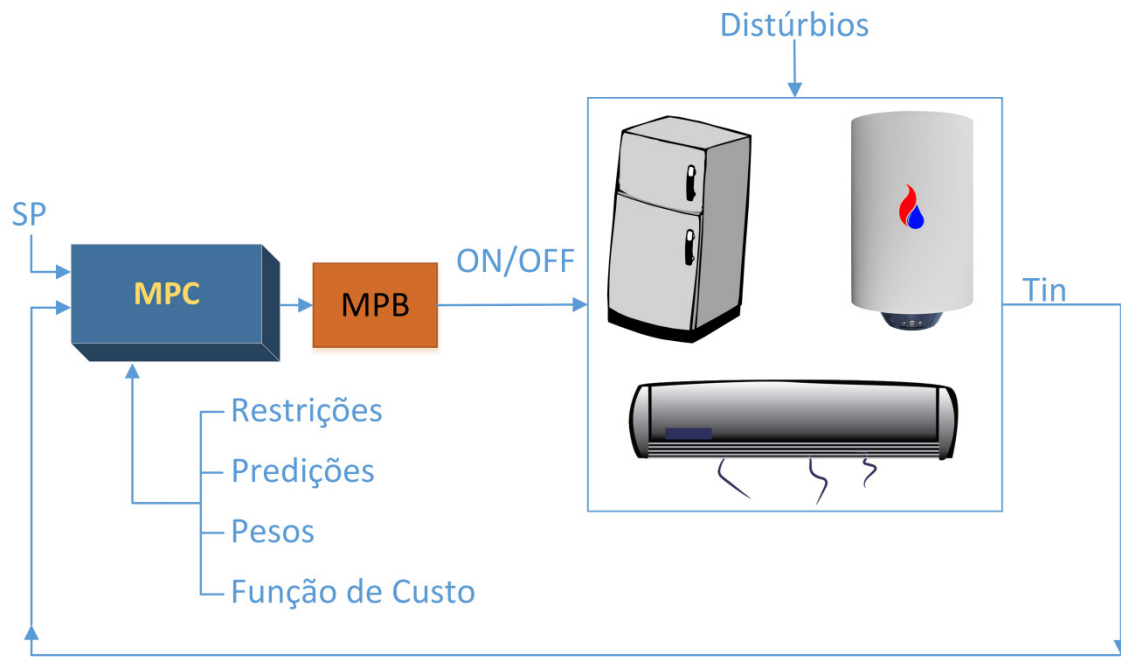


Figura 3.4 Descrição esquemática do funcionamento e estratégia de controlo do MPC.

Capítulo 4

Simulação e Resultados Experimentais

Neste capítulo é primeiramente comparada a performance do termóstato, com o *MPC*, sobre as mesmas condições. Posteriormente estuda-se a influência dos pesos e como essa aptidão do *MPC* pode contribuir para melhorias nos resultados.

Posteriormente são introduzidas no sistema mais cargas para serem estudadas de acordo com a técnica da gestão da procura e por fim são apresentados os resultados de uma possível previsão de cenários com aplicação residencial.

4.1. Termóstato VS *MPC*

4.1.1. Ar Condicionado

Nesta simulação, foi utilizada uma unidade de ar condicionado com 8900 BTU, aproximadamente 2,6 kW para refrigerar três divisões de uma casa. O ar condicionado é manipulado externamente por um sistema de controlo de temperatura, que integra em si um sensor de temperatura e uma unidade de decisão para acionar o ar condicionado.

Para ambos os controladores, foi regulado a temperatura de referência, sendo ela 23°C. Para se poderem comparar os valores de consumo sobre as mesmas condições de tolerância de temperaturas, foi definido um limite superior de 23,5°C e inferior de 22,7°C para a divisão onde se situa o sensor, que recolhe as amostras sempre a cada 7min e 10s que passam.

Para este sistema, é introduzida a perturbação da temperatura exterior que é gerada tendo em conta um dia quente de verão. O comportamento do sistema perante o termóstato é mostrado na figura 4.1 e perante o *MPC* na figura 4.2.

Para uma primeira análise, a temperatura da divisão em ambos os casos está de acordo com as especificações. Ao analisarmos as curvas da temperatura em cada figura é de observar que a temperatura média obtida através do termóstato é 23°C, isto porque a temperatura neste caso não passa o limite superior e inferior do intervalo de histerese. Já o controlo através do *MPC* não se percebe visivelmente qual a sua média pois este controlador não atua como o termóstato atingindo o limite superior e inferior constantemente para realizar a regulação da temperatura.

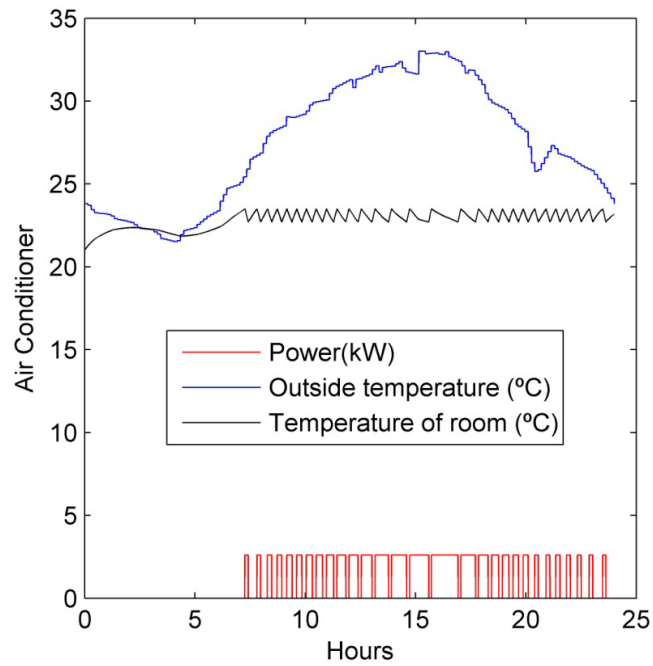


Figura 4.1 Ar condicionado controlado com o Termóstato.

Para que seja possível medir com alguma precisão a *performance* dos controladores tem de se medir os consumos de cada um e os respetivos preços de eletricidade, tais valores estão mostrados na tabela 4.1.

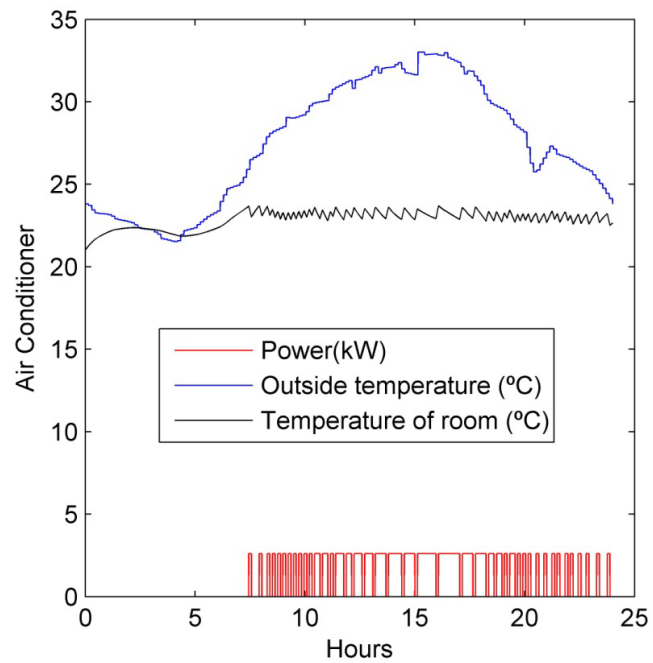


Figura 4.2 Ar condicionado controlado com o MPC.

Cada intervalo do dia é representado por horas de vazio, horas de cheias e horas de ponta. O preço da eletricidade faz jus há tarifa de verão apresentada na figura 1.4, sendo esta aplicada a todos os modelos testados.

Tabela 4.1 Ar condicionado: consumo de energia vs. método de controle

AC-2,6kW	Termóstato		MPC	
	Energia (kWh)	Custo (\$)	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	5,005	0,310	5,065	0,314
Horas de cheias	8,417	0,774	8,546	0,786
Horas de ponta	12,934	1,397	12,661	1,367
Total	26,356	2,482	26,272	2,468

A partir da tabela 4.1 é assim possível inferir que a estratégia do MPC é menos dispendiosa em termos de custo e energia. Nas horas de ponta o consumo é reduzido e incrementado parte nas horas de vazio e cheias, o que se traduz numa redução consequente no custo.

4.1.2. Termoacumulador

Sendo o termoacumulador usado para a higiene diária de uma família, este tem de manter a água quente durante a noite, para que nas horas de maior utilização o sistema responda o mais rápido possível, aquecendo a água fria que entra para compensar a água quente que sai.

Para tal, é simulado um termoacumulador com uma potência nominal de 4,5 kW e com uma capacidade de armazenamento máximo de 184 Litros. Ambos os controladores são inicializados com os mesmos requerimentos, sendo eles a mesma referência de 55°C e uma banda de tolerância de +/- 1,5°C. A temperatura exterior é considerada constante ao longo do dia, estando esta fixa nos 23°C. Para além disto, o perfil de consumo de água também é igual nas duas situações. A água tem uma temperatura constante de entrada de 10°C. O sensor que mede a temperatura da água recolhe as amostras sempre a cada 9min e 18s que passam.

Na figura 4.3 é simulado o termoacumulador controlado através do termóstato, e na figura 4.4 representada de seguida encontra-se a atuação do MPC.

Ao serem analisadas as figuras percebe-se que, para o mesmo perfil de consumo, a temperatura no interior do tanque mantém-se dentro dos limites especificados. Mas é de observar que, a regulação por parte do MPC é novamente feita, em parte, como a anterior, não sendo por vezes alcançado o limite superior e inferior. No início a variação é mais moderada, o que possivelmente levará a um aumento do consumo de energia nesta parte do dia.

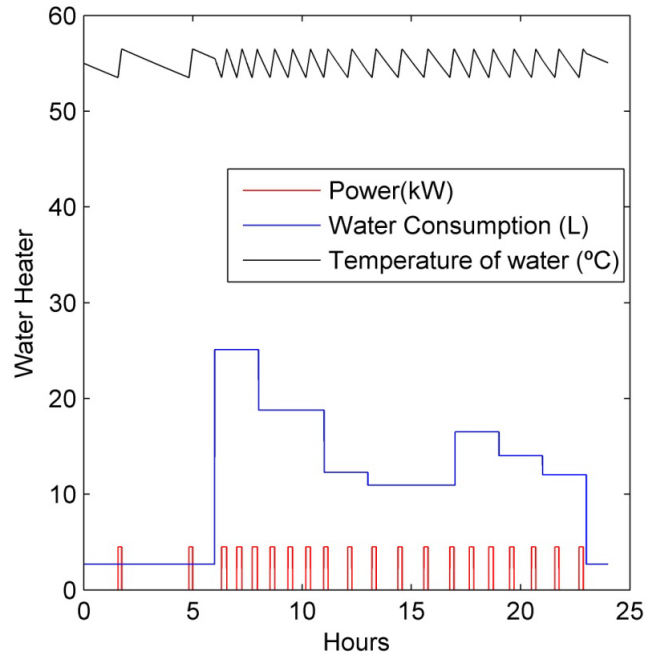


Figura 4.3 Termoacumulador controlado com o Termóstato.

Para que se confirme a hipótese de um maior consumo por parte do MPC em alguns períodos do dia, a tabela 4.2 mostra o consumo para cada intervalo do dia de ambos os métodos de controlo.

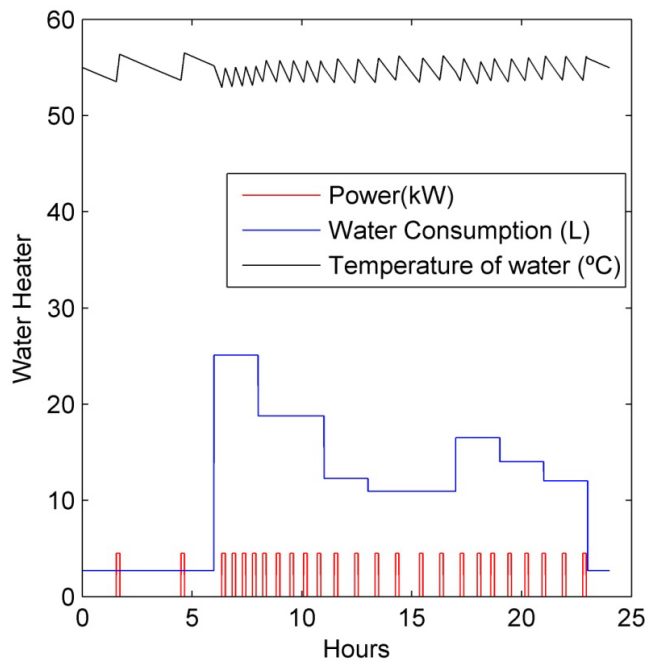


Figura 4.4 Termoacumulador controlado com o MPC.

Tabela 4.2 Termoacumulador: consumo de energia vs. método de controlo.

WH-4,5kW	Termóstato		MPC	
	Energia (kWh)	Custo (\$)	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	5,919	0,367	6,278	0,389
Horas de cheias	6,740	0,620	6,975	0,642
Horas de ponta	4,939	0,533	4,185	0,452
Total	17,598	1,521	17,437	1,483

Para corroborar a suposição anterior, observa-se que existe um maior consumo de energia nas horas de vazio pois os limites superior e inferior não são alcançados, forçando um maior consumo de energia pois, neste caso, o termóstato consegue um consumo mais faseado. Contudo, nas horas de ponta, o desempenho do MPC excede bastante o desempenho do termóstato.

Analisado na globalidade, existe um resultado bastante positivo, pois a poupança de custos totais obtidos nesta simulação são mais elevados que na anterior.

4.1.3. Frigorífico

Tipicamente, o frigorífico é uma carga residencial bastante sensível aos agentes externos, como é o caso da temperatura ambiente, quando a porta do mesmo é aberta. Assim, é a ação de abrir e fechar a porta que obriga o controlador a tomar medidas de ligar ou desligar o sistema de refrigeração.

Para testar o modelo deste, é considerado uma unidade com uma potência nominal de 230 W. Estando o ponto de referência situado para os dois tipos de controlo nos 4,5°C, mais uma tolerância de +/- 0,6°C como limite máximo e mínimo de operação. O sensor que recolhe a informação da temperatura do ar lê as amostras sempre a cada 6min que passam.

Para que sejam simulados os diferentes desempenhos perante um frigorífico, é introduzido o distúrbio de abertura e fecho da porta. Desta forma, modela-se para que entre as 10 horas e as 11 horas se abra e feche a porta, moderadamente. Depois, entre as 14 horas e as 15 horas, modela-se para que este fenómeno aconteça com mais frequência.

Assim, as respostas específicas do termóstato e do MPC são mostradas nas figuras 4.5 e 4.6, respetivamente. Juntamente, como o consumo respetivo a cada tipo controlo é mostrado na tabela 4.3.

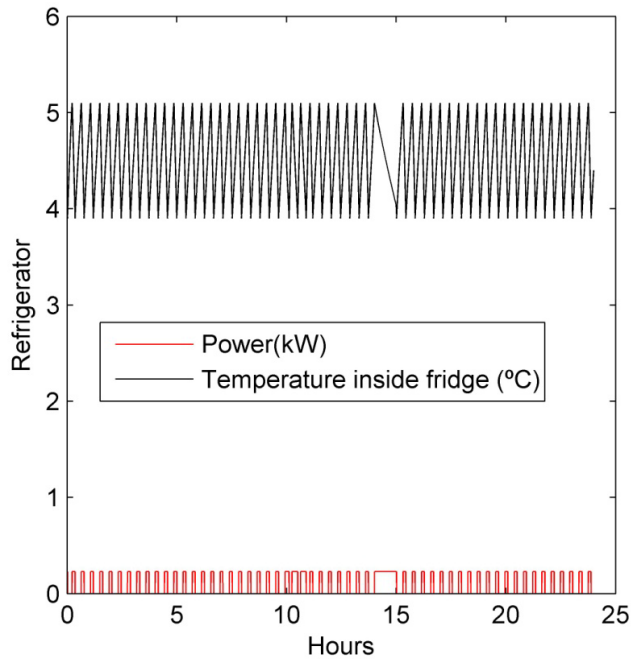


Figura 4.5 Frigorífico controlado com o Termóstato.

É bastante claro que, na figura 4.5, onde opera o termóstato, ambos os distúrbios são ultrapassados, sendo apenas uma questão de tempo para os ultrapassar. Como prova disso, na segunda vez que a porta é aberta com mais frequência, o termóstato obriga o compressor do frigorífico a operar durante quase uma hora para que a temperatura chegue ao limite inferior.

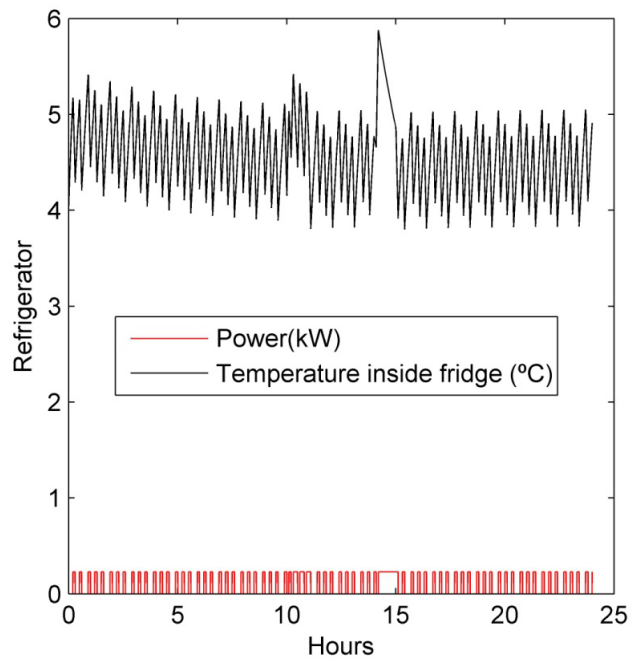


Figura 4.6 Termoacumulador controlado com o MPC.

Por outro lado, o *MPC* tem um tempo específico para fazer uma atualização do estado e para atualizar a saída. Nesta simulação em particular, a atualização ocorre a cada seis minutos de intervalo.

Com este fator a ter em conta, na segunda perturbação forçada, o *MPC* responde um pouco tarde, deixando assim a temperatura subir quase até aos 6°C. Contudo, isto não é um problema, visto que esta temperatura se encontra bem dentro dos limites que se encontram hoje em dia nos frigoríficos domésticos usuais.

Uma possível solução para melhorar o desempenho é diminuir o tempo de amostragem e assim o *MPC* atualizar a saída com mais frequência.

Tabela 4.3 Frigorífico: consumo de energia vs. método de controlo.

RF-230W	Termóstato		<i>MPC</i>	
	Energia (kWh)	Custo (\$)	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	0,824	0,051	0,828	0,051
Horas de cheias	0,504	0,046	0,483	0,444
Horas de ponta	0,549	0,059	0,552	0,060
Total	1,878	0,157	1,863	0,155

Do ponto de vista económico, através da comparação feita pela tabela 4.3, não existe uma melhoria significativa para este caso específico.

4.2. Estudo da Variação dos Pesos e Tempo de Amostragem

Como introduzido no capítulo 3, através dos pesos consegue-se obter uma maior ou menor importância para cada termo na função de custo e, com base nessa mesma premissa, nas subsecções seguintes são estudadas as variações dos valores dos pesos para ser observado qual o seu verdadeiro efeito.

Por conseguinte, é também analisado o tempo de amostragem (*sample time*) pois dependendo do tempo em que se tira o valor da temperatura, a resposta vai variar. Variando a resposta, existe logo uma consequência no valor do consumo, custo e temperatura.

4.2.1. Ar Condicionado

Para assim se testar esta influência dos pesos e do *sample time* é, primeiramente, escolhido o *sample time* utilizado para o ar condicionado utilizado na secção anterior ($ST=0,12$). De seguida, faz-se variar os dois pesos e simula-se um dia de utilização da carga, mantendo sempre o valor dos pesos constantes ao longo do dia.

Assim, para o caso da secção anterior, vêm as figuras 4.7 4.8 e 4.9, que correspondem ao consumo, custo e temperatura média, respetivamente. Começando por se observar os eixos, ω^y continua a ser o peso responsável por dar mais ou menos importância à referência, $\omega^{\Delta u}$ passa a ser ω^u pois o valor deste é constante e é responsável por penalizar as alterações à saída. Já no eixo vertical temos o parâmetro a ser estudado.

Para este caso ($ST=0,12$), pode observar-se basicamente dois níveis de consumo de energia na figura 4.7, onde ainda existe uma diferença notável de cerca de 300 kWh. Estes valores influenciam diretamente o custo e a temperatura pois, como é apresentado para valores de ω^y perto da unidade e valores de ω^u perto de zero, o consumo é máximo assim como o custo e também a temperatura é mínima, pois estamos a influenciar a função de custo a dar uma elevada importância à temperatura de referência.

Contudo, o grande desafio aqui é tentar encontrar pontos intermédios onde se consiga um menor consumo sem variar muito o custo e a temperatura. Para tal, é variado o *sample time* para 0,05 que corresponde a 3 minutos. Deste modo, obtemos as figuras 4.10 4.11 e 4.12, que desde logo se tornam bastante interessantes de analisar pois, neste caso, o tempo de recolha dos dados é feito por menos de metade do tempo do caso anterior.

Para esta situação, ao nível do consumo identificam-se maioritariamente três zonas de consumo, a primeira zona será a zona a vermelho (figura 4.11) onde é interessante de analisar que existem vários níveis de preços para a área análoga na figura 4.10. Ou seja, aqui já se consegue perceber melhor toda esta razão dos pesos e a sua importância, pois com a mesma energia consumida temos uma diferença no custo, sendo esta pouca mas importante no que toca à otimização.

Em relação à figura 4.11, apesar da diferença da temperatura média ser mínima, pois situa-se na casa das dezenas, observa-se a sua clara subida à medida que ω^y tende para zero e o valor de ω^u vai aumentando. Existindo mesmo um pico nessa região extrema, apesar de nessa zona intuitivamente o custo descer e o consumo também, o delinear da temperatura ao longo do dia para esta situação pode não o mais desejável, pois a temperatura tende a afastar-se muito da referência e assim sair da zona de conforto térmico desejada pelo utilizador.

Analisando globalmente este caso com o caso anterior, tem-se um consumo maior de energia e custo, pois com a redução do *sample time*, a carga liga e desliga com mais frequência, o que é um problema nas horas de ponta e cheias, uma vez que, como os limites superior e inferior não são totalmente atingidos, a carga liga mais vezes do que o necessário.

Isto resulta do fato de o maior ganho resultar da variação da temperatura, (atingido o limite superior e de seguida o inferior) pois se a temperatura fosse mantida constante, os resultados seriam piores em termos de consumo, pois é sobre este princípio de ligar e desligar que foi introduzido o termostato. Para que o consumo fosse reduzido, mas com as novas necessidades de otimização, estas novas formas de controlo têm de ser trabalhadas para serem mais tarde postas em prática.

Analogamente como foi estudado um *sample time* menor, um maior é mostrado nas figuras 4.13, 4.14 e 4.15. Para este caso, voltam apenas a existir dois níveis de consumo contudo, o segundo nível apenas aparece na zona onde é dada pouca importância à temperatura de referência. Novamente, para este caso, apesar de o consumo de energia ser o mesmo, conseguem-se definir zonas com custo diferentes, assim como a temperatura média, sendo observável que em determinados pontos existe um decréscimo da temperatura média.

Seguindo a mesma linha de pensamento, para este caso é então conseguido um melhor nível de consumo porque a temperatura atinge mais facilmente o limite superior e inferior. Contudo, quando o *sample time* é muito elevado, pode dar-se o caso de os limites serem ultrapassados e assim a zona de conforto definida é violada.

Em relação a todas as figuras do ar condicionado que representam a temperatura média, como mais adiante se verá, estas figuras são as menos lineares, e isto deve-se ao fato de a temperatura no início do dia não chegar ao limite superior logo nas primeiras horas, demorando, para tal, cerca de seis horas. Assim, este valor influencia bastante o gráfico da temperatura média.

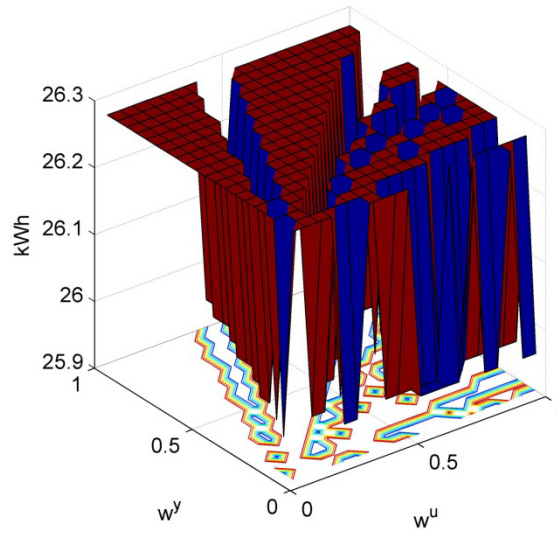


Figura 4.7 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,12.

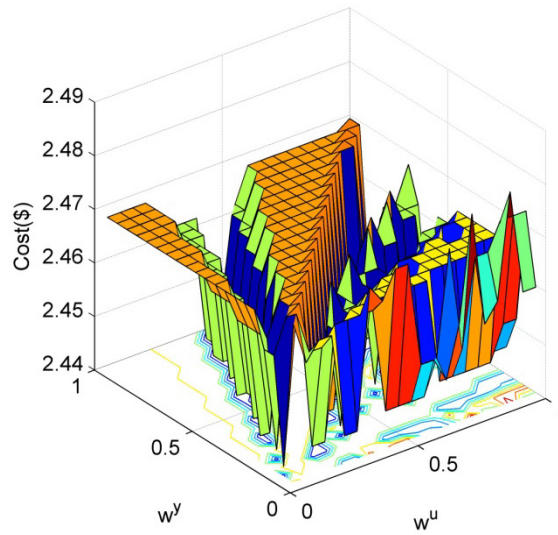


Figura 4.8 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,12.

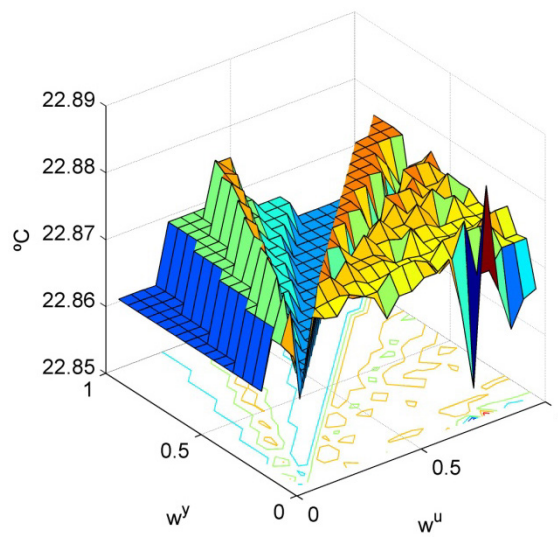


Figura 4.9 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,12.

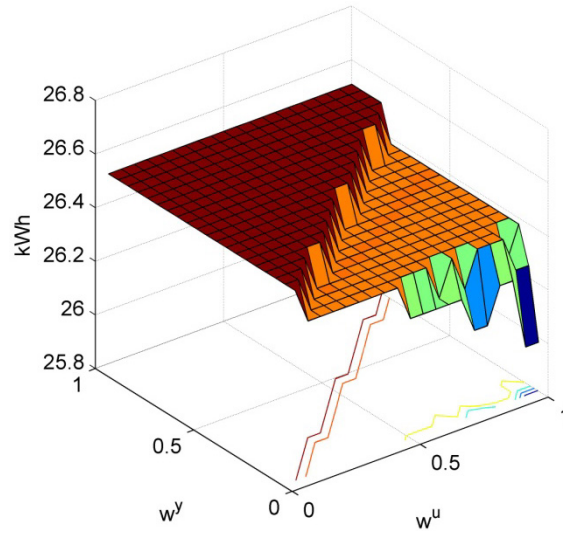


Figura 4.10 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

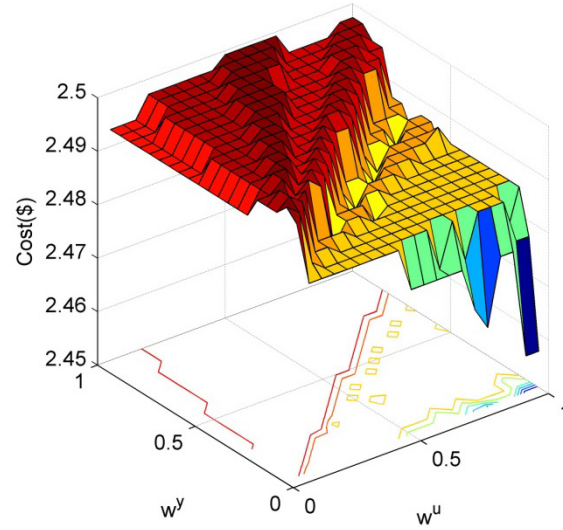


Figura 4.11 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

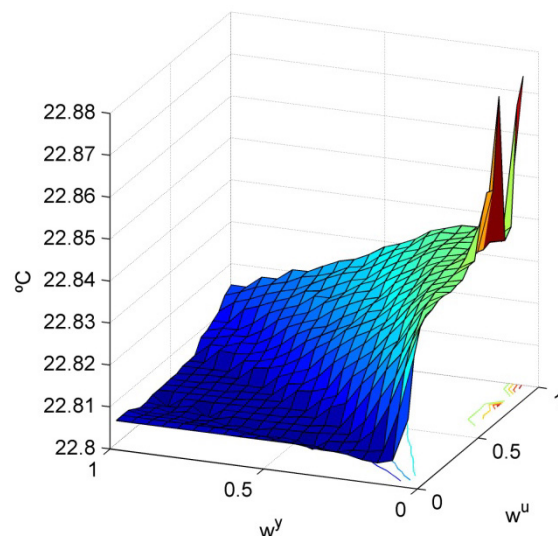


Figura 4.12 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

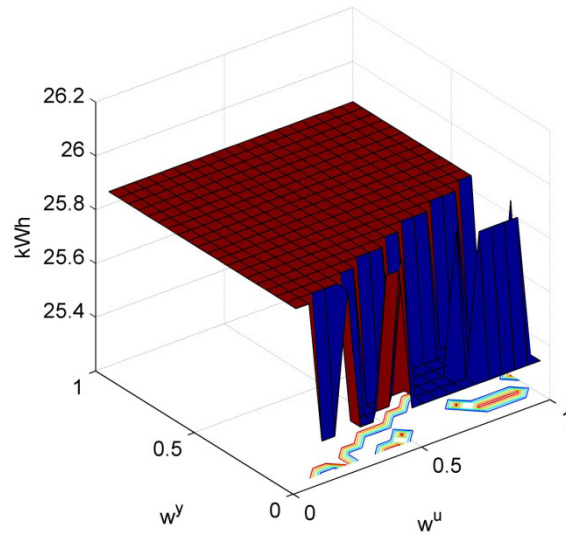


Figura 4.13 AC: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$.

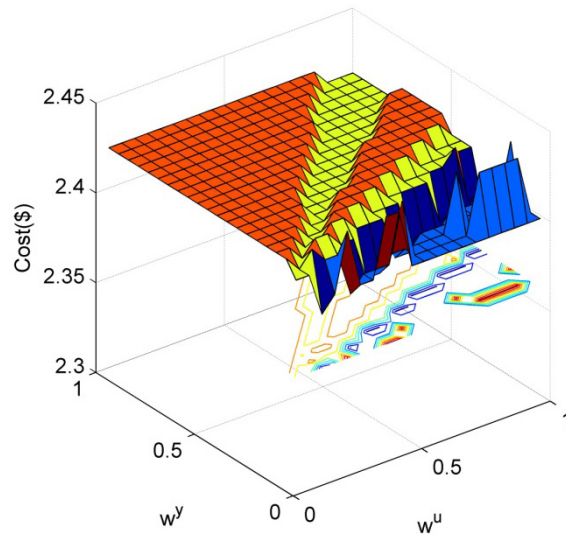


Figura 4.14 AC: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,20$.

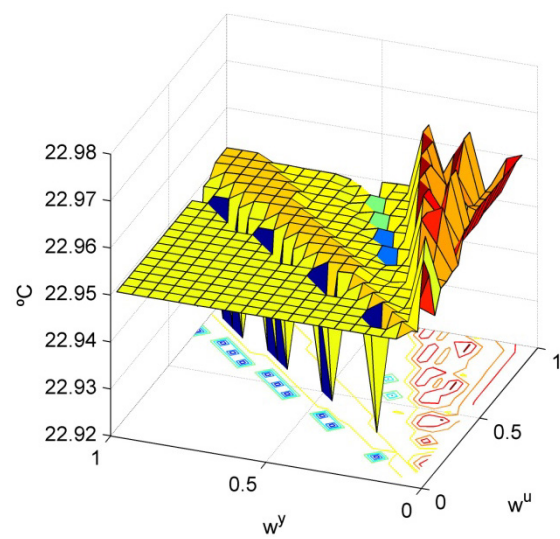


Figura 4.15 AC: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,20$.

4.2.2. Termoacumulador

Prosseguindo o estudo da variação dos pesos e do *sample time*, temos para o caso do termoacumulador um $SP=0,155$ que é mostrado segundo as figuras 4.16, 4.17 e 4.18. Para este caso, ao nível do consumo (figura 4.16) existem dois níveis, estando estes largamente espaçados pois, é novamente observável que a zona de menor consumo de energia é conseguida para valores de ω^y baixos.

Assim, para o gráfico do consumo (figura 4.17) existem também dois níveis de consumo, contudo, antes do decréscimo no consumo existe um pico no gráfico. A sua existência pode ser explicada pela simples razão de que a carga pode ter ligado para estes valores a horas diferentes do dia, influenciando logo o consumo.

Através do gráfico da temperatura (figura 4.18), é dedutível que a temperatura média desce impreterivelmente segundo o eixo ω^y , de realçar que, sendo a temperatura de referência 55°C , temos para o mesmo consumo e para o mesmo custo uma zona apresentada a vermelho. Contudo, toda esta zona tem diferentes valores. Deste modo, é preferível que sejam escolhidos os valores dos pesos onde a temperatura média é mais elevada.

Reduzindo novamente o *sample time* para 0,10, temos as figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Para este caso, ao nível do consumo, voltam a ter-se três níveis de consumo de eletricidade, e consequentemente, três perfis de custo. Já ao nível da temperatura média, tem-se novamente uma curva descendente como esperado. Em termos globais de consumo e custo, estes aumentam, sendo este fenómeno explicado repetidamente pelo que aconteceu no ar condicionado.

Ao ser aumentado o *sample time* para 0,20, temos os resultados apresentados pelas figuras 4.22, 4.23 e 4.24. Similarmente ao primeiro caso, identificam-se duas zonas de consumo, mas no custo existem novamente uns picos, que representam uma minoria nas 400 simulações feitas.

Porém, para este caso, como o *sample time* é bastante mais elevado, é de referenciar que através da análise à temperatura média, esta decresceu. Isto deve-se ao facto de por vezes o limite inferior ser ultrapassado pois o período entre amostras de leituras é algo elevado.

Contudo, estando a referência situada nos 55°C e para este caso do termoacumulador a temperatura média ser um pouco abaixo, não chegando a $0,5^\circ\text{C}$ de diferença, o utilizador praticamente nem nota a diferença.

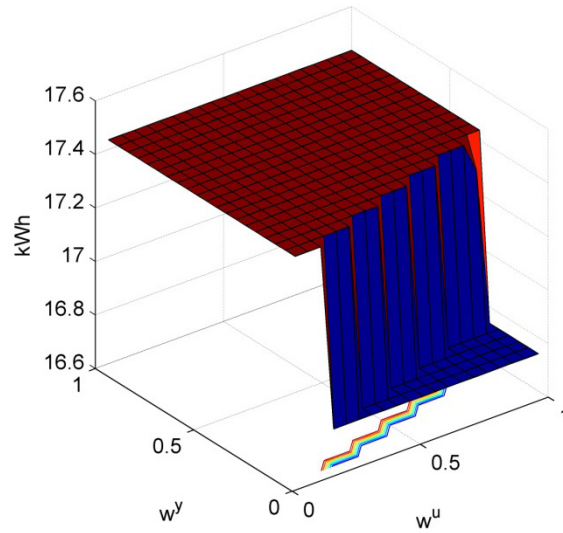


Figura 4.16 WH: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,155.

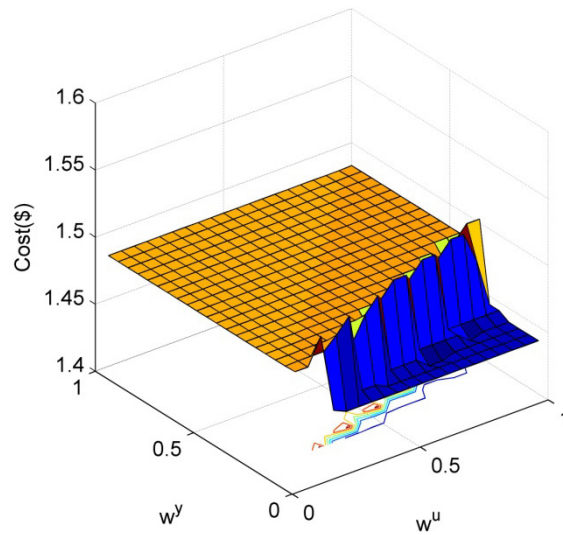


Figura 4.17 WH: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,155.

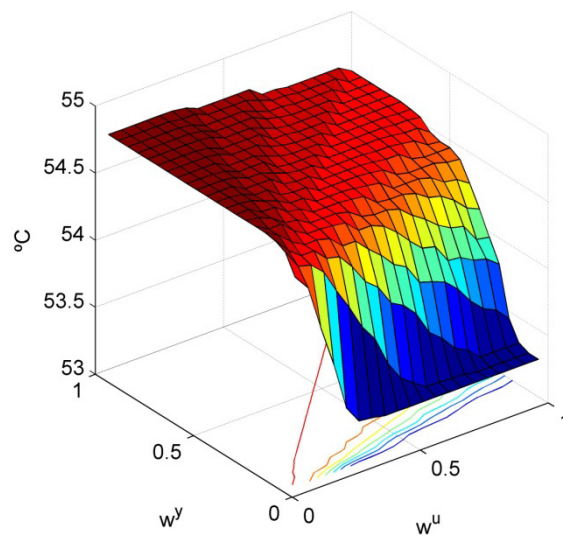


Figura 4.18 WH: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,155.

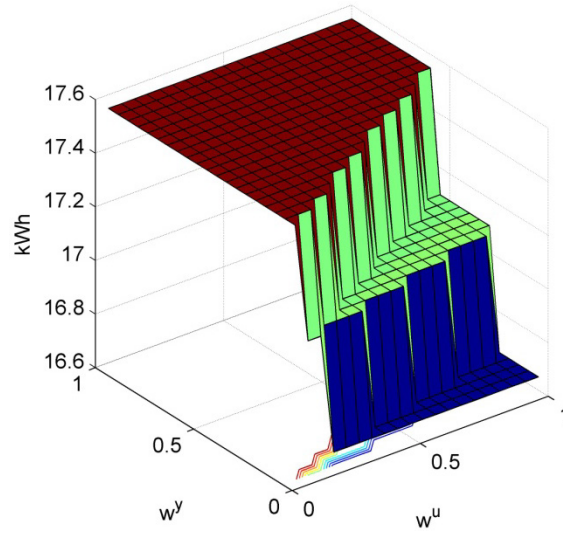


Figura 4.19 WH: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,10.

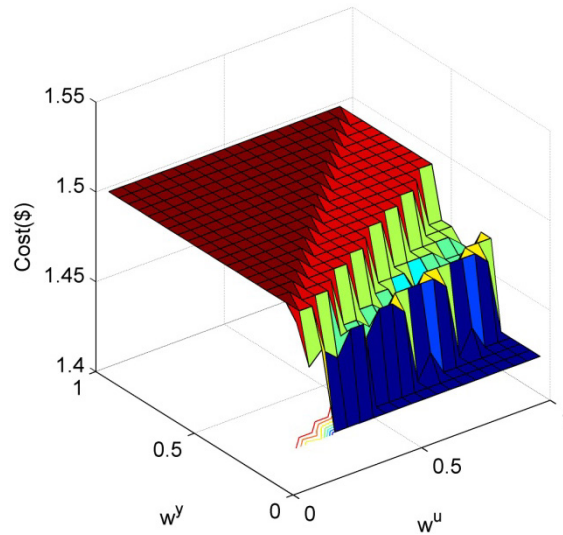


Figura 4.20 WH: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,10.

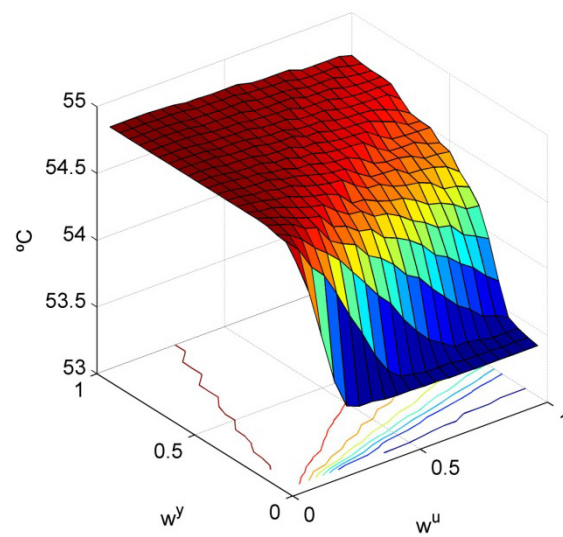


Figura 4.21 WH: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,10.

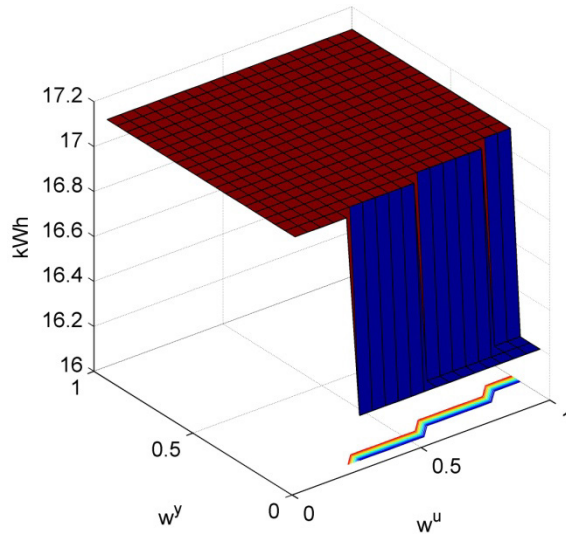


Figura 4.22 WH: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,20.

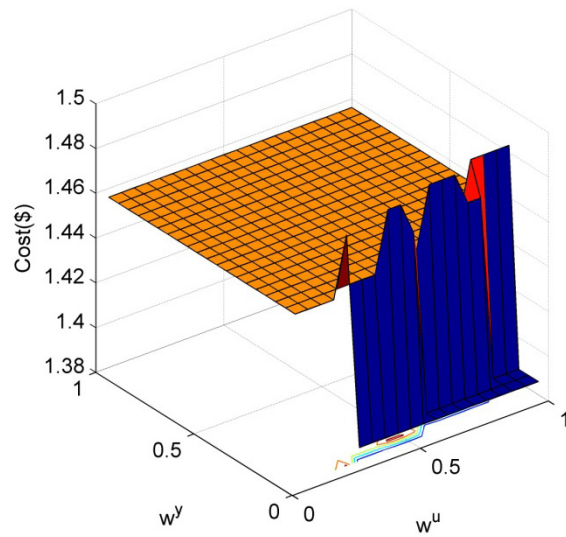


Figura 4.23 WH: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,20.

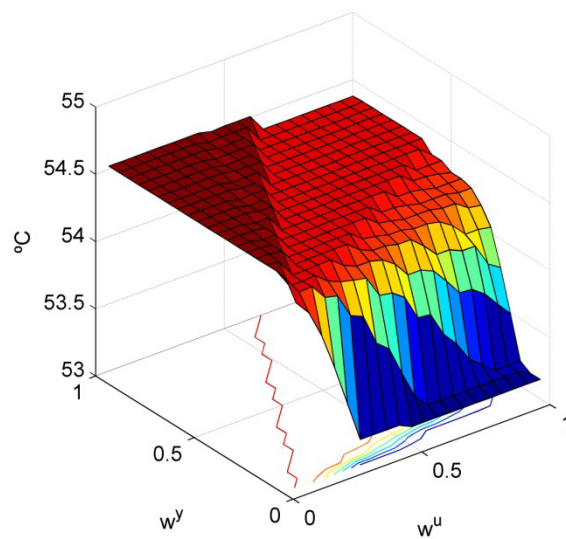


Figura 4.24 WH: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,20.

4.2.3. Frigorífico

Já ao nível do frigorífico, como apresentado anteriormente, as figuras 4.25, 4.26 e 4.27, representam assim o consumo elétrico, o custo e a temperatura média, respetivamente, para um *sample time* de 0,10.

Assim, para este caso, é apresentado na figura 4.25 dois níveis de consumo, que ao serem tidos em conta pode observar-se que a diferença entre eles é bastante pequena, isto porque o frigorífico é um sistema muito bem isolado e só tem perdas quando existem perturbações, como a abertura da porta. Como este fenómeno só foi simulado em algumas horas do dia, o MPC pouco pode fazer para além de regular a temperatura quase sem perturbações.

Apesar de existirem maioritariamente dois valores para o consumo, ao nível do custo temos vários preços. Mas, ao ser introduzido na análise o gráfico da temperatura média, observa-se que para que a referência 4,5°C seja respeitada, o valor dos pesos tem de estar na zona vermelha do gráfico do consumo e dos custos. Contudo, ao nos deslocarmos para zonas onde a temperatura média sobe um pouco para perto dos 4,6°C, consegue-se um melhor valor de energia consumida e de custo ao fim de um dia.

Como analisado nos casos anteriores, ao ser também reduzido o *sample time* para 0,05, têm-se então as figuras 4.28, 4.29 e 4.30, onde a regra de o consumo aumentar se mantém também. Contudo, é de observar que o custo para o valor de consumo máximo é menor que no caso anterior, segundo as mesmas condições. Já a figura 4.30, da temperatura média, também tem um perfil mais linear, sendo estas consequências uma resposta do sistema por haver poucas perturbações porque nas outras cargas existem perturbações durante o dia todo, e porque o *sample time* tem um valor tão reduzido.

Perante um *sample time* de maior valor ($ST=0,15$), obtêm-se os gráficos 4.31, 4.32 e 4.33, onde se nota que o consumo volta a ter apenas dois valores mas em contrapartida, o custo tem quatro valores de saída, sendo o valor mais baixo representado a azul-escuro (figura 4.32). Já ao nível da temperatura média, esta volta a não ser tão linear.

Através de uma análise mais cuidada, o custo é menor neste caso, mesmo perante todos os outros casos se for feita uma análise global. Pois, como justificado para os outros casos, desta forma, o limite superior e inferior são mais facilmente atingidos.

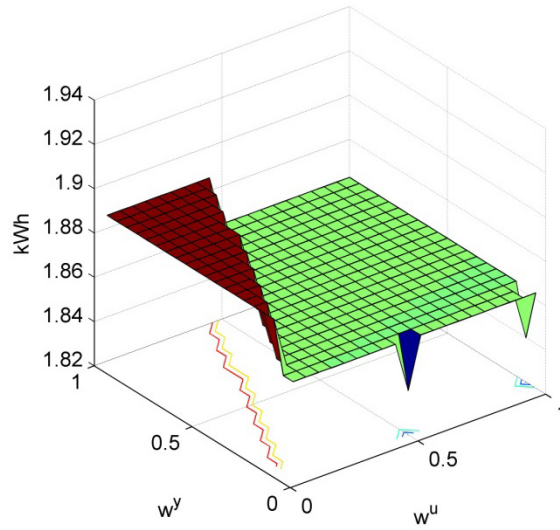


Figura 4.25 RF: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,10.

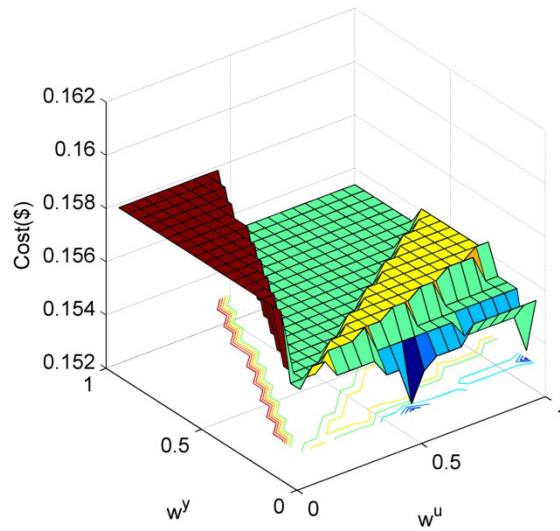


Figura 4.26 RF: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,10.

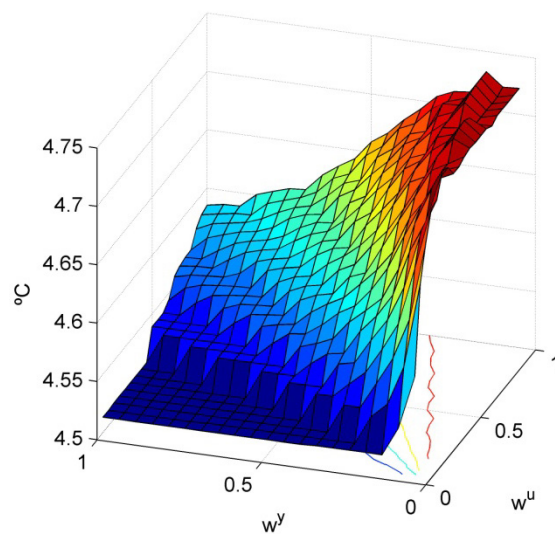


Figura 4.27 RF: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,10.

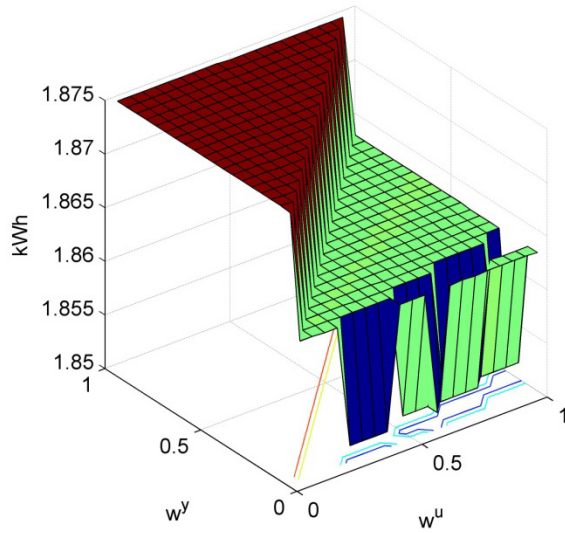


Figura 4.28 RF: Consumo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

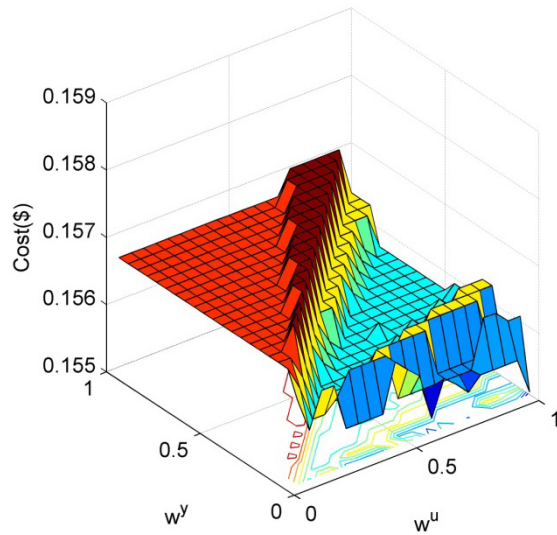


Figura 4.29 RF: Custo de energia vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

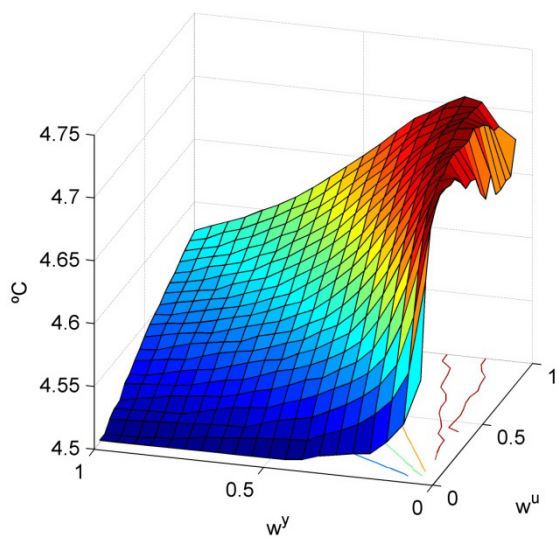


Figura 4.30 RF: Temperatura média vs. variação dos pesos, $ST=0,05$.

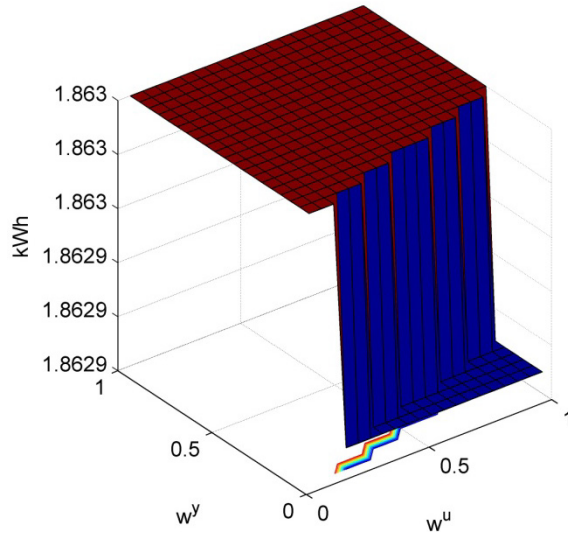


Figura 4.31 RF: Consumo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,15.

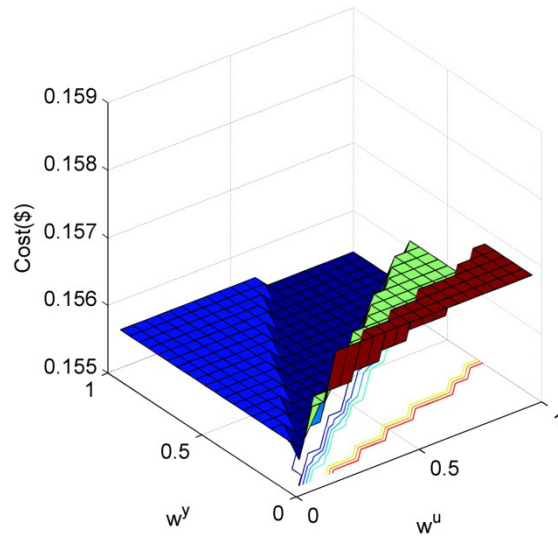


Figura 4.32 RF: Custo de energia vs. variação dos pesos, ST=0,15.

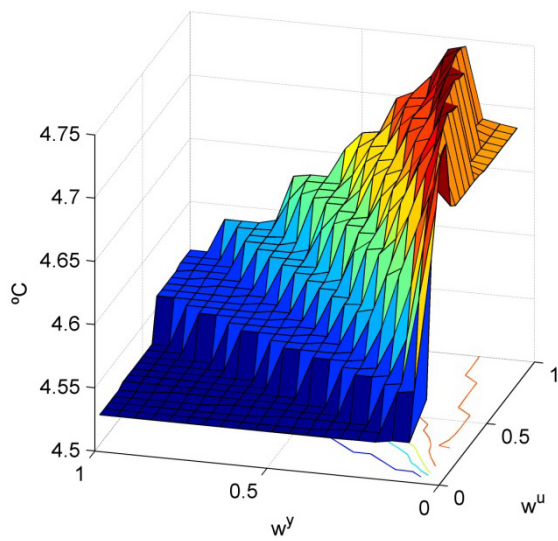


Figura 4.33 RF: Temperatura média vs. variação dos pesos, ST=0,15.

4.3. MPC com Pesos Variáveis

Seguida da análise da subsecção anterior onde é dedutível a importância dos pesos e do *sample time*, pode então ser analisada nesta subsecção a possibilidade de existir a variação dos pesos ao longo do dia, isto é, na subsecção anterior o valor dos pesos era igual ao longo do dia, e através disso conseguiu-se perceber quais os valores que os pesos têm de tomar para que o controlo seja, ou não, o desejável.

Assim sendo, devido à variação dos preços ao longo do dia, nas horas em que a eletricidade é mais cara, pode ser dada uma importância menor à referência desejada, por exemplo. Para que assim o consumo diminua.

4.3.1. Ar Condicionado

Sabendo, *a priori*, através da subsecção anterior os valores para os quais se consegue uma redução no consumo, estes são aplicados então ao modelo desenvolvido, para que assim a função de custo seja alterada ao longo do dia, mantendo sempre a temperatura dentro de limites aceitáveis.

Assim, para o ar condicionado, nas horas em que a temperatura exterior é baixa, é dado um valor baixo a ω^y pois a temperatura não tem de seguir tão rigorosamente a referência, já ω^u é dado um valor também baixo. Nas horas de maior calor, para que se satisfaçam as condições desejadas pelo utilizador, é dado um valor ω^y perto da unidade e ω^u continua com um valor baixo, perto de zero.

Na figura 4.35, são comparados assim todos os tipos de controlo até agora estudados, mais o caso do MPC adicionado dos pesos variáveis obtidos através destes dados de entrada. Nesta figura, a azul está representado o distúrbio (temperatura exterior), a vermelho o controlo feito através do termostato, a azul-claro é representado o controlo feito pelo MPC sem variação de pesos (*MPC Tun 1*) e a preto é representado o controlo feito pelo MPC com variação de pesos (*MPC Tun 2*).

Tal como pretendido, nota-se que o MPC com pesos variáveis tem um comportamento diferente do MPC sem variação dos pesos. Como se pode observar, raramente estes dois têm um comportamento igual apesar de terem o mesmo *sample time* e a mesma referência.

Por exemplo, antes das 10 horas o *MPC Tun 2* tem um comportamento “pior” que o *MPC Tun 1*, isto porque, como ainda não se atingiram as horas de maior calor, o valor definido para o ω^y é mais baixo.

Como tal, para comprovar os seus efeitos, é mostrado na figura 4.34 a variação da energia e do custo perante os diferentes tipos de controlo. Através dos dados desta figura 4.34, é possível perceber a clara vantagem que existe em regular os pesos ao longo do dia, pois em relação ao simples termostato consegue-se obter uma redução de cerca de 0,250 kWh por dia, sendo a diferença para o simples MPC não tão acentuada mas importante no ponto de vista da otimização.

Como o custo também é reduzido, pode concluir-se que ao nível da otimização cria-se um novo paradigma, que é a necessidade futura de os controladores se adaptarem ao meio envolvente, e a prova de que esta pode ser uma forma de otimização é mostrada nestes mesmos resultado e os seguintes.

Note-se ainda, que pouco depois das 15h todos os controladores demoram algum tempo a reduzir a temperatura da divisão. Isto acontece porque é nesta hora que a maior temperatura exterior se faz sentir e como tal, para que isto não aconteça, é necessário aumentar a potência do ar condicionado.

Os resultados para tal são mostrados no anexo B, onde se compara o termostato com o MPC com os pesos variáveis. Neste caso, a diferença no consumo ainda é mais acentuada.

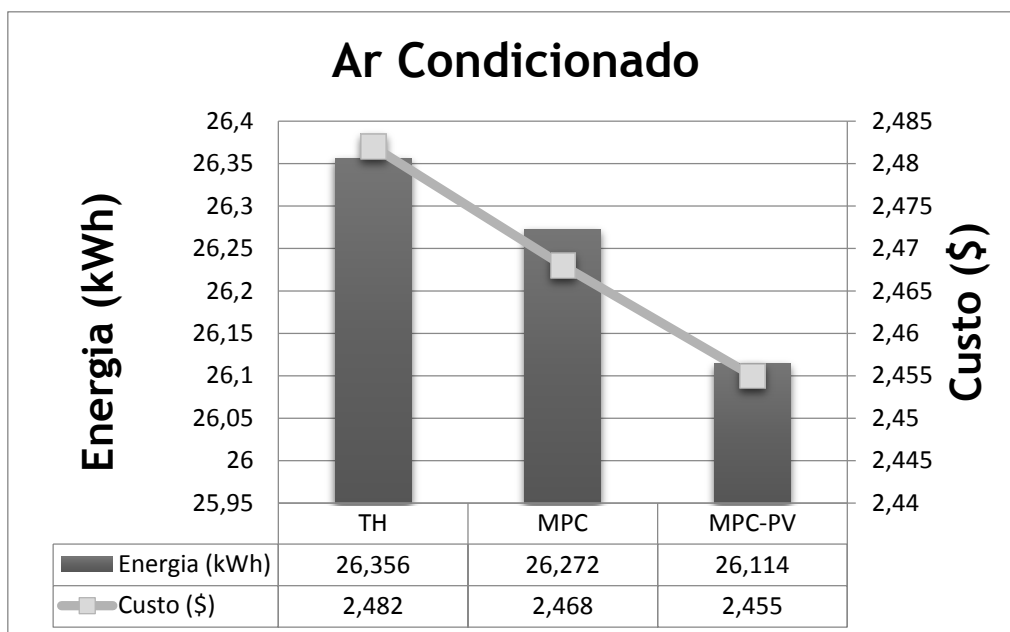


Figura 4.34 AC: Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo.

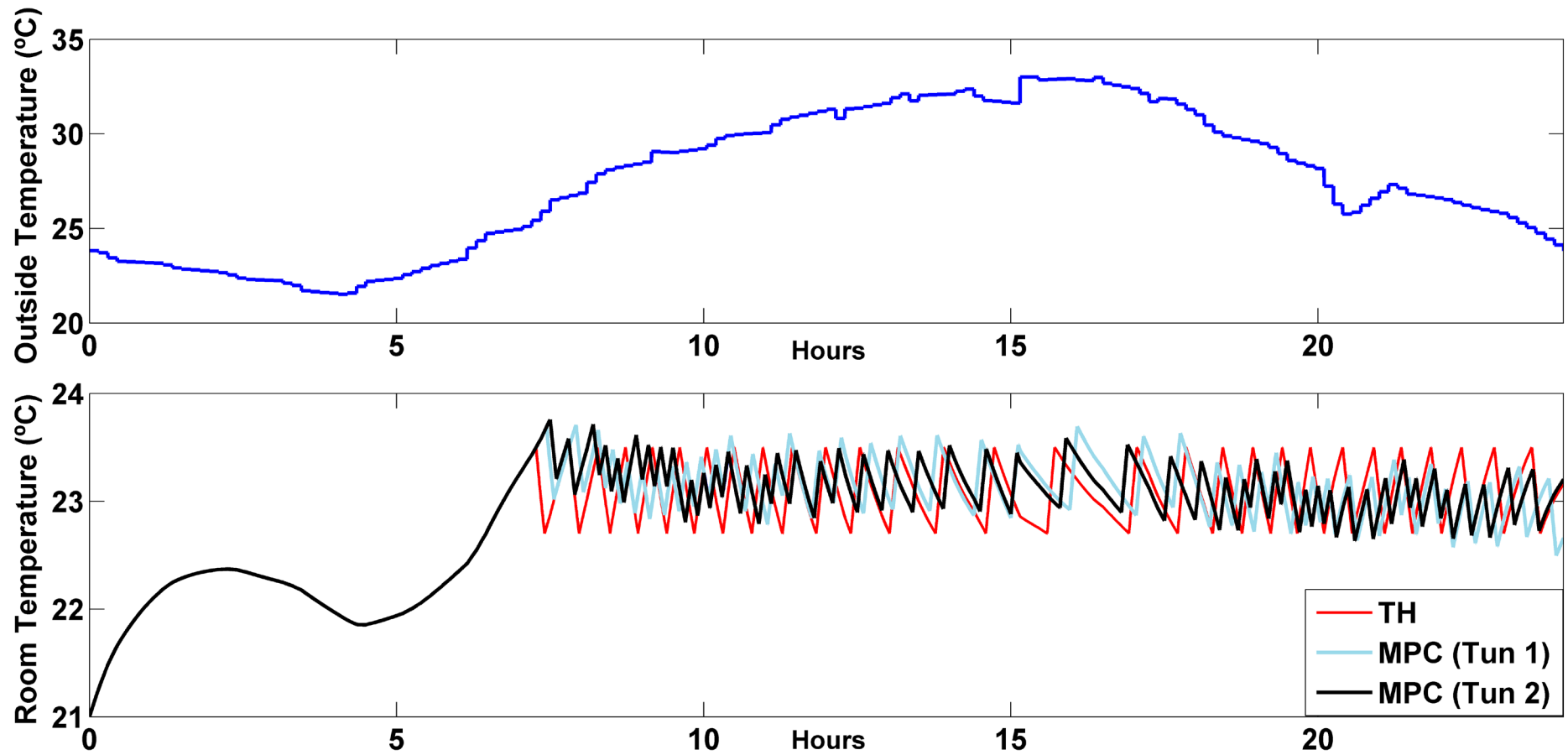


Figura 4.35 Ar condicionado controlado por três tipos de controle.

4.3.2. Termoacumulador

Em relação ao termoacumulador (figura 4.37), como foi através deste que se conseguiu uma maior redução dos custos através do MPC sem variação de pesos (*MPC Tun 1*). Assim para se reduzir novamente os custos tem de se jogar com os pesos de forma a reduzir o consumo nas horas de ponta e cheias.

Para tal, ω^y assume valores altos nas horas de vazio e baixos nas horas de cheias e de ponta, já ω^u assume valores baixos nas horas de vazio e altos nas horas de cheias e de ponta. O resultado final, em termos de valores, é observado na figura 4.36. Onde é trivialmente deduzido que esta alteração trouxe benefícios ao nível tanto do consumo de eletricidade como ao nível da redução de custos.

As cores de cada tipo de controlo são as mesmas que foram definidas anteriormente, com a diferença que neste caso o distúrbio marcado a azul representa o consumo da água ao longo do dia. Como se vê na figura 4.37, entre as 0h e as 7h, o *MPC Tun 2* (pesos variáveis) sempre forçou o sistema a ligar mais cedo pois nesta altura, como referido, o valor de ω^y situa-se perto da unidade.

Já entre as 7h e as 11h existiu uma drástica redução em relação à referência, resultado dos baixos valores tomados por ω^y . Contudo, esta diferença, em termos gerais, mal é representativa pois a temperatura média nestas horas baixou cerca de 1,5°C diferença que à partida é pouco notória em relação a uma água a 55°C.

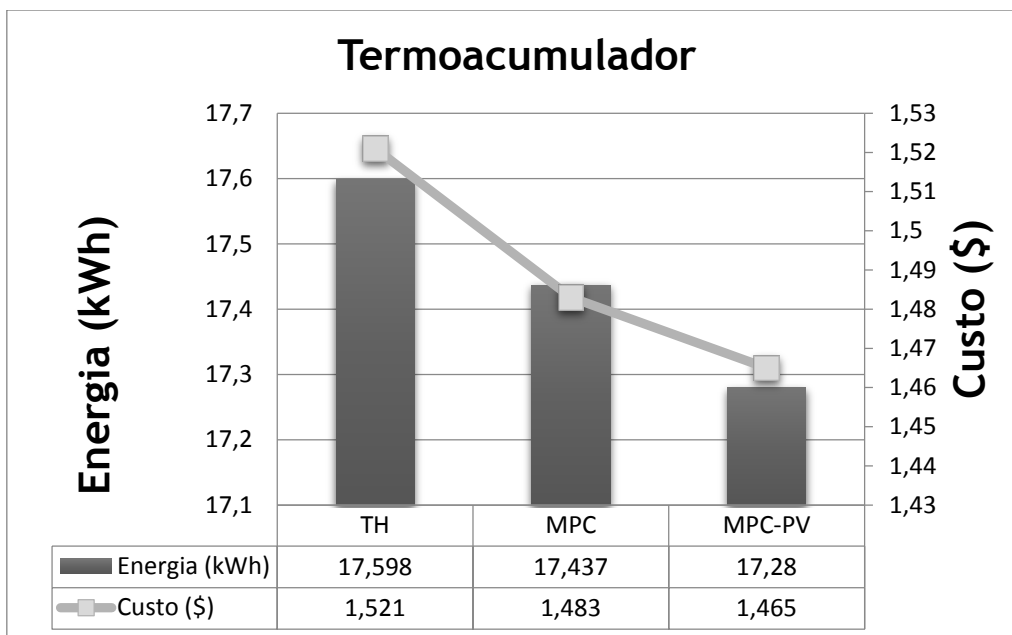


Figura 4.36 WH: Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo.

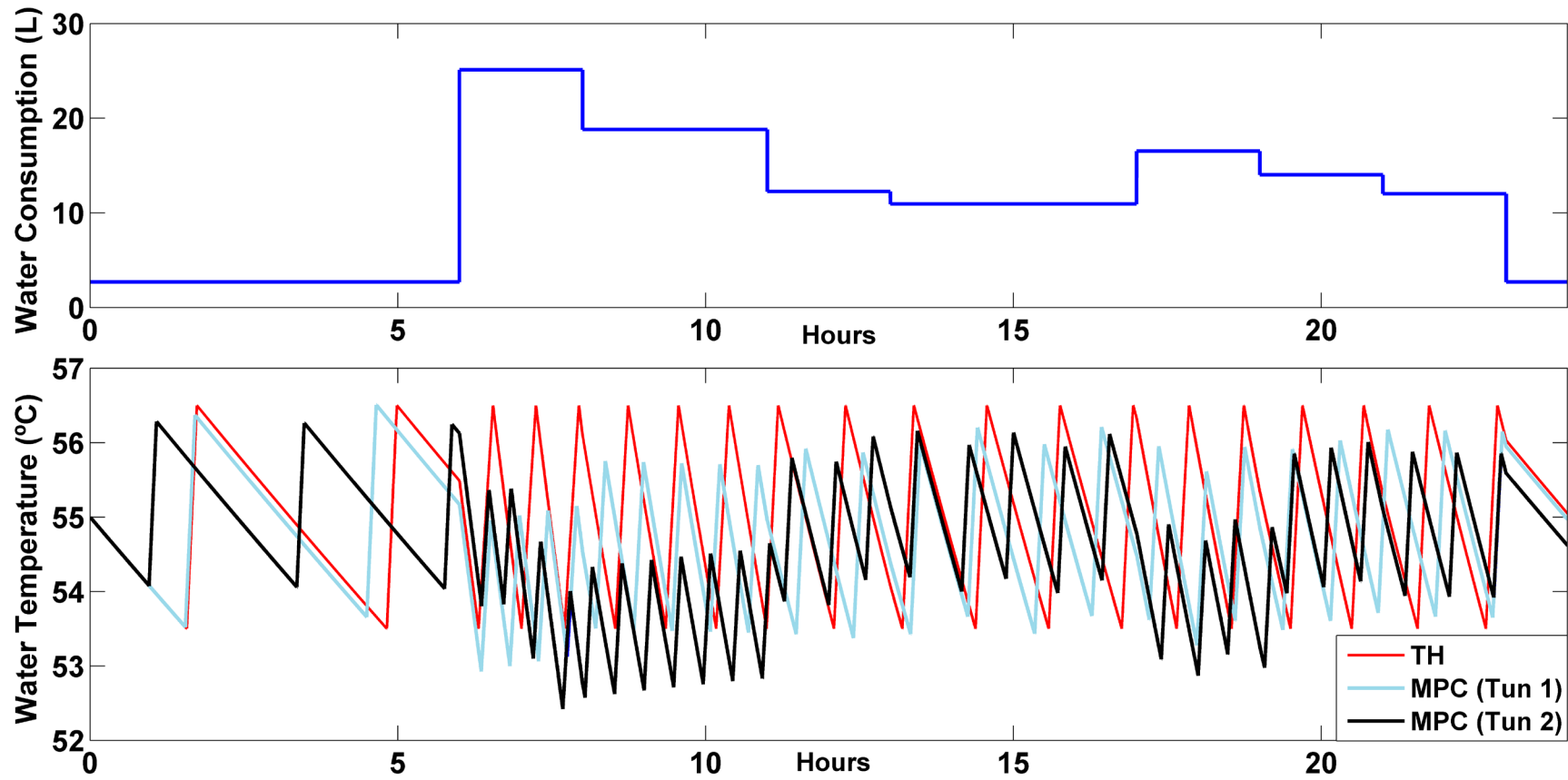


Figura 4.37 Termoacumulador controlado por três tipos de controle.

4.3.3. Frigorífico

Como já analisado anteriormente, devido ao fato de existirem poucas perturbações no sistema do frigorífico, não é esperado que com a introdução dos pesos exista algum tipo de vantagem.

Para confirmar essa premissa, é observável através da figura 4.39, as diferenças entre o MPC sem variação de pesos (*MPC Tun 1*) e o controlo feito pelo MPC com variação de pesos (*MPC Tun 2*) que, durante as primeiras 12 horas do dia, quase nem existem pois estes quase que se sobrepõem, existindo posteriormente uma diferença maior nas últimas 12 horas do dia.

Contudo, através deste novo controlo, o pico máximo atingido pelo MPC foi reduzido, apesar de não ser algo significativo, este foi reduzido. Para que existisse uma boa redução, como visto anteriormente, reduzir o *sample time* seria uma boa solução.

As cores de cada tipo de controlo são as mesmas que foram definidas anteriormente, com a diferença que neste caso os distúrbios estão localizados dentro das colunas cinza.

Contudo, observa-se através da figura 4.38 que esta diferença é mínima, pois ao nível do consumo, esse mantém-se igual, mas ao nível do custo, apesar de aumentar, é algo que acontece nas centenas da unidade, sendo este valor quase insignificante.

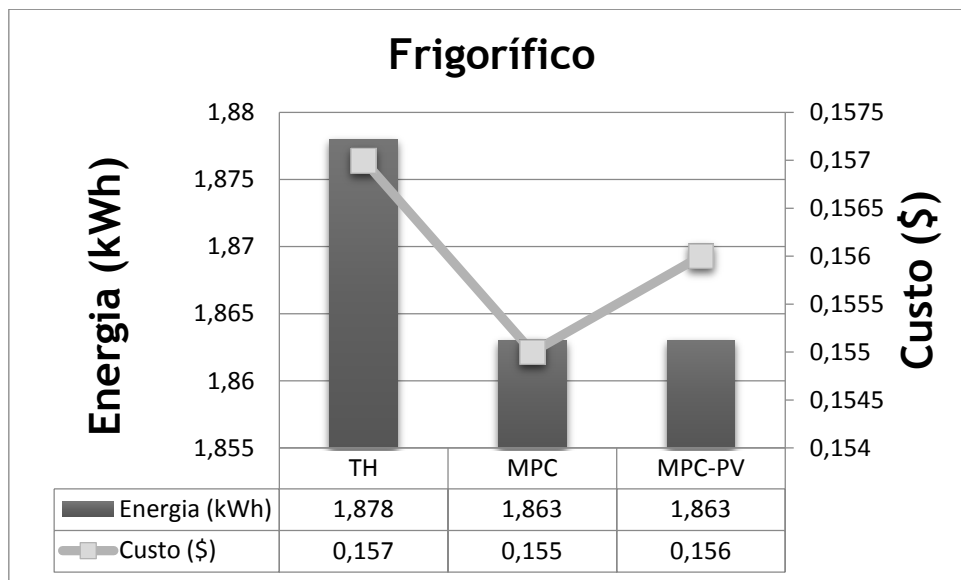


Figura 4.38 RF: Comparação do consumo e do custo para os diferentes tipos de controlo.

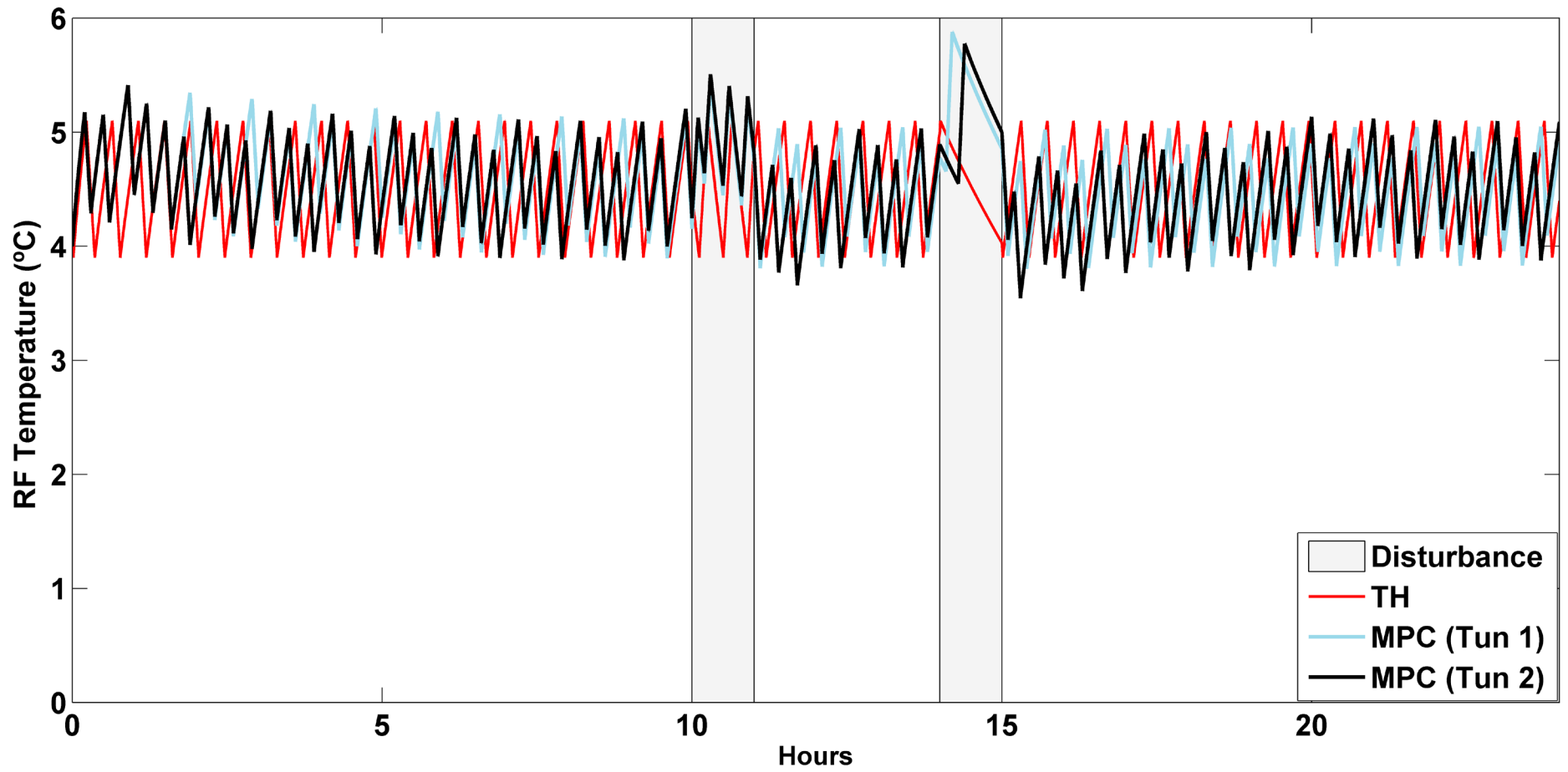


Figura 4.39 Frigorífico controlado por três tipos de controle.

4.4. Introdução da Geração Local

A introdução de geração local de energia, em concreto com painéis fotovoltaicos é considerada nesta subsecção. Este tipo de sistema aqui estudado tem por base o modelo utilizado em [36], este modelo não foi introduzido no sistema, mas serve de análise para se analisar os efeitos deste.

Para este sistema foram considerados painéis com uma potência de 0,55 kW e a sua curva de potência em função das horas do dia é mostrada na figura 4.40. Estando os valores discriminados desta na tabela 4.4.

Através da análise destes conclui-se que as horas onde existe uma maior conversão de energia, situa-se nas horas de ponta. Sendo isto uma clara vantagem perante as cargas que consomem energia nestas horas do dia. Pois apesar de estar a ser gerada pouca energia, esta pode ser instantaneamente consumida pelas cargas da habitação, não tendo assim de requer esta energia da rede.

Tabela 4.4 Produção de energia.

Poupanças	Geração Local	
	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	0,159	0,010
Horas de cheias	0,909	0,084
Horas de ponta	2,647	0,286
Total	3,715	0,380

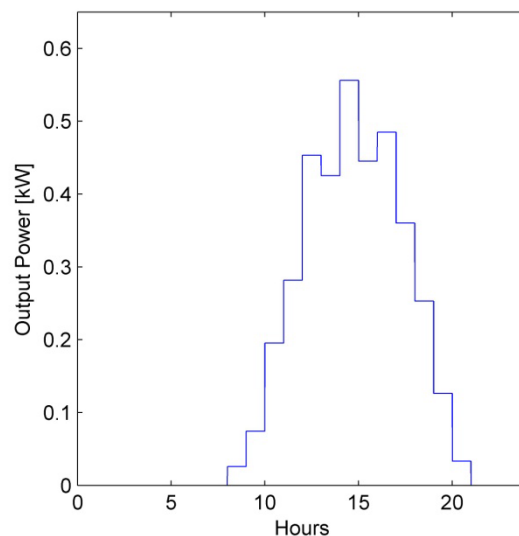


Figura 4.40 Curva de potência dos painéis fotovoltaicos.

4.5. Gestão da Procura

Como definido nos objetivos, nesta subseção é estudado a gestão da procura, sendo esta apenas uma avaliação superficial do que pode ser feito sobre este tema. Para se estudar os efeitos de gestão da procura, são consideradas apenas como cargas a máquina de lavar roupa, loiça, de secar roupa e ainda a bomba da piscina. Pois como referido anteriormente estas têm a vantagem de poderem ser ligadas a qualquer hora do dia.

Na figura 4.41, é representada uma simulação em ambiente *Matlab* de um possível cenário existente numa casa. As cargas são todas ligadas durante uma hora exceto a bomba da piscina que tem neste caso um funcionamento contínuo de 5 horas. Ao serem integrados os consumos consegue-se assim traçar a curva azul que corresponde à energia consumida.

Na tabela 4.5 é então assim detalhado as horas em que estes consumos acontecem, para assim se conseguir analisar e procurar melhorias.

Tabela 4.5 Consumo típico residencial.

Consumo	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	0,500	0,031
Horas de cheias	4,833	0,445
Horas de ponta	2,500	0,270
Total	7,833	0,746

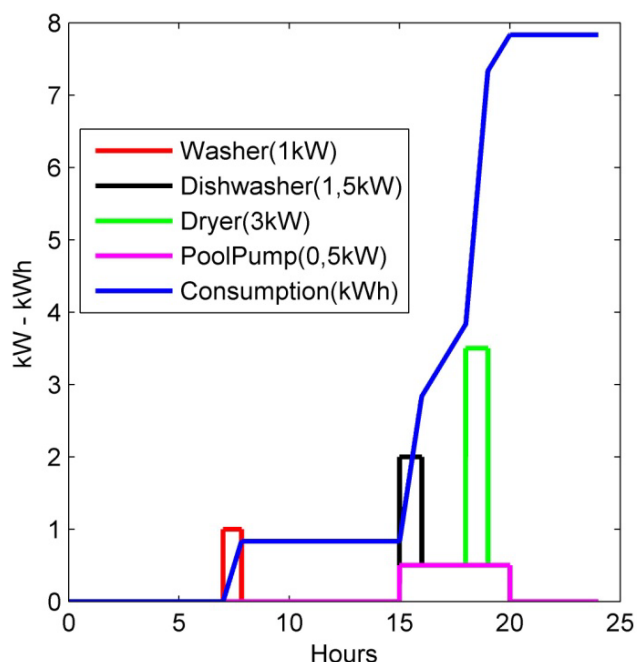


Figura 4.41 Cenário típico do consumo residencial.

Através da tabela 4.5 podemos ver que grande parte do consumo é feito nas horas de cheias e de ponta, o que inevitavelmente leva a custos maiores. Assim ao serem deslocadas as cargas destas horas para as horas de vazio podemos ter o caso ilustrado na figura 4.42 onde é trivial de observar que as cargas foram deslocadas todas para as horas de vazio, confirmando esta informação a tabela 4.6. Assim apesar da energia consumida ser a mesma, o custo desta foi reduzida em cerca de 35%.

Em muitas habitações hoje em dia esta técnica de deslocar as cargas (*Load Shifting*) já é feita por aparelhos programáveis tanto na bomba da piscina que pode ligar e desligar várias vezes, como nas máquinas de lavar e secar, pois deslocar as cargas para estas horas implica uma boa redução dos custos finais e ajuda ao mesmo tempo a diminuir o *stress* na rede nas horas de ponta e cheias.

O grande objetivo deste tipo de gestão da procura, é que exista uma interação entre todos estes aparelhos e que eles automaticamente se possam ligar e desligar.

Tabela 4.6 Possível consumo residencial.

Consumo	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	7,833	0,486
Horas de cheias	0	0
Horas de ponta	0	0
Total	7,833	0,486

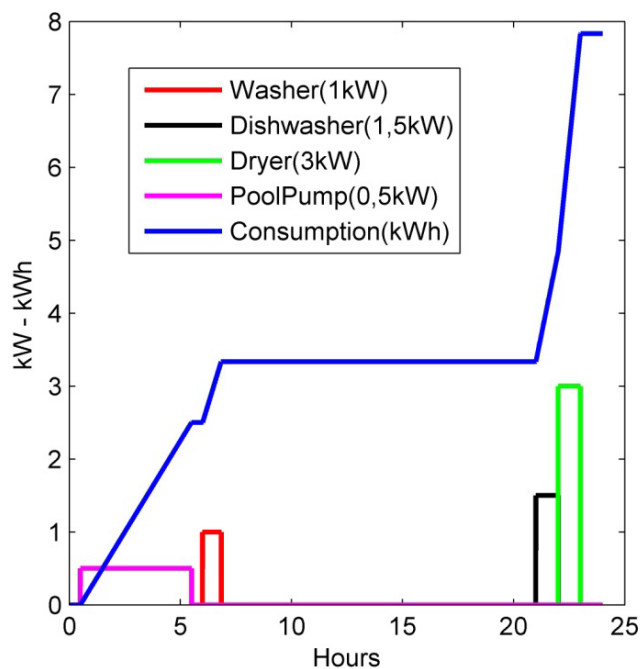


Figura 4.42 Possível cenário de implementação residencial.

4.6. Previsão de Cenários para o Setor Residencial

Seguindo a premissa da subsecção anterior, as horas onde se aconselham a ligar estas cargas é então de acordo com o modelo subjacente, entre as 19 horas e as 6 horas do dia seguinte. Então é simulado em *Matlab* um outro programa para se perceber os efeitos ao nível do consumo e do *stress* na rede.

Para tal efeito o programa calcula múltiplos cenários de implementação em várias habitações simultaneamente, onde existem as seguintes restrições:

- Em todos os cenários as habitações têm de ligar todos os equipamentos durante este período;
- As cargas têm todas a duração de uma hora, não sendo estas repetidas na mesma casa;
- A variação do consumo ao longo deste período tem de ser o menor possível para evitar flutuações e assim o pedido à rede é relativamente constante, reduzindo assim também o *stress* em algumas horas.

Para uma implementação num prédio com oito habitações, são simulados 100 mil casos possíveis, onde o resultado é apresentado na figura 4.43. Através da análise dos vários cenários, é retribuído pelo programa, aquele que tem um desvio padrão menor, neste caso 0,537. Logo nas primeiras horas se vê o efeito da programação pois às 20 e às 21 horas o consumo é o mesmo, estando uma das habitações a utilizar a máquina de secar roupa às 20h e às 21h estão duas habitações a utilizar a máquina de lavar loiça.

Para tornar o desvio padrão ainda menor e para se acrescentar mais uma carga, é considerada a bomba da piscina. Pois esta tem a grande vantagem de se poder alocar num sítio para tentar manter constante as várias cargas, sendo isto possível devido à sua fácil tarefa e baixa potência nominal.

Assim para o mesmo de numero de simulações (100 mil) e para o mesmo número de oito habitações é acrescentada a bomba da piscina, que é mostrado na figura 4.44. Para este caso o desvio padrão é de 0,597 onde apesar de ser maior, se pode observar na figura que em parte teve os efeitos desejados, pois a bomba da piscina foi ligada às 22h, 1h e 2h aumentando assim o consumo nestas horas e ajudando a equilibrar a média. O único ponto que poderia ser otimizado seria às 4h pois o consumo máximo está a ser incrementado, o que não é desejável de todo.

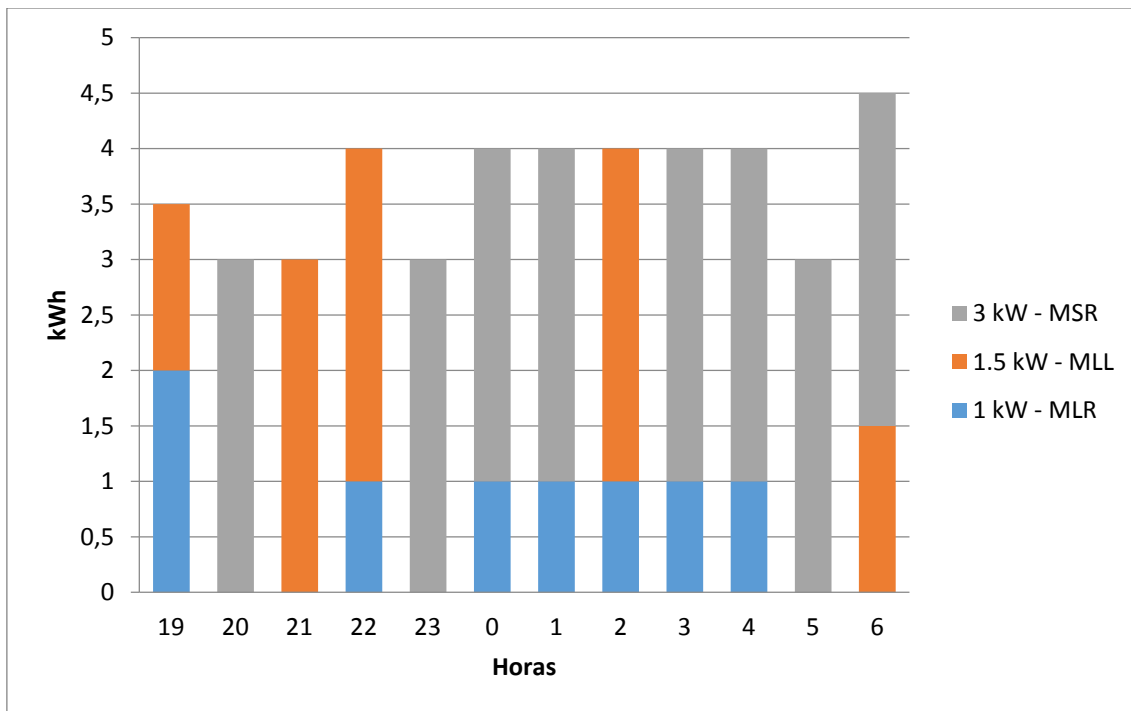


Figura 4.43 Cenário 1: Distribuição do consumo 8 habitações.

Para serem testados os efeitos numa escala maior, a figura 4.45 apresenta os resultados obtidos para uma simulação de 100 mil casos mas para 20 habitações.

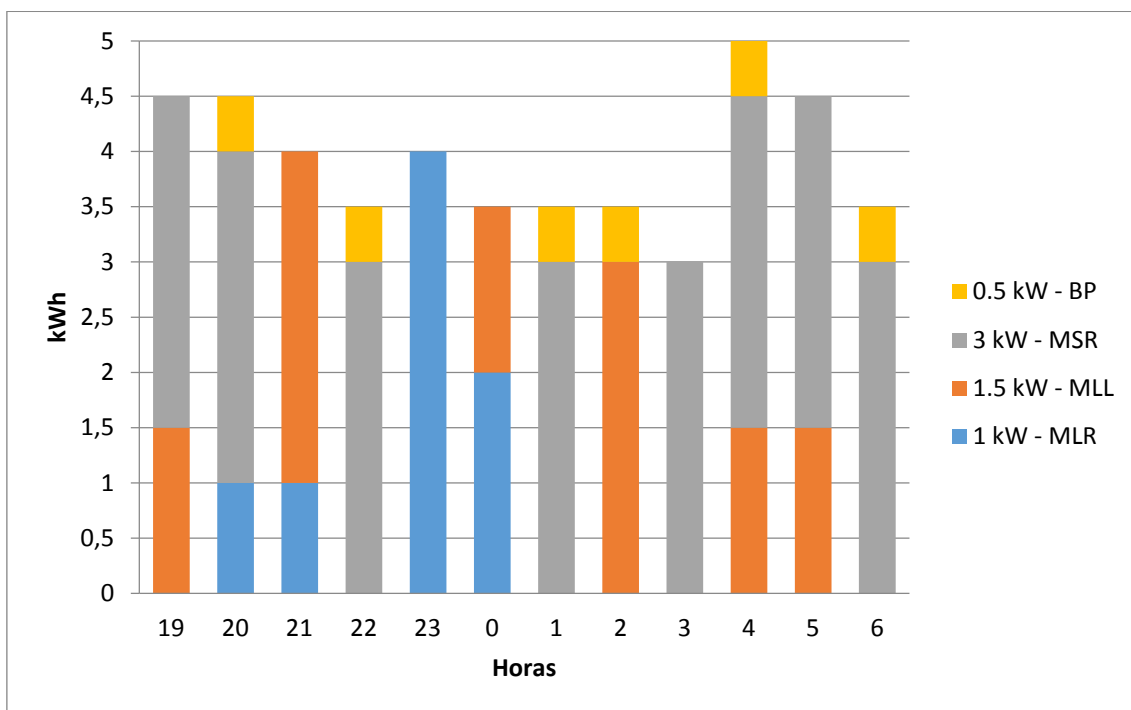


Figura 4.44 Cenário 2: Distribuição do consumo 8 habitações com BP.

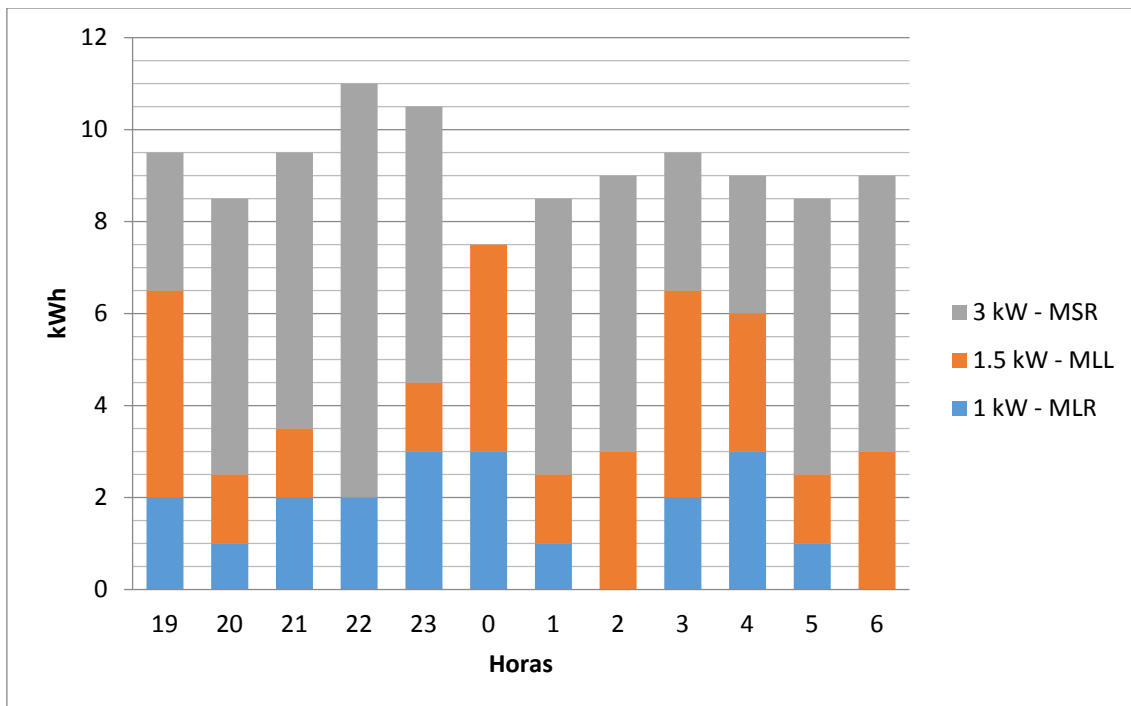


Figura 4.45 Cenário 3: Distribuição do consumo 20 habitações.

Para este caso de 20 habitações o desvio padrão corresponde ao valor 0,916, que é superior ao anterior, pois para esta situação existem mais habitações e o número de possibilidades aumentou, daí que o desvio tenha aumentado. Na figura 4.46 é novamente introduzida a bomba da piscina.

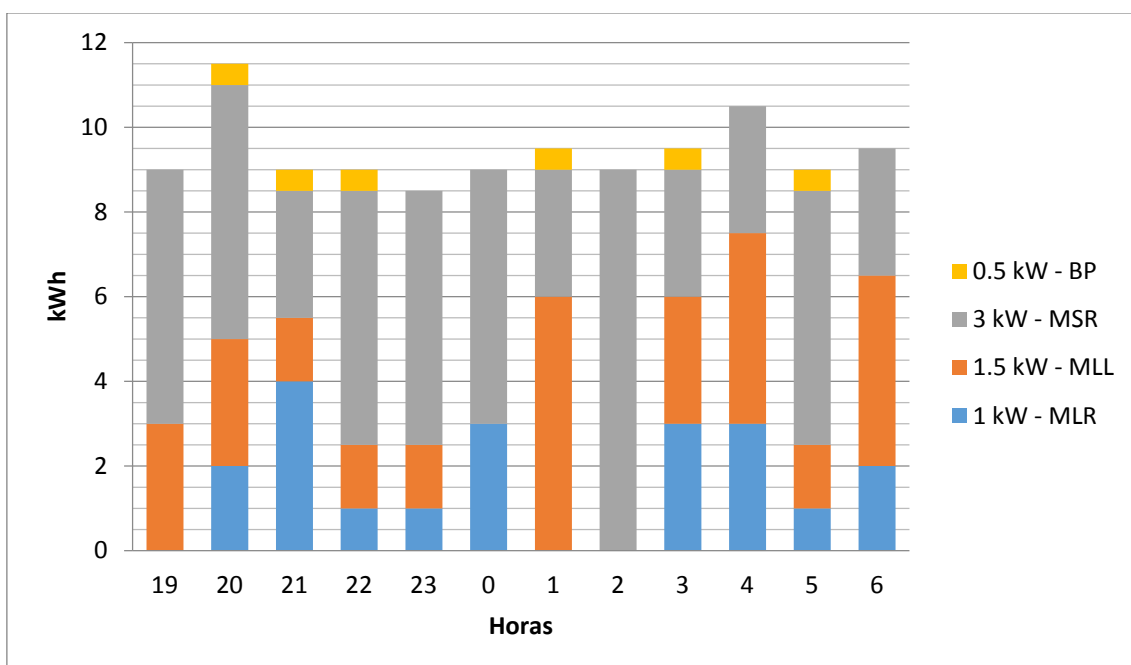


Figura 4.46 Cenário 4: Distribuição do consumo 20 habitações com BP.

Na figura 4.46 ao ser introduzida a bomba da piscina o desvio padrão baixou para 0,821, evidencia-se o fato de que a bomba ajuda a equilibrar o consumo, tornando-o mais constante, excetuando novamente o caso em que esta se alocou novamente na hora de maior consumo.

Contudo este decréscimo também pode ser explicado pelo fato de que o número de simulações foi incrementado para 150 mil, sendo ainda pouco pois o desvio padrão ainda se encontra elevado face aos resultados obtidos para as 8 habitações.

Nas tabelas do anexo C, estão detalhadas as horas a que cada carga liga e a sua casa correspondente, a bomba da piscina assume-se que é comum ao lote de habitações.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

A técnica de controlo preditivo por si só como analisado, consegue reduzir uma certa percentagem do consumo elétrico, e assim reduzir os custos. O que à partida se torna benéfico, mas com o aprofundar dos conhecimentos foi possível jogar com aspetos que de alguma forma ajudam na performance do *MPC*.

Um desses aspetos aprofundados foi a variação dos pesos, pois ao serem analisados os diferentes comportamentos destes para os seus vários valores, foi possível perceber o seu grande impacto. Assim como o tempo de amostragem, pois é através deste que o sistema recolhe as amostras e toma as decisões.

Sabendo isto dar importância a certas horas do dia, e menos a outras, faz com que o *MPC* se torne uma ferramenta ainda mais dinâmica na otimização. Acoplado a isto, uma possível introdução de equipamentos para geração local leva ainda a que a redução seja mais acentuada.

Por fim é concebível afirmar que a aplicação do *MPC* é há partida algo rentável, se bem que os seus requisitos a nível computacional são muito elevados, daí que as aplicações deste, por agora sejam feitas ainda só em larga escala na indústria química. Pois para o nível residencial o *MPC* ainda só é parcialmente simulando computacionalmente, pois ao nível de implementação real este requer muita capacidade computacional, contudo quando este é aplicado neste setor, tem de existir sempre um auxílio computacional elevado, algo inviável de implementação em todas as residências.

5.2. Contribuições

Seguindo a linha de raciocínio estruturada na tese, temos as seguintes contribuições resultantes desta dissertação:

- Implementação do *MPC* em cargas residências, tendo por base num simulador computacional feito em Matlab/Simulink, para que fosse possível ver as melhorias que este poderia trazer, tendo como premissa a sua crescente fama de desempenho e versatilidade a vários campos de aplicação.

- Ao serem aprofundados os conhecimentos sobre esta técnica, foi possível variar duas variáveis importantes (pesos e *sample time*), que posteriormente levaram a nova aquisição do saber.
- Após a nova descoberta, esta como não podia deixar de ser foi implementada (variação dos pesos), levando assim as simulações novamente a resultados satisfatórios.
- Apesar de ter sido pouco abordada a introdução de geração local, esta foi introduzida no sistema para se observarem os possíveis benefícios desta.
- Por fim, ao serem analisados as várias cargas independentes que as pessoas dispõem em suas habitações, foi possível criar um modelo matemático de previsão, de possíveis cenários de aplicação residencial. Levando esta implementação aos benefícios já mencionados.

5.3. Trabalhos Futuros

Com base na investigação desenvolvida nesta dissertação, as seguintes ideias e sugestões podem tornar-se diretrizes para trabalhos futuros:

- Introdução de mais perturbações nos sistemas, para que estes se assemelhem mais com a realidade, como por exemplo a introdução de mais perturbações de abrir e fechar a porta do frigorífico, variar a temperatura da água que entra no termoacumulador, etc..
- Aumentar o tempo das simulações para lá das 24 horas, para se poder estudar o comportamento do MPC perante estímulos já ocorridos no passado.
- Acoplar os modelos do ar condicionado do termoacumulador e do frigorífico e simulá-los simultaneamente.
- Variar a função de custo, isto é, mudar a função objetivo para se analisar a sua implicação no resultado final.

- Variar ao longo do dia para além dos pesos, também o valor do *sample time*, para que se possa chegar a uma razão entre os dois. O que poderá futuramente a que estes se auto implementem.
- Aumentar a gama de valores da referência de cada sistema, para assim se poder estudar a influência também da referência no que toca aos consumos e custos associados.
- Associar ao sistema mais um MPC que modele a geração local juntamente com uma bateria.
- Simular a técnica de preços em tempo real para se obterem resultados comparativos.
- Adicionar ao modelo as previsões meteorológicas e previsões de ocupação, para que exista uma interação entre as previsões, pesos e tempo de amostragem.

5.4. Trabalhos Resultantes desta Dissertação

D. Oliveira, E.M.G. Rodrigues, T.D.P. Mendes, J.P.S. Catalão, E. Pouresmaeil, "Model predictive control technique for energy optimization in residential appliances", in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering – SEGE'15*, Oshawa, Canada, August 17-19, 2015 (aceite).

David Oliveira, Eduardo M.G. Rodrigues, R. Godina, Tiago D.P. Mendes, João P.S. Catalão, E. Pouresmaeil, "MPC Weights Tuning Role on the Energy Optimization in Residential Appliances", in: *Proceedings of the IEEE International Australasian Universities Conference on Power Engineering Conference – AUPEC'15*, Australia, September 27-30, 2015 (submetido).

Bibliografia

- [1] A. Molderink, V. Bakker, M. G. Bosman e G. J. M. S. Johann L. Hurink, “On the effects of MPC on a domestic energy efficiency optimization methodology,” em *IEEE International Energy Conference*, 2010 .
- [2] Direção Geral da Energia e Geologia, Junho 2014. [Online]. Disponível: http://www.apren.pt/fotos/newsletter/conteudos/renovaveis__estatisticas_rapidas_agosto_2014_1415200776.pdf. [Acedido em 20 4 2015].
- [3] United Nations Environment Programme, “The Emissions Gap Report,” 2014. [Online]. Disponível: http://issuu.com/unep/docs/the_emissions_gap_report_2014?e=1015067/10215862. [Acedido em 17 3 2015].
- [4] McKinsey & Company, March 2010. [Online]. Disponível: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/Sustainability/PDFs/A_Compelling_Global_Resource.ashx. [Acedido em 15 4 2015].
- [5] McKinsey & Company, April 2009. [Online]. Disponível: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/client_service/Sustainability/PDFs/Energy_competitive_advantage_in_Germany.ashx. [Acedido em 16 4 2015].
- [6] European Solar Thermal Technology Platform, “Solar Heating and Cooling for a Sustainable Energy Future in Europe,” Brussels, 2009. Disponível: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/downloads/ESTTP_SRA_Revised_Version.pdf
- [7] Y. Ma, F. Borrelli, B. Hancey, B. Coffey, S. Benghea e P. Haves, “Model Predictive Control for the Operation of Building Cooling Systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology* , vol. 20, pp. 796-803, 2012.
- [8] International Energy Agency, “Tracking Clean Energy Progress 2014,” 2014. [Online]. Disponível:http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking_clean_energy_progress_2014.pdf. [Acedido em 20 12 2014].
- [9] International Energy Agency, “Modernising Building Energy Codes,” 2013. [Online]. Disponível. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/PolicyPathwaysModernisingBuildingEnergyCodes.pdf> [Acedido em 2 3 2015].

- [10] P. Bertoldi, B. Hirl e N. Labanca, 2012. [Online]. Disponível: <http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/energy-efficiency-status-report-2012.pdf>. [Acedido em 15 2 2015].
- [11] International Energy Agency, “25 Energy Efficiency Policy Recommendations,” 2011. [Online]. Disponível: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/25recom_2011.pdf [Acedido em 2 3 2015].
- [12] T. Logenthiran, D. Srinivasan e T. Z. Shun, “Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1244-1252, 2012.
- [13] Y. Zong, L. Mihet-Popa, D. Kullmann, A. Thavlov, O. Gehrke e H. W. Bindner, “Model Predictive Controller for Active Demand Side Management with PV Self-consumption in an Intelligent Building,” em *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Berlin, 2012.
- [14] Y.-G. XI, D.-W. LI e S. LIN, “Model Predictive Control - Status and Challenges,” *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, pp. 222-236, 2013.
- [15] J. Rawling e D. Mayne, *Model Predictive Control : Theory and Design*, Nob Hill Publishing, 2013.
- [16] J. Drgoňa e M. K. vasnica, “Comparison of MPC Strategies for Building Control,” em *International Conference on Process Control*, Slovakia, 2013.
- [17] K. Long e Z. Yang, “Model Predictive Control for Household Energy Management based on Individual Habit,” em *25th Chinese Control and Decision Conference*, 2013.
- [18] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones e M. Morari, “Energy Efficient Building Climate Control using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions,” em *American Control Conference*, Baltimore, 2010.
- [19] A. Afram e F. Janabi-Sharifi, “Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC),” *Building and Environment*, vol. 72, pp. 343-355, 2014.
- [20] M. Morari e J. H. Lee, “Model predictive control: past, present and future,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 23, pp. 667-682, 1999.
- [21] C. Chen, J. Wang, Y. Heo e S. Kishore, “MPC - Based Appliance Scheduling for Residential Building Energy Management Controller,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1401-1410, 2013.
- [22] J. A. Candanedo e A. K. Athienitis, “Predictive control of radiant floor heating and solar-source heat pump operation in a solar house,” *HVAC&R Research*, pp. 235-256, 2011.

- [23] W. J. Cole, T. F. Edgar e A. Novoselac, "Use of model predictive control to enhance the flexibility of thermal energy storage cooling systems," em *American Control Conference*, Canada, 2012.
- [24] G. Pattarello (2013). Model Predictive Control of HVAC Systems: Design and Implementation on a Real Case Study. Dissertação de Mestrado. Universtità Degli Studi Di Padova. <http://tesi.cab.unipd.it/43642/1/main.pdf> [5 de Julho de 2014]
- [25] M. Avci (2013). Demand Response-Enabled Model Predictive HVAC Load Control in Buildings using Real-Time Electricity Pricing. Tese de Doutorado em Engenharia Industrial. University of Miami. http://scholarlyrepository.miami.edu/oa_dissertations/1056/ [8 de Julho de 2014]
- [26] J. Ma, S. J. Qin e T. Salsbury, "Model predictive control of building energy systems with balanced model reduction," em *American Control Conference*, Canada, 2012.
- [27] M. Vašak, A. Starčić e A. Martinčević, "Model predictive control of heating and cooling in a family house," em *Proceedings of the 34th International Convention, MIPRO*, 2011.
- [28] G. Mantovani e L. Ferrarini, "Temperature Control of a Commercial Building With Model Predictive Control Techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 2651-2660, 2015.
- [29] A. Bemporad, "Model Predictive Control Design: New Trends and Tools," em *IEEE Conference on Decision & Control*, San Diego,USA, 2006.
- [30] K.-H. Ng e G. B. Sheblé, "Direct Load Control - A Profit-Based Load Management Using Linear Programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, pp. 688-695, 1988.
- [31] A. I. Cohen e C. C. Wang, "An Optimization for Load Management Scheduling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, p. 612618, 1988.
- [32] S. H. Lee e C. L. Wilkins, "A Pratical Approach to Appliance Load Contol Analysis: A Water Heater Case Study," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, pp. 1007-1013, 1983.
- [33] G. Papagiannis, A. Dagoumas, N. Lettas e P. Dokopoulos, "Economic and environmental impacts from the implementation of an intelligent demand side management system at the European level," *Energy Policy*, vol. 36, pp. 163-180, 2008.
- [34] G. Strbac, "Demand side management: Benefits and challenges," *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4419-4426, 2008.
- [35] Z. N. Popovic e D. S. Popovic, "Direct Load Control as a Market-Based Program in Deregulated Power Industries," em *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Italy, 2013.

- [36] E. Pouresmaeil, J. M. Gonzalez, C. A. Canizares e K. Bhattacharya, "Development of a Smart Residential Load Simulator for Energy Management in Smart Grids," *IEEE Transactions on Power System* .
- [37] Y. A. Cengel, Heat Transfer - A practical Approach, McGraw-Hill, 2003.
- [38] A. Molina, A. Gabeldon, J. Fuentes e C. Alvarez, "Implementation and assessment of physically based electrical load models: application to direct load control residential programmes," *IEE Proc-Gener. Transm. Distrib*, vol. 150, 2003.
- [39] R. J. Gran, Numerical Computing with Simulink, SIAM, 2007.
- [40] L. L. K. Elamari e R. Tonkoski, "Using electric water heaters (EWHs) for power balancing and frequency control in PV-Diesel Hybrid, mini-grids," em *Proc. World Renewable Energy Energy Congress*, Sweden, 2011.
- [41] C. Pakula e R. Stamminger, "Electricity and water consumption for laundry washing by washing machine worldwide," *J. Energy Efficiency* , vol. 3, pp. 365-382, 2010.
- [42] M. Eastment e R. Hendron, "Method for Evaluating Energy Use of Dishwashers, Clothes Washers, and Clothes Dryers," em *National Renewable Energy Laboratory*, 2006.
- [43] C. J. Hanley, G. H. Peek e J. D. Boyes, "Solar Energy Grid Integration Systems - Energy Storage," Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2008.
- [44] A. M. Pavan e V. Lughi, "Photovoltaics in Italy: toward grid parity in the residential electricity market," em *24th International Conference on Microelectronics*, 2012.
- [45] J. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, 2002.
- [46] J. A. Rossiter, Model-Based Predictive Control: A Practical Approach, CRC Press, 2003.
- [47] E. F. Camacho e C. Bordons, Model Predictive Control, Springer, 2007.
- [48] L. Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, Springer, 2009.
- [49] A. Bemporad, M. Morari e N. L. Ricker, *Model Predictive Control Toolbox™ User's Guide*, The MathWorks, Inc., 2014.
- [50] A. Bemporad, M. Morari e N. L. Ricker, *Model Predictive Control Toolbox™ Getting Started Guide*, The MathWorks, Inc., 2014.
- [51] C. E. Garcia, D. M. Prett e M. Morari, "Model Predictive Control: Theory and Practice - a Survey," *Automatica*, vol. 25, pp. 335-348, 1989.
- [52] C. Schmid e L. Biegler, "Quadratic programming methods for reduced hessian SQP," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 18, pp. 817-832, 1997.

ANEXOS

A. Anexo A

Tabela A.1 Constantes para o modelo de uma divisão.

Constante Térmica	Constantes	Unidades
Cálculo do C_{in}	$C_p(ar) = 1005,4$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$\rho(ar) = 1,2250$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
	$Vol(divisao) = 32$	m^3
	$C_p(mad) = 1298$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$\rho(mad) = 1,2250$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
Cálculo do C_w	$C_p(isol) = 1005,4$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$\rho(isol) = 1,2250$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
	$Vol(parede) = 9,4$	m^3
Cálculo do R_C	$L(janela) = 0,01$	m
	$k(janela) = 0,81$	$\left(\frac{w}{m K}\right)$
	$\acute{a}rea(janela) = 1$	m^2
Cálculo do R_w	$L(parede) = 0,2$	m
	$k(parede) = 0,038$	$\left(\frac{w}{m K}\right)$
	$\acute{a}rea(parede) = 47$	m^2

Tabela A.2 Constantes para o modelo do termoacumulador.

Constante Térmica	Constantes	Unidades
Cálculo do C_w	$UA = 6837,48$	$\left(\frac{W}{m K}\right)$
	$\rho(ag) = 999,4$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
	$C_p(ag) = 1005,4$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$Vol(term) = 184$	l

Tabela A.3 Constantes para o modelo do frigorífico.

Constante Térmica	Constantes	Unidades
Cálculo do C_{in}	$C_p(ar) = 1000$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$\rho(ar) = 1,2$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
	$Vol(frig) = 1,224$	m^3
Cálculo do C_w	$C_p(isol) = 1005,4$	$\left(\frac{J}{Kg K}\right)$
	$\rho(isol) = 50$	$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
	$Vol(parede) = 0,42$	m^3
Cálculo do R_w	$L(parede) = 0,1$	m
	$k(janela) = 0,0249$	$\left(\frac{W}{m K}\right)$
	$\acute{a}rea(parede) = 6,88$	m^2

B. Anexo B

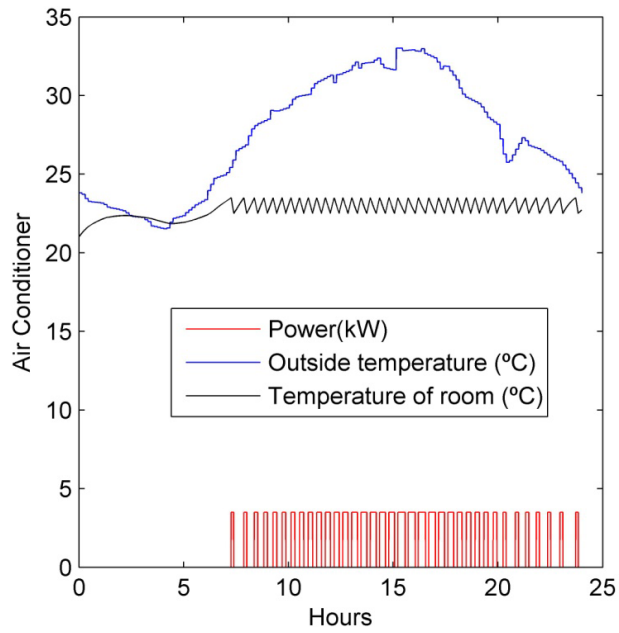


Figura B.1 Ar condicionado controlado com termóstato(3,5kW).

Tabela B.1 Ar condicionado: consumo de energia vs. método de controlo.

AC-3,5kW	Termóstato		MPC Tun 2	
	Energia (kWh)	Custo (\$)	Energia (kWh)	Custo (\$)
Horas de vazio	5,029	0,312	5,029	0,312
Horas de cheias	8,571	0,789	8,511	0,783
Horas de ponta	13,307	1,437	12,767	1,379
Total	26,907	2,538	26,307	2,474

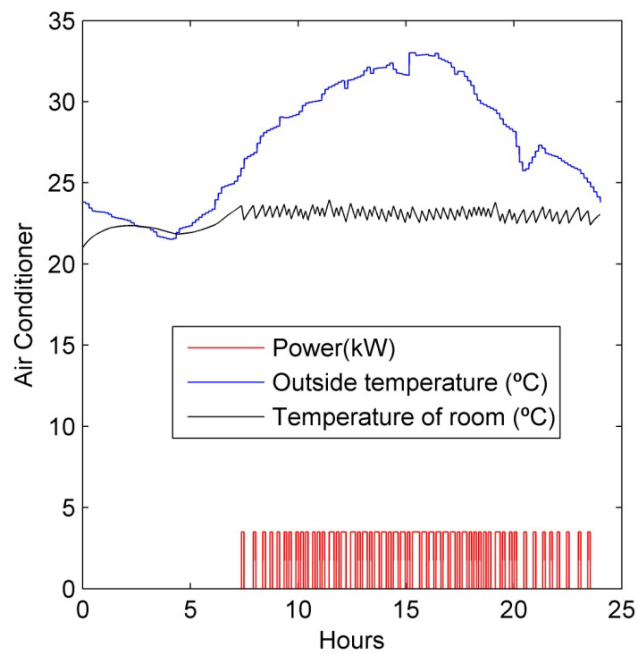


Figura B.2 Ar condicionado controlado com o MPC(3,5kW).

C. Anexo C

Tabela C.1 Distribuição do consumo para 8 habitações.

Casa 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	MLR
Casa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa1	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MLL
Casa2	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa3	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa4	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa5	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa6	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa7	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	
Casa1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	MSR
Casa2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
Casa3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Casa5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
Casa6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa7	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	
Casa8	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
100k Cenário	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	Horas

Tabela C.2 Distribuição do consumo para 8 habitações mais BP.

Casa 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MLR
Casa 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa1	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MLL
Casa2	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa3	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	
Casa4	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa5	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa7	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa8	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MSR
Casa2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
Casa4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
Casa6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
Casa7	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Casa8	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
100k Cenário	19	20	21	22	23	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	BP
	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	Horas

Tabela C.3 Distribuição do consumo para 20 habitações.

Casa 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	MLR
Casa 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Casa 13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Casa 14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 2	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	
Casa 3	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 5	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	
Casa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 10	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	MLL
Casa 12	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 14	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	
Casa 16	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	
Casa 17	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	
Casa 18	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa 19	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	
Casa 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Casa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
Casa 10	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa 13	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa 15	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
Casa 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
Casa 17	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
Casa 18	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 19	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
100k Cenários	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	Horas

Tabela C.4 Distribuição do consumo para 20 habitações mais bomba da piscina.

Casa 1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Casa 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Casa 11	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MLR
Casa 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
Casa 13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Casa 17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Casa 19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
Casa 1	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	
Casa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa 3	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa 6	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	
Casa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	
Casa 10	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MLL
Casa 11	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 12	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	
Casa 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	
Casa 14	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 15	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	
Casa 16	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	
Casa 17	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 18	1,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5	
Casa 1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
Casa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
Casa 3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
Casa 5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 6	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
Casa 7	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	
Casa 8	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
Casa 9	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 10	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 11	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	MSR
Casa 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa 13	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 14	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Casa 15	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	
Casa 17	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 18	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 19	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Casa 20	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	
150k	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0	BP
Cenários	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	Horas