

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Optimização Energética de Equipamentos Domésticos no Sector Residencial em Portugal através do Modelo de Controlo Preditivo

Jorge Marcelo Fernandes da Silva

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Catalão

Co-orientador: Doutor Radu Godina

14 de Julho de 2017

Resumo

Os sistemas residenciais de aquecimento são um dos principais consumidores de energia ao nível mundial. A minimização deste consumo de energia e dos seus custos exigem um funcionamento energético eficiente dos sistemas de aquecimento e uma utilização crescente das energias renováveis. A integração de fontes de energia renováveis na rede elétrica é desafiador devido à flutuação da sua geração. A utilização de armazenamento térmico para dissociar a procura de calor e o fornecimento de eletricidade proporciona a possibilidade de integrar a energia proveniente de fontes de energia renováveis e a gestão da procura.

O “design” de controladores de carga torna-se desafiador quando as previsões meteorológicas, disponibilidade de energia renovável e preço de energia são usados para controlo em malha fechada (realimentação). Espera-se que os edifícios mantenham o conforto dos ocupantes, enquanto minimizam o consumo de energia, sendo robustos à intermitência na geração de energia renovável e sensíveis aos sinais duma "smart-grid". Alcançar todos esses recursos de forma sistemática e custo-efetiva é um desafio. O desafio é ainda maior quando sistemas convencionais são substituídos por sistemas inovadores de aquecimento e arrefecimento que utilizam armazenamento ativo de energia térmica com restrições operacionais críticas.

O Modelo de Controlo Preditivo (MPC) é uma metodologia de controlo que pode sistematicamente levar em conta previsão futuras durante o estágio de projeto de controlo enquanto satisfaz as restrições de operação do sistema. Desta forma, o MPC tem sido identificado como uma das possíveis soluções a adotar em habitações residenciais e outras capazes de atingir o objetivo a que se propõe. O MPC oferece propriedades como controlo de restrições, controlo multivariável e desempenho ótimo com objetivos conflitantes. Com o desenvolvimento desta tecnologia tem-se demonstrado, em vários estudos, que a estratégia do MPC supera as estratégias convencionais de controlo.

Esta dissertação centra-se na conceção e implementação de MPC para o controlo de arrefecimento e aquecimento de espaços, aquecimento de águas e também do frigorífico. O objetivo é desenvolver uma metodologia de controlo que possa reduzir o consumo de energia dos edifícios e, ao mesmo tempo satisfazer as restrições a que é sujeito.

A solução deste problema exige maior potência computacional tornando-a inadequada para implementação em controladores incorporados, para os quais formulações simplificadas são desejáveis. Embora a formulação não convexa represente os objetivos de controlo com mais precisão, o seu desempenho depende dum modelo detalhado do sistema que limita o seu uso amplamente difundido. Além disso, um algoritmo de programação não linear que é usado para resolver este problema normalmente obtém uma solução ótima em vez duma solução global. Diversas formulações de problemas analisam a influência das simplificações sobre a qualidade do desempenho do controlador e dos custos, em relação à duas estratégias de controlo não preditivas o controlo ON / OFF e o PID.

Abstract

Residential heating systems are one of the world's leading energy consumers. Minimizing this energy consumption and its costs requires an energy-efficient operation of heating systems and a growing use of renewable energy. The integration of renewable energy sources into the grid is challenging due to the fluctuation of its generation. The use of thermal storage to decouple demand for heat and the provision of electricity provides the possibility of integrating energy from renewable energy sources and demand management. The design of load controllers becomes challenging when weather forecasts, renewable energy availability and energy prices are used for closed loop control (feedback). Buildings are expected to maintain comfort for the residents while minimizing energy consumption, being robust to the intermittent generation of renewable energy and sensitive to the signals of a smart grid. Achieving all these resources in a systematic and cost-effective way is a challenge that becomes even greater when conventional systems are replaced by innovative heating and cooling systems that utilize active thermal energy storage with critical operational restrictions. The Predictive Control Model (MPC) is a control methodology that can systematically take into account future forecasts during the control design stage while satisfying the system's operating constraints. In this way, the MPC has been identified as one of the possible solutions to be adopted in residential housing and others capable of achieving its propose. MPC offers properties such as constraint control, multi-variable control, and optimal performance for conflicting purposes. It has been demonstrated in several studies that MPC strategy outperforms conventional control strategies. This dissertation focuses on the design and implementation of MPC for the control of cooling and space heating, water heating and also the refrigerator. The objective is to develop a control methodology that can reduce the energy consumption of buildings while at the same time satisfy the constraints to which they are exposed. The solution to this problem requires more computational power making it unsuitable for implementation in embedded controllers, for which simplified formulations are desirable. Although the non-convex formulation represents control objectives more accurately, their performance depends on a detailed model of the system that limits their widespread use. In addition, a nonlinear programming algorithm that is used to solve this problem usually gets an optimal solution instead of a global solution. Several problem formulations are studied by means of simulations in order to assess the influence of simplifications on the quality of controller performance and costs in relation to two non-predictive control strategies, ON / OFF control and PID.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado uma realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha profunda gratidão ao Doutor Radu Godina, na qualidade de co-orientador, pelo seu contributo durante o decurso do trabalho, o seu encorajamento, suporte, comentários e sugestões que tanto enriqueceram este trabalho.

Ao Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão, orientador da dissertação, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Acima de tudo, obrigado por me continuar a acompanhar nesta jornada e por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela vida académica.

Não poderia deixar de agradecer à minha família por todo o apoio económico, pela força e pelo carinho que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida académica, bem como, à elaboração da presente tese a qual sem o seu apoio teria sido impossível.

A todos os amigos e colegas de trabalho que de uma forma direta ou indireta, contribuíram, ou auxiliaram na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuem para uma concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Jorge Marcelo Silva

“All we know about the new economic world tells us that nations which train engineers will prevail over those which train lawyers. No nation has ever sued its way to greatness.”

Richard Lamm

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Estrutura da Dissertação	2
1.3	Metodologia de Estudo	3
1.4	Notação	4
2	Estado da arte	5
2.1	Transição para um sistema livre de combustíveis fósseis	5
2.2	O controlo de cargas domésticas flexíveis	14
3	Formulação matemática	23
3.1	Controlador Proporcional Integral Derivativo	23
3.2	Modelo de Controlo Preditivo	26
3.2.1	Estratégia do Modelo de controlo preditivo	26
3.2.2	Predição	27
3.2.3	Otimização	28
3.2.4	Implementação do horizonte de previsão	29
3.2.5	Metodologia de restrições	30
3.2.6	Inclusão de estratégias de pesos no Modelo de Controlo Preditivo	30
3.3	Modelo de controlo preditivo em edifícios residências.	32
4	Modelo de edifício e identificação do sistema	35
4.1	Modelos térmicos dinâmicos	35
4.1.1	Modelo térmico da habitação residencial	36
4.1.2	Ar Condicionado	38
4.1.3	Termo-acumulador de água	39
4.1.4	Frigorífico	40
4.1.5	Sistema Fotovoltaico	41
4.2	Projeto MPC para controlo de cargas domésticas	42
4.2.1	Arquitetura proposta	42
4.2.2	Modulador do sinal de dois níveis	43
4.3	Planos Tarifários	44
5	Resultados e simulação	49
5.1	Caso de estudo	49
5.1.1	Ar-Condicionado	51
5.1.2	Termo-acumulador de água	52
5.1.3	Frigorífico	53

5.1.4	Sistema fotovoltaico	54
5.2	Caraterização de resposta transitória dos controladores	55
5.2.1	Controlo de temperatura por ar condicionado	56
5.2.2	Termo-acumulador de água	73
5.2.3	Frigorífico	83
5.3	Análise geral dos resultados obtidos	95
5.3.1	Período de verão	95
5.3.2	Período de inverno	98
6	Conclusões e Trabalho Futuro	101
6.1	Satisfação dos Objetivos	101
6.1.1	Crítica aos Resultados Obtidos	102
6.2	Trabalhos Futuros	103
6.3	Contribuições de pesquisa resultantes deste trabalho	104
6.3.1	Artigos de conferência	104
	Referências	105
A	Anexos	115

Lista de Figuras

2.1	Anomalia de temperatura anual [3]	5
2.2	Evolução da capacidade instalada de produção de energia elétrica através de recursos renováveis [6], adaptado	7
2.3	Evolução da produção de energia elétrica através de fontes renováveis [6], adaptado	8
2.4	Projeções das emissões de gases de efeito de estufa a partir dos diferentes sectores [9], adaptado	8
2.5	Evolução ao longo dos anos dos diferentes tipos de combustível utilizados em edifícios [9], adaptado	9
2.6	Distribuição dos consumos energéticos do sector doméstico em Portugal no ano de 2010, [15]	10
2.7	Paridade de rede, em Portugal, [6], adaptado	12
2.8	Evolução da capacidade de solar fotovoltaica instalada em Portugal, [6], adaptado	13
2.9	Paradigma da produção fotovoltaica, face à procura.	14
3.1	Estratégia do controlador proporcional integral derivativo, [76].	25
3.2	Estratégia do Modelo de controlo preditivo, [82], adaptado	27
3.3	Princípio básico de funcionamento dos controladores propostos em edifícios.	34
4.1	Esquema de quarto utilizado no presente estudo	37
4.2	Esquema completo do modelo RC utilizado [96]	38
4.3	Visão geral do controlo de 2 níveis operados pelo MPC[14].	43
4.4	Estratégia de operação da modulação de dois níveis[14].	44
4.5	Tarifa de venda a cliente final em BTN, para o período de verão.	46
4.6	Tarifa de venda a cliente final em BTN, para o período de inverno.	47
5.1	Temperatura (a) e irradiancia solar (b) exterior na residência doméstica no período de 6 a 12 de Agosto de 2016.	50
5.2	Temperatura (a) e irradiancia solar (b) exterior na residência doméstica no período de 1 a 7 de Janeiro de 2017.	51
5.3	Consumo de água quente diária.	53
5.4	Distúrbios diários causados pela abertura da porta do frigorífico	54
5.5	Produção de energia elétrica no período de verão (a) e inverno (b), por parte do sistema fotovoltaico instalado na residência	55
5.6	Comportamento dos controladores de AC propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.	57
5.7	Comportamento dos controladores de AC propostos no período de inverno. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.	58

5.8	Custo a pagar pelo uso do AC face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal	59
5.9	Desempenho dos vários controladores propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.	60
5.10	Desempenho das restantes arquiteturas de controlo AC com inclusão de pesos no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.	61
5.11	Consumo de energia elétrica por parte do AC no período de verão sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.	62
5.12	Consumo energético do AC, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso (b).	63
5.13	Custo a pagar pelo uso do AC face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de inverno, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal.	64
5.14	Desempenho dos vários controladores de AC propostos no período de inverno. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Controlador MPC com inclusão de pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV, e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal com PV.	65
5.15	Desempenho das restantes arquiteturas de controlo AC com inclusão de pesos no período de inverno. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.	66
5.16	Consumo de energia elétrica por parte do AC no período de inverno sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.	67
5.17	Consumo energético do AC, proveniente do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).	68

5.18	Comportamento dos controladores do TA propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.	73
5.19	Custo a pagar pelo uso do termo-acumulador face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal	74
5.20	Desempenho dos vários controladores do TA propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.	75
5.21	Desempenho das restantes arquiteturas de controlo do TA com inclusão de pesos no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.	76
5.22	Consumo de energia elétrica por parte do TA no período de inverno sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.	77
5.23	Consumo energético do termo-acumulador, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).	78
5.24	Comportamento dos controladores de FR propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.	84
5.25	Custo a pagar pelo uso do frigorífico face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal	85
5.26	Desempenho dos vários controladores de FR propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.	86
5.27	Desempenho das restantes arquiteturas de controlo do FR com inclusão de pesos, no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.	87

5.28	Consumo de energia elétrica por parte do frigorífico no período de verão sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.	88
5.29	Consumo energético do frigorífico, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).	89
5.30	Custo semanal dos vários controladores testados, face à tarifa utilizada, no período de verão.	97
5.31	Custo semanal dos vários controladores testados, face à tarifa utilizada, no período de inverno.	100

Lista de Tabelas

3.1	Domínio do controlador proporcional integral derivativo	24
4.1	Tarifas Transitórias de venda a clientes finais a aplicar pelos comercializadores de último recurso aos fornecimentos a clientes finais em $BTN > 20,7kVA$ em Portugal Continental	45
5.1	Tabela características painel fotovoltaico [108]	54
5.2	Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão, (Valores em Euros).	69
5.3	Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão, (Valores em Euros).	69
5.4	Poupanças alcançadas no equipamento Ar-condicionado, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.	69
5.5	Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado, no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	72
5.6	Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado, no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	72
5.7	Poupanças alcançadas no equipamento Ar-condicionado, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.	72
5.8	Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.	80
5.9	Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.	80
5.10	Poupanças alcançadas no equipamento Termo-acumulador, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.	80
5.11	Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	82
5.12	Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	82
5.13	Poupanças alcançadas no equipamento Termo-acumulador, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.	83
5.14	Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão (Valores em Euros).	91
5.15	Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.	91
5.16	Poupanças alcançadas no equipamento Frigorífico, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.	91

5.17 Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	94
5.18 Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.	94
5.19 Poupanças alcançadas no equipamento Frigorífico, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.	94
5.20 Custo total semanal para os três equipamentos testados no período de verão.	96
5.21 Poupanças semanais alcançadas nos três equipamentos domésticos testados no período de verão.	97
5.22 Custo total semanal para os três equipamentos testados no período de inverno.	99
5.23 Poupanças semanais alcançadas nos três equipamentos domésticos testados no período de inverno.	99

Abreviaturas e Nomenclatura

AC	Ar-Condicionado
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
AT	Alta tensão
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BT	Baixa tensão
BTN	Baixa tensão nominal
BTUs	Unidades térmicas britânicas
EDP	Energias de Portugal
EMPC	Modelo de Controlo Preditivo Económico
EMS	Sistema de gestão de energia
FR	Frigorífico
FLC	Fuzzy Logic Controlo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LTI	Tempo linear invariante
MCUs	Micro Controladores
MT	Média tensão
MPC	Modelo de Controlo Preditivo
NCEE	NOAA's National Centers for Environmental Information
PID	Proporcional Integral Derivativo
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SISO	Sistema de entrada e saída única
TA	Termo-acumulador de água
UE	União europeia
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

Nomenclatura

K_P	Ganho Proporcional
K_D	Ganho Derivativo
K_I	Ganho Integral
$y(t+k t)$	Saída Preditiva
$u(t+k t)$	Sinal de Controlo
$w(t+k)$	Sinal de Referencia
$e(t)$	Erro
$J(k)$	Função Custo
Ψ	Vetor de entrada
ϕ_y	Índice de desempenho para minimizar o erro de trajetória
ω_i^y	Peso de desvio de trajetória
ϕ_u	Sinal de controlo de erro face à trajetória
ω_i^u	Peso associado ao sinal de controlo do erro face à trajetória
$u_i(k+i k)$	Define o objetivo a ser alcançado
ϕ_{du}	Define a taxa de variação no sinal de entrada
ω_i^{du}	Peso associado à taxa de variação nas variáveis de entrada
$y_{min}(i)$	Limite mínimo das saídas futuras
$y_{max}(i)$	Limite máximo das saídas futuras
ζ	Constante adimensional do controlador
u_{max}	Limite superior do sinal de controlo
u_{min}	Limite inferior do sinal de controlo
Q_{ac}	Entrada de energia de arrefecimento
T_{out}	Temperatura ambiente exterior
T_{in}	Temperatura ambiente interior
T_{wl}	Temperatura da parede
C_{wl}	Capacitância térmica da parede
R_{wl}	Resistência térmica da parede
R_{wd}	Resistência térmica da janela
C_{in}	Capacitância térmica do ar interior
Q_s	Fluxo de calor numa superfície externa da casa, submetida à radiação solar
A_w	Área de parede
T_s	Temperatura da superfície da parede
$S(t)$	Variável binária
ρ	Densidade da água
Q_{wa}	Calor específico da água
$T_{wa;inlet}$	Temperatura da água de entrada no tanque
C_{wa}	Capacitância térmica da água
U	Coefficiente global de transferência de calor para as paredes do Termo- acumulador
A_t	Área de superfície do tanque
Q_{eg}	Potência do termo-acumulador
T_{FR}	Temperatura interna do frigorífico
R_{FRwe}	Resistência térmica do isolamento da parede do frigorífico
C_{FR}	Capacidade de armazenamento de calor do frigorífico
T_C	Temperatura da célula de um painel fotovoltaico
T_a	Temperatura ambiente
G	Irradiância incidente no painel
Λ	Vetor de entrada de dois níveis

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivos

A principal razão para a realização desta dissertação, surge na tentativa de resolução dum problema, a fatura elétrica das habitações Portuguesas, nomeadamente na redução do valor a pagar ao comercializador. Para tal serão utilizados controladores de cargas mais complexos, isto é, o Controlador Proporcional Integral Derivativo e o Modelo de Controlo Preditivo. Assim, ficou decidido recorrer a uma metodologia de investigação qualitativa, com o intuito de examinar, de forma exata e objetiva, através dos dados simulados, a utilização destes controladores, em cargas domésticas e o seu impacto na fatura elétrica. Também é colocada em cima da mesa, segundo os resultados obtidos, a possibilidade, caso assim o justifique, de se indicar possíveis melhorias no que toca ao uso desta tecnologia.

Face ao contexto acima descrito, o objetivo deste trabalho é o estudo e melhoria da utilização de energia por parte de equipamentos domésticos, através da utilização do Modelo de Controlo Preditivo, numa habitação em Portugal Continental. A habitação encontra-se localizada em Paranhos, Porto e dispõe dum sistema de Ar-condicionado, um Termo-acumulador de água, Frigorífico e um sistema Fotovoltaico instalado no telhado do edifício. Nesta dissertação não serão incluídas análises dos restantes equipamentos domésticos suscetíveis de se encontrar numa habitação residencial.

Perante este estudo de caso em contexto prático desta metodologia, de regulação de carga, surgem também algumas questões às quais se vai tentar responder ao longo deste trabalho:

- Análise dos atuais controladores de carga utilizados nos equipamentos propostos;
- Análise do controlador proposto nos mais variados cenários;
- Justificar ou não a necessidade do uso do Modelo de Controlo Preditivo;

Estes objetivos justificam-se, na medida em que Portugal apresenta uma dos mais elevados preços de eletricidade na Europa e no Mundo. Ao analisar o comportamento do preço da eletricidade ao longo dos últimos anos, constata-se que este tem um comportamento crescente, pelo

que é empírica a necessidade de reduzir os custos da fatura elétrica, sem que sejam alteradas as condições de funcionamento estipuladas pelo utilizador.

Com isso, o presente estudo pretende demonstrar, através dum estudo de caso, de que forma o Modelo de Controlo Preditivo pode auxiliar na redução da fatura de eletricidade a pagar. Para tal serão simulados vários cenários com o intuito de compreender qual a estratégia mais benéfica do ponto de vista do utilizador.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo 1 motiva a nossa pesquisa, apresenta o objetivo da dissertação e apresenta a sua estruturação.

No Capítulo 2, é apresentado o panorama atual do aquecimento global face aos aumentos dos consumos energéticos. São também apresentadas medidas que têm contribuído para a transição para um sistema livre de combustíveis fósseis. É também neste capítulo que são apresentadas as abordagens de controlo existentes em matéria de controlo de temperatura nos edifícios residências. Assim é feita uma revisão crítica dos trabalhos realizados neste campo.

No Capítulo 3, é apresentada a formulação matemática dos controladores propostos, isto é, para o controlador Proporcional Integral Derivativo, bem como para o Modelo de Controlo Preditivo. Neste capítulo, é feita uma abordagem sobre a estratégia de operação do MPC, nomeadamente em matéria de predição, otimização, implementação de horizonte de previsão, metodologia de restrições e por fim inclusão de estratégias de pesos. Após isto, é apresentada uma síntese do MPC em edifícios residências.

No Capítulo 4, são apresentados os modelos térmicos dinâmicos propostos na dissertação. É apresentada a estratégia adotada para a criação dos modelos. É então feita uma descrição detalhada do modelo térmico da habitação residencial. De seguida são apresentados os modelos dos equipamentos Ar-Condicionado, Termo-acumulador de água, Frigorífico e por fim do sistema fotovoltaico proposto. Neste Capítulo, é também apresentado o projeto MPC para o controlo de cargas domésticas, relativamente à arquitetura proposta bem como ao modulador de sinais de dois níveis. Por fim são apresentados os planos disponíveis, que servirão de base na comparação dos resultados obtidos.

O Capítulo 5, apresenta os resultados experimentais simulados. Neste capítulo é demonstrada a eficácia da estratégia MPC face as outras estratégias propostas nesta dissertação. São então revelados os resultados obtidos que por sua vez, demonstram uma redução significativa na fatura de eletricidade sem comprometer as exigências estipuladas previamente.

A formulação MPC no Capítulo 4 e 5 pressupõe conhecimento perfeito do modelo do sistema, distúrbio de carga e condições meteorológicas. No entanto, as previsões na prática são diferentes das realizações reais.

Por fim, no Capítulo 6, é realizada uma análise global do trabalho desenvolvido, onde se fazem críticas construtivas aos resultados finais obtidos. Neste Capítulo são também apresentadas sugestões de trabalhos a realizar futuramente e que darão continuidade ao trabalho aqui apresentado.

1.3 Metodologia de Estudo

A metodologia dum trabalho de investigação, é um enquadramento geral que aborda uma perspetiva mais prática, referindo as estratégias concretas utilizadas para melhor compreender as realidades envolvidas.

Investigadores com escassos recursos e até sozinhos, colocam à prova as suas qualidades de pesquisa, com o intuito de dar uma contribuição séria para a investigação, através do estudo de caso, em alternativa a estudos de perspetiva mais vasta que por sua vez exige mais recursos. O estudo desenvolvido pode, e deve, ser prosseguido com futuros trabalhos, de modo a melhorar constantemente o tema de estudo. A reflexão desta dissertação baseia-se em vários autores, com particular incidência na obra do Professor E. F. Camacho, Bordons Alba, bem como em numerosas dissertações e artigos científicos.

Uma contribuição importante para o desenvolvimento científico, é o estudo de caso, e tal pesquisa não equivale a simplismo, mas exige enquadramento teórico adequado, domínio de instrumentos e disponibilidade de tempo. Além disso, certos processos e situações correm risco de passar despercebidamente em estudos de maior dimensão, pelo que, a análise de casos, mesmo de casos pouco habituais, pode ser ilustrativa de circunstâncias cruciais para os sistemas e organizações [1].

Existem vários passos a efetuar neste tipo de estudos, o primeiro passo passa por definir o caso que está a estudar, ou seja, o tópico ou unidade de análise e o seu subtópico ou contexto social. Ao conceber esta definição esta-se a ajudar enormemente a organização do estudo de caso. Esta escolha pode manter-se na medida em que se apoia em questões de pesquisa e literatura adequada, mas, depois de coligir os primeiros dados, pode redefinir-se o caso, o que deve obrigar a rever as perguntas e a literatura de apoio.

O segundo passo, passa por optar por um estudo de caso singular, ou por um estudo múltiplo de casos. No entanto, é necessário decidir se o caso singular é holístico ou tem incluídos sub-casos dentro do caso holístico [2].

E por fim o terceiro passo, passa por decidir usar ou não desenvolvimento teórico para ajudar a selecionar o caso, desenvolver o protocolo de recolha de dados e organizar as estratégias iniciais de análise de dados. Um estudo de caso pode tentar construir, alargar ou desafiar esta perspetiva [2].

Em suma, um estudo de caso feito em profundidade pode constituir um bom começo para uma investigação mais global, a desenvolver posteriormente com mais tempo e recursos. A vantagem é a de, à partida, exigir menos recursos e poder ser assumido por um investigador ou por uma pequena equipa mas, como toda a investigação, quanto à problemática, ao enquadramento teórico, à escolha das “unidades” a inquirir ou à lógica da análise dos dados, põe igualmente à prova as qualidades da investigação [1].

Tendo em consideração os objetivos definidos, recorreu-se a uma metodologia de investigação qualitativa, com o intuito de examinar, de forma exata e objetiva, através dos dados simulados, a

utilização do Modelo de Controlo Preditivo em habitações residenciais e o seu impacto na fatura elétrica a pagar.

1.4 Notação

A presente dissertação utiliza a notação frequentemente usada na literatura científica, harmonizando os aspetos comuns em todas as secções sempre que possível. No entanto, sempre que necessário, em cada secção pode ser utilizada uma notação adequada. As fórmulas matemáticas serão identificadas com referência à secção em que elas aparecem e não de maneira sequencial durante a tese, reiniciando-as sempre que uma nova secção for criada. Além disso, figuras e tabelas serão identificadas com referência à secção em que elas estão inseridas e não de forma sequencial ao longo da dissertação. As fórmulas matemáticas são identificadas por parênteses (x.x) e denominadas "Equação (x.x)" e as referências são identificadas por parênteses retos [xx]. As siglas utilizadas nesta tese são estruturadas sob síntese de nomes e informações técnicas provenientes de línguas portuguesas ou inglesas, conforme aceite na comunidade técnica e científica.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Transição para um sistema livre de combustíveis fósseis

O planeta Terra formou-se a cerca de 4.6 bilhões de anos a partir de um aglomerado poeiras e de gases, desde aí o clima não tem parado de sofrer alterações naturais. No entanto no último século essas alterações ultrapassaram a barreira daquilo que é considerável natural. De acordo com uma análise conduzida pelo NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI), a temperatura média global da terra e dos oceanos aumentou cerca de 0.94° Celcius desde 1880. Dois terços desse aquecimento ocorreram a partir de 1975, a uma taxa de cerca $0.15-0.2^{\circ}$ Celcius por década. Como podemos observar na figura 2.1 após a passagem da década de 70 as anomalias de temperatura anual são cada vez de maior amplitude [3].

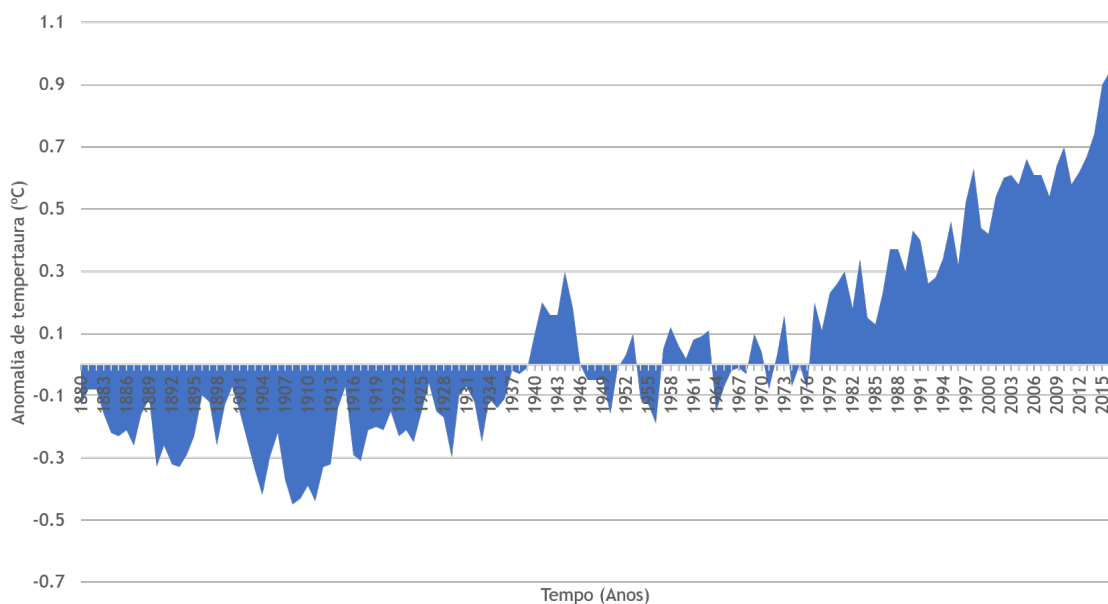


Figura 2.1: Anomalia de temperatura anual [3]

Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), as alterações climáticas são classificadas como a consequência da intervenção humana no meio natural. Atividades do ser humano como a queima de combustíveis fósseis e a utilização abusiva de terra para a produção agrícola faz com que a concentração de gases de efeito de estufa aumente.

O rápido crescimento do consumo mundial de energia já suscitou preocupações devidas as dificuldades de abastecimento, ao esgotamento dos recursos e aos pesados impactos ambientais que já se fazem sentir. Desta forma o tema do desenvolvimento sustentável tem estado presente na agenda mundial há mais de três décadas. Compete aos governos, empresas e cidadãos, cada um, na sua medida e responsabilidade a realização de esforços conjuntos para alteração de comportamentos e políticas que permitem assim alcançar o desejado desenvolvimento sustentável.

A primeira grande intervenção mundial político-ambiental deu-se em 1997 com a assinatura do Protocolo de Quioto, que vincula os participantes a reduzir as emissões de gases de efeito de estufa. Desde então a sociedade dedicou-se a desenvolver tecnologias que permitam diminuir as emissões de gases prejudiciais para a atmosfera mantendo ou mesmo melhorando o nível de conforto do ser humano e outras espécies [4].

É no ano de 2007 que se inicia o ponto de viragem em matéria de clima e energia, estando a União Europeia (UE), disposta a assumir uma posição de líder mundial face aos desafios colocados pelas alterações climáticas e pelo abastecimento de energia segura, sustentável e competitiva. Por forma a mitigar as consequências mundiais decorrentes duma utilização deficiente de energia foram acordadas metas ambiciosas para o ano de 2020. É então criado o programa europeu “Duas vezes 20 até 2020 - As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa”, tendo em vista a promoção da economia europeia para caminhos energéticos mais sustentáveis. Portugal como membro europeu encontra-se abrangido pelo programa “Duas vezes 20 até 2020” pelo que necessita de realizar investimentos racionais de forma a cumprir as metas estipuladas. Em termos de matéria de Clima e Energia, Portugal está encarregue de diminuir os gases de efeito de estufa, aumentar a percentagem de energias renováveis no consumo de energia final para 31%, e por fim aumentar a eficiência energética (ganho em percentagem relativamente a consumos de energia primária em cenário de referência) em 20% [5].

De forma a facilitar a análise dos consumos energéticos das populações distinguem-se cinco setores consumidores de energia: transportes, indústria, doméstico, serviços e agricultura e pescas. Segundo Direção-Geral de Energia e Geologia no ano de 2014 o setor que mais energia consumiu foi o dos serviços (36%), seguido do setor da Indústria (31%), doméstico (17%), serviços (13%) e por fim agricultura e pescas (3%) [6].

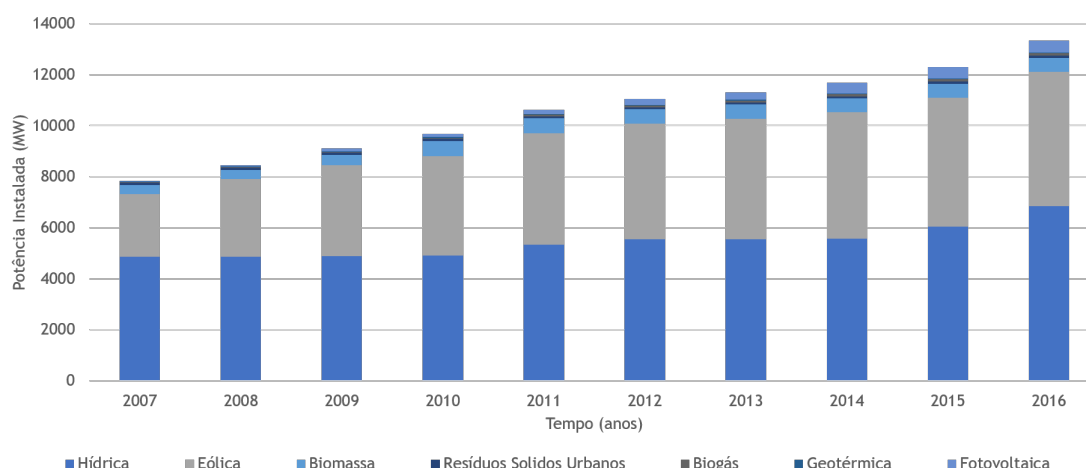


Figura 2.2: Evolução da capacidade instalada de produção de energia elétrica através de recursos renováveis [6], adaptado

Com o intuito de cumprir as metas estipuladas pela União Europeia para 2020, Portugal decide apostar na produção de energia elétrica através de fontes renováveis, tais como a energia eólica, hídrica, e na solar mais recentemente.

No ano de 2014, Portugal possuía 42% da sua capacidade de gerar eletricidade associada aos combustíveis fósseis, um valor elevado, ainda que inferior à média europeia. Na figura 2.2 é possível observar que a capacidade de potência instalada de carácter renovável tem aumentado consecutivamente ao longo dos últimos anos, fruto das políticas incentivadoras promovidas pelo governo Português, como é o caso da produção em regime especial.

O ano de 2016 é caracterizado por um dos maiores crescimentos de capacidade instalada de energia renovável dos últimos anos, não só em Portugal, mas também em grande parte das restantes regiões. As energias eólica e solar fotovoltaica apresentam crescimentos recordes pelo segundo ano consecutivo, respondendo em cerca de 77% das novas instalações [7].

Em Portugal o cenário é mais favorável que na média mundial, segundo a APREN cerca de 60% da eletricidade distribuída no ano de 2016 é de carácter renovável, de onde se pode destacar a utilização da hidroelétrica (50.63%), seguida da produção eólica (37.37%), biomassa (9.41%), solar fotovoltaica (1.94%) e geotérmica (0.65%) [6].

Na Figura 2.3, percebe-se claramente a evolução da produção de energia renovável no sistema elétrico Português. Justificando, assim, os esforços económicos realizados em prol do aumento da produção de energia renovável ao longo dos últimos anos. No entanto, existem outros setores não menos importantes responsáveis pela emissão de gases de efeito de estufa. De acordo com a International Energy Agency, os cenários previstos para o ano de 2025 estão em sintonia com os esforços realizados no campo da produção de energia. Mas, os restantes setores não seguem a mesma direção e não contribuem para a diminuição dos gases emitidos como pode ser observado na figura 2.4.

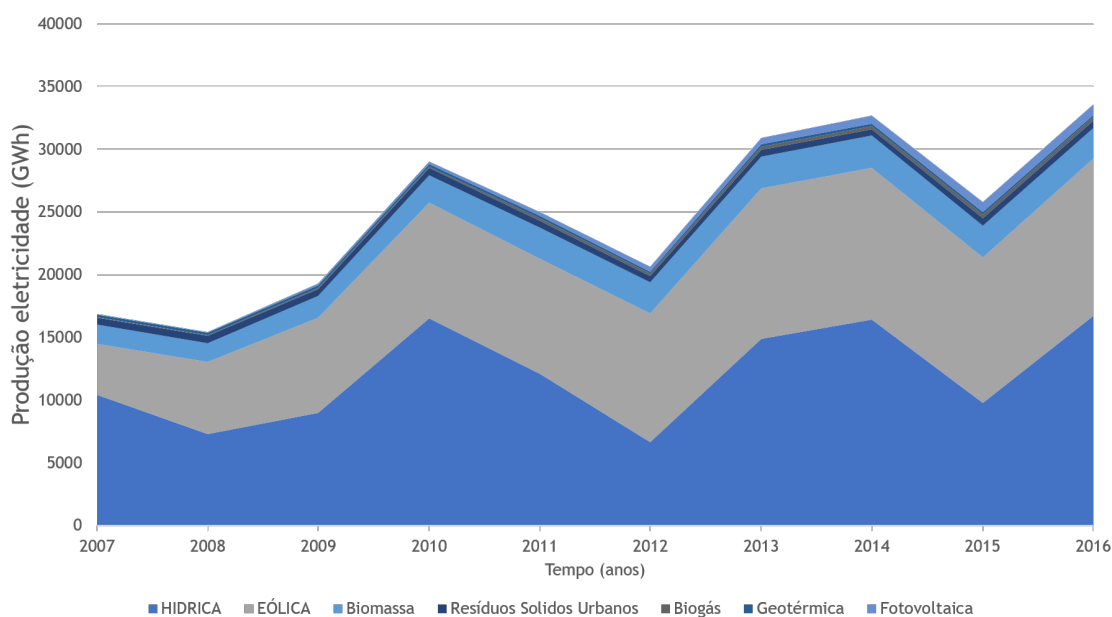


Figura 2.3: Evolução da produção de energia elétrica através de fontes renováveis [6], adaptado

Como é esclarecedor na Figura 2.4, o setor da indústria é o maior responsável pela emissão de gases seguido do setor da energia, transportes e edifícios. Em todo o planeta, os edifícios consomem uma quantidade significativa da energia, cerca de um terço de toda a energia primária [8]. Para além disso, é notável uma expansão significativa dos gastos neste setor ao longo dos últimos anos. Devendo-se à emergência de novas economias como o médio oriente, Índia e África e que desta forma possibilitam que um maior número de cidadãos tenham acesso a condições de conforto que anteriormente não eram possíveis.

Na Figura 2.5, é possível observar a evolução dos diferentes categorias de combustíveis utilizados em edifícios bem como as suas projeções para 2020 e 2025.

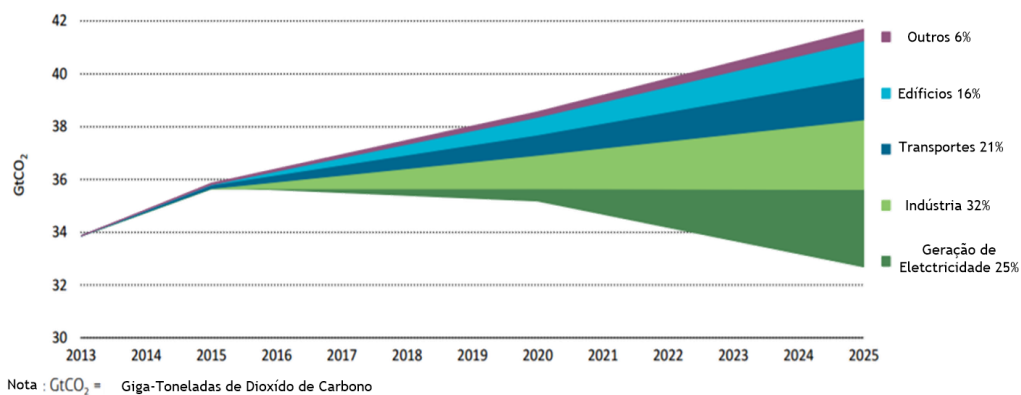


Figura 2.4: Projeções das emissões de gases de efeito de estufa a partir dos diferentes sectores [9], adaptado

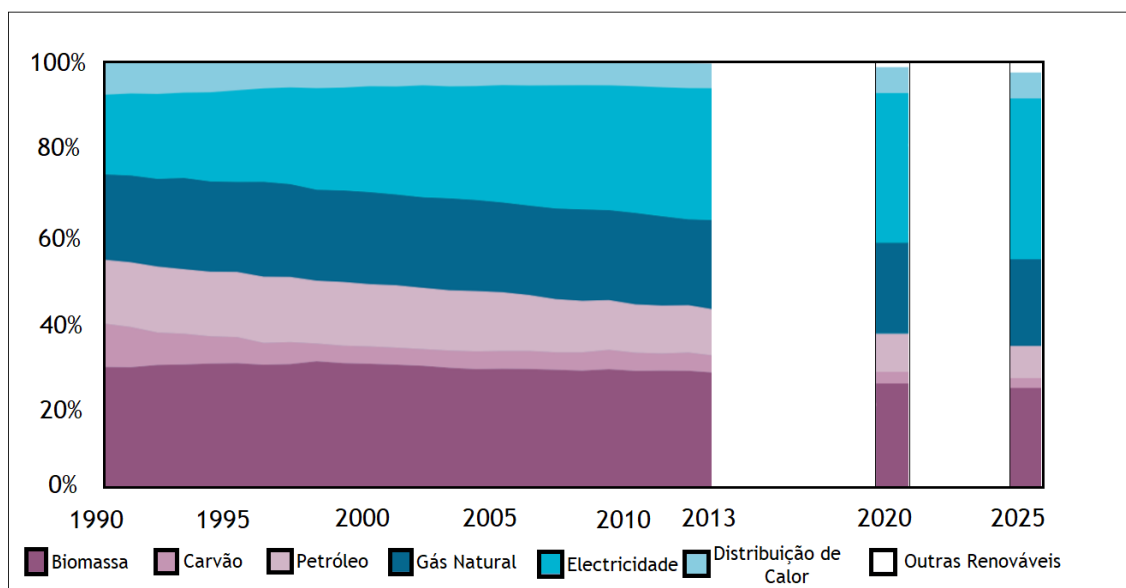


Figura 2.5: Evolução ao longo dos anos dos diferentes tipos de combustível utilizados em edifícios [9], adaptado

A eficiência energética dos edifícios por metro quadrado melhorou significativamente em algumas regiões, mas não suficientemente rápido para compensar a duplicação da área que se deu a partir da década de 90.

Globalmente o grande potencial da eficiência energética permanece por explorar, é necessário agir agora e acelerar o desenvolvimento de tecnologias, que permitam reduções de consumos, de forma que este setor se torne menos poluente e mais eficiente até 2050.

O rápido crescimento populacional, faz da electricidade o meio ideal de energia a utilizar em grandes centros urbanos devido a elevada vestalidade e segurança desta forma de energia. A figura 2.5 ilustra perfeitamente essa evolução no consumo de electricidade bem como as metas a alcançar daqui a três e oito anos respetivamente.

Em 2025 é expetável que o consumo de electricidade nos edifícios aumente cerca de 20% face a 2013, pelo que é importante antecipar tecnologias que permitam gerir a electricidade de maneira mais eficiente. Assim um esforço global em prol da eficiência energética nos edifícios, é crucial para compensar o rápido crescimento da área dos edifícios e consequentemente, o aumento dos gastos energéticos, proporcionando os mesmos níveis de qualidade de vida.

O desempenho energético global dos edifícios por metro quadrado melhorou 1.5% por ano nas últimas duas décadas e meia, em resultado do desenvolvimento e aplicação de medidas energéticas e políticas de eficiência energética. No entanto, os progressos não foram suficientes para compensar o rápido crescimento da área de habitação bem como o elevado uso de equipamentos consumidores de energia.

Segundo International Partnership for Energy Efficiency Cooperation (IPEEC) até à data, poucos são os países que têm dissociado o consumo de energia em edifícios a partir do crescimento da

população. Pelo que o consumo de energia per capita continua a crescer na maior parte das regiões [10]. Assim sendo a união europeia decide criar uma diretiva que coloca restrições na construção de novos edifícios. De modo a que estes sejam mais eficientes do ponto vista energético e assim contribuir para a redução das emissões de gases de efeito de estufa [11]. Estima-se que, no ano de 2020, o potencial de redução do consumo de energia em termos de eficiência energética estimada seja entre 27% e 30% [12]. Atingir este potencial faz parte do pacote da UE para o clima e a energia (conhecido coloquial-mente como o objetivo 20-20-20 UE).

O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) realizou em 2009 uma pesquisa que conclui que o consumo de energia nos edifícios poderia ser reduzido drasticamente, proporcionando assim uma poupança equivalente à energia utilizada pelo setor do transporte atualmente [13].

Desta forma a poupança de consumo de energia que é possível alcançar em edifícios é significativa, ajudando assim a preservar recursos fósseis, reduzir o custo de energia para consumidores e ainda permitir uma maior sustentabilidade do planeta.

Mundialmente as necessidades de aquecimento e arrefecimento do setor doméstico, incluindo o aquecimento de água, representam cerca de 50% das cargas globais de energia dos edifícios residenciais [14]. De acordo com os censos realizados no ano de 2010 em Portugal, foi possível construir uma matriz de consumos energéticos domésticos, que se encontra representada na Figura 2.6. O principal consumidor de energia residencial é a atividade de cozinhar.

O aquecimento de águas é a segunda maior fatia do uso final, representando 23,5% do uso global de energia nos edifícios, enquanto o arrefecimento do espaço, apesar de apresentar um consumo muito baixo, é o uso final de crescimento mais acentuado em todo o mundo, tendo aumentado mais de 4% ao ano desde 1990 [15].

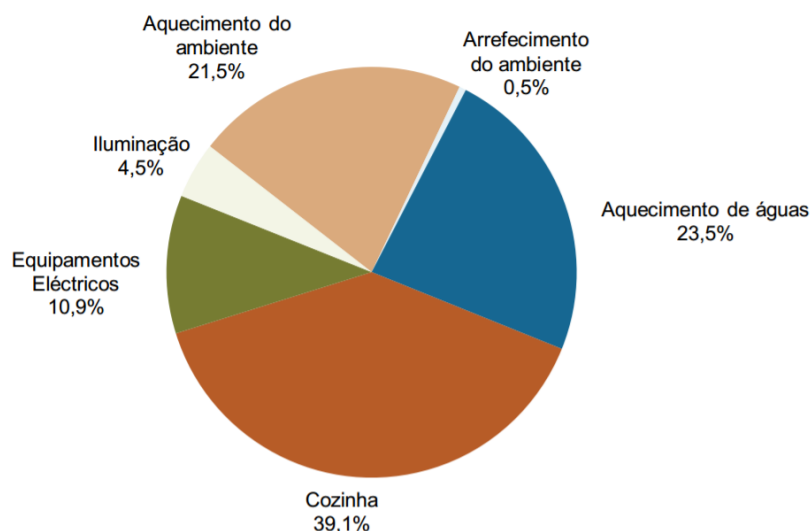


Figura 2.6: Distribuição dos consumos energéticos do sector doméstico em Portugal no ano de 2010, [15]

Os edifícios pressupõem o propósito de proporcionar ao ser humano, abrigo e proteção, possibilitando assim condições que proporcionam bem-estar. Devido a essas condições, aproximadamente 90% das pessoas passa a maior parte do seu tempo em edifícios [16].

No entanto, dado a natureza do ser humano, que tende sempre a procurar melhorar as suas condições de vida, observou-se nas últimas décadas uma procura crescente por parte dos habitantes em tecnologias que permitam a melhoria do conforto ambiental interior, reduzindo simultaneamente o consumo de energia e as emissões de CO_2 .

Um bom exemplo, é o uso de painéis solares em habitações residenciais, uma vez que é uma forma acessível e eficaz de energia limpa e renovável que pode ser aproveitada. Usando coletores de chapa plana solar, é possível tirar proveito da energia abundante do sol para reduzir os seus próprios custos de energia.

No entanto, é provável que a contribuição dos recursos renováveis em edifícios seja limitada devido às várias limitações, como a sua natureza incerta, área ocupada e eficiência pelo que é empírica a necessidade de uma gestão eficiente da energia para alcançar uma economia de baixo carbono.

Desta forma, o conforto interior desempenha um papel significativo e representa um enorme impacto para preservar a saúde, a moral, a eficiência, a produtividade e a satisfação do habitante [17].

Até à data, a maioria dos esforços realizados, para reduzir o consumo de energia em edifícios, foram concentrados no estudo de materiais alternativos que permitem a redução das perdas de calor na própria construção ou através do melhoramento do funcionamento dos aparelhos domésticos. Neste sentido, um bom exemplo a ter em conta é a mudança de paradigma no ramo da iluminação, a transição da lâmpada incandescente clássica para a tecnologia LED que permite economias de energia significativas.

Nos dias de hoje, observam-se também outras estratégias que têm como objetivo a diminuição das emissões de CO_2 bem como da fatura energética. Após Albert Einstein ter aberto uma época de novos desenvolvimentos, ao explicar o efeito fotoelétrico, em 1905. Seguiu-se o advento da mecânica quântica e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício. As grandes melhorias de eficiência na conversão da energia resultante destes avanços tornaram o fotovoltaico numa solução viável para várias novas situações.

No entanto, a tecnologia fotovoltaica continuava dispendiosa, e, portanto só era utilizada em grandes projetos, como foi o caso da exploração espacial. Mas os governos da Alemanha e do Japão perceberam rapidamente que a criação de um verdadeiro mercado fotovoltaico não poderia basear-se apenas no desenvolvimento tecnológico, mas também ser incentivado no sentido de criar massa crítica no mercado.

À semelhança desses governos, Portugal decidiu criar incentivos às instalações fotovoltaicas. O apoio político foi, aliás, o catalisador de um desenvolvimento exponencial, a que se assistiu na última década: em 1999 o total acumulado de painéis solares atingia 1GW (gigawatt), para dupli-

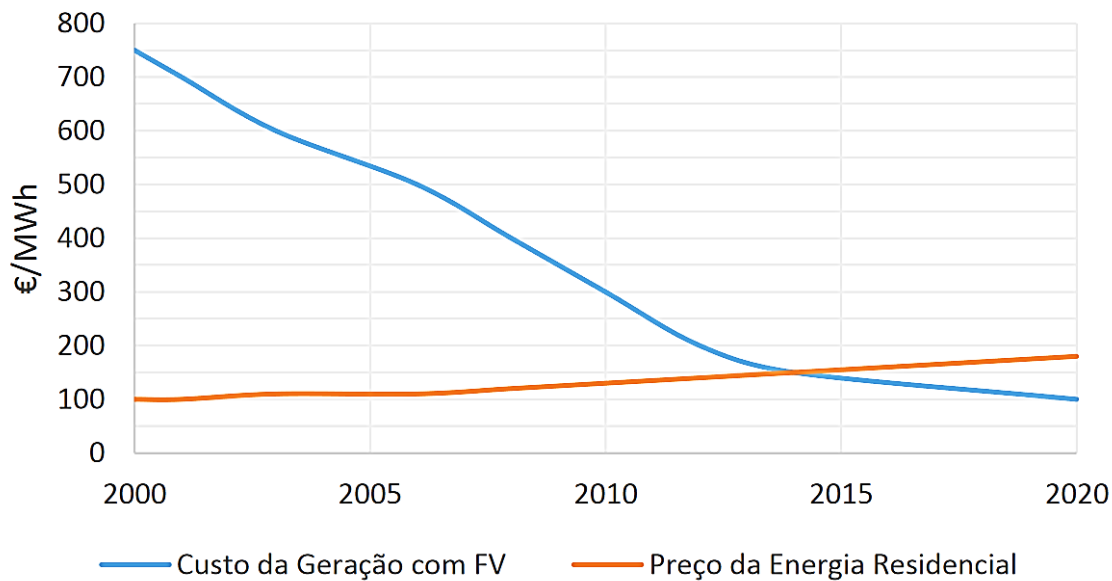


Figura 2.7: Paridade de rede, em Portugal, [6], adaptado

car três anos depois como era esperado, o desenvolvimento tecnológico do fotovoltaico acompanhou esse crescimento.

Além disso, os países do sul da Europa apresentam condições muito favoráveis à instalação de produção fotovoltaica. Portugal, logo a seguir à Grécia e a Espanha, goza do maior potencial de aproveitamento de energia solar da Europa, com mais de 2300 horas/ano de insolação na região norte, e 3000 horas/ano no sul.

Há alguns anos, dado que a tecnologia fotovoltaica apresentava elevados preços, existia o incentivo à instalação através de tarifas “Feed-in”, tarifas bonificadas, garantidas durante alguns anos, para que fosse viável o investimento neste tipo de produção.

No entanto, ao longo dos anos o custo das tecnologias fotovoltaicas foi diminuindo, tornando mais promissor o futuro da energia solar em Portugal. A prova disso é o aparecimento da paridade de rede, representado na Figura 2.7, que ocorre no momento em que o custo de produção de energia solar se torna igual ao custo de energia consumida (vendida pelo comercializador). Este custo de produção de energia solar engloba o custo dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos, montagem, manutenção entre outros custos associados.

Desta forma a tecnologia tornou-se extremamente apetecível, aumentando assim o número de instalações fotovoltaicas e consequentemente a potência fotovoltaica instalada, como se pode ver na Figura 2.8. A estratégia passava por sobre-dimensionar o sistema por forma a maximizar a energia injetada na rede e por conseguinte, aumentar as receitas.

No entanto, em consequência da paridade com a rede o governo decide tomar medidas e assim publica em Diário da República, a 12 de outubro de 2016. Uma portaria estipula que no ano seguinte, isto é, 2017, o comercializador de último recurso (EDP Serviço Universal) deverá dimi-

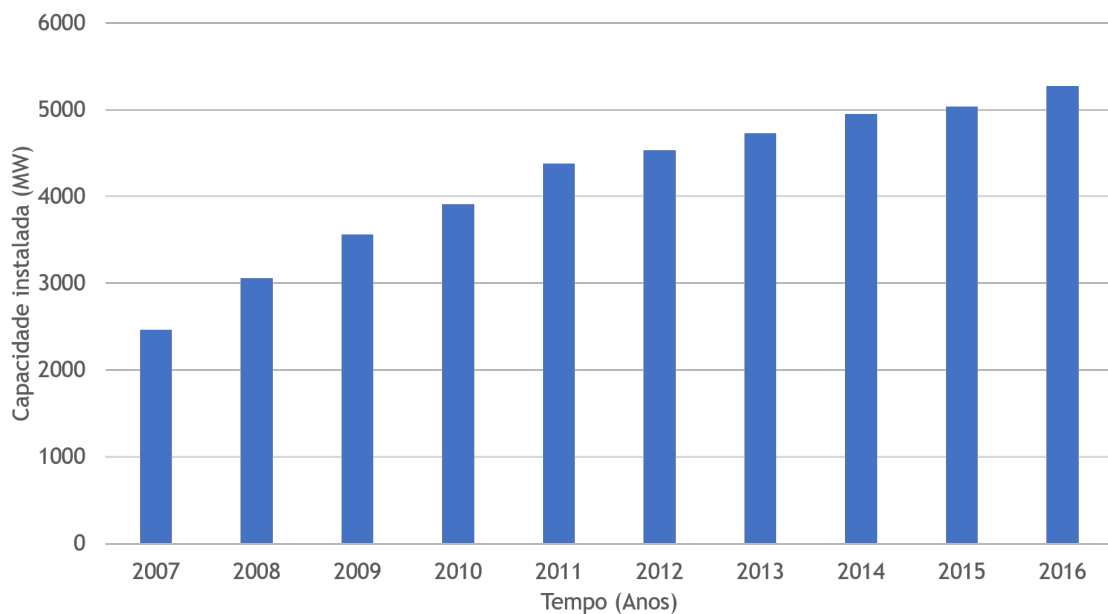


Figura 2.8: Evolução da capacidade de solar fotovoltaica instalada em Portugal, [6], adaptado

nuir os pagamentos aos produtores do regime especial que tenham beneficiado de outros apoios públicos além das tarifas bonificadas de venda de energia à rede (“feed in tariffs”).

Em habitações residenciais, por sua vez, a energia produzida pela instalação fotovoltaica atinge o seu pico nas horas de maior incidência solar produzindo sensivelmente entre as 8h e as 20h, sendo que a produção depende sempre do período, isto é, se se trata de uma estação de Verão ou Inverno, bem como da região.

Por conseguinte, o investimento em sistemas fotovoltaicos adquire outra estratégia, o autoconsumo. Esta nova estratégia visa dimensionar o sistema local, em prol das necessidades energéticas do consumidor.

Contudo, o período de produção fotovoltaica, não coincide com o período de alto consumo energético no setor doméstico, como é possível observar na Figura 2.9. Na sociedade atual, o ser humano passa grande parte do dia fora de casa, pelo que o consumo energético na sua residência é menor no período de grande produção fotovoltaica. Por conseguinte, a rentabilidade do investimento feito no sistema fotovoltaico, está de certa forma a diminuir, uma vez que a energia produzida, não é totalmente consumida, e por isso injetada na rede. Mas a energia injetada na rede é paga a um preço menor que aquela que é comprada.

É então necessária a criação de novas estratégias, que tirem partido das altas produções fotovoltaicas durante o dia, a fim de disponibilizar essa energia não consumida noutros períodos. Surge então a hipótese de utilizar baterias para armazenar essa energia excedente.

Dada a natureza não controlável e estocástica dos recursos renováveis, uma solução potencial é usar um sistema de armazenamento de energia da bateria que permite acumular a energia excedente nos períodos em que a produção solar é maior. Hoje existem várias tecnologias e métodos

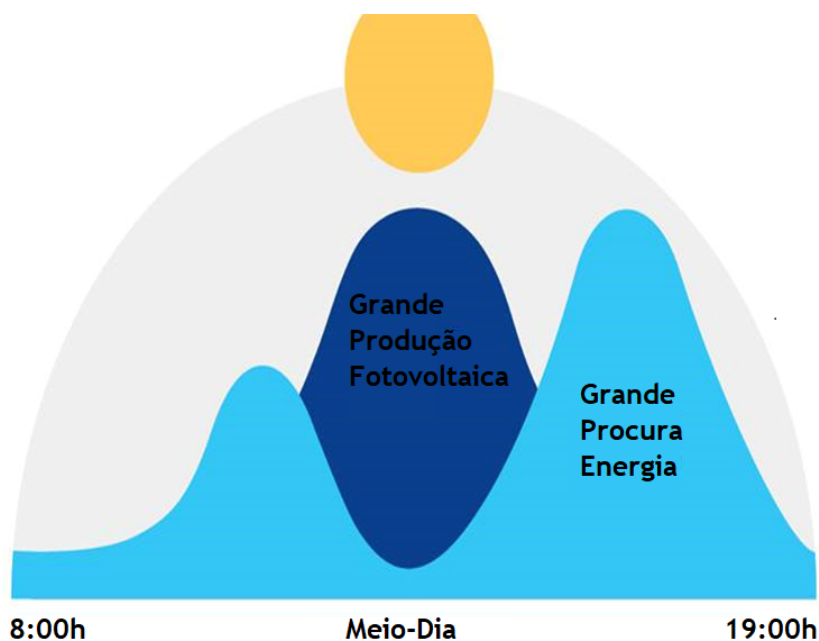


Figura 2.9: Paradigma da produção fotovoltaica, face à procura.

de armazenamento de energia disponíveis no mercado [18], [19], embora todas elas ainda são extremamente dispendiosas para aplicar em edifícios residenciais.

Outra forma de rentabilizar esta energia, excessiva, produzida pelo sistema fotovoltaico durante os períodos de sol, está diretamente associada ao tema da presente dissertação. A utilização de controladores de carga mais inteligentes, proporciona vantagens que visam aproveitar de forma mais eficaz a energia produzida pelo sistema, como irá ser demonstrado no Capítulo 5.

2.2 O controlo de cargas domésticas flexíveis

Ao longo dos últimos anos, como já referido, o tema da eficiência energética esteve sempre presente no desenvolvimento de novos equipamentos domésticos. Assim, várias estratégias são constantemente apresentadas com o intuito de reduzir o consumo destes aparelhos e simultaneamente satisfazer os requisitos de conforto, seja sob a forma de equipamento mais eficiente [20][21][22], armazenamento de energia [23], ou técnicas de controlo e supervisão [24][25]; [26][27].

Um bom exemplo da atenção dada a este tema, é a utilização de variadores eletrónicos de velocidade em unidades de ar condicionado, máquinas de lavar e frigoríficos, permitindo assim alcançar um novo nível de eficiência energética, graças ao carácter flexível que este componente acrescenta [28][29]. Contudo, apesar do esforço realizado neste campo, a maioria dos equipamentos domésticos, utilizados para regulação de temperatura, continua a utilizar uma tecnologia já bastante ultrapassada e com bastantes limitações, o controlo ON / OFF ou controlo duas posições.

Os controladores ON / OFF, são simples e comuns em pequenos edifícios. Estes operam sistemas de ar condicionado, arcas frigoríficas, bem como aquecimento de águas sanitárias [30]. São responsáveis por manter os níveis de temperatura desejados, sem considerar a procura elétrica de pico do edifício ou seu impacto na rede e consequentemente na faturação. Estes controlos termos-táticos usam um simples ciclo de realimentação em tempo real, baseado no ponto de ajuste de temperatura, normalmente uma constante.

De facto, o uso do controlador de duas posições, (isto é, bang-bang [30] ou controlo por histerese [31][32]) é uma forma bastante básica e pouco flexível de controlar o aquecimento ou arrefecimento. Este tipo de controlo, apenas é capaz de fornecer sinais binários, ou seja, potência nula ou potência máxima. Desta forma, irá apresentar limites de manutenção que não consideram as características térmicas do edifício, as previsões meteorológicas nem a eficiência do sistema de aquecimento / arrefecimento. Além de que não existe nenhum método para avaliar o aumento da temperatura exterior e que permita impedir a injeção contínua de calor dentro da sala pelo controlador ON / OFF, a fim de evitar o super aquecimento da casa [14].

É também empírico que, em pequenos edifícios residenciais, normalmente não existem sistemas de gestão energética (EMS) sofisticados que permitiriam o controlo do padrão de carga do sistema AC. A instalação dum sistema de gestão de energia (EMS), capaz de minimizar a carga de pico dos edifícios pode ser impraticável, devido a um longo e incerto retorno do investimento. Desta forma, surge a necessidade de implementar estratégias de controlo com maiores capacidades que a anteriormente enunciada.

No passado, o uso de poder computacional, com intuito de regular estes equipamentos era quase proibido, devido ao elevado consumo de energia que era exigido pelos processadores bem como devido ao exuberante preço da tecnologia. Mas, nos dias de hoje o cenário começa a seguir outro caminho. Os microcontroladores (MCUs), apresentam cada vez mais baixos consumos energéticos, maior capacidade de cálculo e preços de fabrico bastante mais reduzidos [33]. Assim sendo, a abundância deste tipo de recursos com elevado poder de cálculo abre portas para a implementação de técnicas avançadas de controlo de energia em equipamentos domésticos [14].

Por forma a classificar métodos de controlo são distinguidas quatro estratégias, controlo clássico, controlo suave e controlo rígido. Uma breve introdução sobre cada um deste tipo de controlo é apresentada de seguida.

Os controladores clássicos, representam o grupo de técnicas de controlo mais utilizadas, tais como controlo ON / OFF e controlo P, PI e PID. O controlador ON / OFF utiliza um limite superior e outro inferior de modo a manter o processo dentro dos limites definidos. Os controladores P, PI e PID usam dinâmicas de erro e modulam a variável controlada para obter um controlo preciso do processo.

Embora o controlador ON / OFF seja o mais intuitivo e o mais fácil de implementar, é incapaz de controlar processos em movimento com atrasos de tempo. Devido à alta inércia térmica de muitos sistemas AVAC, um processo que é controlado usando um controlador ON / OFF exibe grandes oscilações dos pontos de ajuste. O controlador PID, por sua vez, produz resultados promissores, mas ajustar os parâmetros do controlador é uma tarefa pesada.

Guang e Geary [34], afirmam usar controladores PID para regulação de temperatura já à vários anos. Apesar de se tratar duma tecnologia simples e capaz de satisfazer a maioria das especificações dos equipamentos. No entanto, a realização de ajustes eficazes nos controladores PID nem sempre é trivial e pode inclusive ser uma tarefa trabalhosa e dispendiosa [35]. A seleção inadequada dos parâmetros do controlador PID pode resultar em instabilidade do sistema [36]. Assim, varias metodologias são apresentadas para resolver o problema da escolha de parâmetros. Por exemplo, Wang apresentou um novo conjunto de regras eficazes que permitem a escolha automática dos parâmetros de peso do controlador PID. Com esta metodologia é possível alcançar um melhor desempenho experimental do sistema deste tipo de sistemas [37].

Um método mais avançado utilizado para o controlo de aquecimento e arrefecimento incorpora a evolução tecnológica do controlo descontínuo (ON / OFF) com o controlo contínuo, usando os denominados controladores de derivada proporcional-integral (controlador PID). Este tipo de controlador inclui um mecanismo avançado de realimentação em ciclo de controlo com a intenção de minimizar os períodos em que a temperatura diverge do valor de referência [38].

No entanto, os controladores PID são considerados inferiores devido à sua baixa precisão em processos não lineares. Por exemplo, os controladores PID apenas controlam eficientemente sistemas com uma única saída e entrada (SISO).

As técnicas de controlo suave, tais como as baseadas em Fuzzy Logic [39], [35] e as redes neuronais [40], [41] são técnicas comparativamente as anteriores, novas, e tornadas possíveis pelo advento dos controladores digitais.

Um outro método eficaz de controlo de aquecimento e arrefecimento, é a utilização de Fuzzy Logic Control (FLC) [42]. Este tipo de controlo é um dos mais úteis métodos a utilizar em situações onde existam dificuldades na obtenção dos modelos matemáticos. Ao contrário dum controlador de processo convencional, como o controlador PID, nenhum modelo matemático rigoroso é necessário para projetar um bom controlador de lógica fuzzy e, em muitos casos, eles podem ser implementados com maior facilidade que o PID. Devido a esta vantagem, o controlo baseado em lógica Fuzzy é mais utilizado em unidades industriais [43]; [44]. Mas, recentemente este controlador tem também sido aplicado no setor doméstico em aparelhos como a arca-frigorífica [45]. Underwood [46], apresenta um método alternativo de controlo de bombas de calor domésticas através da utilização dum compressor de velocidade variável. A realização destas simulações, mostram que a utilização de Fuzzy multivariable, melhora o desempenho da bomba de calor face ao controlo de duas posições convencional.

As Redes Neuronais (RN), são treinadas sobre os dados de desempenho do sistema encaixando-se num modelo matemático não linear dos dados. O algoritmo é uma técnica de modelagem de caixa preta que não requer uma compreensão da física subjacente do processo. Exemplos de projetos que utilizam RN incluem um controlador de conforto térmico baseado em "Predicted mean vote", para controlo de temperatura zonal [47].

A implementação do controlo FLC, requer um conhecimento abrangente da operação do sistema e dos seus diferentes estados, enquanto que o projeto de controle baseado em RN's requer

dados para realizar o treino numa ampla gama de condições operacionais, o que pode não estar disponível para muitos sistemas.

Os controladores rígidos, são baseados na teoria dos sistemas de controlo de escalonamento de ganho, controlo não linear, controlo robusto, controlo ótimo e Modelo de Controlo Preditivo (MPC).

No controlo de escalonamento de ganho, um sistema não linear é dividido em regiões lineares por partes. Para cada uma das regiões lineares, um controlador PI ou PID linear é projetado com um conjunto diferente de ganhos. Os reguladores PI ou PID, auto-ajustáveis, também são propostos na literatura para variar os ganhos do controlador com base no estado do sistema. Por exemplo, em [48], dois controladores PI são sintonizados para satisfazer as necessidades de calor dum sistema AVAC.

Para o projeto do controlador não linear, a lei de controlo pode ser derivada usando a teoria de estabilidade de Lyapunov, linearização da realimentação e técnicas de controlo adaptativo. A lei de controlo, é usada para direcionar o sistema não linear para um estado estável enquanto os objetivos de controlo são alcançados. Para manter condições de conforto satisfatórias em edifícios com baixo consumo de energia e custo de operação, é necessário o controlo de unidades de ar-condicionado. Num trabalho desenvolvido por Hamed Moradi et al., o controlo não linear duma unidade de tratamento de ar é investigado e comparado com duas abordagens de controlo: programação de ganho e linearização de "feedback". Neste trabalho, a temperatura interna bem como a humidade relativa são controladas através da manipulação das posições das válvulas de fluxo de ar e água fria [49].

O objetivo do controlo robusto, passa por projetar um controlador que funcione bem sob distúrbios que variam no tempo, bem como mudanças nos parâmetros. Exemplos de controlo robusto incluem controlo de temperatura de ar [50] e controlo de temperatura zonal [51].

O algoritmo de controlo ótimo, resolve um problema de otimização de forma a minimizar uma determinada função de custo. Os objetivos de otimização em sistemas AVAC, são geralmente minimização do consumo de energia e maximização do conforto térmico. Exemplos de trabalhos de controlo ótimo incluem controlo de armazenamento térmico ativo [52], controlo de armazenamento térmico passivo [53], otimização de energia do sistema AVAC [54] e controlo do aquecimento e arrefecimento do edifício [55].

As técnicas de controlo não linear são eficazes, mas requerem a identificação de estados estáveis bem como uma análise matemática complexa de forma a projetar o controlador. Para o design do controlo de escalonamento de ganhos, é necessária a identificação de regiões lineares e o projeto de lógica de comutação entre regiões, e a sintonização manual de vários controladores PID nestas regiões pode ser bastante complicada. O controlo ótimo e controlo robusto são técnicas promissoras para o controlo de sistema de aquecimento / arrefecimento uma vez que são capazes de rejeitar distúrbios e parâmetros que variam no tempo. Muitas dessas abordagens também exigem a especificação de parâmetros adicionais, o que pode ser difícil e impraticável para a integração neste tipo de sistemas.

Entre as abordagens de controlo rígido, o Modelo de Controlo Preditivo, é uma das técnicas mais promissoras devido à sua capacidade de integrar rejeição de perturbações, manipulação de restrições e controlo dinâmico lento bem como devido as estratégias de conservação de energia na formulação do controlador.

Originalmente desenvolvido para a indústria de refinação no final dos anos 70, o Modelo de Controlo Preditivo (MPC), foi estabelecido como o método principal de controlo avançado de processos, em muitos softwares de apoio à indústria [56].

O Modelo de controlo preditivo, é uma técnica de controlo moderna que tem sido aplicada com êxito em muitas áreas devido à sua capacidade de lidar com problemas de controlo restritos. Em cada intervalo de tempo, a ação de controlo ótima é obtida através da resolução de um problema de controlo ótimo num horizonte finito restringido.

Embora a conceção e implementação da estratégia de controlo MPC, possa ser feita de forma eficiente, a obtenção dum modelo de edifício é tipicamente a parte mais demorada, superando facilmente a vantagem de projetar um controlador convencional. O desempenho do MPC depende fortemente do seu modelo subjacente, contudo, não existe nenhum um software "plug-and-play" capaz de gerar um modelo do edifício que cumpra as necessidades do MPC. Assim, para cada edifício individual deve ser estabelecido um modelo específico (estrutura, localização, parametrização). Esta desvantagem é provavelmente a principal razão pela qual o uso do MPC ainda não se tornou amplamente adotado [57].

Outro aspeto, não menos importante, mas problemático é a vontade do pessoal atuante de adotar novas estratégias de controlo na automação de edifícios. Os sistemas de automação em edifícios existentes são bastante conservadores, especialmente em edifícios residenciais [58].

Apesar de a estratégia de controlo ser simples de implementar e requerer pouca capacidade computacional, a sua derivação já é mais complexa que a utilizada no PID, pelo que requer maior capacidade de processamento computacional [59]. Além disso quando são adicionadas restrições, a capacidade de computação requerida ainda é mais elevada. No entanto, dado o estado de desenvolvimento atual dos computadores esta desvantagem é quase que menosprezada. O desenvolvimento adequado do modelo do edifício para utilização no MPC é a tarefa mais desafiadora.

Por forma a resolver o problema da modelização do edifício, David Sturzenegger et.al introduz a caixa de ferramentas de MatLab da modelagem da capacitância e da resistência dum edifício que tem por objetivo facilitar a modelação física dos edifícios. A caixa de ferramentas, fornece um meio para gerar rapidamente modelos de tipo resistência-capacitância linear a partir de dados básicos de geometria, construção e sistemas de construção. No entanto, no geral a implementação e conceção de MPC para edifícios comerciais não é possível sem conhecimento de especialistas durante a fase de conceção e implementação [57].

No sector doméstico, o MPC tem sido aplicado em inúmeras estratégias de controlo de temperatura [60]; [61][62], com relatos de resultados experimentais encorajadores [63][64].

Quando aplicado no controlo climático de edifícios, o problema é formulado para as próximas horas ou dias, com base nas previsões das condições meteorológicas futuras. As previsões de quaisquer outras perturbações (por exemplo, ocupação), preços de eletricidade dinâmicos ou das

restrições podem ser facilmente incluídas na otimização. Assim, face aos factos apresentados é evidente que se trata do controlador com maior potencial de otimizar o uso de fontes renováveis de energia bem como facilitar a futura integração em redes de distribuição inteligentes.

O estudo apresentado por Grünenfelder e Tödli, foi um dos primeiros trabalhos que formularam o controlo do armazenamento térmico como um problema de otimização. O controlo dum simples sistema de água quente doméstica, considerando a previsão meteorológica e duas tarifas energéticas são discutidas neste artigo [65]. A aplicação da estratégia MPC destina-se, na área residencial, a equipamentos de ventilação, aquecimento, arrefecimento e ar condicionado (AVAC) com a intenção de minimizar as despesas energéticas para além de uma simples redução de energia consumida como é sugerido na investigação desenvolvida em [66]. De forma a oferecer a potência de AVAC agregada e flexível à rede, é proposta uma estrutura de contrato edifício-agregador-rede e formulado um algoritmo de MPC, robusto, que maximiza o lucro do agregador e minimiza o pagamento de cada edifício participante. Por último, os resultados de simulação num grupo de edifícios reais e hipotéticos validam a viabilidade do método proposto.

Sorin C. Bengea et al. [60], apresenta resultados experimentais da implementação dum modelo de controlador preditivo que otimiza o funcionamento dum unidade de AVAC, multizona, que serve um edifício comercial de tamanho médio. A abordagem de controlo empregue, utiliza estimativas dinâmicas e previsões de carga e temperatura por zona, bem como condições climáticas externas de forma a minimizar o consumo de energia, ao mesmo tempo, em que atende às restrições de conforto e de equipamentos térmicos.

Christofer Sundström et.al, dedicam-se à investigação de distribuir eficientemente o consumo de energia doméstico com base no custo energético. O sistema de gestão de energia implementado usa um controlador MPC que tem em considerações informações futuras, como preço spot de eletricidade e previsões meteorológicas, mas também restrições como potência máxima global limitada e níveis de conforto. Com este modelo, Christofer Sundstrom et al. pretendem controlar a temperatura dum sistema de aquecimento de águas sanitárias. Nesta investigação é dada ênfase ao dimensionamento do reservatório de água uma vez que, um tanque maior requer horizontes de previsão mais longos para alcançar a redução de custo adicional. Além disso, é concluído que uma melhoria significativa no custo elétrico total é alcançada [67].

Um trabalho apresentado por C.Sundström et.al, demonstra os esforços no sentido das economias de energia que podem ser alcançadas num sistema de aquecimento de edifícios, aplicando o Modelo de Controlo Preditivo (MPC) e usando previsões meteorológicas. A formulação básica do MPC é descrita com ênfase na aplicação de controlo de construção e testado num edifício real em Praga, na República Checa [67].

Yi Zong et.al, apresenta a estratégia de Modelo de Controlo Preditivo Económico (EMPC), para a gestão de energia em edifícios inteligentes, que atua interagindo com sistemas de energia inteligentes. Os desafios encontrados durante a implementação da EMPC para a gestão ativa da procura são investigados em detalhes neste artigo. Um estudo de teste piloto mostra economia de energia e deslocamentos de carga podem ser alcançados através da aplicação EMPC com previsão do tempo e sinais de preço dinâmico de energia [68].

Em [69], os investigadores propõem um modelo distribuído de arquitetura de controlo preditivo que calcula a temperatura do ar de entrada e a taxa de fluxo. Este trabalho, assume um sistema determinista com previsão perfeita das futuras condições climáticas ambientais e ganhos de calor internos que, por sua vez, são de natureza estocástica. O objetivo do controlo, é manter as temperaturas da zona dentro da faixa de conforto, enquanto, consome a menor energia possível. Este feito é conseguido usando conhecimento preditivo de meteorologia e ocupação. Primeiro, é apresentado um sistema não linear de duas massas, simplificado para modelar a dinâmica da zona térmica. Em segundo lugar, um controlo preditivo baseado em modelo distribuído é projetado para aquecimento e arrefecimento ideal.

Um estudo desenvolvido por Giancarlo Mantovani et.al, aborda o problema do controlo de energia térmica numa superfície comercial, através da aplicação de estratégias de Modelo de controlo preditivo. Em particular, este artigo utiliza um centro comercial existente como caso piloto, que se caracteriza por um grande espaço de andar comum. Este artigo explora a importância dos parâmetros MPC, nos ganhos energéticos e em níveis de conforto. Além disso, aborda algumas extensões notáveis, desde a otimização económica, que abre caminho para técnicas de preço em tempo real e integração com sistema de produção de energia renovável [70].

R. Godina et al., desenvolve um trabalho que tem por objetivo demonstrar a influência do ajuste dos pesos do MPC, nos equipamentos domésticos de arrefecimento e aquecimento tendo por objetivo reduzir o consumo e o custo energético. Neste trabalho, três aparelhos domésticos são utilizados para avaliação: o controlo de temperatura ambiente por AC, aquecimento de águas bem como um frigorífico. No entanto, apenas é utilizado um sistema tarifário de eletricidade, bem como apenas é realizada a simulação para apenas 24 horas [63].

Uma outra abordagem para aplicações domésticas com necessidades de arrefecimento ou aquecimento, é apresentada por David Oliveira et al. No estudo em questão, um controlador preditivo minimiza o consumo de energia, enquanto, simultaneamente, satisfaz a necessidade de arrefecimento e aquecimento, atendendo também às restrições operacionais das cargas. Neste trabalho, dado o paradigma atual, tal como apresentado no subcapítulo 2.1, surge a necessidade de integração da produção renovável na formulação do problema de minimização do MPC. Assim sendo, o impacto do Modelo de controlo preditivo, numa residência com sistema fotovoltaico, é analisado, tendo em foco as poupanças de energia alcançadas. São então apresentadas varias simulações diárias em que se utilizam tarifas energéticas canadianas [71].

No entanto, muitos autores constataam que um grande entrave no controlo inteligente de cargas domésticas, é como gerir as previsões meteorológicas. Em geral, as estratégias preditivas (no sentido de explicar as previsões meteorológicas e a sua incerteza) revelam-se mais eficientes e promissoras em comparação com as estratégias convencionais não preditivas no controlo térmico dos edifícios. No entanto, é importante considerar também a incerteza das previsões. Assim, em [72], [73], [74] as incertezas são consideradas, mesmo que de maneiras diferentes.

Em [72], os autores incorporam um modelo estocástico de ocupação dentro do ciclo de controlo. Os autores de [73] em vez disso, propõe um regulador de temperatura de construção predi-

tivo estocástico onde as perturbações do tempo e da carga são modeladas como processos gaussianos.

No estudo apresentado em [74], também é utilizado um MPC estocástico e previsões meteorológicas. Este controlador faz uso de previsões meteorológicas para calcular a quantidade de energia que os atuadores necessitam de fornecer para manter a temperatura ambiente nos níveis de conforto necessários.

No trabalho realizado em [75], é apresentada uma estratégia MPC com a finalidade de melhorar o controlo de temperatura de unidades AVAC, operando diretamente com as incertezas e restrições associadas. Os resultados dos testes mostram que a estratégia proposta tem muito mais robustez do que a estratégia de controlo PI convencional, quando o sistema experimenta uma ampla gama de condições operacionais.

Face aos trabalhos prévios realizados e apresentados neste capítulo, pretende-se com a presente dissertação seguir a tendência atual de considerar as estratégias de Controlo Preditivo Modelo. Esta técnica de controlo é popular principalmente devido à sua capacidade de lidar com problemas multivariável, bem como devido à capacidade de incorporar restrições para as variáveis manipuladas e controladas. No entanto, não foram só estas as razões que levaram ao seu uso, o MPC começou a ser adotado em edifícios com o intuito de controlo climático, devido à dinâmica lenta dos edifícios, o que torna significativo o facto de explorar as previsões.

O papel desta dissertação é, portanto, analisar, o contributo do controlador MPC na redução da fatura elétrica a pagar, quando aplicado em equipamentos domésticos. Nesta dissertação serão considerados três equipamentos, o Ar-Condicionado, Termo-acumulador de água e o Frigorífico.

Especificamente, este trabalho, descreve detalhadamente a implementação de estratégias MPC em equipamentos domésticos. Ao fazê-lo, conseguimos algumas contribuições específicas, que podem ser resumidas em:

- Projetar e executar modelagem e identificação de sistemas de edifício, Ar-condicionado, Termo-acumulador de água e Frigorífico. De forma a inferir a importância de ter modelos atuadores precisos;
- Adaptar os esquemas clássicos de MPC a uma habitação localizada em Portugal. Tendo como objetivo compreender quais as contribuições que podem ser alcançadas com a utilização deste controlador em território Português;
- Através de simulações compreender quais são as tarifas, disponíveis, que mais beneficiam o uso da estratégia MPC.
- Apresentar várias estratégias de pesos associados às várias tarifas propostas, que sejam capazes de satisfazer as restrições impostas e , ao mesmo tempo reduzir a fatura de eletricidade.
- Apresentar comparações com os atuais controladores normalmente utilizados nestes equipamentos, o controlo ON / OFF e o controlador PID. Assim serão explanadas as vantagens

de implementar esquemas de controlo avançado e o que pode realmente ser salvo em termos económicos.

- Incluir um sistema fotovoltaico na habitação proposta, de modo a compreender quais as vantagens da utilização do controlo MPC na otimização dos consumos energéticos provenientes do sistema PV.

Através deste trabalho de dissertação, o problema da formulação da função de custo para o controlo preditivo de equipamentos residenciais e armazenamento térmico ativo em Portugal é abordado. Para atingir os objetivos propostos, foi desenvolvida uma estrutura de simulação para testar diferentes algoritmos de controlo. O desenvolvimento do código-fonte da estrutura de simulação baseia-se em ferramentas como MATLAB, SIMULINK e bibliotecas associadas.

Os resultados das múltiplas simulações em vários cenários tarifários, para a mesma investigação, também forneceram reflexões sobre a escolha dos parâmetros de sistema a utilizar. A abordagem para a formulação de problemas de controlo ótimo convexo que é derivada nesta tese é uma contribuição original à literatura existente sobre o tópico de formulações de problemas de controlo ótimo em equipamentos domésticos.

Capítulo 3

Formulação matemática

Neste capítulo, será apresentada a formulação matemática dos vários controladores propostos, isto é, o controlador Proporcional Integral Derivativo, bem como o Modelo de Controlo Preditivo utilizado na presente dissertação.

3.1 Controlador Proporcional Integral Derivativo

O primeiro passo a dar, quando se decide utilizar controladores standards P, PI, PD, PID tem como principal objetivo, a escolha dos modos a utilizar (proporcional, derivativo, integral, ou uma combinação destes). Após a conclusão do primeiro passo, procede-se ao ajustamento dos vários parâmetros do controlador. O ajustamento consiste em através das respostas do sistema, quando sujeito a determinadas entradas, deduzir os referidos parâmetros. A grande vantagem deste procedimento, passa por não existir necessidade de conhecer à priori o modelo do sistema.

Os controladores PID, ao longo dos anos alcançaram o status de controlador mítico. Quando uma variável física precisa ser controlada - temperatura, velocidade angular, posição, taxa de fluxo, etc. - o poder de PID é invocado, e com PID vem a esperança confiante de sucesso rápido. A popularidade e o renome do PID não são necessariamente imerecidos. O controlo PID é elegante, flexível e robusto, e já provou a sua eficácia em inúmeras aplicações práticas. No entanto, é possível que o nosso conhecimento acerca do PID exceda em muito a nossa experiência com ele, especialmente considerando que as implementações PID são muitas vezes escondidas dentro dos chamados controladores lógicos programáveis (PLC's), com vários detalhes de baixo nível abstraídos do usuário.

Por forma a compreender melhor o funcionamento do controlador proporcional integral derivativo, divide-se a sua estratégia de atuação em três partes:

- **Compensação proporcional:** A função principal do compensador proporcional é introduzir um ganho proporcional, K_P à leitura de erro que é produzido comparando a saída e a entrada do sistema.

- **Compensação derivada:** Num sistema de realimentação unitário, o compensador derivativo introduzirá a derivada do sinal de erro multiplicada por um ganho K_D . Por outras palavras, a inclinação da forma de onda do sinal de erro é o que será introduzido na saída. O seu principal objetivo é então melhorar a resposta transitória do sistema global em malha fechada.
- **Compensação integral:** Num sistema de realimentação unitário, o compensador integral introduzirá o integral do sinal de erro multiplicado por um ganho K_I . Isto significa que a área sob a curva do sinal de erro irá afetar o sinal de saída. Assim, é importante notar que esta faceta do controlador irá melhorar o erro de estado estacionário do sistema global em malha fechada.

Tabela 3.1: Domínio do controlador proporcional integral derivativo

Compensação	Domínio do tempo	Domínio-S
Proporcional	$K_P e(t)$	K_P
Derivado	$K_D \frac{\partial}{\partial t} e(t)$	$K_D s$
Integral	$K_I \int_0^t e(x) d(x)$	$\frac{K_I}{s}$

Portanto, um controlador PID pode ser descrito matematicamente como:

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{\partial}{\partial t} e(t) + K_I \int_0^t e(x) d(x) \quad (3.1)$$

Onde $e(t)$, representa o erro, t representa o tempo e x o tempo de integração.

$$u(s) = K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (3.2)$$

Por nenhuma outra razão, senão a simplicidade, pode-se ver que o domínio s é usado exclusivamente quando se analisa ou projetam sistemas análogos, uma vez que trabalhar com frações é sempre mais fácil do que fazer integração e / ou derivadas de todo o intervalo. Se tomarmos agora o que descrevemos como um controlador PID e aplicando-o a um sistema, por exemplo, um sistema de controlo da temperatura de águas, temos que o diagrama de blocos resultante, será da mesma natureza que o que se na Figura 3.1.

Quando o sinal de realimentação é recebido, este é comparado com o valor desejado ou o ponto de ajuste. Com base nessa comparação, faz-se um cálculo da resposta necessária para fazer com que o sinal de realimentação corresponda ao ponto de referência. O objetivo desta dissertação passa por apresentar um controlo PID, inteligente, que controla um conjunto de cargas domésticas, através da observação em tempo real do erro. A partir desta observação, ajustam-se os parâmetros de modo a aproximar o máximo possível a trajetória do sinal de saída com o sinal de referência.

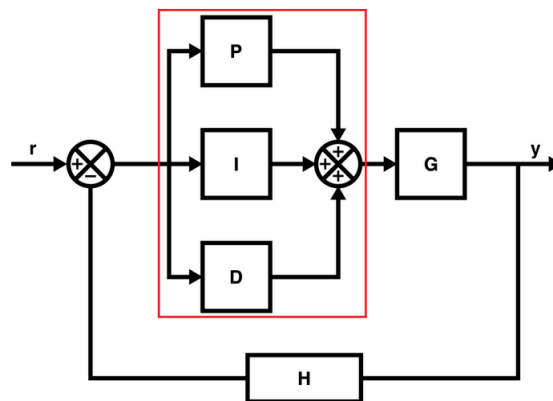


Figura 3.1: Estratégia do controlador proporcional integral derivativo, [76].

No entanto, mesmo um controlador PID que tenha sido bem sintonizado na sua colocação em funcionamento, pode funcionar incorretamente devido às alterações nas condições de funcionamento. Para obter bons efeitos de controle, existem três métodos comuns para ajustar o controlador PI / PID em sistemas térmicos: manual, autoajuste e métodos de controle adaptativo.

Com o ajuste manual, o operador executa testes diferentes para determinar os parâmetros que caracterizam o processo. São então utilizadas regras empíricas, simples, para determinar os parâmetros do controlador a partir das estimativas dos parâmetros do processo. Seborg et al. revisa os métodos de afinação manual [77].

O autoajuste, tem sido amplamente aplicado com sucesso em muitos campos industriais [78]. Um controlador de autoajuste, assume que o processo sob controle, tem inicialmente parâmetros desconhecidos, mas constantes durante a operação normal, de modo que os parâmetros possam ser estimados por um teste de etapa ou retorno de relé. Pinnella et al., propuseram um método de autoajuste para um controlador integral [79]. Brandt, explorou o controle de autoajuste em sistemas AVAC [80]. Åström et al., descreve um método de ajuste para um controlador digital geral com base na realimentação do relé para instalações AVAC em que o método de design de controle é baseado na colocação de pólos [81].

Para distúrbios de carga térmica, a maioria dos sistemas térmicos, apresenta características dinâmicas que variam no tempo, nas quais os parâmetros do sistema são variáveis durante a operação, portanto, não é suficiente usar um controlador de autoajuste. De acordo com Åström e Wittenmark, um controlador de ganho fixo deve ser usado para sistemas com dinâmica constante, e métodos de controle adaptativo devem ser usados para processos com dinâmica variável no tempo [78]. Portanto, devem-se usar métodos de controle adaptativo no campo de sistemas térmicos de forma a alcançar resultados mais satisfatórios.

3.2 Modelo de Controlo Preditivo

Modelo de Controlo Preditivo (MPC), foi originalmente desenvolvido no final dos anos setenta com o propósito de ser utilizado nas indústrias de processo, isto é, refinarias de petróleo, açúcar, indústria química, etc. No entanto, nos últimos anos, tem recebido especial atenção da comunidade investigadora, pelo que foram alcançados avanços consideráveis, nomeadamente na área de aplicação.

O MPC, designa não uma estratégia de controlo em específico mas sim um amplo range de estratégias de controlo que fazem uso explícito do modelo de processo para obter um sinal de controlo e ao mesmo tempo minimizar uma função objetivo, que pode estar sujeita a restrições. Um modelo dinâmico, é utilizado para prever o efeito de futuras ações de controlo, estas ações são determinadas minimizando o erro previsto sujeito a restrições operacionais. As otimizações, são então repetidas em cada período de amostragem com informações atualizadas sobre o processo.

Os vários algoritmos MPC apenas diferem entre si no modelo usado para representar o processo, no ruído, e na função objetivo a minimizar. Considera-se então, que o MPC é um tipo de controlo de natureza aberta, isto é, o seu raio de aplicação é muito alargado pelo que muitos desenvolvimentos têm sido desenvolvidos fazendo com que o MPC se torne amplamente aceite pelo mundo académico e industrial. Além disso, trata-se dum modelo robusto, perante distúrbios e que possui capacidade de prever o desempenho dos modelos num horizonte de controlo [82].

Desta forma o uso do controlo MPC apresenta bastantes vantagens face aos seus concorrentes diretos na medida em que:

- **Simplicidade** — É particularmente atrativo para quem tem conhecimento limitado acerca de controlo na medida em que é bastante intuitivo e ao mesmo tempo bastante simples de deferir pesos;
- **Polivalência** — Este controlo pode ser aplicado a um grande numero de processos, desde processos bastante simples até processos mais complexos, incluindo sistemas com resposta lenta e até em sistemas instáveis;
- **Capacidade de suportar varias variáveis** — É capaz de controlar múltiplas entradas de sistema bem como múltiplas saídas.

3.2.1 Estratégia do Modelo de controlo preditivo

A metodologia de todos os controladores da família do MPC são caracterizados pela seguinte estratégia apresentada na Figura 3.2

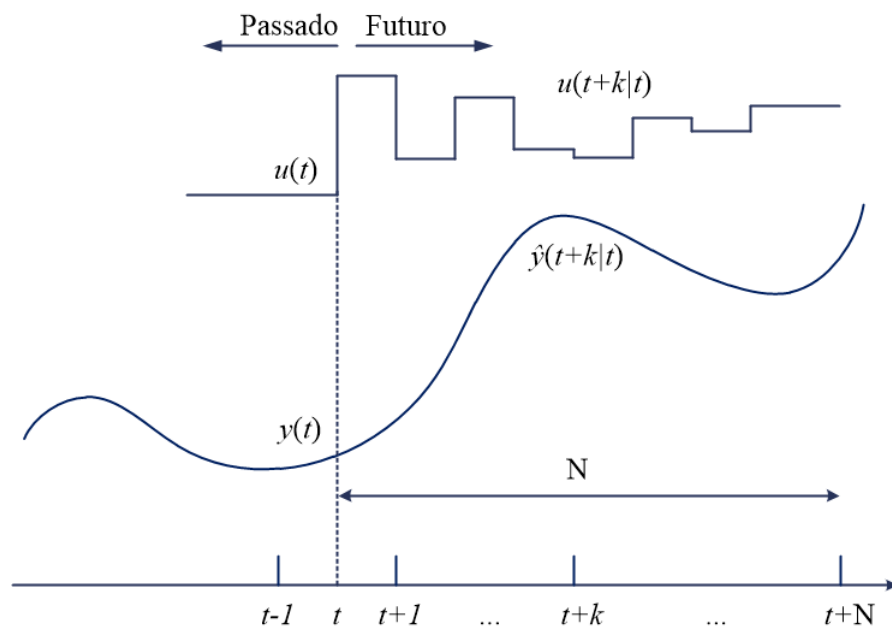


Figura 3.2: Estratégia do Modelo de controlo preditivo, [82], adaptado

As saídas futuras dum determinado horizonte N , denominado horizonte de predição, são calculadas em cada instante de tempo t , usando o modelo de processo. O cálculo das saídas preditivas $y(t+k|t)$ para $k = 1 \dots N$ depende dos valores conhecidos até ao instante t (valores passados das entradas e saídas), bem como dos valores futuros de controlo $u(t+k|t)$, $k = 0 \dots N-1$, que serão enviados para o sistema e calculados.

Os sinais de controlo futuros, são calculados através da otimização dum determinado critério, de modo que o processo se aproxime da trajetória referencia $w(t+k)$ o máximo possível. É usual que este critério tenha a forma duma função quadrática dos erros entre o sinal de saída previsto e o sinal referencia previsto.

O sinal de controlo $u(t|t)$ é enviado para o processo enquanto, que o próximo sinal de controlo é rejeitado, porque no próximo instante de tempo, $y(t+1)$ já é conhecido e por isso volta-se ao início do ciclo com este novo valor e desta forma todas as sequências são atualizadas. Portanto, o sinal de controlo $u(t+1|t+1)$ é calculado de forma diferente ao sinal $u(t+1|t)$ uma vez que já dispõe de nova informação disponível.

A estratégia do modelo de controlo preditivo contem então componentes básicos de predição, otimização e implementação do horizonte de recuo. Um sumário de cada um destes temas será apresentado nos subcapítulos seguintes.

3.2.2 Predição

As saídas futuras do MPC, que irão controlar o modelo, são previstas usando um modelo dinâmico do sistema. No caso de sistemas lineares de tempo discreto com representação de espaço de estados temos:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3.3)$$

Em que $x(k)$ e $u(k)$, são o estado do modelo e o vetor de entrada no k^{nd} intervalo de tempo respectivamente. Dada uma sequência de entradas prevista, a sequência correspondente de previsões de estado é gerada simulando-se o modelo ao longo do horizonte de predição, ou seja, N intervalos de amostragem [82]. Por conveniência de notação, estas sequências previstas são frequentemente empilhadas em vetores u, x definidos por:

$$u(k) = \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N-1|k) \end{bmatrix}, \quad x(k) = \begin{bmatrix} x(k+1|k) \\ x(k+2|k) \\ \vdots \\ x(k+N|k) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Onde $u(k+i|k)$ e $x(k+i|k)$ representam o vetor de estado no instante $k+i$ que é previsto no instante de tempo k , e $x(k+i|k)$ e portanto, evolui de acordo com seguinte o modelo de predição:

$$x(k+i+1|k) = Ax(k+i|k) + Bu(k+i|k), \quad i = 0, 1, \dots \quad (3.5)$$

Com a condição inicial, ou seja, o início do horizonte de predição, é definido da seguinte forma:

$$x(k|k) = x(k) \quad (3.6)$$

3.2.3 Otimização

A estratégia do controlo preditivo realimentado é computorizado através da minimização do custo de desempenho preditivo, que é definido em termos das sequências previstas u, x [82]. Em termos de custo quadrático, o custo previsto tem a forma geral:

$$J(k) = \sum_{i=0}^N [x^T(k+i|k)Qx(k+i|k)u^T(k+i|k)Ru(k+i|k)] \quad (3.7)$$

Onde Q, R são matrizes positivas definidas (Q pode ser positiva semidefinida). Claramente que $J(k)$ é uma função de $u(k)$, e a ótima sequência de entrada para o problema de minimização de $J(k)$ é denotado $u^*(k)$:

$$u^*(k) = \arg \min J(k) \quad (3.8)$$

Se o modelo está sujeito a restrições de entrada e de estado, então estas podem ser incluídas na otimização como restrições equivalentes de $u^*(k)$.

3.2.4 Implementação do horizonte de previsão

O horizonte de controlo finito para as futuras saídas do sistema é denominado de horizonte de previsão N . Este intervalo de tempo implica que um conjunto de saídas futuras seja estimado em cada instante da amostragem k . Assim as futuras saídas estimadas, são formuladas como $y(k+i|k)$. Em que, k representa o intervalo de controlo corrente e $k+i$ denota o instante de tempo associado à predição de estados futuros. Os sinais de controlo futuros $u(k+i|k), i = 0 \dots P-1$, em que P é o horizonte de controlo, são estimados através dum critério de desempenho satisfatório ou função custo. Querendo com isto dizer que, o conjunto de entrada calculado, é composto pelas atuais entradas, $u(k)$ e $P-1$ entradas futuras. Estas entradas são estimadas de tal forma que as futuras saídas $y(k+i)$ permitam que o sistema alcance à referência de forma ótima [83].

Uma técnica para obter a síntese do controlador de realimentação a partir do conhecimento dos controladores de malha aberta, é medir o estado do processo de controlo atual e de seguida calcular muito rapidamente a função de controlo em malha aberta. A primeira parte desta função é então utilizada durante um curto intervalo de tempo, após isto, é realizada uma nova medição do estado de processo e é calculada uma nova função de controlo em malha aberta para esta nova medição. O procedimento é então repetido.

Assim apenas o primeiro elemento da sequência de entrada preditiva ótima é introduzido na planta:

$$u(k) = u^*(k|k) \quad (3.9)$$

O processo de computar $u^*(k)$ minimizando o custo previsto e implementando o primeiro elemento de u^* é então repetido em cada instante de tempo $k = 0, 1, 2, \dots$

É também importante realçar que o horizonte de previsão permanece sempre com tamanho, apesar da repetição do processo de otimização em instantes de tempo futuros. Uma vez que as previsões de estado x e, portanto, a sequência de entrada ótima u^* dependem da medição de estado atual $x(k)$, este procedimento introduz um parecer acerca do estado do sistema, proporcionando assim um grau de robustez a erros de modelação e incertezas.

Uma segunda característica da abordagem do horizonte de retrocesso, é que, ao deslocar-mos continuamente o horizonte sobre o qual as entradas futuras são otimizadas, o modelo constantemente ajusta de forma ótima as saídas futuras e desta forma os comandos futuros anteriormente

previstos podem não coincidir com a estratégia efetivamente aplicada no momento da sua atuação [83].

Desde que o custo e as restrições sejam projetadas corretamente, uma estratégia de horizonte de retrocesso pode garantir que o desempenho do sistema em malha fechada seja pelo menos tão bom quanto o da previsão ótima.

3.2.5 Metodologia de restrições

Além das óbvias restrições de igualdade que o estado e a entrada deve satisfazer face à dinâmica do modelo, são também encontradas restrições de desigualdade nas variáveis de entrada e de estado dum problema de controlo. Embora as restrições de igualdade sejam normalmente tratadas implicitamente, as restrições de desigualdade são impostas como restrições explícitas dentro do problema de otimização [84].

Restrições de entrada-Estes podem ter a forma de restrições absolutas, isto é:

$$\underline{u} \leq u(k) \leq \bar{u} \quad (3.10)$$

Ou sobre a forma de restrição de taxa:

$$\underline{du} \leq u(k) - u(k-1) \leq \overline{du} \quad (3.11)$$

Restrições de estado- As restrições lineares de estado é têm a seguinte fórmula geral:

$$\underline{g_c} \leq G_c x(k) \leq \overline{g_c} \quad (3.12)$$

Onde G_c é uma matriz constante e $\underline{g_c}$, $\overline{g_c}$ são vetores constantes.

As restrições podem ser classificadas como rígidas ou suaves. As restrições rígidas devem sempre ser satisfeitas, e se isso não for possível, o problema é inviável. Por outro lado, restrições suaves apresentam um carácter mais flexível e por isso se for necessário são violadas para evitar a inviabilidade do sistema [84].

3.2.6 Inclusão de estratégias de pesos no Modelo de Controlo Preditivo

O índice de desempenho do MPC é construído usando uma função quadrática que tem em atenção o valor do erro entre o sinal futuro de saída estimado, $y(k+i)$, e a referência, $r(k+i)$, de forma a obter a lei de controlo $u(k)$. Do ponto de vista do sistema de controlo, a função de custo consiste em três termo padrão, cada um com um fator de peso que penaliza o esforço da variável de predição. Por outras palavras, são estabelecidos objetivos de controlo com uma penalidade de

saída, uma penalidade de entrada e uma penalidade de taxa de entrada [85]. Desta forma é possível construir uma expressão geral para função objetivo, dada por:

$$\min \phi(P, N) = \phi_y + \phi_u + \phi_{\Delta u} + \phi_\varepsilon \quad (3.13)$$

Onde ϕ_y otimiza o erro em relação à trajetória de referência de saída, ϕ_u é o sinal de controlo do erro face à trajetória, ϕ_u minimiza o aumento do sinal de controlo e ϕ_ε está associado a violações de restrições. Uma vez que a função de custo tem uma forma quadrática, uma metodologia de programação quadrática (QP) gera um possível vetor de entrada Ψ , da seguinte forma:

$$\Psi = [u(k|k)^T u(k+1|k)^T \dots u(k+p-1|k)^T] \quad (3.14)$$

No caso dos equipamentos domésticos, apenas é necessário um modelo de entrada e saída única (SISO). Portanto, o número de variáveis de saída é limitado a um.

O índice de desempenho para minimizar o erro de trajetória, ϕ_y , é dado da seguinte forma:

$$\phi_y = \sum_{i=1}^N \{ \omega_i^y [r(k+i|k) - y(k+i|k)] \}^2 \quad (3.15)$$

Onde $r(k+i|k)$ define a referência, $y(k+i|k)$ representa a saída estimada multiplicada por um fator peso ω_i^y .

O sinal de controlo do erro face à trajetória é representa-se por:

$$\phi_u = \sum_{i=1}^P \{ \omega_i^u [u(k+i|k) - u_t(k+i|k)] \}^2 \quad (3.16)$$

Em que $u(k+i|k)$ representa o sinal de controlo, $u_t(k+i|k)$ define o objetivo a ser alcançado. A diferença é também multiplicada por um peso, ω_i^u de forma a dar mais ou menos importância à diferença.

Variações bruscas no sinal de entrada são também penalizadas de forma a não permitir mudanças bruscas nas variáveis de entrada. Assim podemos escrever da seguinte forma:

$$\phi_{du} = \sum_{i=1}^P \{ \omega_i^{du} [u(k+i|k) - u_k(k+i-1|k)] \}^2 \quad (3.17)$$

Onde $u(k+i-1|k)$ é o sinal de entrada referente ao período $k-1$, ou seja o período anterior período, ω_i^{du} penaliza grandes diferenças entre instantes de tempo sucessivos.

O índice de desempenho das restrições violadas é formulado segundo:

$$\phi_\varepsilon = \rho_\varepsilon \varepsilon_k^2 \quad (3.18)$$

Onde ρ_ε é o peso de violação da restrição e ε_k é uma variável de folga no intervalo de controlo k .

Os pesos ω_i^u e ω_i^y devem ser afinados de forma a garantir o desempenho esperado do sistema. Por exemplo, dando mais importância ao peso ω_i^y em relação ao peso ω_i^u , o controlador terá como objetivo estimar os conjuntos sucessivos de saídas futuras que minimizam as divergências previstas a partir do ponto de referência. Por outro lado se ω_i^u for superior a ω_i^y , então o intervalo entre a referência e a saída do sistema irá aumentar [62].

O modelo de controlo preditivo pode ser implementado considerando as restrições no problema de minimização, isto é, fixando limites de amplitude bem como as taxas de variação das variáveis. Assim o controlador irá forçar o sistema a operar dentro dos limites estabelecidos.

Adicionalmente, a formulação do MPC em programação quadrática é dada pela equação 3.13 e pelas seguintes expressões:

$$y_{min}(i) - \varepsilon_k \zeta_{min}^y(i) \leq y(k+i|k) \leq y_{max}(i) + \varepsilon_k \zeta_{min}^y(i), \quad i = 1 : N \quad (3.19)$$

$$u_{min}(i) - \varepsilon_k \zeta_{min}^u(i) \leq u(k+i-1|k) \leq u_{max}(i) + \varepsilon_k \zeta_{min}^u(i), \quad i = 1 : N \quad (3.20)$$

Onde y_{min} e y_{max} representam os limites mínimos e máximos das saídas futuras, o parâmetro ζ é uma constante adimensional do controlador, para além disso as margens superior e inferior do sinal de controlo são representadas por u_{max} e u_{min} respetivamente [14].

3.3 Modelo de controlo preditivo em edifícios residências.

O Modelo de Controlo Preditivo, apresenta capacidade de lidar com problemas de controlo restritos, pelo que uma das razões frequentemente utilizadas em sua defesa, é que de facto, podem ser obtidas economias de energia na construção de controlos climáticos, mantendo as condições de conforto, dentro dos padrões estabelecidos. As suas capacidades de incorporar facilmente previsões meteorológicas e fazer uso do edifício como um armazenamento térmico, contribuem para a antecipada preparação do edifício face as condições meteorológicas que se precedem.

As previsões de quaisquer outras perturbações, por exemplo, ganhos internos, preços de electricidade dinâmicos ou restrições de conforto térmico podem também ser facilmente incluídas no problema de otimização. Contudo, o uso de previsões meteorológicas na construção do controlo climático não é, no entanto, simples, uma vez que as previsões meteorológicas estão sujeitas a erros, o que introduz uma certa incerteza no problema de controlo resultante [72]. Para se obter um bom desempenho de controlo, é crucial explicar corretamente essas incertezas ao controlador.

Uma segunda razão pela qual o MPC é apropriado para o controlo climático é o facto de que as normas de construção exigem que a temperatura ambiente não seja satisfeita em todos os momentos, permitindo desta forma violações durante uma fração predefinida do tempo. Desta forma em cada intervalo de controlo é formulado e resolvido um problema de controlo ótimo com um horizonte finito.

Dada a natureza do controlador, o resultado do problema de otimização é uma sequência de movimentos de controlo ótimos que direciona o sistema (ou saídas) para uma dada referência, respeitando as restrições do sistema (tais como os limites superiores e inferiores da temperatura) e minimizando um critério de desempenho (Erro de temperatura e custo mínimo). O objetivo da estratégia de controlo MPC para os problemas de aquecimento / arrefecimento que consumam eletricidade passa por minimizar o custo total da energia usada no aquecimento num horizonte de previsão, maximizando também a eletricidade gerada na instalação fotovoltaica local. Ao mesmo tempo, deve manter a temperatura do ar interior próxima da temperatura de referência.

Em termos de aplicação ao setor dos edifícios, isto significa que, na fase de controlo atual, um plano de aquecimento / arrefecimento etc. é obtido para as várias horas ou dias seguintes, com base nas previsões disponíveis. Assim sendo o primeiro valor do plano de controlo é aplicado ao edifício, ajustando todos os elementos de aquecimento e arrefecimento, de seguida o processo avança para o instante seguinte e o procedimento é repetido.

É a abordagem de horizonte de retrocesso que possibilita a realimentação do sistema, uma vez que o novo problema de controlo ótimo é resolvido no início do próximo intervalo de tempo e desta forma irá existir uma nova função de estado nesse momento fruto de quaisquer distúrbios que tenham agido sobre o edifício.

A Figura 3.3, resume o princípio básico do MPC para controlo de temperatura em edifícios. Os parâmetros que variam no tempo (isto é, o preço da energia, os critérios de conforto e meteorologia) são entradas do controlador MPC. Pode-se constatar, que a modelagem e o projeto consiste em especificar um modelo dinâmico do edifício, identificar as restrições do problema de controlo bem como identificar uma função de custo que encapsula o comportamento desejado. Desta forma em cada intervalo de amostragem, estes componentes são combinados e convertidos num problema de otimização, dependendo da estrutura MPC escolhida.

Geralmente, o objetivo principal é minimizar o custo de energia, respeitando as restrições de conforto, o que pode ser formalizado pela seguinte função de custo:

$$l_k(x_k, u_k) = (Y_k - y_{r,k})^T Q_k (Y_k - y_{r,k}) + R_k u_k \quad (3.21)$$

Onde Q_k e R_k são matrizes com variação temporal de tamanho apropriado e Y_k e $y_{r,k}$, o sinal de referência no tempo k . A troca entre a precisão do seguimento da trajetória de referência e o consumo de energia é expresso pela proporção das matrizes Q_k e R_k . O seguimento da trajetória de referência é expresso como uma forma quadrática, porque penaliza significativamente os maiores desvios da referência. A fatura energética é geralmente uma função afetada pela quantidade total de energia consumida nos diferentes períodos. Portanto, o custo de controlo é ponderado linear-

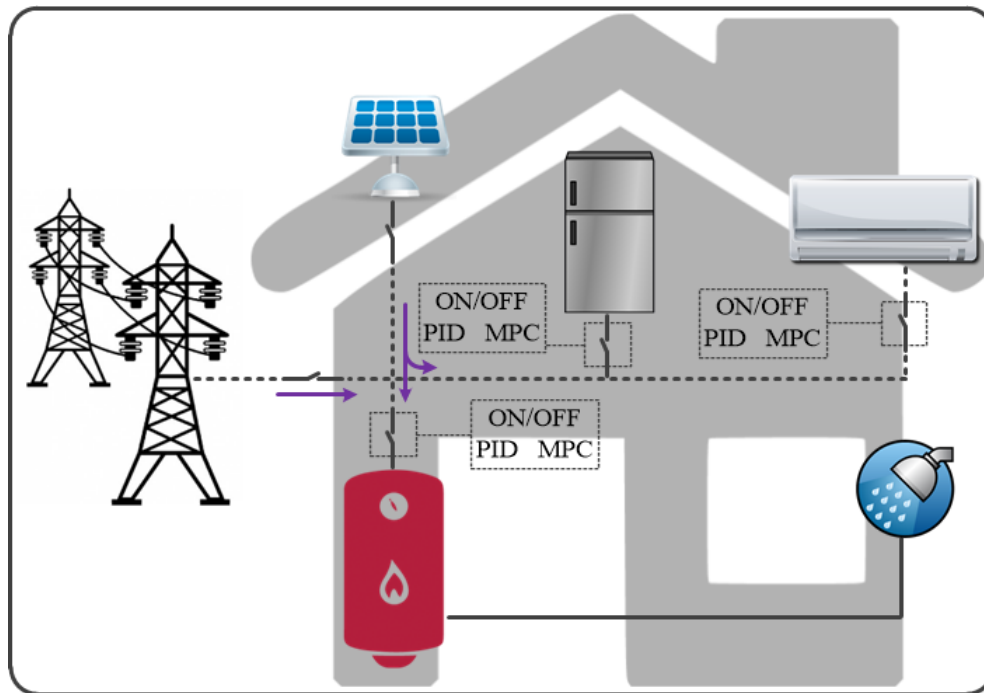


Figura 3.3: Princípio básico de funcionamento dos controladores propostos em edifícios.

mente. A equação 3.21 não é a única função de custo aplicável ao controlo de edifícios. Pode haver, por exemplo, penalização para procura de energia em alturas de pico que pode ser expressa pela norma l^∞ das entradas de controlo na função de custo.

Na Figura 3.3, encontra-se representado um esquema ilustrativo da estratégia que será utilizada nesta dissertação. Assim como indica a figura, os três controladores em estudo, irão controlar cada um dos equipamentos domésticos propostos, em ambos os cenários propostos no Capítulo 5. Adicionalmente, é incluído um sistema fotovoltaico na habitação, este sistema tem a função de potencializar as melhorias possíveis de alcançar, com a adoção duma estratégia MPC com e sem pesos nas variáveis.

Capítulo 4

Modelo de edifício e identificação do sistema

A modelização de sistemas, tornou-se uma área muito importante em qualquer domínio do conhecimento: na política, na economia, na agricultura, na saúde, na química e de uma forma mais generalizada, no domínio da engenharia. Assim, uma definição genérica de modelo é dada em [86]. Eykhoff, defende que o modelo de um sistema é como uma representação dos aspetos essenciais dum dado sistema existente, ou a construir, que apresenta o conhecimento do referido sistema de forma útil. Com isto, pode-se concluir que o modelo é uma representação simplificada do sistema que por sua vez, serve de ferramenta para qualquer outra tarefa. Dado que a modelização de sistemas é uma abstração da realidade, é usual que o resultado seja uma equação matemática. O modelo de sistema é caracterizado e definido através das variáveis de entrada e saída conhecidas, mas também através das eventuais entradas desconhecidas.

4.1 Modelos térmicos dinâmicos

O MPC requer inerente-mente um modelo apropriado da planta controlada do sistema, que será então usada para o cálculo dos sinais de controlo ótimos. Esse modelo, deve ser suficientemente preciso, a fim de produzir previsões válidas das variáveis relevantes (por exemplo, a temperatura ambiente, temperatura de água ou até mesmo temperatura interior de um frigorífico), mas ao mesmo tempo, o modelo deve ser o mais simples possível para que a tarefa de otimização seja computacionalmente tratável e numericamente estável. Na comunidade de engenharia especializada em sistemas térmicos, as ferramentas de simulação de desempenho energético são tipicamente usadas para modelagem da física do edifício [87]. Essas ferramentas contêm inúmeros cálculos complexos, não-linearidades e procedimentos iterativos que tornam o seu uso na otimização em tempo real, proibido, pois, os modelos resultantes estão representados de uma forma implícita¹. Uma tentativa de usar um modelo resultante desse tipo de programas, num processo de otimização

¹Neste contexto, chamamos um modelo de explícito se existirem fórmulas matemáticas que descrevem uma evolução de estado, isto é, quando um conjunto de equações diferenciais ou de diferença está disponível.

é relatado por Coffey et al. [88], mas geralmente, os investigadores procuram modelos com menor complexidade e menor requisito computacional.

Os chamados modelos de tempo linear invariante (LTI), são muito mais adequados para o uso em estruturas MPC. A obtenção dum modelo LTI apropriado do sistema, controlado é, no entanto, uma tarefa delicada e laboriosa mesmo para engenheiros experientes. Uma breve revisão dos métodos que podem ser usados para modelagem de edifícios é mencionada por Prívará et al. [89]. Geralmente, as seguintes técnicas podem ser usadas para obter um modelo LTI:

- **Modelação de caixa-preta**— A estrutura do modelo e os parâmetros são identificados de forma empírica-estatística a partir de medições no local. A abordagem da caixa-preta é concetualmente simples, mas tecnicamente complicada, e depende crucialmente da disponibilidade de conjuntos de dados de entrada apropriados que englobam sequências longas de todos os pares de sinais de excitação-resposta relevantes [90], [91].
- **Modelação de caixa-cinza**— Esta abordagem descreve a dinâmica térmica dum sistema térmico com base numa rede de capacitância e resistência térmica (RC) [63]. Este modelo apresenta um análogo a um circuito elétrico, com gradientes de temperatura e fluxo de calor substituindo potenciais elétricos e correntes. Uma estrutura de modelo plausível é primeiro especificada a priori e, em seguida, os parâmetros do modelo são identificados a partir de medidas ou simulações. A vantagem desta abordagem é que o conhecimento básico de possíveis interações térmicas podem facilmente ser introduzidas [92]. No entanto, a identificação dos parâmetros está longe de ser trivial.
- **Modelação de caixa-branca** — Esta abordagem também depende duma rede térmica RC. Aqui tanto a topologia da rede RC como os seus elementos R e C (os parâmetros do modelo) são derivados diretamente a partir de dados detalhados da geometria e construção do sistema [93]. Em comparação com a modelagem de caixa-cinza, esta abordagem tem uma base física ainda mais forte. No entanto, é exigida disponibilidade e processamento duma grande quantidade de informações específicas do sistema.

4.1.1 Modelo térmico da habitação residencial

É de fácil compreensão que as propriedades dos materiais utilizados na construção do sistema térmico, determinam a resposta térmica e conseqüentemente o seu comportamento em termos de consumo energético. Desta forma, a retenção de ar quente / frio no sistema depende das características de condutividade térmica dos materiais utilizados. Como um todo, o desempenho térmico é definido pela geometria, propriedades térmicas e pelo número de divisões do edifício. Nesta dissertação, três divisões distintas são modeladas, enquanto apenas uma é equipada com um sistema de regulação de temperatura como é visível na Figura 4.1.

Neste paradigma, os principais mecanismos de transferência de calor são: condução de calor através de paredes externas e internas, janelas, telhado e teto; convecção de calor com ar exterior

devido ao ar fornecido e extraído da sala pelo sistema AC; radiação solar através da janela e parede externa.

Os modelos de parâmetros agrupados que os investigadores costumam usar para modelar a dinâmica de temperatura numa sala, frigorífico, aquecimento de águas etc.. - e às vezes dum edifício inteiro - são uma combinação de modelos de rede R-C (resistência-condensador) que capturam a transferência de calor através de superfícies sólidas. O modelo tem um termo não linear que captura o efeito da troca de entalpia com o exterior devido ao ar de alimentação e de exaustão. Nesta dissertação iremos-nos restringir a esta classe de modelos de rede R-C não linear, que é denotada por $M_{RC}(n, q, p)$, onde n se refere à dimensão de estado, q ao número de entradas e p ao número de parâmetros incertos.

Deve-se notar, que existe uma longa história de utilização de redes R-C para modelar a dinâmica térmica dum edifício. Historicamente, estes modelos surgem primeiramente na derivação de modelos de transferência de calor através de superfícies sólidas. Na verdade, ASHRAE (Sociedade Americana de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado) [94], descreve como determinar os valores de R-C para uma superfície sólida dado o seu material e tipo de construção. Esta informação está agora disponível em software. As resistências e condensadores de um modelo de rede R-C, são cuidadosamente escolhidos para modelar o efeito combinado de condução entre as massas de ar separadas pela superfície, bem como a radiação de ondas longas e a convecção entre a superfície e a massa de ar em contacto com ela [95].

Esta configuração de quarto é bastante comum em edifícios residenciais. Um modelo para tal quarto, também abrange o modelo para um quarto que não partilha uma parede com o exterior, ou que não tem janela. O único outro caso comum que não é capturado pela configuração de sala

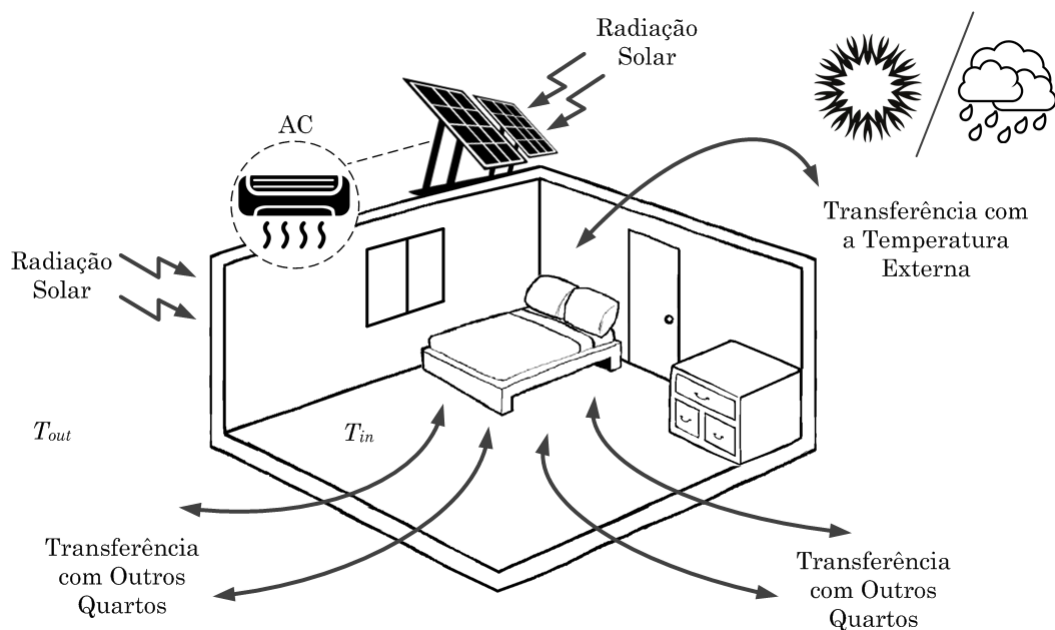


Figura 4.1: Esquema de quarto utilizado no presente estudo

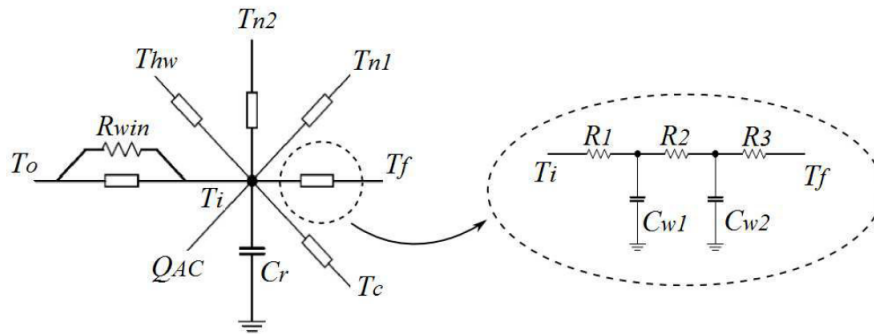


Figura 4.2: Esquema completo do modelo RC utilizado [96]

escolhida, é quando a sala está localizada no piso térreo de modo que a temperatura no outro lado do piso é a temperatura do solo.

No presente estudo, e de forma a simplificar o modelo são admitidas as seguintes premissas. O ar dentro da sala está bem misturado, de modo que temos uma temperatura uniforme na sala. São também ignoradas infiltrações e ex-filtrações.

O modelo completo da dinâmica térmica ambiente é construído pela combinação de modelos R-C para superfícies individuais, capacitância de sala e ganhos de calor. Transferência de calor através de cada superfície, com exceção da janela, é modelado como 3R-2C, que é inspirado pelos resultados em [97]. Como as janelas têm capacitância de calor muito baixa, é usual que seja modelada como uma única resistência. Cada elemento de superfície é então conectado ao "nó" de sala para formar um modelo de rede R-C. Um condensador adicional é incluído para modelar o calor armazenado pelo ar e outros objetos na sala. Os ganhos de calor incluem variação de entalpia devido ao fornecimento e escape de ar e ganhos de calor interno. A estrutura do modelo é representada na Figura 4.2.

De seguida, serão discutidos e apresentados, estados, entradas e parâmetros dos três modelos diferentes que integram o conjunto de equipamentos utilizados na dissertação.

4.1.2 Ar Condicionado

Ao contrário de animais como a raposa ou o urso que nascem com peles embutidas, os seres humanos, como os conhecemos hoje, enfrentam este mundo com pouca proteção contra as duras condições ambientais. Portanto, podemos afirmar que a busca do conforto térmico remonta ao início da história humana.

O termo ar-condicionado é geralmente usado em um sentido restrito para arrefecimento, mas no seu sentido amplo significa para condicionar o ar ao nível desejado por aquecimento, arrefecimento, humidificação, desumidificação, limpeza e desodorização. O objetivo do sistema de ar condicionado de uma habitação é então proporcionar conforto térmico completo para os seus

ocupantes. Portanto, é necessário compreender os aspetos térmicos do corpo humano, a fim de projetar um sistema de ar-condicionado eficaz.

Assim na presente dissertação, que tem por base uma habitação doméstica, é necessário criar ambientes interiores térmica-mente confortáveis, como salas de estar ou quartos, por isso tem de ser utilizada energia para adicionar ou remover calor. Desta forma, o nível de conforto desejado é ajustado, ajustando uma temperatura de referência e medindo a temperatura do ar do espaço. O nível de conforto baseado na temperatura é perturbado pela massa térmica do próprio espaço e a troca térmica através das paredes externas com o ambiente externo. Portanto, a dinâmica de temperatura de uma divisão residencial resulta dos balanços de energia entre as temperaturas do ambiente externo, o sistema de AC que adiciona ou remove o calor da divisão, combinado com a massa térmica interna. De seguida são apresentadas as expressões derivadas de [96], que pretendem simular o equipamento de AC:

$$\frac{\partial T_{wl}}{\partial t} = \frac{Q_s}{C_{wl}} + \frac{T_{in} - T_{wl}}{R_{wl}C_{wl}} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \frac{Q_{ac} \times S(t)}{C_{in}} + \frac{T_{out} - T_{in}}{C_{in}R_{wd}} + \frac{T_{wl} - T_{in}}{C_{in}R_{wl}} \quad (4.2)$$

$$Q_s = A_w h_o (T_{out} - T_s) \quad (4.3)$$

Onde Q_{ac} , é a entrada de energia de arrefecimento para a sala, T_{out} é a temperatura ambiente, T_{in} é a temperatura da sala, T_{wl} é a temperatura da parede, C_{wl} é a capacitância térmica da parede, R_{wl} é a resistência térmica da parede, R_{wd} é a resistência térmica das janelas, C_{in} é a capacitância térmica do ar interior, Q_s é o fluxo de calor numa superfície externa da casa submetida à radiação solar, h_o é o coeficiente de convecção combinada e transferência de calor através de radiação, A_w é a área de parede, T_s é a temperatura da superfície da parede e $S(t)$ é uma variável binária que emula o ligar e o desligar do termostato. O funcionamento AC é um bloco de interruptor de alimentação sem perda interna. O valor dos parâmetros físicos do sistema AC, utilizado nesta dissertação, são obtidos a partir de [98].

4.1.3 Termo-acumulador de água

Em muitos países, um grande número de famílias usa aquecedores de água elétricos para que estes forneçam-lhes água quente, adequada para consumo doméstico. O armazenamento, tipo aquecedor elétrico de água, é uma das formas mais comuns de aquecimento de água, através de eletricidade em habitações domésticas. Um Termo-acumulador de Água (TA), é um sistema simples, constituído por um tanque isolado, um ou mais elementos de aquecimento, dispositivos de controlo e segurança e tubagem associada. Os aquecedores de água elétricos, são mais flexíveis em design do que outros tipos de aparelhos de aquecimento de água. Em comparação com os grandes sistemas centrais de água quente, a simplicidade, a fiabilidade e o baixo custo dos aquecedores elétricos de água são suas principais vantagens. Além disso, o consumo de água é menor em

aquecedores elétricos de água, uma vez que é necessário um período de tempo mais curto para a água se aquecer a temperaturas aceitáveis no dispositivo elétrico.

O Termo-acumulador é então, um tanque cilíndrico, encerrado pelo isolamento e coberto com uma chapa metálica, que pode ser simulado usando um modelo térmico clássico [99], [100]. A entrada de água e as temperaturas ambientem em torno do tanque, bem como a capacidade do TA e a sua eficiência são consideradas entradas. O consumo de energia é relatado em W quando um TA elétrico é escolhido. Geralmente, a eficiência de Termo-acumuladores elétricos está na faixa de 85-94%.

Com base no fluxo de energia dentro do aquecedor elétrico de água, o modelo de TA utilizado nesta dissertação foi gerado de forma a adquirir o consumo de energia elétrica do TA. Geralmente, a energia elétrica consumida pelo TA é utilizada para satisfazer os seguintes objetivos: a compensação das perdas térmicas do tanque TA para o ambiente bem como o aquecimento de água proveniente da fonte de água que substitui a água aquecida extraída do tanque. No modelo de TA utilizado, a água aquecida é assumida como totalmente homogênea dentro do recipiente de armazenamento. Como resultado, espera-se também que a temperatura seja homogênea no tanque e desta forma T_{wa} é a única variável de temperatura da água, utilizada neste modelo de TA. O modelo de TA segue o método apresentado em [101]:

$$\frac{\partial T_{wa}}{\partial t} = \frac{\rho Q_{wa} (T_{wa;inlet} - T_w)}{C_{wa}} - \frac{UA_t (T_{wa} - T_{amb})}{C_{wa}} + \frac{Q_{eg}\eta}{C_{wa}} \quad (4.4)$$

Onde ρ é a densidade da água, Q_{wa} é o calor específico da água, $T_{wa;inlet}$ é a temperatura da água de entrada no tanque (água proveniente da fonte de água), C_{wa} é a capacitância térmica da água, U é o coeficiente global de transferência de calor para as paredes do TA, A_t é a área de superfície do tanque, Q_{eg} é, por exemplo, a potência elétrica nominal do elemento de aquecimento e η a eficiência do elemento de aquecimento da resistência elétrica. Parâmetros para simulação de modelos foram extraídos de [102].

4.1.4 Frigorífico

O frigorífico (FR), trata-se dum equipamento doméstico muito familiar, existente em praticamente todas as casas, significando então, que a maioria das pessoas os utiliza diariamente. O frigorífico é um popular aparelho doméstico que consiste num compartimento com isolamento térmico e uma bomba de calor (mecânica, eletrônica ou química), que transfere o calor do interior do frigorífico para o seu ambiente externo para que o interior do frigorífico seja arrefecido a uma temperatura abaixo da temperatura ambiente da sala. A temperatura mais baixa diminui a taxa de reprodução de bactérias, de modo que o frigorífico reduz a taxa de deterioração dos alimentos. Fazendo do frigorífico, um equipamento essencial de armazenamento de alimentos nos países desenvolvidos [103].

Os frigoríficos domésticos, são amplamente investigados na literatura. Algumas publicações abordam o consumo de energia, principalmente do ponto de vista económico. Marz [45] e Hermes e Melo [104] descobriram que os frigoríficos exigem 11% -16% do consumo total de energia de

habitação doméstica. Como tal esta taxa elevada tem que ser diminuída, vários trabalhos diferentes tentam desenvolver os modelos matemáticos que podem ser usados eficientemente para o projeto do frigorífico no futuro [105].

O frigorífico pode, à semelhança dos anteriores, ser modelado como um sistema térmico com um isolamento. O modelo correspondente, é semelhante ao modelo de quarto mencionado anteriormente, assim, pode ser representado usando o mesmo modelo de circuito simplesmente alterando os valores dos parâmetros em questão [106].

A temperatura interna do frigorífico é representada por T_{FR} e destina-se a descrever o comportamento do sistema bem como ser adequada para controlo. T_{FR} é elevado pela temperatura ambiente ($T_{out}gt;0^{\circ}C$) e reduzido pela temperatura de entrada do refrigerante do evaporador ($T_{FR_e} < 0^{\circ}C$). Portanto, as transferências de calor são delimitadas pela resistência térmica da parede entre o armário e o evaporador ($R_{FR_{we}}$) e a resistência térmica do isolamento da parede (R_{FR_w}). Além disso, o comportamento do FR é adicionalmente influenciado pela sua capacidade de armazenamento de calor (C_{FR_i}). O comportamento dinâmico térmico é aproximado através das equações 4.5 e 4.6, sendo a Equação 4.5 referente ao aquecimento e para arrefecimento Equação 4.6. As equações em questão são representadas como se segue [105]:

$$\frac{\partial T_{FRI}}{\partial t} = -\frac{T_{FRI}}{C_{FRI}R_{FR_w}} + \frac{T_{out}}{C_{FRI}R_{FR_w}} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial T_{FRI}}{\partial t} = -\frac{T_{FRI}}{C_{FRI}(R_{FR_w}R_{FR_{we}})} + \frac{T_{out}}{C_{FRI}R_{FR_w}} + \frac{T_{FR_e}}{C_{FRI}R_{FR_{we}}} \quad (4.6)$$

A temperatura interior do frigorífico é normalmente regulada por um relé termos-tático. Abrir a porta do FR, aumenta o consumo de energia, uma vez que é necessário recuperar a temperatura interna anterior. Neste trabalho o controlo convencional será comparado com a alternativa, PID e MPC através da utilização dum modelo FR simulado.

4.1.5 Sistema Fotovoltaico

Com o aumento dos preços da eletricidade e o custo decrescente da tecnologia fotovoltaica (PV), o aumento do número de instalações fotovoltaicas domésticas, ligadas à rede, torna-se uma realidade na Europa. No entanto, os incentivos governamentais, relativos as instalações fotovoltaicas, em alguns países já começam a sofrer alterações. As propostas alterações, visam promover o autoconsumo, isto é, diferentemente da abordagem tradicional que se baseia apenas na maximização da eletricidade exportada para a rede. É então sugerido, que se devem explorar novos modos de operação para a geração distribuída de PV.

Face aos factos enunciados, é evidente que o sistema fotovoltaico desempenha um papel preponderante no panorama atual elétrico, fruto dos altos preços de eletricidade praticados pelo comercializador de energia selecionado.

O painel instalado, encontra-se perfeitamente alinhado a sul, isto é, um azimute de 0° . De forma a melhorar ainda mais o rendimento global do sistema, os painéis encontram-se dispostos

com uma inclinação ótima. Para sistemas ligados à rede, em que o objetivo é maximizar o aproveitamento da radiação, deve utilizar-se uma inclinação correspondente à latitude menos 10° , ou seja, aproximadamente 31° para a região do Porto, Portugal.

A temperatura da célula, desempenha um papel importante na produção do sistema, uma vez que com o aumento de temperatura há uma maior agitação e recombinação dos portadores, diminuindo a tensão da célula. Um abaixamento da tensão nos terminais, dá lugar a uma difusão mais larga e menor corrente de díodo, o que implica um ligeiro aumento da corrente da célula. Como, com o aumento da temperatura, é mais significativa a diminuição da tensão que o aumento da corrente, resultando numa diminuição da potência. Assim e de forma a contabilizar este efeito a temperatura da célula é calculada segundo a expressão 4.7.

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{NOCT - 20}{800} \quad (4.7)$$

Onde T_c , representa a temperatura da célula, T_a a temperatura ambiente, isto é, temperatura exterior. Ambas as temperaturas são calculadas em graus celsius. G representa a irradiancia incidente no painel e $NOCT$ “Nominal Operating Cell Temperature”.

Para o cálculo da potência fornecida pelo conjunto da instalação fotovoltaica, recorreu-se a uma equação bastante simplificada, Equação 4.8, não tendo em conta fatores que influenciam as condições de funcionamento do PV, como a temperatura ambiente e perdas que possam ocorrer nas instalações. Foi ainda assumido que os painéis apresentam ao longo de todo dia uma eficiência (η) de 21,5% independentemente de alguns fatores que ocorram, estando portanto a funcionar na zona de potência máxima.

$$PPV(W) = \eta \times APainel(m^2) \times NPainéis \times ISolar(W/m^2) \quad (4.8)$$

Onde $APainel$ representa Área do Painel, $NPainéis$ representa o Número de Painéis e $ISolar$ a Irradiação Solar.

4.2 Projeto MPC para controlo de cargas domésticas

Nesta secção, será apresentada a arquitetura de MPC proposta para o controlo das várias cargas sugeridas. Será também apresentada a estratégia utilizada pelo modulador de sinal utilizado, uma vez que as cargas propostas, utilizam acionadores de dois níveis. Assim é necessário estabelecer uma metodologia que determine esses dois níveis de modo eficaz, face às saídas do controlador MPC.

4.2.1 Arquitetura proposta

A implementação do MPC utilizado encontra-se representada na Figura 4.3. Tipicamente, a composição MPC é feita através dos blocos, antes do bloco modulador de sinais de dois níveis. A versão melhorada proposta do MPC tem um bloco de processamento de sinal adicional representado pela área cinzenta na Figura 4.3.

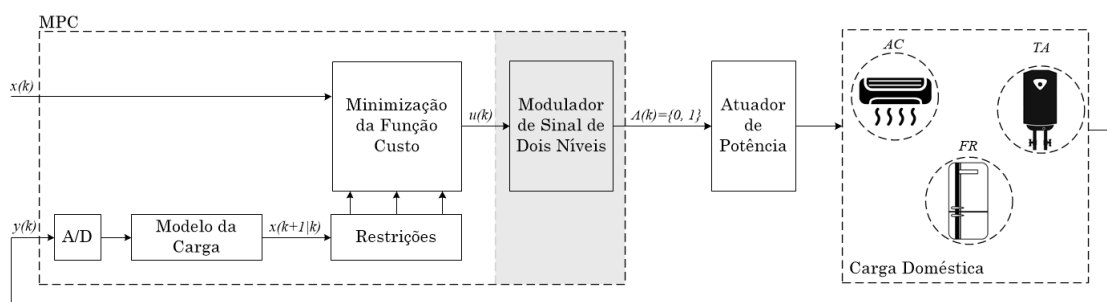


Figura 4.3: Visão geral do controlo de 2 níveis operado pelo MPC[14].

4.2.2 Modulador do sinal de dois níveis

Qualquer sinal a ser traduzido para dispositivo atuador está sujeito às restrições físicas do próprio dispositivo em termos de saída. Um atuador convencional, pode ter uma resposta linear, no entanto, é limitado por limites inferiores e superiores. Dum ponto de vista de design clássico, a resposta da variável manipulada é restrita de acordo com as restrições físicas do atuador.

Para que a adoção do MPC, como controlador alternativo, seja acessível, todos os custos potenciais devem ser minimizados. Consequentemente, deve notar-se que o atuador em si é uma parte cara. Assim, a gestão de energia linear requer um interruptor de alimentação adequado. Por exemplo, relés de estado sólido que são boas escolhas ainda que apresentem um custo proibitivo para o simples controlo de aparelhos domésticos. Em vez de usar um interruptor de alimentação linear, nesta dissertação é proposta uma interface de sinal de controlo de dois níveis que modula o conjunto limitado contínuo de variáveis manipuladas para um conjunto discreto de números inteiros. O vetor de entrada de dois níveis $\Lambda(k)$ é dado por:

$$\Lambda(k) = \{0, 1\} \quad (4.9)$$

Para codificar a gama dinâmica do sinal $u(k)$ num sinal de controlo de potência de 2 posições discretas, é proposto um operador de comparação simples que tem o seguinte comportamento de funcionamento:

$$\Lambda(k) = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{U_{max}}{2} < u(k) \leq U_{max} \\ 0 & \text{se } 0 < u(k) \leq \frac{U_{max}}{2} \end{cases} \quad (4.10)$$

A faixa dinâmica da variável manipulada é dividida em duas partes. Todos os valores de $u(k)$ que se encontram abaixo de metade da sua faixa dinâmica são processados pelo esquema de modulação de 2 níveis como 0. Assim, a potência entregue à carga doméstica é zero. Por outro lado, se o sinal $u(k)$ otimizado estiver na metade superior do intervalo dinâmico, a carga doméstica recebe plena potência. Na Figura 4.4 é demonstrado o uso do esquema de modulação de controlo de potência de dois níveis propostos.

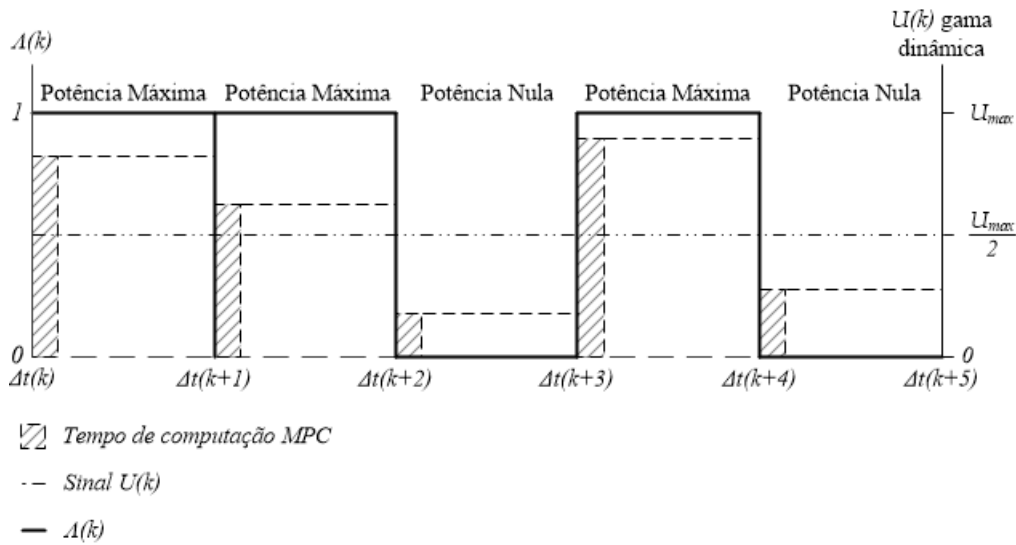


Figura 4.4: Estratégia de operação da modulação de dois níveis[14].

4.3 Planos Tarifários

A definição da estrutura tarifária, é um dos aspetos mais importantes na definição de tarifas que tenham capacidade de transmitir sinais de forma eficiente aos consumidores finais de energia elétrica, bem como aos utilizadores das redes.

O sistema elétrico Português, é um sistema onde as tarifas de venda a clientes finais, são calculadas pelo princípio da aditividade tarifária de todas as atividades, unicamente com os custos associados à mesma. Estas atividades, deverão ser uma das identificadas ao longo da cadeia de valor, desde a produção até à comercialização. No caso dum cliente residencial, este encontra-se ligado a rede de baixa tensão (BT), pelo que a tarifa de venda a clientes finais em BT resulta da adição das tarifas de todas as atividades subjacentes na cadeia energética. Isto é, Tarifa de energia, Tarifa de uso global do sistema, Tarifa utilização da rede de transporte, Tarifa de utilização da rede distribuição e tarifa de comercialização.

Os preços da tarifa de energia, devem refletir os custos marginais de produção de energia elétrica. Apesar das variações sazonais de preços grossistas em função da conjuntura de preços de combustíveis e dos fatores climáticos (hidraulicidade e eolicidade), a estrutura horária dos preços no mercado diário está fortemente relacionada com a estrutura do parque eletroprodutor e com o diagrama da procura. Os custos marginais da tarifa de energia devem apresentar esta estrutura horária do preço de modo a orientar os consumidores nas suas decisões de consumo e de forma a imputar a cada consumidor o justo custo da energia consumida.

Em Portugal, as tarifas de venda a clientes finais apresentam diferenciação sazonal (apenas em MAT, AT e MT) e diferenciação horária, que pode ir até quatro períodos horários (ponta, cheias, vazio normal e super vazio). Em BTN estão disponíveis várias tarifas: simples, bi-horárias e tri-horárias para potências contratadas iguais ou inferiores a 20,7kVA. Anualmente são também

distinguidos dois períodos distintos, inverno e verão que por sua vez altera os intervalos de vazio, ponta e cheias. Adicionalmente alguns comercializadores como é o caso da EDP comercial, disponibilizam ainda a opção de ciclo diário e ciclo semanal.

Desta forma, estamos em condições de apresentar as tarifas utilizadas nesta dissertação que têm como alvo de aplicação uma residência doméstica localizada na região do grande Porto. Nesta dissertação serão utilizados os preços estabelecidos pelo comercializador de último recurso. Em Portugal, essa tarefa está encarregue à ERSE, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, que anualmente disponibiliza os preços das tarifas de venda a clientes finais nos vários níveis de tensão. No nível de tensão mais baixo, BTN, os clientes que apresentem uma potência contratada inferior a 20,7kVA podem se seguir pelos preços que se apresentam na Tabela 4.1. Este plano tarifário é válido para o ano de 2017 em Portugal Continental.

Tabela 4.1: Tarifas Transitórias de venda a clientes finais a aplicar pelos comercializadores de último recurso aos fornecimentos a clientes finais em BTN > 20,7kVA em Portugal Continental

TARIFA TRANSITÓRIA DE VENDA A CLIENTES FINAIS EM BTN ($\leq 20,7$ kVA e $> 2,3$ kVA)		(EUR/kWh)
Tarifa simples >6,9 kVA		0.1659
Tarifa bi-horária >6,9 kVA	Horas fora de vazio	0.1981
	Horas de vazio	0.1023
Tarifa tri-horária >6,9 kVA	Horas de ponta	0.2247
	Horas de cheias	0.1768
	Horas de vazio	0.1023

De seguida, são apresentados os períodos horários disponibilizados pela EDP comercialização de onde se podem distinguir os três sistemas de tarifas, simples, Bi-Horária e Tri-horária nos quais podemos ainda destacar o ciclo semanal ou ciclo diário, bem como o período de Verão e de Inverno.

Assim sendo, nas Figura 4.5 e 4.6, encontram-se os períodos horários referentes à tarifa simples. Como seria de esperar não existe nenhuma alteração ao longo do ano neste tipo de tarifa, sendo o preço sempre fixo e estipulado anualmente.

São também apresentados os períodos horários referentes às tarifas Bi-horárias. Este tipo de tarifa distingue dois períodos, vazio e fora de vazio bem como o horário legal de verão e inverno. Neste sistema tarifário podemos ainda distinguir ciclo diário e ciclo semanal. Isto é, no caso do ciclo diário não existe nenhuma alteração ao longo da semana pelo que o sábado e o domingo apresentam as mesmas características que os dias úteis. Na opção de ciclo diário não existe distinção entre verão e inverno. Por outro lado, o ciclo semanal apresenta diferentes períodos horários para o sábado e domingo, face aos dias úteis, adicionalmente é também feita a distinção entre horário de verão e de inverno.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, são também apresentadas as tarifas Tri-horárias. Este tipo de tarifa

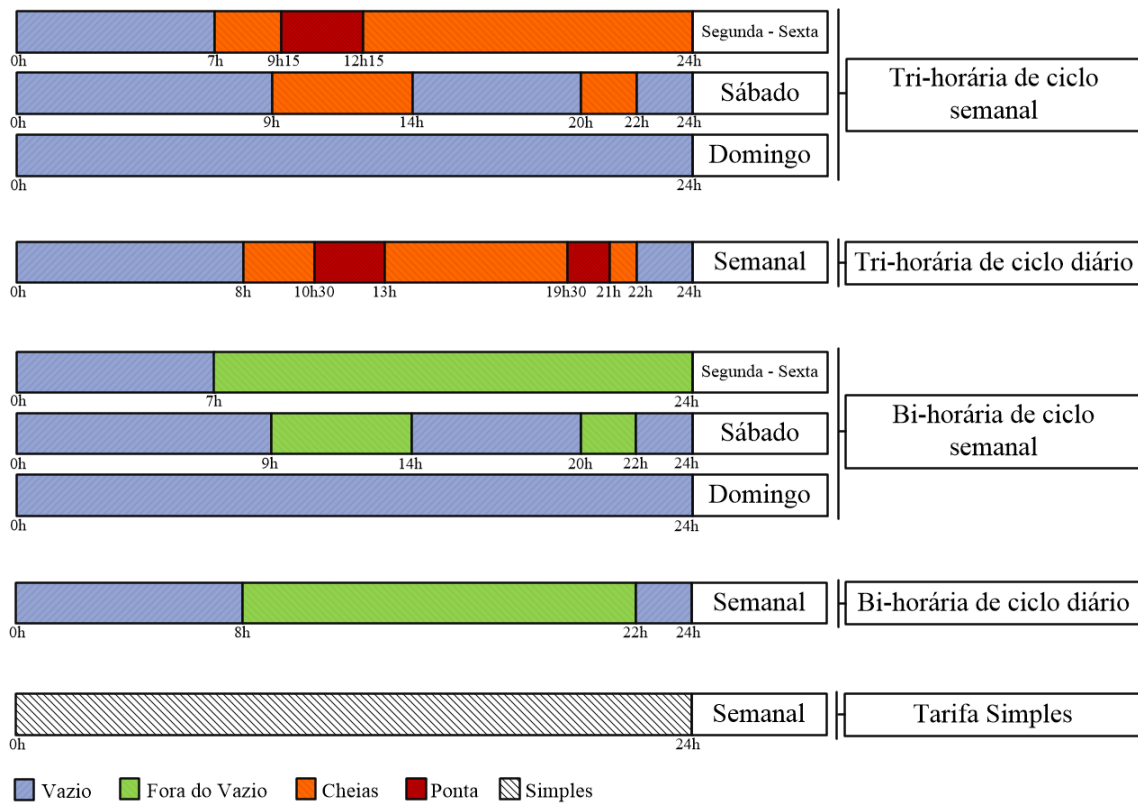


Figura 4.5: Tarifa de venda a cliente final em BTN, para o período de verão.

distingue três períodos, vazio, cheias e ponta bem como o horário legal de verão e inverno. Neste sistema tarifário podemos ainda distinguir ciclo diário e ciclo semanal. Sendo que o esquema de variação tarifária ao longo do ano é similar ao sistema tarifário Bi-horário.

Assim, dado o conjunto de tarifas apresentado, o objetivo da presente dissertação passa por simular cada modelo individual, submetendo-o a cada uma das tarifas apresentadas, com o intuito de perceber qual a melhor estratégia a aplicar. E assim, alcançar uma poupança económica e energética como se irá demonstrar no Capítulo 5.

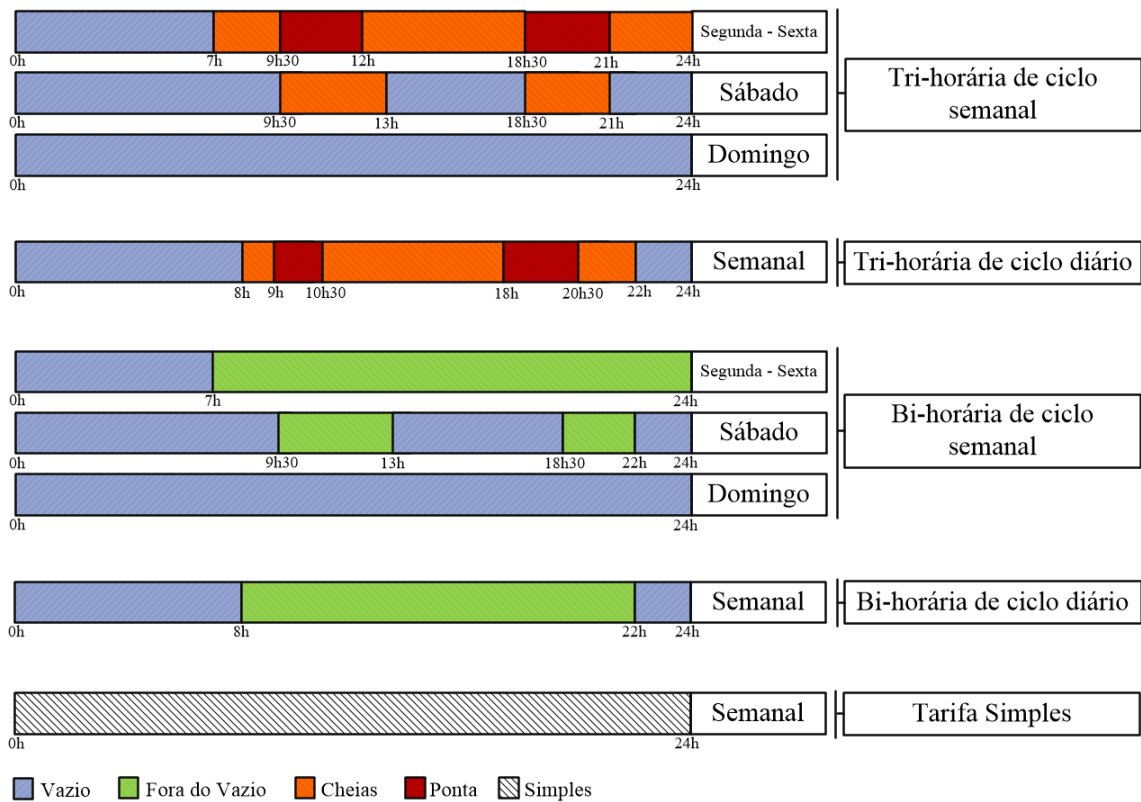


Figura 4.6: Tarifa de venda a cliente final em BTN, para o período de inverno.

Capítulo 5

Resultados e simulação

O Capítulo 4, apresentou algumas das diferentes estratégias de controlo possíveis de empregar em equipamentos domésticos, cuja função é fornecer serviços de aquecimento e arrefecimento. Neste Capítulo 5, são discutidos os resultados de simulação das estratégias de controlo aplicadas aos três distintos modelos. Os diferentes casos de teste para comparação são brevemente descritos na secção 5.1. Os resultados da comparação são apresentados em pormenor na secção 5.2. Este capítulo é concluído resumindo os resultados das simulações na secção 5.3.

A estrutura de testes aplicados nesta dissertação, consiste na simulação de três aparelhos domésticos comumente encontrados em residências, Termo-acumulador de água, Frigorífico e Ar-Condicionado. Este conjunto de cargas foi escolhido, pois, normalmente, numa casa típica, são os aparelhos com maior consumo de eletricidade. Assim, um dos métodos para ajudar a atingir o objetivo, isto é, reduzir a fatura de eletricidade, passa pela atualização da tecnologia de controlo que opera essa classe de aparelhos domésticos.

Na realidade, os equipamentos de aquecimento e arrefecimento utilizam sobretudo um dispositivo ON-OFF convencional para regular a temperatura. Como resultado do seu baixo custo de fabricação e simplicidade. O controlo termos-tático convencional serve como uma referência à avaliação do PID e do MPC. Para este estudo, foram utilizados vários esquemas tarifários, descritos no SubCapítulo 4.3, disponíveis em Portugal Continental. A avaliação do custo de energia é baseada nos preços praticados no mercado residencial português. O período da simulação corresponde a uma semana, ou seja, 168 horas. O controlador MPC empregue, é explorado com dois conjuntos de ponderações diferentes, a fim de avaliar o impacto na meta de redução da fatura elétrica.

5.1 Caso de estudo

O presente caso de estudo remete-nos a uma residência familiar, localizada em Paranhos, Porto, Portugal. A residência como já descrito em capítulos subjacentes dispõe dum sistema de ar condicionado, um termo-acumulador de água, um frigorífico e um sistema de autoconsumo fotovoltaico.

Assim sendo, é necessário apresentar as características intrínsecas ao caso de estudo. Ao longo desta dissertação, foram realizadas simulações relativas a dois períodos distintos, isto é, um período de verão e um período de inverno. O período de verão selecionado para a simulação, inicia-se a 6 de Agosto de 2016 e termina a 12 do homologo mês. Já o período de inverno, inicia-se a 1 de Janeiro de 2017 e termina a 7 do mesmo mês.

De seguida serão apresentados os dados meteorológicos úteis para a realização das propostas simulações. Isto é, a temperatura e irradiância solar exterior, nos dois períodos alvos de estudo.

Na Figura 5.1, pode ser observada a temperatura e irradiância solar utilizada para o período de verão. Como se pode ver as temperaturas são características do norte de Portugal, com temperaturas a atingir os 40°C no período de verão. A irradiância solar neste período de verão é também muito elevada, o que irá provocar grandes produções fotovoltaicas.

Por outro lado, na Figura 5.2, encontram-se representadas as características do período escolhido de inverno. Podemos observar que, comparado com o período de verão, os dias apresentam pouca irradiância solar e conseqüentemente temperaturas bastante mais baixas.

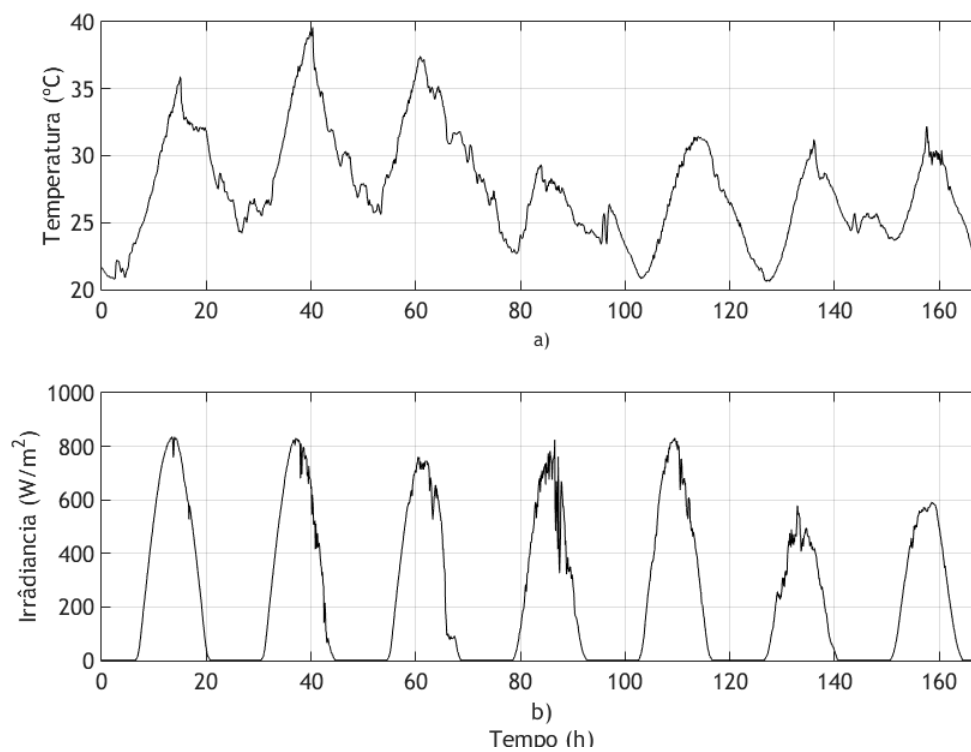


Figura 5.1: Temperatura (a) e irradiância solar (b) exterior na residência doméstica no período de 6 a 12 de Agosto de 2016.

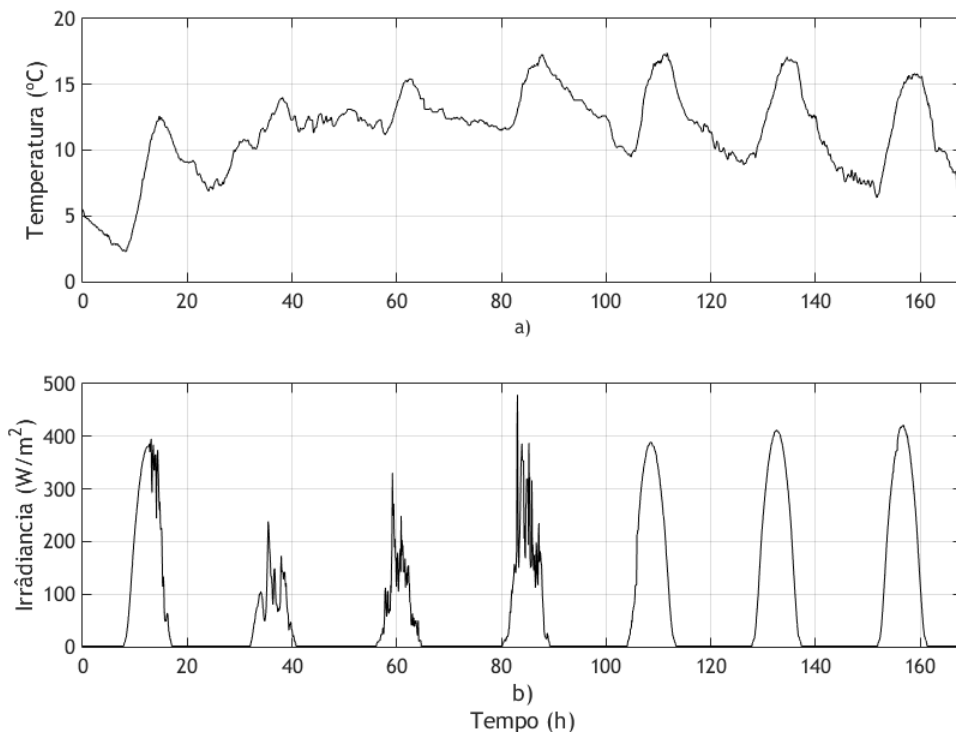


Figura 5.2: Temperatura (a) e irradiação solar (b) exterior na residência doméstica no período de 1 a 7 de Janeiro de 2017.

Nos subcapítulos 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 serão apresentadas e descritas as características das cargas domésticas utilizadas na simulação.

5.1.1 Ar-Condicionado

O sistema de Ar-Condicionado é responsável pela criação de ambientes térmicos internos confortáveis. Assim, a climatização da sala modelada neste trabalho, é fornecida por um sistema de AC, com capacidade de arrefecimento de 3,6kW.

O calor da sala é trocado com o ambiente externo através da parede externa da sala que é o principal fator de perturbação para manter a temperatura interna no nível de conforto térmico desejado. Assim quanto maior for a temperatura exterior maior será a troca de calor com o exterior e por isso maior será o consumo de energia por parte do AC. Assim, nas Figuras 5.1 e 5.2, é possível observar as temperaturas externas à residência utilizada nas várias simulações realizadas.

Para testar ambas as estratégias de controle, a taxa de perda ou geração de calor através da parede externa da sala, é modelada usando uma série temporal com variação de amplitude térmica significativa em 168 horas correspondentes a 7 dias. Sendo que a mesma estratégia é aplicada para as estações de verão e inverno.

Assim, serão simulados todos os controladores propostos que irão controlar o sistema de ar condicionado. Os resultados serão utilizados para realizar comparações entre as diferentes estratégias de controlo. Pelo que, foram definidas configurações comuns aos diferentes controladores, a fim de obter comparações legítimas.

O controlo ON - OFF é configurado com um ajuste de $\pm 1^\circ\text{C}$ em relação a uma temperatura de 23°C no caso do verão e 20°C no caso do inverno.

Por outro lado, as restrições na operação do PID e do MPC são válidas para a mesma faixa de temperaturas. De forma a cumprir o objetivo de controlo de temperatura desejado para a gama de temperatura pretendida, é definido um conjunto de restrições suaves no controlador MPC, entre $22,5^\circ\text{C}$ e $23,5^\circ\text{C}$ para o verão e $19,5^\circ\text{C}$ e $20,5^\circ\text{C}$ no inverno. O objetivo da utilização de restrições suaves é permitir que as variáveis controladas violem as restrições em quantidades modestas, enquanto que no caso de restrições rígidas não são permitidas quais queres violações [107].

5.1.2 Termo-acumulador de água

A unidade de aquecimento de água, é responsável por aquecer a água que será usada nas atividades de higiene pessoal pelos habitantes da casa. De forma a adequar o consumo de água quente à realidade vivida numa habitação, estabeleceu-se uma rotina de consumo de água quente. A rotina encontra-se representada na Figura 5.3 e apresenta um pico de consumo de água no início da manhã e à noite antes do período de sono, que coincidem com os períodos normais de banho. Dada a finalidade do Termo-acumulador de água, o sistema de regulação da temperatura deve preservar a água suficientemente quente durante esses períodos de pico.

O elemento do TA utilizado na dissertação utiliza uma tecnologia baseada numa resistência, que irá transferir energia sobre a forma de calor, para a água que se encontra armazenada no reservatório de 184 litros. O sistema dimensionado apresenta uma potência nominal de 2,0 kW.

A temperatura da água pré-definida, serve como referência para as diferentes estratégias de regulação e está ajustada para 55°C , com uma gama histórica de $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

As mesmas restrições na operação do PID e do MPC são válidas para a mesma faixa de temperaturas. De forma a cumprir o objetivo de controlo de temperatura desejado para a gama de temperatura pretendida, é definido um conjunto de restrições suaves no controlador MPC, entre $53,5^\circ\text{C}$ e $56,5^\circ\text{C}$ para ambas as estações.

A temperatura da parede externa do reservatório é dada pela temperatura interior da residência, que por sua vez, apresenta temperaturas em torno dos 23°C no período de verão e 20°C no período de inverno.

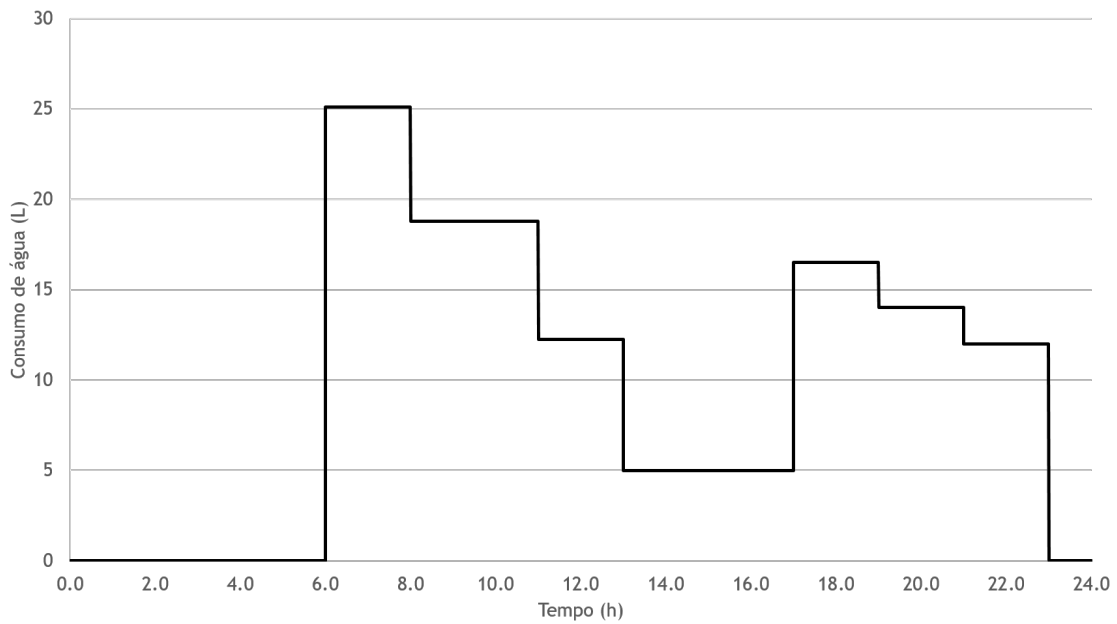


Figura 5.3: Consumo de água quente diária.

5.1.3 Frigorífico

O frigorífico desempenha um papel extremamente importante dentro duma habitação, pois, permite a preservar e prolongar o bom estado dos alimentos. É através de uma temperatura interior baixa que permite tal feito. Visto que o desempenho dos controladores é tanto mais preciso quanto melhor se adequar o modelo à realidade. Desta forma, é imprescindível contabilizar os distúrbios causados pela ação de abrir a porta do FR, uma vez que quando se abre a porta grande quantidade da calor é trocada com o ambiente exterior. Fazendo desta forma, aumentar o consumo de energia. Os distúrbios contabilizados no presente modelo encontram-se representados na Figura 5.4. De forma a adequar os distúrbios, causados pela abertura da porta, estipulou-se uma rotina diária para esta ação, dando-se relevância aos momentos coincidentes com as refeições normais tomadas pelo ser humano.

Nesta dissertação foi utilizado um frigorífico cuja tecnologia responsável pela criação de frio é baseada num motor-compressor de 0,23kW (potência nominal). Aos três controladores propostos foi atribuída a função de preservar a temperatura interna entre $3,8^{\circ}\text{C}$ e $5,2^{\circ}\text{C}$, sendo referencia da temperatura interior $4,5^{\circ}\text{C}$. A temperatura ambiente exterior ao FR, é igual à temperatura interior da habitação, isto é, a temperatura fornecida pelo AC será utilizada como a temperatura exterior do FR. Assim, a temperatura exterior do frigorífico será de aproximadamente de 23°C no período de verão e 20°C no período de inverno.

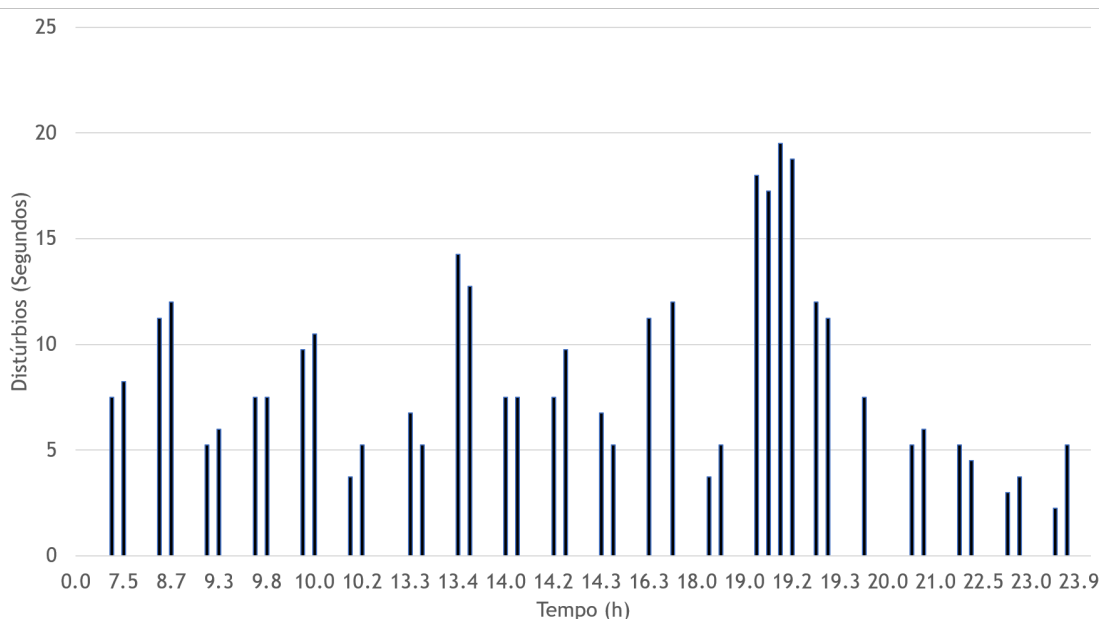


Figura 5.4: Distúrbios diários causados pela abertura da porta do frigorífico

5.1.4 Sistema fotovoltaico

O proposto estudo incide sobre uma habitação doméstica equipada com um sistema fotovoltaico instalado no telhado da habitação. O sistema implementado, inclui um total de trinta e dois painéis SunPower SPR-X21-335-BLK, organizados em quatro strings, cada uma das quais com oito painéis. As características do painel são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tabela características painel fotovoltaico [108]

SunPower SPR-X21-335-BLK	
Potência nominal	335W
Eficiência média	21%
Tensão nominal	57.3V
Corrente nominal	5.85A
Tensão em circuito aberto	67.9V
Corrente de curto-circuito	6.23A

Durante as simulações realizadas e de forma a aproximarmos-nos mais da realidade, são também acrescentadas perdas. Estas perdas pretendem representar fenómenos como as perdas nos condutores e conversores. Para simular tal fenómeno acrescenta-se 10% de perdas globais.

Dado os factos apresentados, é possível então expor a potência produzida pelo sistema, face às condições metrológicas a que foi submetido. Neste estudo, foram então realizadas duas simulações da potência produzida pelo sistema implementado. Os resultados das simulações encontram-se representados na Figura 5.5, representado o período de verão e inverno respetivamente. Como

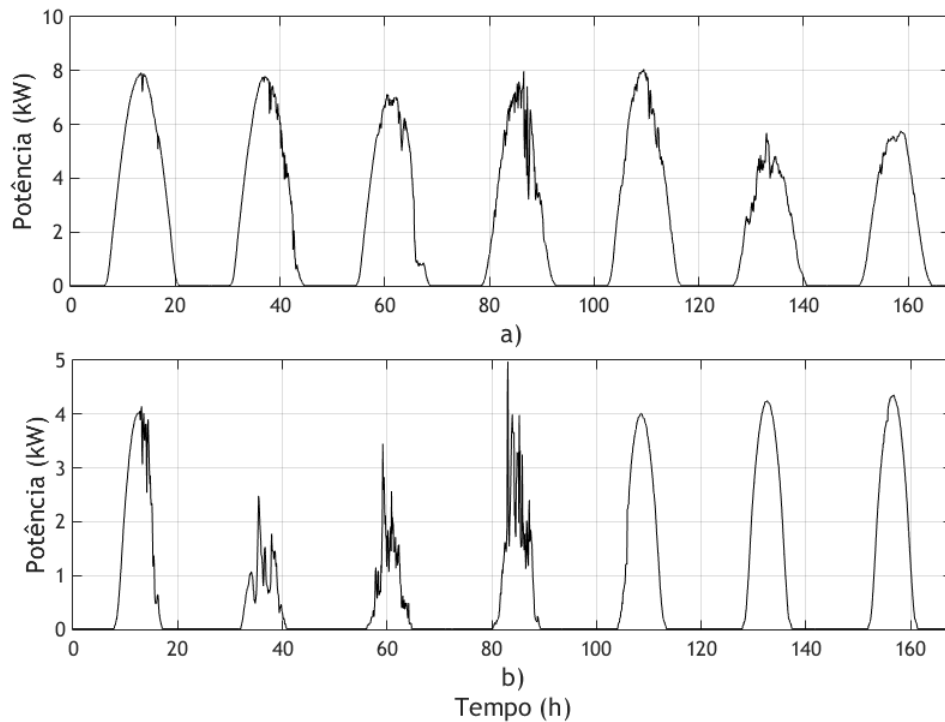


Figura 5.5: Produção de energia elétrica no período de verão (a) e inverno (b), por parte do sistema fotovoltaico instalado na residência

seria de esperar a produção de energia elétrica fotovoltaica acompanha a trajetória da irradiação solar incidente no painel.

Como seria de esperar durante o período de verão os picos de produção fotovoltaica, são superiores aos encontrados no período de inverno. Além disso podemos constatar que o intervalo de produção fotovoltaica, é inferior no período de inverno, consequência das reduzidas horas de sol que se dispõe neste período.

5.2 Caracterização de resposta transitória dos controladores

Esta secção apresenta os resultados essenciais obtidos da simulação das diferentes estratégias de controlo aplicadas nos três equipamentos modelados, ou seja, serão apresentadas simulações para o controlo ON - OFF, PID e por fim para o controlador MPC.

Nas várias simulações apresentadas, irá ser feita a distinção das diferentes tarifas disponíveis. Assim diferentes sistemas de preço foram considerados para avaliar o desempenho das estratégias de controlo com base na comparação e avaliação dos principais indicadores de desempenho. Relativamente ao preço podemos distinguir dois cenários distintos:

- **Cenário de preço fixo:** Neste caso de teste, o preço da eletricidade é assumido como constante, o que significa que o único objetivo da estratégia de controlo é minimizar o consumo

de eletricidade. A comparação neste cenário é feita para testar se cada estratégia de controle otimiza a eficiência de aquecimento / arrefecimento, o que resulta num consumo mínimo de energia.

- **Cenário de preço variável:** As comparações neste caso de teste indicam o desempenho de deslocamento de carga das estratégias de controle em relação ao preço da eletricidade. Os resultados obtidos neste caso são então analisados para quantificar a influência da produção local de energia renovável e as potenciais economias de custos. Neste cenário serão utilizados quatro sistemas de preço variável e assim analisar qual a melhor estratégia a aplicar.

O sistema de fotovoltaico instalado para autoconsumo permite a produção de potência local que por sua vez pode ser consumida pelos três diferentes equipamentos modelados. A contribuição do sistema fotovoltaico será também tida em conta na realização das simulações, de forma a compreender qual a sua influência nas várias estratégias de controle aplicadas, uma vez que possível os diferentes equipamentos modelados apresentam necessidades energéticas diferentes em diferentes instantes.

A satisfação de todos os objetivos de controle simultaneamente não é viável, uma vez que normalmente as ações de controle específicas têm prioridade sobre outras ações. Portanto, as trocas de desempenho devem ser feitas entre os objetivos de controle concorrentes. Para este efeito, os fatores de peso são aplicados às variáveis de entrada e saída do processo, permitindo assim que a priorização do desempenho individual execute o controle sob restrições do processo. Desta forma será também apresentada e discutida a influência dos pesos incluídos na estratégia do MPC, uma vez que, como iremos observar de seguida, se trata dum tema de extrema importância no funcionamento do controlador MPC.

5.2.1 Controlo de temperatura por ar condicionado

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados das várias simulações realizadas. É objetivo do presente estudo, analisar as respostas dos três controladores propostos e comparar os resultados obtidos.

Assim para o caso do sistema de controlo de temperatura ambiente por recurso ao ar condicionado, são apresentados quatro cenários de arquitetura possível de implementar no controlador MPC. O primeiro cenário passa pela não inclusão do sistema fotovoltaico. Nesta situação realiza-se ainda a distinção entre os cenários que incluem ou não pesos nas variáveis. De seguida é também apresentado o cenário no qual se inclui o sistema fotovoltaico. À semelhança do anterior são também apresentados resultados para os casos com e sem pesos nas variáveis, a fim de compreender o contributo dos pesos no resultado final.

Os dados apresentados irão ter em foco o consumo e custo de energia solicitado pelo sistema AC. Por forma a compreender o comportamento dos diferentes controladores é apresentada uma simulação para os períodos de verão e de inverno. Nesta simulação não será tida em conta o sistema fotovoltaico, pelo que não existe nenhum período do dia em que a energia consumida tenha preço nulo.

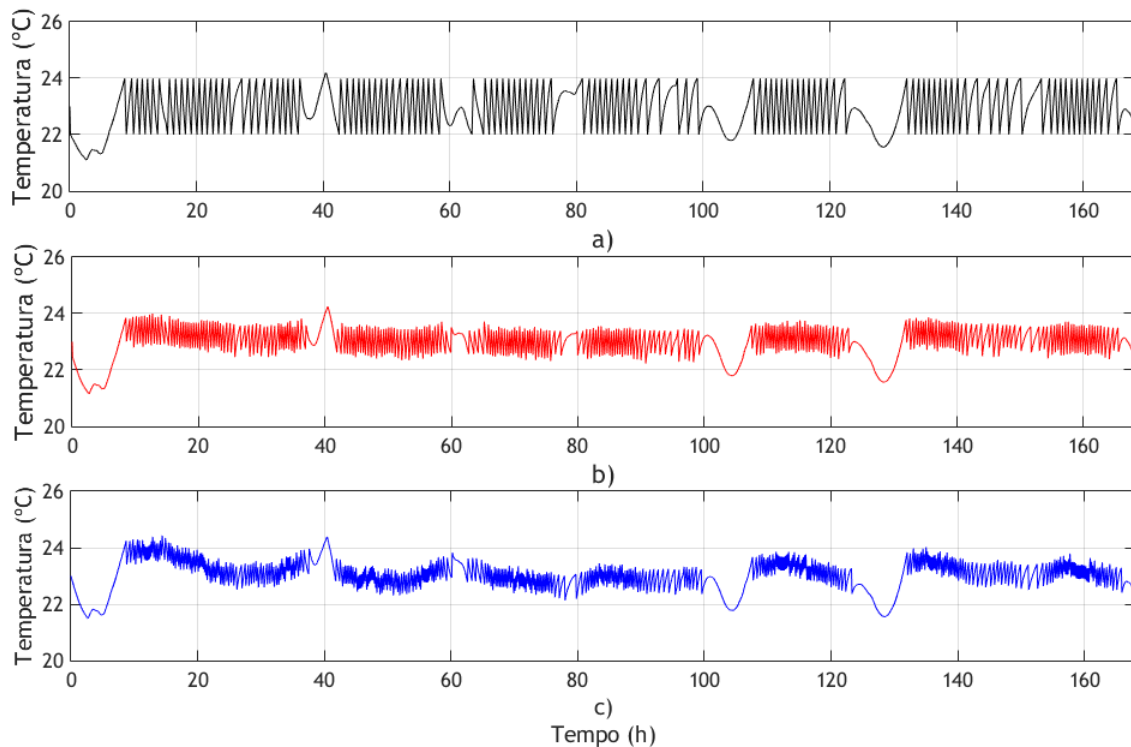


Figura 5.6: Comportamento dos controladores de AC propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.

No controlador MPC é também tido em conta um conjunto de pesos associados as variáveis manipuladas bem como à sua taxa de variação. Neste cenário, foram também incluídos pesos nas variáveis com o intuito de simular a variação do custo da energia ao longo do dia.

O desempenho dos vários controladores implementados é apresentado na figura 5.6 e 5.7 para o período de verão e de inverno respetivamente.

Na Figura 5.6, é possível observar que o controlador ON / OFF apresenta um comportamento mais constante ao longo dos dias, ditado pela característica termos-tática histórica. Por outro lado o controlador PID apesar de sujeito as mesmas restrições que o controlador ON / OFF apresenta uma variação de temperatura menor, para além de que a variação da temperatura não é tão previsível como o do controlador ON / OFF. É também notável que o número de ciclos realizado pelo controlador PID é maior que o do controlador ON / OFF.

O controlador MPC apresenta um comportamento bastante mais errático que os outros controladores. As variações de temperatura são bastante mais imprevisíveis que a dos anteriores, o número de ciclos é ainda maior que no controlador PID, o que lhe permite alcançar melhor conforto e , ao mesmo tempo maiores poupanças energéticas.

Na Figura 5.7, encontra-se representado o comportamento dos vários controladores utilizados, no período de inverno. Em comparação com o período anterior é notável a existência de um maior número de ciclos em todos os controladores.

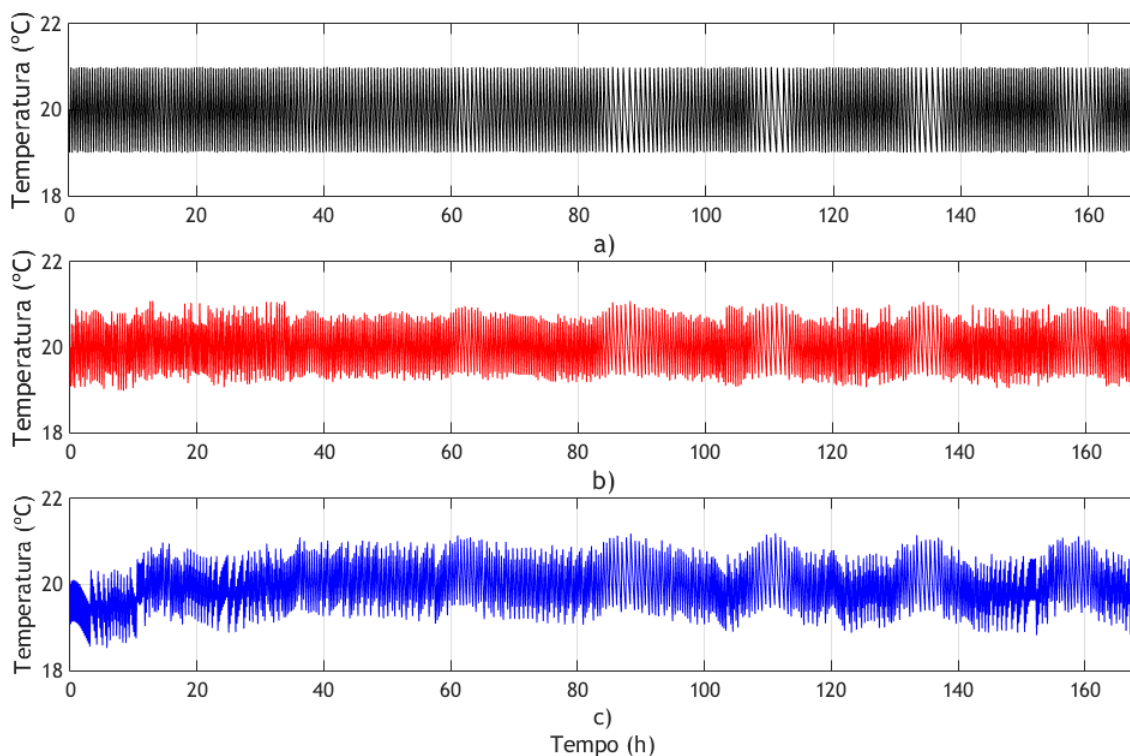


Figura 5.7: Comportamento dos controladores de AC propostos no período de inverno. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.

Este acontecimento é consequência de as temperaturas exteriores serem constantemente inferiores à temperatura de referência o que obriga a maiores exigências por parte do sistema de AC. Nos restantes aspetos o comportamento dos controladores é em tudo semelhante ao comportamento no período de verão.

Dado o longo período de estudo, é difícil compreender as diferentes estratégias tomadas por cada controlador. Assim, de seguida será apresentado em detalhe um dia semanal. O dia escolhido será o ultimo dia de cada um dos períodos, ou seja, sexta-feira no período de verão, e sábado no período de inverno. Com este tipo de abordagem será possível compreender as diferenças de atuação em cada instante de tempo e desta forma proceder á sua análise. No entanto, como o principal objetivo do estudo passa por reduzir a fatura de eletricidade duma residência em Portugal, é importante compreender qual a melhor tarifa a contratar. Pelo que foram simuladas todas as tarifas disponíveis a fim de compreender a que melhor se adequa.

5.2.1.1 Período de verão

A combinação diferente entre pesos leva a diferentes valores-limite. Dado que existem cinco tarifas em estudo durante o mesmo período, o objetivo passa por tentar diminuir o custo da energia, como a Figura 5.8 mostra claramente que certa combinação de pesos beneficia o utilizador

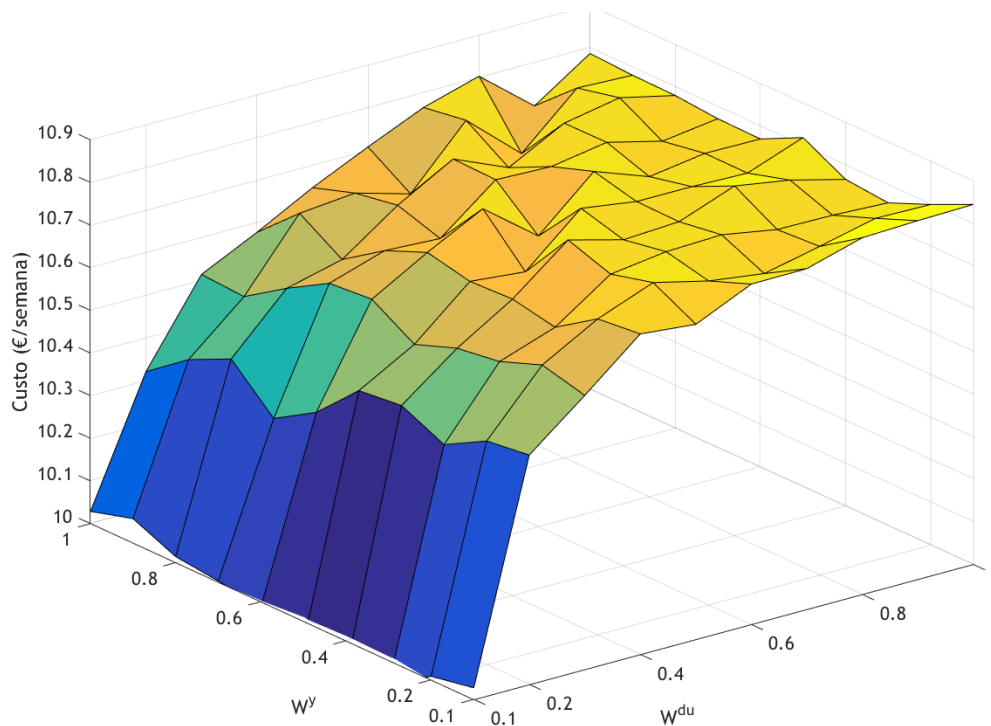


Figura 5.8: Custo a pagar pelo uso do AC face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal

doméstico reduzindo o custo no período em análise.

Assim, de forma a melhorar os resultados obtidos, decidiu-se correr todas as combinações de pesos associados, às variáveis de saída W^y e à taxa de variação das variáveis manipuláveis W^{du} . Este conjunto de simulações foi realizado com o intuito de compreender qual o conjunto ótimo de pesos que minimiza o custo. Assim, na Figura 5.8 encontram-se representadas todas as combinações de pesos suscetíveis de utilizar.

Face aos resultados obtidos, para o período de verão decidiu-se então atribuir o conjunto de pesos $W^y = 0.1$ e $W^{du} = 0.3$. Desta forma obtém-se o melhor resultado do ponto de vista económico. De realçar também, que uma escolha errada dos pesos pode levar a resultados menos satisfatórios. Contudo, existem conjuntos de pesos que são inaceitáveis devido ao comportamento que o controlador toma.

Nas simulações apresentadas nas figuras 5.9, 5.10, serão representados dados referentes ao desempenho dos vários controladores propostos. No caso do MPC serão também apresentados resultados, relativos as várias arquiteturas de pesos sugeridas.

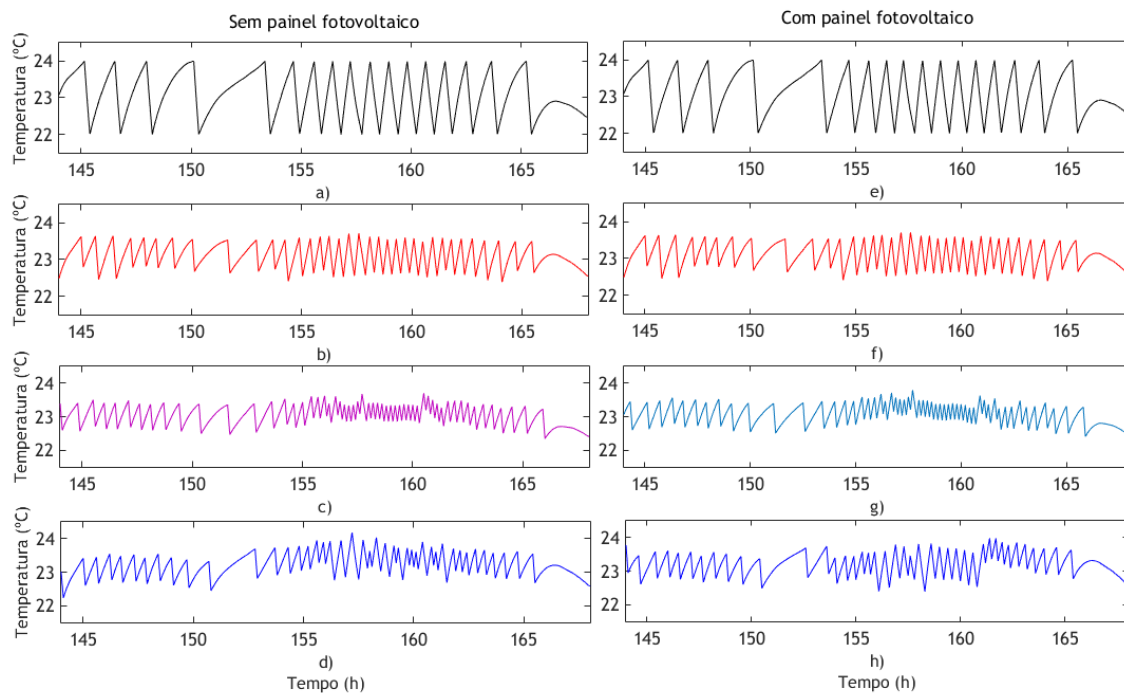


Figura 5.9: Desempenho dos vários controladores propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.

Com o intuito de compreender o comportamento dos controladores, foram realizados um conjunto de simulações em que o objetivo passa por determinar a estratégia de controlo de energia mais eficiente. Para além de que, analisando os dados referentes a apenas um dia, seja bastante mais fácil compreender as diferenças entre os controladores.

Na Figura 5.9 é perceptível que não existe nenhuma diferença no comportamento das estratégias tomadas pelos vários controladores testados, quando se inclui ou não, o proposto sistema fotovoltaico. Isto é, o comportamento dos controladores ON / OFF, PID e MPC sem pesos apresentam a mesma trajetória ao longo do dia, com ou sem produção fotovoltaica.

No entanto, na mesma figura é também apresentada uma quarta estratégia de controlo, MPC com pesos. Este controlador consegue compreender o preço da eletricidade consumida através da aplicação dum conjunto de pesos as variáveis de saída. Dado o atual cenário em que a injeção de energia na rede é do ponto de vista económico desvantajoso, é do interesse do utilizador, que o sistema de AC consuma o máximo de energia possível proveniente do sistema fotovoltaico. Com esta estratégia será utilizada o máximo possível de energia derivada do sistema fotovoltaico que por sua vez, apresenta um custo nulo, face ao preço da rede.

Desta forma, é possível compreender as diferenças encontradas na estratégia MPC com pesos. No cenário em que não se inclui o sistema fotovoltaico, percebe-se que no período compreendido

entre as 154h e as 162h, existem diferenças quando comparado com o cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico. O período em questão coincide com o período de alta intensidade de irradiância solar que por sua vez está associado à produção fotovoltaica. Pelo que neste período existe eletricidade gratuita, produzida localmente, disponível para utilizar. O sistema MPC irá desta forma aproveitar ao máximo esta energia disponível, armazenando-a sob a forma de calor dentro do edifício, respeitando ao mesmo tempo, as restrições a que está sujeito. Facto este que proporciona que nesse período, a temperatura interior do edifício, seja no cenário que se inclui o sistema PV.

Na figura 5.10, é possível observar as restantes estratégias aplicadas às diferentes tarifas disponíveis no mercado nacional. O objetivo destas simulações passou por perceber em que situações é possível tirar partido do poder do MPC com pesos associados ao preço variável da eletricidade. Assim foram testadas todas as tarifas disponíveis no mercado português. Em cada período horário das diferentes tarifas, foi associado um peso, de forma a que períodos em que a eletricidade é mais dispendiosa fossem associados a pesos de maior valor, de forma a que o MPC compreenda que nesse período deve utilizar menos energia que em outros períodos de menor peso.

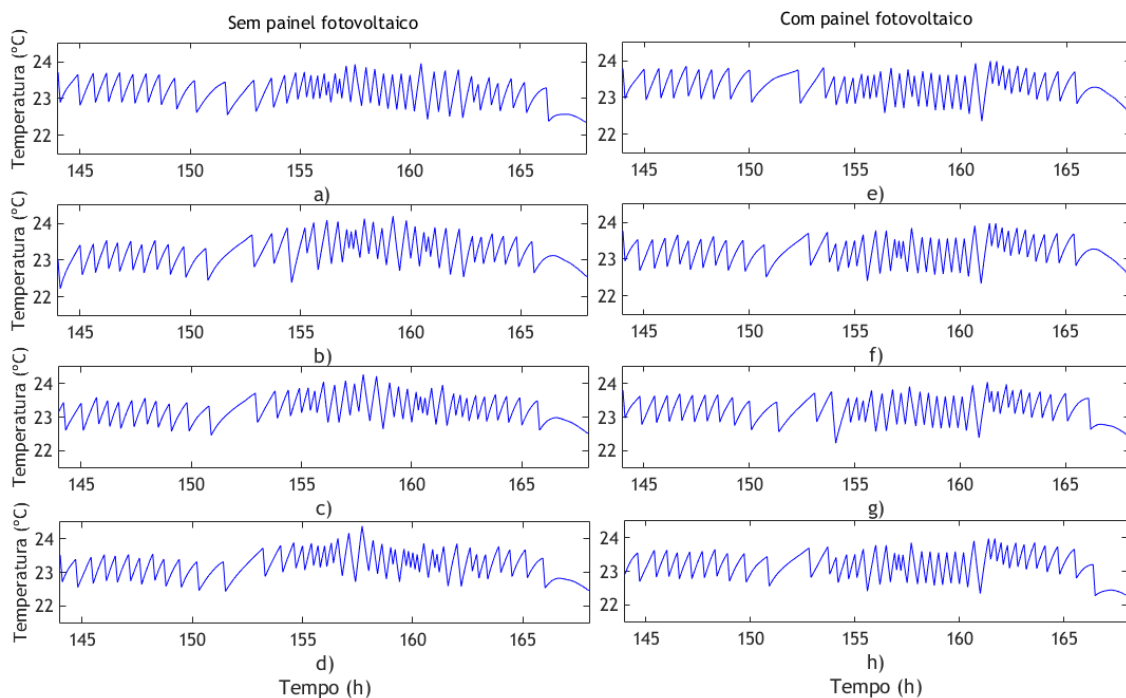


Figura 5.10: Desempenho das restantes arquiteturas de controlo AC com inclusão de pesos no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.

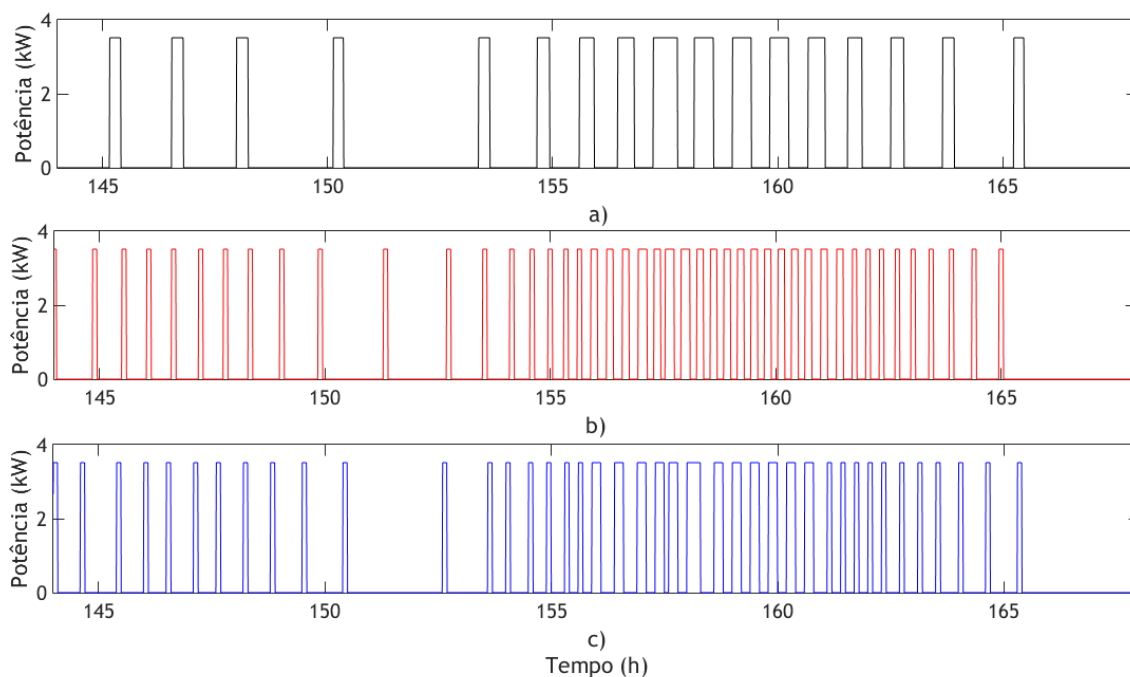


Figura 5.11: Consumo de energia elétrica por parte do AC no período de verão sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.

A Figura 5.11 é possível observar as diferentes estratégias de consumo de energia por parte do sistema de AC. É de fácil compreensão que, como já mencionado anteriormente, o número de ciclos no controlador ON / OFF é menor que nos outros controladores. O controlador ON / OFF, apesar de apresentar menor número de ciclos, estes são de maior duração, uma vez que apresenta variações de temperatura maiores.

O controlador PID apresenta o maior número de ciclos em comparação com o controlador MPC representado na figura 5.11 verifica-se que o controlador MPC apresenta um menor número de ciclos, mas por sua vez apresenta maior duração. É também notável que os ciclos realizados por ambos os controladores apresentam deslocamentos. Isto é, o controlador MPC apresentado compreende o preço a pagar pela eletricidade em cada momento, ao contrario do PID. Analisando com mais detalhe a figura, é possível constatar existem períodos, como, por exemplo, das 152,5h até as 156h o número de ciclos é menor no controlador MPC quando comparado com o controlador PID. Este acontecimento deve-se a que os períodos em questão coincidem com os períodos de ponta, pelo que o controlador MPC apresentado evita consumir energia nesses períodos.

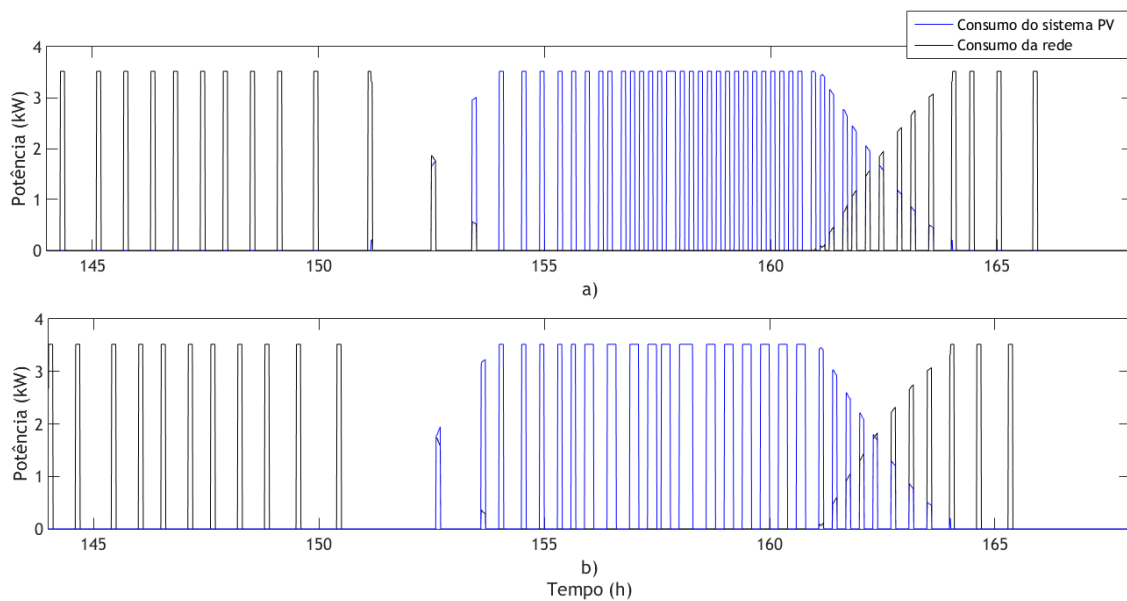


Figura 5.12: Consumo energético do AC, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso (b).

Por forma a aprofundar as diferenças existentes entre as arquiteturas com e sem peso, decidiu-se analisar a energia elétrica consumida pelo sistema AC, proveniente do sistema PV. Assim na Figura 5.12 encontra-se representada a energia consumida do painel fotovoltaico pelo sistema AC.

Analisando os resultados constata-se que na arquitetura MPC sem pesos, são realizados mais ciclos quando comprado com a arquitetura MPC com pesos. No entanto, no cenário com pesos, apesar de o número de ciclos ser menor, estes têm maior duração.

Na Figura 5.12 b), verifica-se também que, tal como pretendido, o consumo de energia proveniente da rede é menor na estratégia MPC com pesos, contribuindo assim para a diminuição da fatura energética a pagar.

5.2.1.2 Período de Inverno

À semelhança do que foi realizado no período de verão, decidiu-se adotar a mesma estratégia ao período de inverno com o objetivo de melhorar os resultados obtidos. Desta forma decidiu-se correr todas as combinações de pesos associados, às variáveis de saída W^y e à taxa de variação das variáveis manipuláveis W^{du} .

Este conjunto de simulações foi realizado com o intuito de compreender qual o conjunto ótimo de pesos que minimiza o custo. Assim, na Figura 5.13 encontram-se representadas todas as combinações de pesos suscetíveis de utilizar.

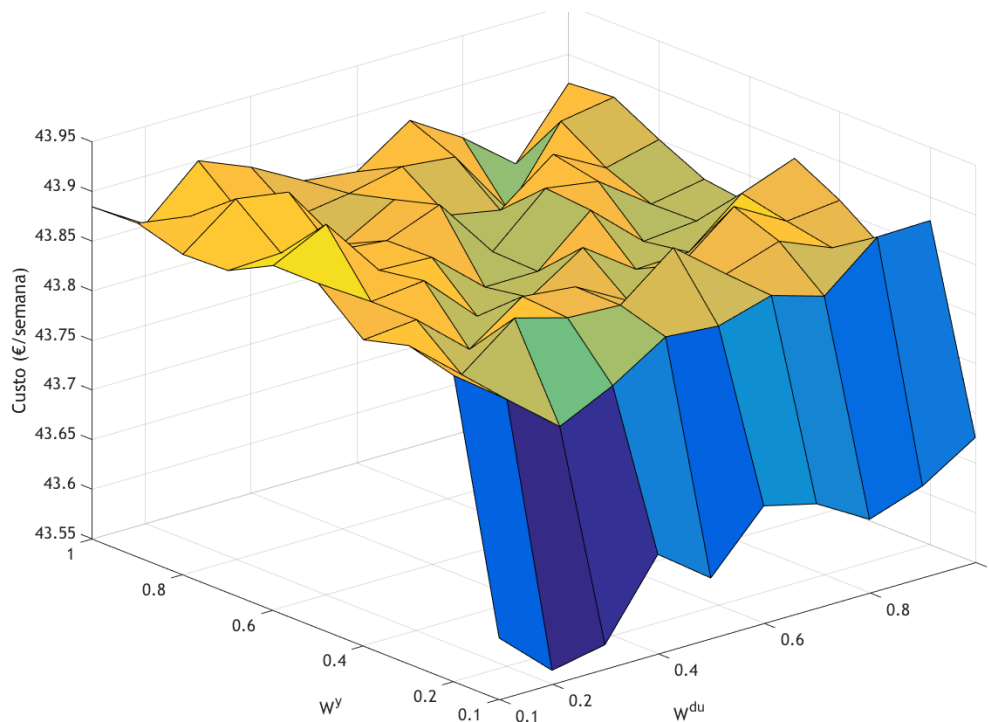


Figura 5.13: Custo a pagar pelo uso do AC face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de inverno, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal.

Face aos resultados obtidos, para o período de verão decidiu-se então atribuir o conjunto de pesos $W^y = 0.1$ e $W^{du} = 0.2$. Com esta combinação obtém-se o melhor resultado do ponto de vista económico. De realçar também, que uma escolha errada dos pesos pode levar a resultados menos satisfatórios.

Definidos os pesos, esta-se então em condições de simular e apresentar os resultados obtidos para o período de inverno. Por conseguinte, nas simulações apresentadas nas Figuras 5.14 e 5.15, serão representados dados referentes ao desempenho dos vários controladores propostos. No caso do MPC serão também apresentados resultados, relativos às várias arquiteturas de pesos sugeridas.

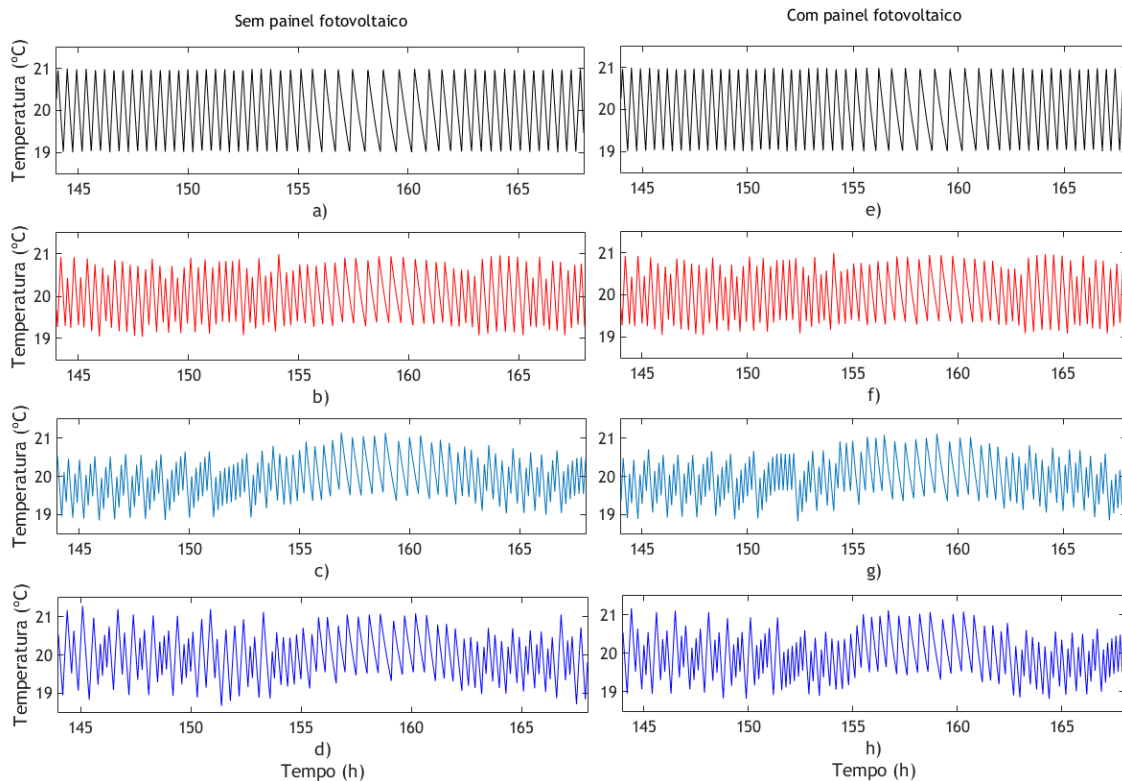


Figura 5.14: Desempenho dos vários controladores de AC propostos no período de inverno. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Controlador MPC com inclusão de pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV, e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal com PV.

À semelhança do período de verão, o controlador ON / OFF apresenta um comportamento bastante mais constante ao longo do dia devido à sua característica histórica. O controlador PID também pelas mesmas razões enunciadas no subcapítulo anterior, não apresenta variações para os cenários com e sem painel fotovoltaico.

Relativamente ao MPC sem pesos, Figura 5.14 c) e g), este apresenta um comportamento característico durante as horas de sol, ou seja, entre as 152h e as 163h. Sabendo antecipadamente que a temperatura durante a noite vai descer para valores muito abaixo da temperatura referência, o controlador eleva ligeiramente a temperatura média durante esse período, aproveitando a energia proveniente da irradiância solar nas paredes. Desta forma, quando essa energia exterior deixar de existir, a habitação irá consumir essa energia acumulada. De seguida a temperatura média interior passa para um valor inferior ao de referência, cumprindo na mesma os limites estipulados. Com este comportamento, superior aos outros enunciados, conseguem-se consumos de energia mais baixos.

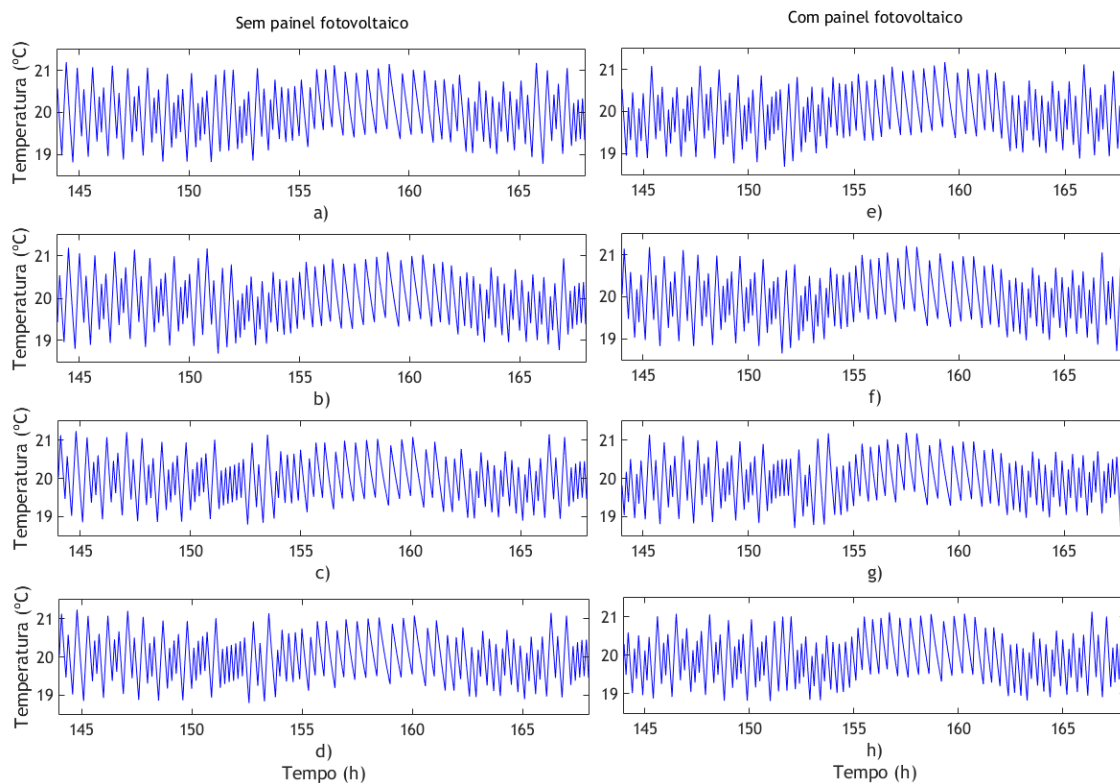


Figura 5.15: Desempenho das restantes arquiteturas de controlo AC com inclusão de pesos no período de inverno. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.

Seguindo a mesma estratégia aplicada no período de verão, na Figura 5.15 estão representadas as restantes estratégias de pesos, associados às diferentes tarifas sugeridas. Este estudo de tarifas foi realizado por forma a compreender qual a influência da escolha das tarifas no resultado final, isto é, no consumo de energia e consequentemente na fatura de eletricidade a pagar.

As arquiteturas de pesos propostas para o cenário em que se inclui o painel fotovoltaico apresenta uma clara elevação da temperatura média interior entre as 156h e as 161h (9h e as 17h). Esta elevação de temperatura é claramente fruto da energia a custo zero proveniente do sistema fotovoltaico.

No período de ponta que se sucede ao período de produção fotovoltaica, isto é, entre as 162,5h e as 166h (18:30h e as 22h), a habitação pode consumir essa energia acumulada. Reduzindo de seguida a temperatura média interior, continuando a cumprir os limites estipulados. Desta forma o consumo de energia em períodos de ponta é menor e consequentemente o custo a pagar também

será menor.

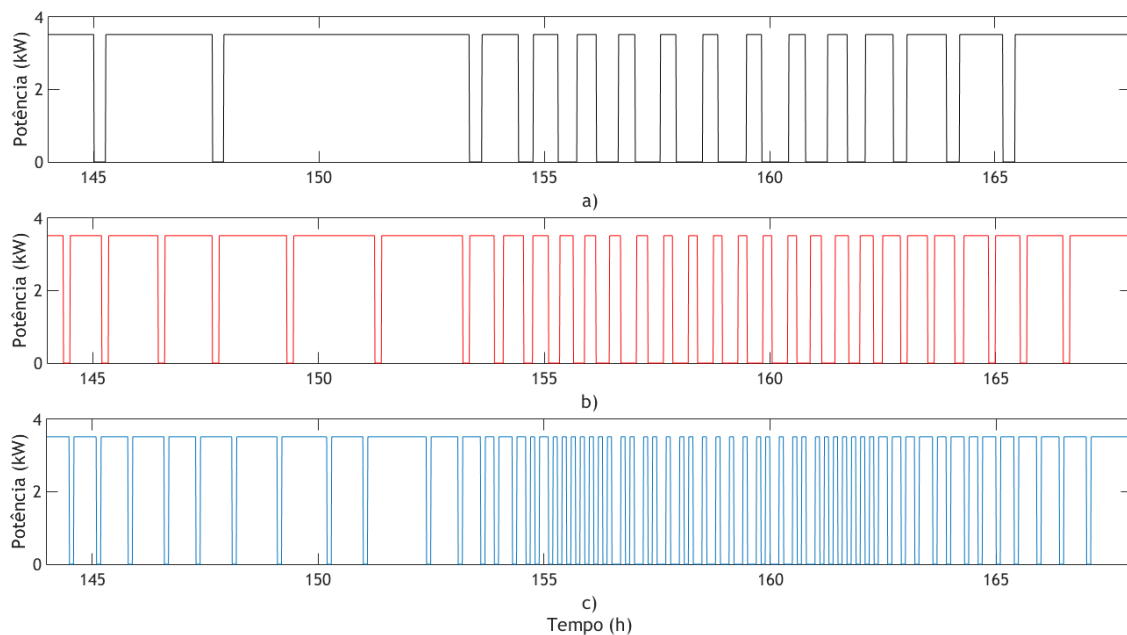


Figura 5.16: Consumo de energia elétrica por parte do AC no período de inverno sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.

Observando a Figura 5.16 verifica-se facilmente que o número de ciclos realizado neste período é bastante superior quando comparado com o período de verão. Pelo que, como seria de esperar o consumo de energia também será maior. Este consumo intenso de energia, verifica-se devido às temperaturas externas, bastante baixas, que se fazem sentir neste período, o que leva a um trabalho intenso do AC.

Observando a Figura 5.16 é possível verificar que o comportamento das diferentes estratégias de consumo de energia por parte do sistema de AC. É de fácil compreensão que, como já mencionado anteriormente, o número de ciclos no controlador ON / OFF é menor que nos outros controladores. O controlador ON / OFF, apesar de apresentar menor número de ciclos, estes são de maior duração, uma vez que também, apresenta variações de temperatura maiores. O controlador MPC com pesos, por sua vez apresenta um número de ciclos superior aos restantes controladores, o que lhe permite alcançar resultados do ponto de vista económico, mais vantajosos.

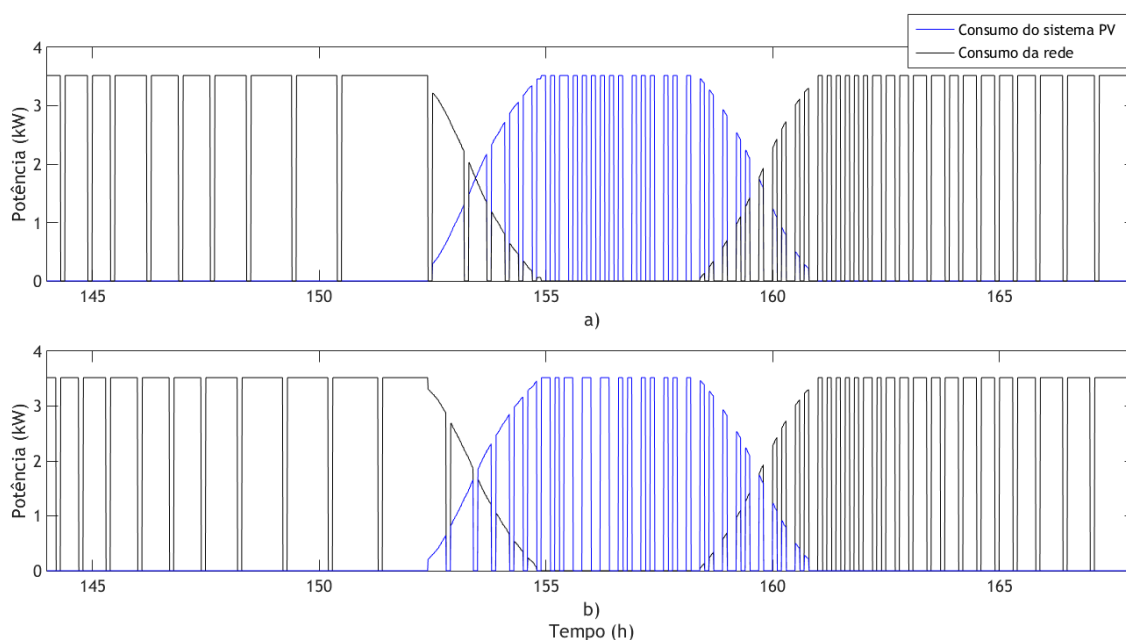


Figura 5.17: Consumo energético do AC, proveniente do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).

Na Figura 5.17 encontra-se representado o consumo energético do sistema AC. Dada a existência de um sistema fotovoltaico, importa extrair e consumir o máximo de energia possível do sistema. Assim é objetivo da arquitetura MPC com pesos sugerida utilizar este recurso o máximo possível e assim diminuir os consumos da rede e consequentemente diminuir a fatura de eletricidade.

Analisando com maior detalhe a Figura 5.17 verificamos que na arquitetura com pesos propostos, o consumo de energia proveniente da rede é menor no caso em que se utilizam pesos associados, assim o preço final a pagar também será menor.

5.2.1.3 Resultados económicos alcançados no período de verão

Na Tabela 5.2, encontra-se representada o custo obtido para o período de verão selecionado, sendo que neste cenário não é contabilizado o sistema fotovoltaico. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo sistema de AC. O objetivo destas simulações passa por perceber qual será a melhor tarifa a aplicar na residência. Com o intuito de alcançar assim poupanças económicas na fatura de eletricidade.

Analisando com mais atenção a Tabela 5.2, percebe-se que a estratégia ON / OFF é inevitavelmente mais cara que as restantes estratégias. O controlo PID por sua vez apresenta poupanças na ordem dos 1,5% em relação ao controlo ON / OFF. A estratégia MPC, por sua vez, apresenta poupanças ligeiramente superiores ao controlo PID ficando ainda muito aquém dos resultados esperados.

Tabela 5.2: Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão, (Valores em Euros).

Controlador	ON / OFF	PID	MPC	MPC com pesos
Custo (€/ semana)				
Tarifa simples	33.839	33.403	33.491	32.324
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	36.416	35.702	35.558	30.214
Tarifa bi-horária de ciclo diário	36.416	35.702	35.558	34.0714
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	30.444	30.079	29.986	28.624
Tarifa tri-horária de ciclo diário	35.083	34.440	34.255	32.807

Tabela 5.3: Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão, (Valores em Euros).

Controlador	ON / OFF	PID	MPC	MPC com pesos
Custo (€/ semana)				
Tarifa simples	12.693	12.532	13.332	12.301
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	10.998	11.071	11.620	10.714
Tarifa bi-horária de ciclo diário	11.224	11.026	11.590	10.850
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	10.356	10.274	10.862	10.054
Tarifa tri-horária de ciclo diário	11.158	11.009	11.528	10.833

Tabela 5.4: Poupanças alcançadas no equipamento Ar-condicionado, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.

	PID	MPC	MPC com pesos
Sem sistema PV			
Poupança (%)			
Tarifa simples	1.29%	1.03%	4.48%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.26%	1.36%	6.12%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.96%	2.36%	6.44%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.20%	1.51%	5.98%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.83%	2.36%	6.49%
Com sistema PV			
Tarifa simples	1.27%	-5.03%	3.09%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.66%	-5.65%	2.58%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.76%	-3.26%	3.33%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.79%	-4.89%	2.91%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.34%	-3.31%	2.91%

A estratégia MPC com pesos apresentada na Tabela 5.2, apresenta por sua vez, resultados encorajadores. A estratégia de pesos associado à tarifa tri-horária de ciclo diário, apresenta poupanças que atingem os 6,49% como podemos observar na Tabela 5.4. No entanto, apesar de ser a estratégia que apresenta poupanças superiores, não coincide com a estratégia que apresenta menor valor final a pagar. A tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta o melhor resultado alcançado, sendo que para o caso da estratégia MPC com pesos associados, foi possível alcançar uma redução de 5,98% face ao controlo ON / OFF.

Na Tabela 5.3 encontra-se enunciados os resultados obtidos no período de verão, com inclusão do sistema fotovoltaico. Assim, como seria de esperar, face à grande intensidade de irradiação solar, a produção fotovoltaica também o será, pelo que o preço da fatura de eletricidade a pagar, será de valor inferior. Além disso, como podemos ver no subcapítulo 5.2.1.1, o período de grande consumo energético coincide com o período de grande produção fotovoltaica.

Neste caso os resultados alcançados são contrários aos obtidos no cenário em que não se inclui o sistema PV. Neste cenário a estratégia MPC apresenta resultados negativos, isto é, a estratégia ON / OFF consegue ser mais vantajosa do ponto de vista económico. Este acontecimento deve-se à elevada taxa de acionamento do sistema AC durante o período de produção fotovoltaica por parte da estratégia ON / OFF. Assim apesar de a estratégia ON / OFF apresentar um consumo de energia maior, esta apresenta custo zero, pelo que o resultado final será melhor.

A estratégia MPC sem pesos, passa por fazer um uso mais constante do sistema AC durante todo o dia, como podemos ver na Figura 5.9. Ao contrario da estratégia ON / OFF que apresenta um consumo mais intenso durante as horas de sol. Por forma a corrigir esta situação foram adicionados pesos à estratégia MPC. Os pesos, desempenham um papel fulcral nesta estratégia. Desta forma o controlador MPC apresenta a capacidade de compreender que durante os períodos de produção fotovoltaica, deve usar o máximo possível de energia proveniente do sistema PV. Além disso, fora dos períodos de produção fotovoltaica, são adicionados diferentes pesos aos diferentes períodos tarifários, levando o controlador a fazer um uso da energia mais eficiente.

Assim sendo a estratégia MPC com peso, associada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta o melhor resultado com uma poupança de 2,91% face à estratégia ON / OFF.

5.2.1.4 Resultados económicos alcançados no período de inverno

No período de inverno é seguido o mesmo procedimento. Assim nas tabelas 5.5 e 5.6 são apresentados os resultados obtidos para o cenário sem e com sistema fotovoltaico respetivamente. A Tabela 5.7 apresenta um resumo das poupanças alcançadas em cada estratégia.

Na Tabela 5.5, encontra-se representada o custo obtido para o período de inverno selecionado, sendo que neste cenário não é contabilizado o sistema fotovoltaico. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo sistema de AC. O objetivo destas simulações é, mais uma vez, compreender qual o melhor sistema tarifário a aplicar na residência.

Analisando a Tabela 5.5, verificamos que os valores semanais a pagar são de carácter mais elevado quando comparados com o período de verão representado na Tabela 5.2. Este acontecimento

deve-se ao acionamento contínuo ao longo do dia do sistema AC, isto é, no verão o AC apenas funciona nos períodos de maior calor, sendo que durante a noite raramente é utilizado. No período de inverno selecionado, a diferença de temperatura para o exterior nunca é nula, pelo que existe sempre troca de calor com o exterior, fazendo com que seja necessário um funcionamento mais constante do sistema AC. Além disso, ao contrário do verão, é durante a noite que o funcionamento do AC é mais intenso, face às baixas temperaturas exteriores.

Tal como no período de verão, a estratégia ON / OFF revela-se mais dispendiosa do ponto de vista económico. A estratégia do controlador PID apresenta poupanças inferiores a 1% em relação ao controlo ON / OFF. A estratégia MPC, por sua vez, apresenta poupanças ligeiramente superiores ao controlo PID. No entanto, a poupança alcançada fica ainda muito aquém dos resultados esperados.

Com a adição de pesos à estratégia MPC, verificamos que as poupanças aumentam significativamente. Este aumento deve-se à relevância dada ao consumo de energia face à condição de conforto. Além disso são também adicionados pesos nas variáveis manipuláveis por forma a controlar o consumo em períodos em que a energia é mais dispendiosa. Assim o preço final a pagar será menor. Na Tabela 5.7 é possível observar que a estratégia MPC com pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo diário, apresenta a maior redução percentual de valor a pagar. No entanto, a estratégia que apresenta melhor desempenho económico é a estratégia MPC com pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo semanal.

No cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, o preço final semanal a pagar desce ligeiramente face ao anterior cenário, fruto da eletricidade produzida localmente. Na Tabela 5.6 observa-se que à semelhança dos anteriores, a estratégia MPC com pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta-se como a mais vantajosa do ponto de vista económico.

No período de inverno, o MPC sem pesos, não apresenta vantagens negativas como no período de verão. Este acontecimento deve-se à baixa quantidade de energia produzida localmente, aliada ao facto de o período de alto consumo energético se localizar durante o período noturno, onde por sua vez, não existe produção fotovoltaica.

Na Figura 5.16 percebe-se que o sistema AC, apresenta elevado consumo entre as 14h e as 15h (0h e as 8h). No entanto, durante todo este período não existem variações no preço da eletricidade, pelo que se torna complicado conseguir alcançar maiores poupanças energéticas. Por esta razão as reduções alcançadas são menores que as alcançadas no período de verão.

Comparativamente, ao período de verão, verifica-se que no cenário em que não se contabiliza a presença dum sistema fotovoltaico, os custos envolvidos são de maior valor. Este acontecimento deve-se sobretudo às baixas temperaturas que se fazem sentir no exterior, e que desta forma, obrigam o sistema de AC a funcionar muito mais constantemente, não só durante o dia, mas principalmente durante a noite, onde as temperaturas ainda são menores.

Tabela 5.5: Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado, no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
	Custo (€/semana)			
Tarifa simples	63.048	63.015	61.906	61.731
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	55.395	55.250	54.595	53.028
Tarifa bi-horária de ciclo diário	57.510	57.617	56.692	55.029
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	54.937	54.824	54.080	52.664
Tarifa tri-horária de ciclo diário	56.431	56.482	55.558	54.040

Tabela 5.6: Resultados obtidos no equipamento Ar-condicionado, no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
	Custo (€/semana)			
Tarifa simples	53.359	53.317	51.917	51.733
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	44.857	44.757	43.772	43.340
Tarifa bi-horária de ciclo diário	45.940	45.974	44.812	44.366
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	44.542	44.539	43.444	42.750
Tarifa tri-horária de ciclo diário	45.568	45.610	44.422	43.735

Tabela 5.7: Poupanças alcançadas no equipamento Ar-condicionado, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.

	PID	MPC	MPC com Pesos
Sem Sistema PV			
Poupança (%)			
Tarifa simples	0.05%	1.81%	2.09%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.26%	1.44%	4.27%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	-0.19%	1.42%	4.31%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.21%	1.56%	4.14%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	-0.09%	1.55%	4.24%
Com Sistema PV			
Tarifa simples	0.08%	2.70%	3.05%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.22%	2.42%	3.38%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	-0.07%	2.46%	3.43%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.01%	2.47%	4.03%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	-0.09%	2.51%	4.02%

5.2.2 Termo-acumulador de água

No presente subcapítulo, serão apresentados os resultados das várias simulações realizadas, por forma a proceder a análise das respostas dos três controladores propostos.

Neste caso, o sistema em análise tem por objetivo o controlo de temperatura de água por recurso a um termo-acumulador. Foram então sugeridos vários cenários, por forma a compreender qual o mais eficiente. Assim o primeiro cenário passa pela não inclusão do sistema fotovoltaico. Nesta situação realiza-se ainda a distinção entre os cenários que incluem ou não pesos nas variáveis. De seguida é também apresentado o cenário no qual se inclui o sistema fotovoltaico. À semelhança do anterior são também apresentados resultados para os casos com e sem pesos nas variáveis, a fim de compreender o contributo dos pesos no resultado final.

Os resultados apresentados irão ter como objetivo a redução do consumo e custo de energia solicitado pelo termo-acumulador. Por forma a compreender o comportamento dos diferentes controladores é apresentada uma simulação para os períodos de verão e de inverno. Nesta simulação não será tida em conta o sistema fotovoltaico.

O desempenho dos vários controladores implementados são apresentados na Figura 5.18 para o período de verão.

Na Figura 5.18, é possível constatar que, à semelhança do sistema AC, o controlador ON / OFF apresenta um comportamento mais constante ao longo dos dias, ditado pela característica termos-tática histerica.

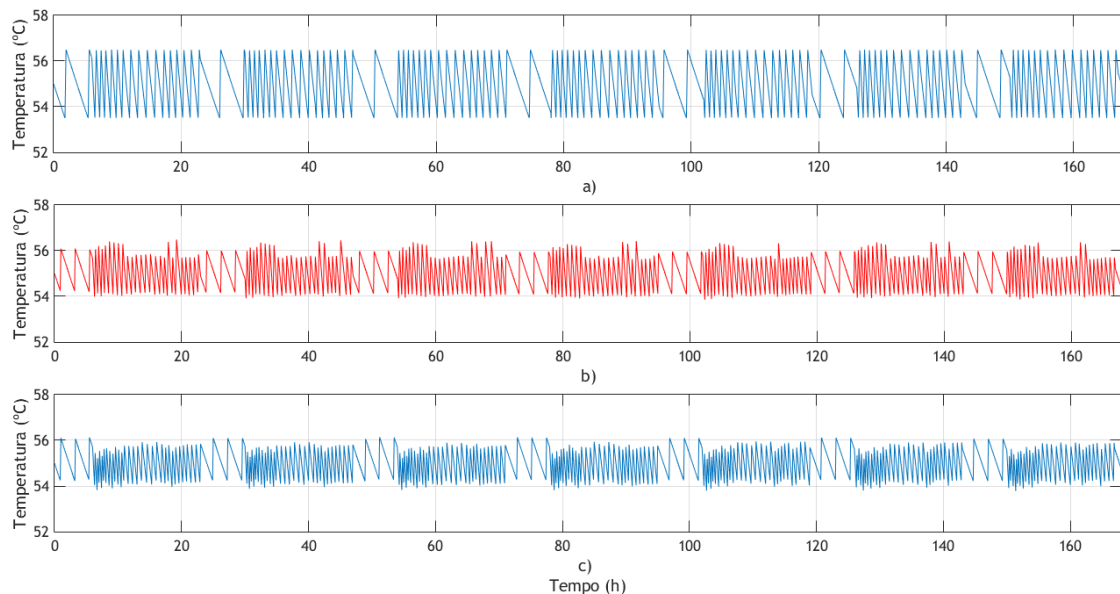


Figura 5.18: Comportamento dos controladores do TA propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.

O controlador PID, sujeito as mesmas restrições, apresenta uma variação de temperatura menor que o controlador ON / OFF. Verifica-se também que nos períodos de elevado consumo de água, a variação de temperatura é superior que nos outros momentos, fruto duma taxa de acionamento mais constante.

Para além disso, e face aos factos apresentados, o número de ciclos realizado pelo controlador PID é maior que o do controlador ON / OFF.

O controlador MPC apresenta um comportamento bastante mais errático que os outros dois controladores. A variação de temperatura dentro do termo-acumulador tende a ser menor que nos outros controladores. Sendo que as variações de temperatura são bastante mais imprevisíveis que a dos anteriores. O número de ciclos é ainda maior que no controlador PID, o que lhe permite alcançar melhor conforto e, ao mesmo tempo maiores poupanças energéticas.

De seguida, são analisadas as estratégias de pesos a utilizar nas simulações, uma vez que a combinação diferente entre pesos leva a diferentes valores-limite. Dado que existem cinco tarifas em estudo durante o mesmo período, o objetivo passa por tentar diminuir o custo da energia, como a Figura 5.25 mostra. Claramente que certa combinação de pesos beneficia o utilizador doméstico reduzindo o custo no período em análise.

Assim, de forma a melhorar os resultados obtidos, decidiu-se correr todas as combinações de pesos associados, às variáveis de saída W^y e à taxa de variação das variáveis manipuláveis W^{du} . Este conjunto de simulações foi realizado com o intuito de compreender qual o conjunto

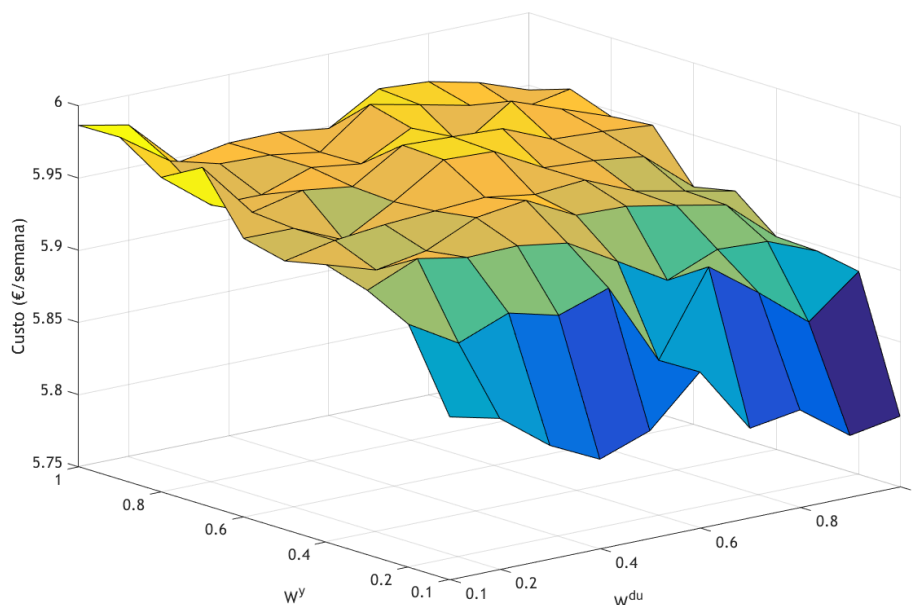


Figura 5.19: Custo a pagar pelo uso do termo-acumulador face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal

ótimo de pesos que minimiza o custo. Assim, na Figura 5.19 encontram-se representadas todas as combinações de pesos suscetíveis de utilizar.

Face aos resultados obtidos, para o período de verão decidiu-se então atribuir o conjunto de pesos $W^y = 0.1$ e $W^{du} = 0.2$. Desta forma obtém-se o melhor resultado do ponto de vista económico. De realçar também, que uma escolha errada dos pesos pode levar a resultados menos satisfatórios. Contudo, existem conjuntos de pesos que são inaceitáveis devido ao comportamento que o controlador toma.

À semelhança da estratégia adotada nos subcapítulos anteriores, dado o longo período de estudo, é difícil compreender as diferentes estratégias tomadas por cada controlador. Assim, de seguida serão apresentados em detalhe os resultados obtidos para um dia semanal. O dia escolhido será o ultimo dia de cada um dos períodos, ou seja, sexta-feira no período de verão.

Tal como no capítulo anterior, dado o longo período apresentado na Figura 5.18, é difícil compreender as diferentes estratégias tomadas por cada controlador. Desta forma, será de seguida realizada uma análise diária, isto é, para apenas um dia do período escolhido.

No entanto, como o principal objetivo do estudo passa por reduzir a fatura de eletricidade duma residência em Portugal, é importante compreender qual a melhor tarifa a contratar. Pelo que foram simuladas todas as tarifas disponíveis a fim de compreender a que melhor se adequa.

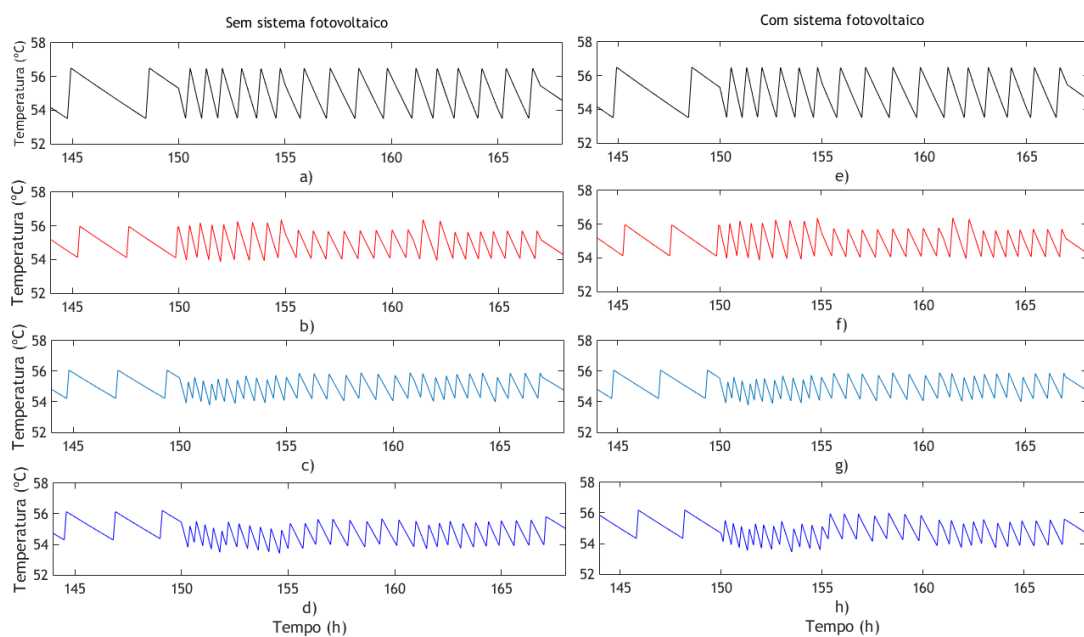


Figura 5.20: Desempenho dos vários controladores do TA propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.

Na Figura 5.20, encontra-se representada a estratégia, detalhada, tomada pelos vários controladores propostos. Por forma a analisar o impacto do sistema fotovoltaico, foram criados dois cenários diferentes.

Como é possível constatar, não existe nenhum tipo de diferença entre as estratégias representadas na Figura 5.20 a), b), c) e e), f), g). Este funcionamento, deve-se ao desconhecimento, por parte do controlador, da existência de eletricidade produzida localmente. Assim a estratégia ON / OFF, PID e MPC sem pesos apresentam comportamento semelhante nos dois cenários criados.

No entanto, a estratégia proposta na Figura 5.20 d) e h) apresentam comportamento diferente nos dois cenários. É facilmente visível que entre os instantes 155h e 162h (11h e as 18h), existe uma elevação da temperatura interior do termo-acumulador. Esta elevação coincide com o período em que existe diminuição do consumo de água quente e adicionalmente existe potência fotovoltaica produzida localmente, disponível para consumo. Assim, através do sistema de pesos implementado, o controlador dá prioridade à elevação da temperatura em períodos em que existe eletricidade gratuita, contribuindo assim para a diminuição da fatura energética. Adicionalmente, a potência injetada na rede, fruto dos excessos de produção, também irá diminuir, contribuindo para um retorno mais acelerado do investimento feito no sistema fotovoltaico.

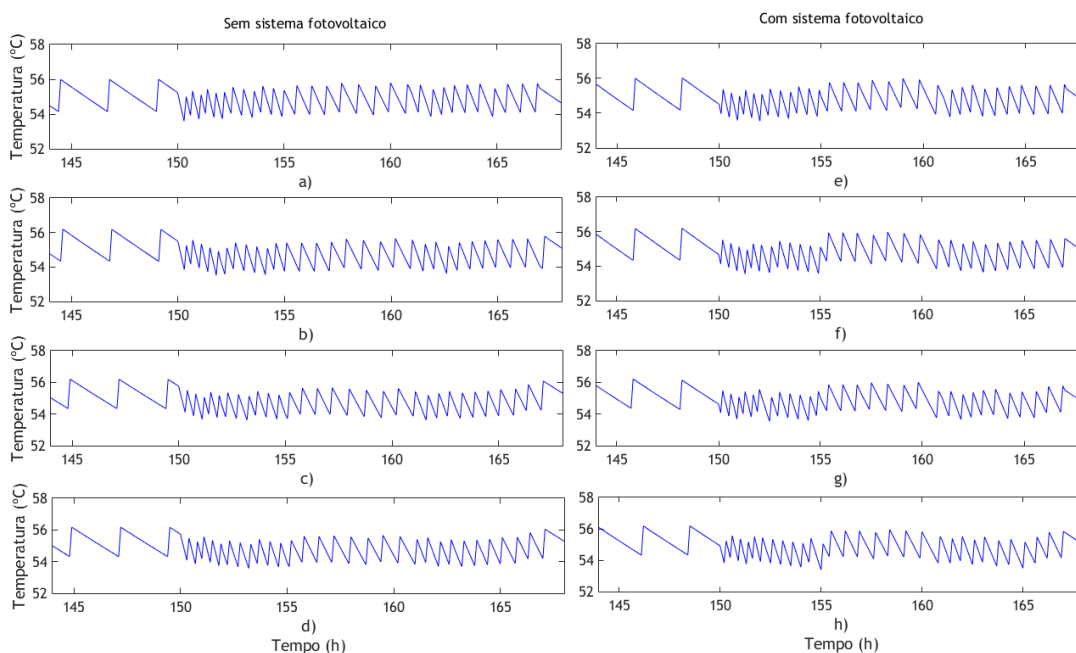


Figura 5.21: Desempenho das restantes arquiteturas de controlo do TA com inclusão de pesos no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.

Seguindo a mesma estratégia aplicada à carga anterior procedeu-se à simulação das restantes estratégias de pesos, associados às diferentes tarifas sugeridas.

Como é possível observar na Figura 5.21, considerando o cenário em que não se inclui o sistema fotovoltaico, verificam-se diferenças entre as várias estratégias aplicadas. Estas diferenças resultam dos pesos associados às variáveis manipuladas em cada instante de tempo. Estes pesos variam conforme o período da tarifa. Assim comparando a estratégia de pesos associada à tarifa simples com a estratégia associada à estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, verifica-se um abaixamento da temperatura média, do termo-acumulador, nos períodos de ponta.

As arquiteturas de pesos propostas para o cenário em que se inclui o painel fotovoltaico apresenta uma clara elevação da temperatura média do termo-acumulador entre as 155h e as 161h (11h e as 17h). Esta elevação coincide com o período em que existe diminuição do consumo de água quente e simultaneamente existe potência fotovoltaica produzida localmente, disponível para consumo.

As estratégias propostas para o cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico apresenta uma diminuição da temperatura nos períodos em que o peso associado à variável manipulável é maior. Um peso maior implica um custo maior pelo que se deve consumir menos energia nesse período. Com esta estratégia o consumo de energia diminui.

Na Figura 5.22 encontra-se representado o consumo de energia ao longo do dia, apresentado pelo termo-acumulador de acordo com a estratégia de controlo aplicada.

A estratégia ON / OFF apresenta menor número de ciclos, mas de maior duração, não possuindo qualquer informação acerca do preço da energia. A estratégia PID, também não conhece

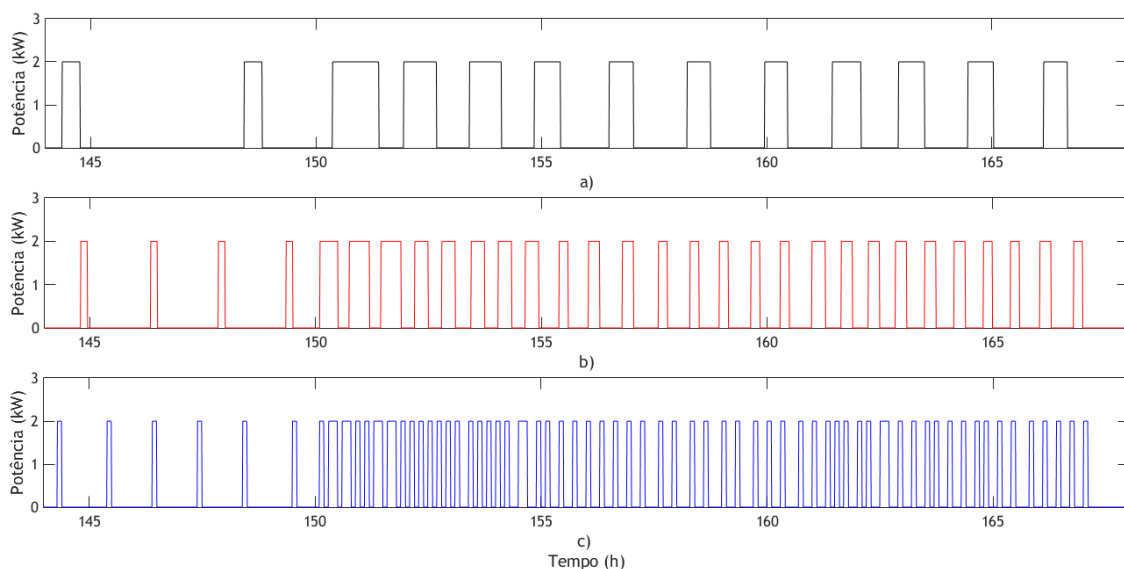


Figura 5.22: Consumo de energia elétrica por parte do TA no período de inverno sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.

os períodos tarifários. No entanto, apresenta um número de ciclos superior à estratégia ON / OFF.

A estratégia MPC com peso associada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta um consumo energético diferenciado. O seu comportamento tira partido do conhecimento, por parte do controlador, acerca dos períodos tarifários. Assim, por exemplo, no período de ponta, isto é, entre as 9:15h e as 12:15h, verifica-se um menor consumo que nas restantes estratégias. Sendo que essa diminuição é mais visível a partir das 11h, instante em que o consumo de água diminui.

Outra diferença da arquitetura MPC com pesos passa pelo número de ciclos realizados. Como podemos ver ao contrario do controlador ON / OFF o MPC apresenta um número de ciclos superior, mas de menor duração. Contribuindo assim para uma menor variação na temperatura interior do termo-acumulador.

Na Figura 5.23 encontram-se representados os consumos energéticos de duas estratégias MPC. O objetivo desta representação passa por compreender a influência dos pesos no consumo do TA. Assim analisando com mais atenção a figura, percebe-se que a estratégia MPC sem pesos, representada na Figura 5.23 a), apresenta maior consumo de energia proveniente do sistema PV. No entanto, a estratégia MPC com pesos 5.23 b), apresenta menor consumo de energia da rede pelo que o custo final a pagar é menor.

Além disso, podemos constatar que a estratégia MPC sem pesos, apresenta maior número de ciclos de curta duração no período de produção fotovoltaica. Enquanto que a estratégia MPC com pesos apresenta menos ciclos, mas de maior duração.

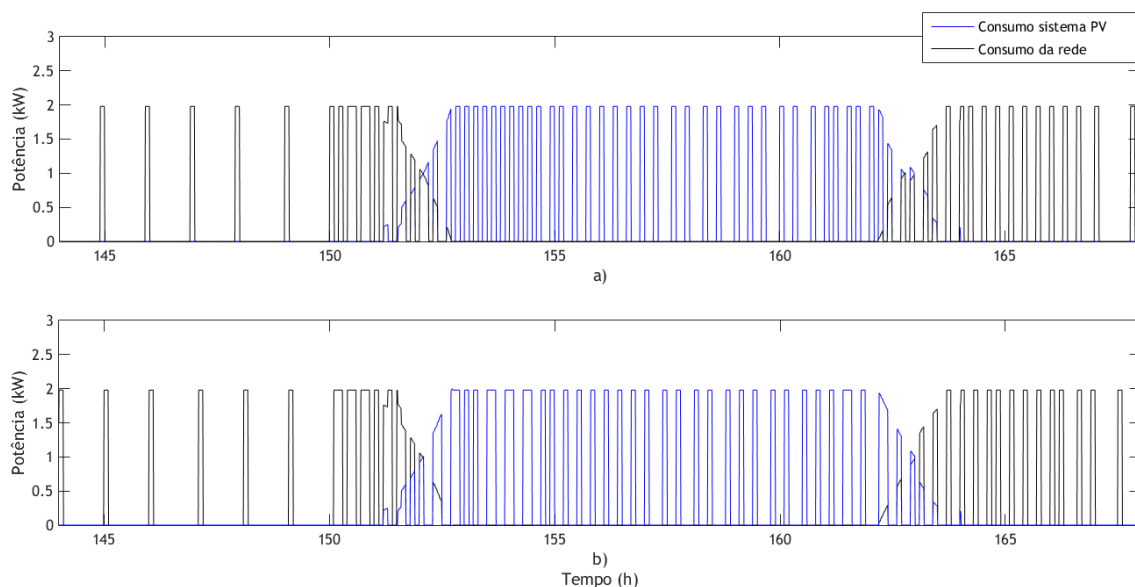


Figura 5.23: Consumo energético do termo-acumulador, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).

5.2.2.1 Resultados económicos alcançados no período de verão

Nesta secção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas várias simulações propostas. O objetivo passa por compreender qual a estratégia que permite alcançar melhores resultados económicos.

De seguida nas tabelas 5.8 e 5.9, são apresentados os resultados obtidos para os cenários sem e com sistema fotovoltaico respetivamente, para o período de verão.

Na Tabela 5.8, encontra-se representado o custo obtido para o período de verão selecionado, sendo que neste cenário não é utilizado o sistema fotovoltaico proposto. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo termo-acumulador. O objetivo destas simulações passa por perceber qual será a melhor tarifa a aplicar na residência. Com o intuito de alcançar assim poupanças económicas na fatura de eletricidade.

Analisando com mais atenção a Tabela 5.8, e à semelhança dos resultados obtidos anteriormente verifica-se que a estratégia de controlo ON / OFF é mais desvantajosa em todos os casos testados.

O controlo PID, que apresenta um comportamento mais errático que o ON / OFF, apresenta poupanças na ordem dos 1,2% em relação ao controlo ON / OFF. Estas poupanças devem-se a um trajeto mais vantajoso da temperatura interior do TA, donde se pode destacar as baixas variações de temperatura em relação à estratégia ON / OFF.

A estratégia MPC, por sua vez, apresenta poupanças ligeiramente superiores ao controlo PID. O controlador MPC sem pesos, é capaz de alcançar poupanças cerca de duas vezes superiores aquelas que foram alcançadas com recurso à estratégia PID.

Com o intuito de ainda conseguir melhores resultados do ponto de vista económico, foi simulada uma outra estratégia, em que se adicionaram pesos nas variáveis do controlador MPC.

A estratégia MPC com pesos presentes na Tabela 5.8, apresenta custos menores face à estratégia sem pesos. A estratégia de pesos associado à tarifa bi-horária de ciclo semanal, apresenta poupanças que atingem os 3.64% como podemos observar na Tabela 5.10. No entanto apesar de ser a estratégia que apresenta poupanças percentuais superiores, não coincide com a estratégia que apresenta menor valor final a pagar. A tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta o melhor resultado alcançado.

Na Tabela 5.9 é possível observar os resultados obtidos para o período de verão, no qual se inclui um sistema fotovoltaico. Tal como no caso do Ar-condicionado, face à energia disponível para consumo a custo zero, é empírico que o valor final a pagar seja menor.

A estratégia MPC sem pesos, passa por fazer um uso mais constante do sistema AC durante todo o dia, como podemos ver na Figura 5.20. Com o intuito de melhorar os resultados obtidos foram adicionados pesos às variáveis, na estratégia MPC. Os pesos, desempenham um papel fulcral nesta estratégia. Assim o controlador MPC possui a capacidade de compreender que durante os períodos de produção fotovoltaica, deve usar o máximo possível de energia proveniente do sistema PV. Além disso, fora dos períodos de produção fotovoltaica, são adicionados pesos aos diferentes períodos tarifários, levando o controlador a fazer um uso mais eficiente da energia.

Tabela 5.8: Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com peso
	Custo (€/ semana)			
Tarifa simples	17.685	17.468	17.203	17.070
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	17.523	17.305	17.103	16.884
Tarifa bi-horária de ciclo diário	17.933	17.758	17.567	17.334
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	16.647	16.469	16.260	16.060
Tarifa tri-horária de ciclo diário	17.416	17.193	17.000	16.885

Tabela 5.9: Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com peso
	Custo (€/ semana)			
Tarifa simples	7.424	7.368	7.131	7.070
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	6.478	6.407	6.433	6.278
Tarifa bi-horária de ciclo diário	5.997	5.974	5.832	5.777
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	6.168	6.086	5.981	5.867
Tarifa tri-horária de ciclo diário	6.057	6.001	5.850	5.780

Tabela 5.10: Poupanças alcançadas no equipamento Termo-acumulador, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.

	PID	MPC	MPC com pesos
Sem sistema PV			
	Poupança (%)		
Tarifa simples	1.23%	2.73%	3.48%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.24%	2.40%	3.64%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.98%	2.04%	3.34%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.07%	2.32%	3.53%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.28%	2.39%	3.05%
Com sistema PV			
Tarifa simples	0.76%	3.96%	4.78%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.10%	0.70%	3.09%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.38%	2.75%	3.67%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.32%	3.04%	4.88%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.92%	3.42%	4.58%

No cenário em que se incluí o sistema fotovoltaico, constatou-se que a tarifa bi-horária de ciclo diário, apresenta melhores resultados que a tarifa bi-horária de ciclo semanal, como podemos ver na Tabela 5.9. Este resultado, deve-se ao período de grande consumo de água quente, coincidir com a transição do período tarifário. Isto é, na opção de ciclo diário, o pico de consumo, entre as 6h e as 8h (150h e as 152h), coincide com o período de vazio. Por outro lado, na tarifa bi-horária de ciclo semanal, apesar de o fim de semana ser bastante mais favorável do ponto de vista económico, o pico de consumo é abrangido pelos dois períodos tarifários. Desta forma, o custo a pagar será obrigatoriamente maior.

Também a tarifa tri-horária de ciclo diário, apresenta melhores resultados que a tarifa tri-horária de ciclo semanal, como podemos ver na Tabela 5.9. À semelhança do que acontece na tarifa bi-horária, o período de grande consumo de água quente, coincide com a transição de períodos tarifários. Assim sendo, na opção de ciclo diário, o pico de consumo, entre as 6h e as 8h (150h e 152h), coincide com o período de vazio. Por outro lado, na tarifa tri-horária de ciclo semanal, o período em questão já engloba um período de vazio e outro de cheias pelo que o valor a pagar terá obrigatoriamente que ser superior. Para além disso, na opção de ciclo diário, até as 11h (155h), apenas são incluídos dois períodos tarifários, enquanto que na opção de ciclo semanal, são incluídos três períodos tarifários. Contribuindo assim para o aumento do preço final a pagar pelo consumo energético.

5.2.2.2 Resultados económicos alcançados no período de inverno

No período de inverno, optou-se por não explicar as figuras referentes ao comportamento da temperatura, da água, dentro do termo-acumulador, uma vez que estas apresentam um comportamento muito semelhante ao apresentado no período de verão.

O comportamento é muito semelhante, visto o termo-acumulador se encontrar dentro do edifício. Assim, este não estará sujeito a grandes variações de temperatura provocadas pela temperatura exterior ao edifício. As únicas diferenças encontradas face ao período de verão, são relativas às tarifas de eletricidade e à temperatura interior do edifício. Desta forma, apenas o valor a pagar final é que será afetado.

Por conseguinte, neste subcapítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas várias simulações propostas. O objetivo passa por compreender qual a estratégia que permite alcançar melhores resultados económicos. Nas Tabelas 5.11 e 5.12, são apresentados os resultados obtidos para os cenários sem e com sistema fotovoltaico respetivamente, para o período de verão.

Na Tabela 5.11, encontra-se representado o custo obtido para o período de inverno selecionado, sendo que neste cenário não é incluído o sistema fotovoltaico proposto. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo termo-acumulador. O objetivo destas simulações passa por perceber qual será a melhor tarifa a aplicar na residência.

Analisando com mais atenção a Tabela 5.11, e à semelhança dos resultados obtidos anteriormente, no período de verão, verifica-se que a estratégia de controlo ON / OFF é mais desvantajosa em todos os casos testados.

Tabela 5.11: Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
	Custo (€/ semana)			
Tarifa simples	18.186	18.061	17.869	17.674
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	17.889	17.649	17.524	17.173
Tarifa bi-horária de ciclo diário	18.469	18.363	18.264	17.879
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	17.651	17.404	17.273	16.851
Tarifa tri-horária de ciclo diário	17.956	17.862	17.835	17.423

O controlo PID, à semelhança dos resultados alcançados no período de verão, apresenta poupanças face ao controlo ON / OFF em todas as tarifas. Nas tarifas de ciclo diário as poupanças atingidas, são de menor valor que as conseguidas em tarifas de ciclo semanal como se pode constatar na Tabela 5.13.

O controlador MPC, apresenta poupanças de grandeza superior ao controlo PID. À semelhança do controlador PID, o MPC sem pesos apresenta melhores resultados nas tarifas de ciclo semanal, quando comparadas com as de ciclo diário.

No entanto, os resultados apresentados ainda não são suficientemente satisfatórios. Desta forma, foi simulada uma outra estratégia, em que se adicionaram pesos nas variáveis do controlador MPC.

Assim sendo, o controlador MPC com pesos, presente na Tabela 5.11, apresenta custos inferiores a todas as outras estratégias apresentadas, em todos os sistemas tarifários testados. A estratégia de pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta poupanças que atingem os 4,53% como podemos observar na Tabela 5.13.

Na Tabela 5.12 é possível observar os resultados obtidos para o período de inverno, sendo que neste cenário é contabilizada a presença dum sistema fotovoltaico. Desta forma, em sintonia com os resultados alcançados em simulações anteriores, é de esperar que o custo final a pagar seja menor fruto da energia produzida localmente.

Os pesos, desempenham um papel fulcral na implementação dum controlador MPC. Com a inclusão dos pesos o controlador MPC possui a capacidade de compreender que durante os

Tabela 5.12: Resultados obtidos no equipamento Termo-acumulador no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
	Custo (€/ semana)			
Tarifa simples	15.631	15.310	15.359	14.868
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	14.985	14.768	14.765	14.194
Tarifa bi-horária de ciclo diário	15.573	15.454	15.314	14.652
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	15.001	14.720	14.574	13.981
Tarifa tri-horária de ciclo diário	15.218	15.122	14.938	14.382

Tabela 5.13: Poupanças alcançadas no equipamento Termo-acumulador, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.

	PID	MPC	MPC com Pesos
Sem sistema PV			
Poupança (%)			
Tarifa simples	0.69%	1.74%	2.81%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.34%	2.04%	4.01%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.57%	1.11%	3.20%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.40%	2.14%	4.53%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.52%	0.67%	2.97%
Com sistema PV			
Tarifa simples	1.16%	1.74%	4.88%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.45%	1.47%	5.28%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.77%	1.66%	5.92%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.87%	2.85%	6.80%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.63%	1.84%	5.49%

períodos de produção fotovoltaica, deve usar o máximo possível de energia proveniente do sistema PV. No entanto, em períodos de baixa ou nula produção fotovoltaica, são adicionados pesos aos diferentes períodos tarifários, levando o controlador a fazer um uso mais racional da energia e consequentemente do preço final a pagar. Mas, visto a produção fotovoltaica ser bastante inferior à conseguida no período de verão, a redução do custo final a pagar não será tão acentuada como aconteceu no período de verão.

No período de inverno, considerando o sistema fotovoltaico, constata-se que a tarifa tri-horária de ciclo semanal apresenta a maior poupança alcançada, coincidindo também com a estratégia de valor mais baixo a pagar.

Comparativamente, ao período de verão, verifica-se que no cenário em que não se contabiliza a presença dum sistema fotovoltaico, os custos envolvidos são de maior valor. Este acontecimento deve-se sobretudo a uma menor temperatura interior do edifício. Isto é, no verão a temperatura interior da casa ronda os 23°C, enquanto no período de inverno a temperatura ronda os 20°C. Desta forma, a temperatura exterior ao termo-acumulador, é mais vantajosa no período de verão, pois, o termo-acumulador necessita de menos esforço para manter a temperatura interior nos limites predefinidos.

Da mesma forma, o cenário com sistema fotovoltaico, apresenta melhores resultados no período de verão, essencialmente devido às elevadas produções fotovoltaicas que se apresentam no período de verão, face ao período de inverno.

5.2.3 Frigorífico

No presente subcapítulo, serão enunciados os resultados das várias simulações realizadas, por forma a proceder à análise das respostas dos três controladores propostos. Neste caso, o sistema em

análise tem por objetivo o controlo de temperatura interior dum frigorífico. São então propostos vários cenários, por forma a compreender qual o mais vantajoso.

O primeiro cenário, passa pela não inclusão do sistema fotovoltaico, sendo que nesta situação, realiza-se ainda a distinção entre os cenários que incluem ou não pesos nas variáveis. De seguida é também apresentado o cenário no qual se inclui o sistema fotovoltaico. À semelhança do anterior, são também apresentados resultados para os casos com e sem pesos nas variáveis, a fim de compreender o contributo dos pesos no resultado final.

O desempenho dos vários controladores implementados são apresentados na Figura 5.24 para o período de verão. De seguida será então realizada uma análise do comportamento de cada estratégia proposta.

O controlador ON / OFF apresenta um comportamento simétrico, e menos imprevisível ao longo do dia devido à sua característica histórica.

Por outro lado, o controlador PID, apesar de sujeito as mesmas restrições que o controlador ON / OFF apresenta uma variação de temperatura menor, para além de que a variação da temperatura não é tão previsível como o do controlador ON / OFF. É ainda de destacar, o elevado número de ciclos realizado pelo controlador PID, quando comparado com o controlador ON / OFF.

O controlador MPC, apresenta um comportamento bastante mais errático que os outros controladores. As variações de temperatura são mais imprevisíveis que as dos controladores anteriores. O número de ciclos, por sua vez, ainda é maior que no controlador PID, permitindo assim alcançar um comportamento mais correto, e , ao mesmo tempo maiores poupanças energéticas.

Importa agora decidir qual a estratégia de pesos a utilizar nas simulações, uma vez que a

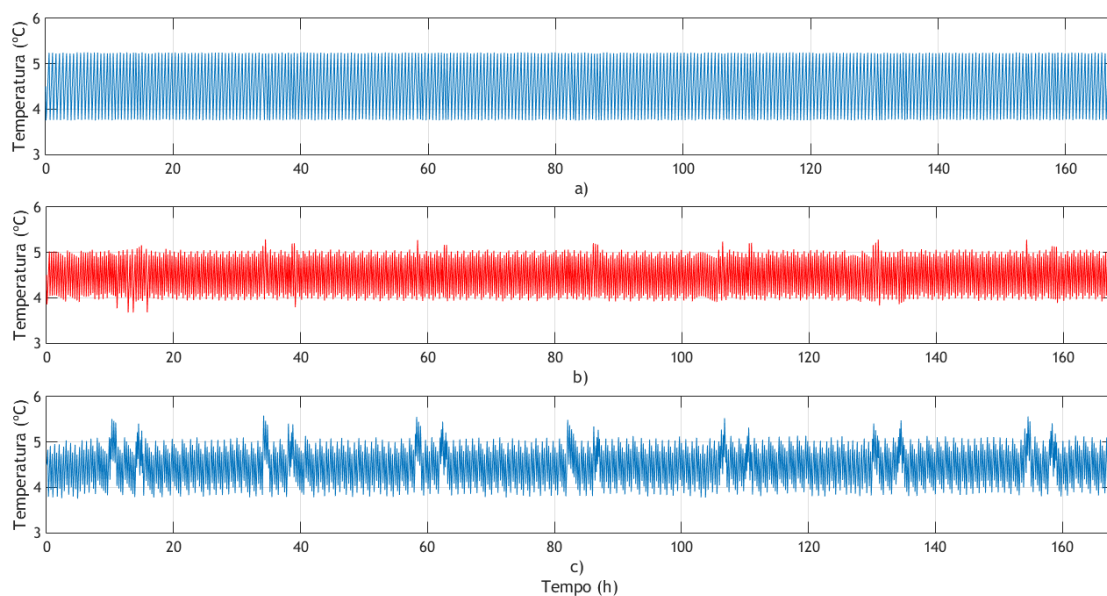


Figura 5.24: Comportamento dos controladores de FR propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF, b) Controlador PID, c) Controlador MPC sem pesos.

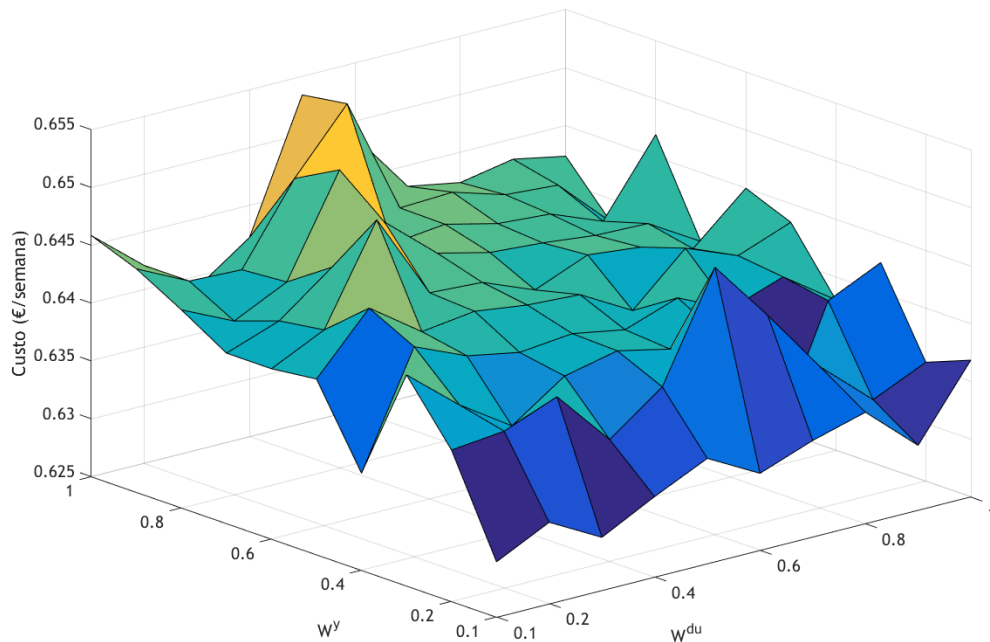


Figura 5.25: Custo a pagar pelo uso do frigorífico face à estratégia de pesos adotada. Esta simulação foi realizada no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico, no período de verão, utilizando a tarifa tri-horária de ciclo semanal

combinação diferente entre pesos leva a diferentes valores-limite. Dado que existem cinco tarifas em estudo durante o mesmo período, o objetivo passa por tentar diminuir o custo da energia, como a Figura 5.25 mostra. Claramente que certa combinação de pesos, beneficia o utilizador doméstico reduzindo o custo no período em análise.

Assim, de forma a melhorar os resultados obtidos, decidiu-se correr todas as combinações de pesos associados, às variáveis de saída W^y e à taxa de variação das variáveis manipuláveis W^{du} . Este conjunto de simulações foi realizado com o intuito de compreender qual o conjunto ótimo de pesos que minimiza o custo. Assim, na Figura 5.25 encontram-se representadas todas as combinações de pesos suscetíveis de utilizar.

Face aos resultados obtidos, para o período de verão decidiu-se então atribuir o conjunto de pesos $W^y = 0.1$ e $W^{du} = 0.4$. Desta forma obtém-se o melhor resultado do ponto de vista económico. De realçar também, que uma escolha errada dos pesos pode levar a resultados menos satisfatórios. Contudo, existem conjuntos de pesos que são inaceitáveis devido ao comportamento que o controlador toma.

À semelhança da estratégia adotada nos subcapítulos anteriores, dado o longo período de estudo, é difícil compreender as diferentes estratégias tomadas por cada controlador. Assim, de seguida serão apresentados em detalhe os resultados obtidos para um dia semanal. O dia escolhido será o ultimo dia de cada um dos períodos, ou seja, sexta-feira no período de verão.

Com este tipo de abordagem, pretende-se facilitar a compreensão das diferenças de atuação, dos controladores propostos, em cada instante de tempo e assim proceder à sua análise. No entanto, como o principal objetivo do estudo passa por reduzir a fatura de eletricidade numa residência em Portugal, é importante compreender qual a melhor tarifa a contratar. Pelo que foram simuladas todas as tarifas disponíveis a fim de compreender a que mais se adequa.

Na Figura 5.26, à exceção do controlador MPC com pesos, é facilmente perceptível que não existe qualquer diferença no comportamento das estratégias tomadas pelos vários controladores testados, quando se inclui ou não, o proposto sistema fotovoltaico. Isto é, o comportamento dos controladores ON / OFF, PID e MPC sem pesos, apresenta a mesma trajetória ao longo do dia, com ou sem produção fotovoltaica.

Relativamente ao MPC sem pesos, Figura 5.26 c) e g), não se observa qualquer diferença na trajetória da temperatura nos dois cenários propostos. Este facto é consequência do não conhecimento por parte do controlador acerca dos períodos tarifários.

Na arquitetura MPC com pesos agregados à tarifa tri-horária de ciclo semanal, representada na Figura 5.26 d) e h), observam-se diferenças. Este controlador, possui a capacidade de compreender o preço da eletricidade consumida através da aplicação dum conjunto de pesos às variáveis. As

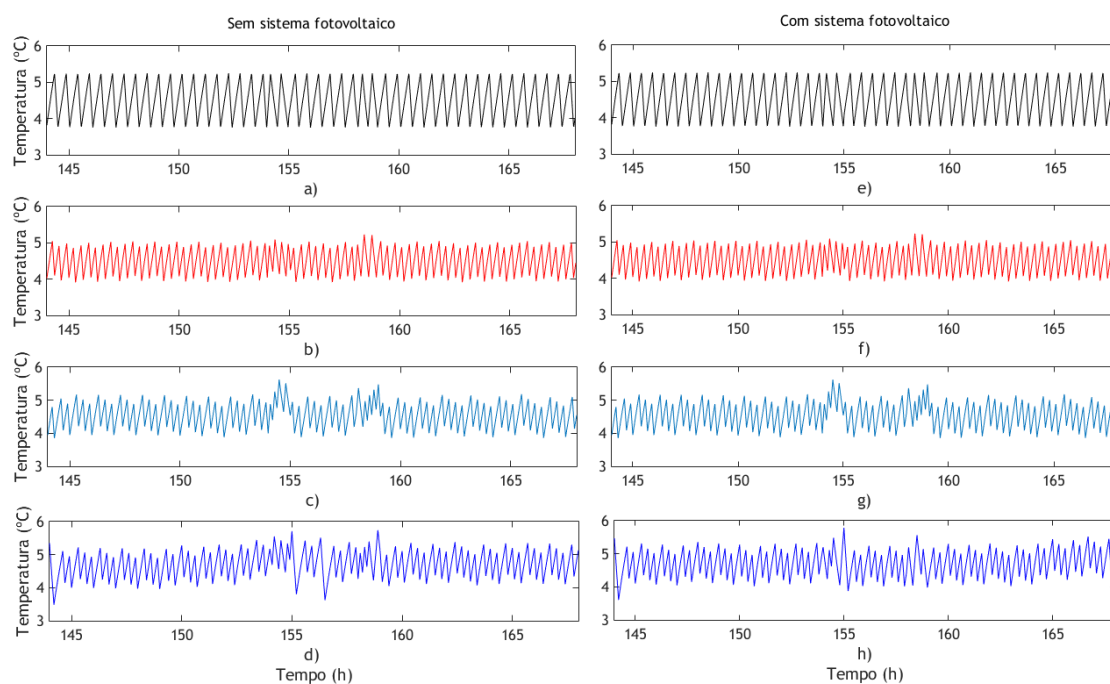


Figura 5.26: Desempenho dos vários controladores de FR propostos no período de verão. a) Controlador ON / OFF sem PV, b) Controlador PID sem PV, c) Controlador MPC na ausência de pesos sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, sem PV., e) Controlador ON / OFF com PV, f) Controlador PID com PV, g) Controlador MPC na ausência de pesos com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, com PV.

diferenças observadas, devem-se aos pesos associados a cada intervalo de tempo da proposta tarifa tri-horária de ciclo semanal.

No cenário em que não se inclui sistema fotovoltaico, observa-se uma ligeira elevação da temperatura média interior no período entre as 153h e as 157h (9:00h e as 13:00h). Este acontecimento está diretamente relacionado com a mudança para período de ponta do sistema tarifário. Neste período existem também vários distúrbios, causados pela abertura e fecho de porta do frigorífico, que contribuem para o aumento da temperatura interior.

Por outro lado, na Figura 5.26 h), do mesmo período, observa-se uma ligeira diminuição da temperatura interior do frigorífico. Neste período, como existe elevada produção fotovoltaica, existe energia a custo zero disponível para consumo. Assim, a estratégia adotada atribui ao período de produção fotovoltaica um peso muito pequeno, para que a taxa de utilização seja maior e assim contribuir para a redução do consumo energético da rede.

Quando o recurso solar é insuficiente para satisfazer o consumo do frigorífico, isto é, pelas 163h (19:00h), a temperatura interior é elevada para um valor superior à referência, continuando

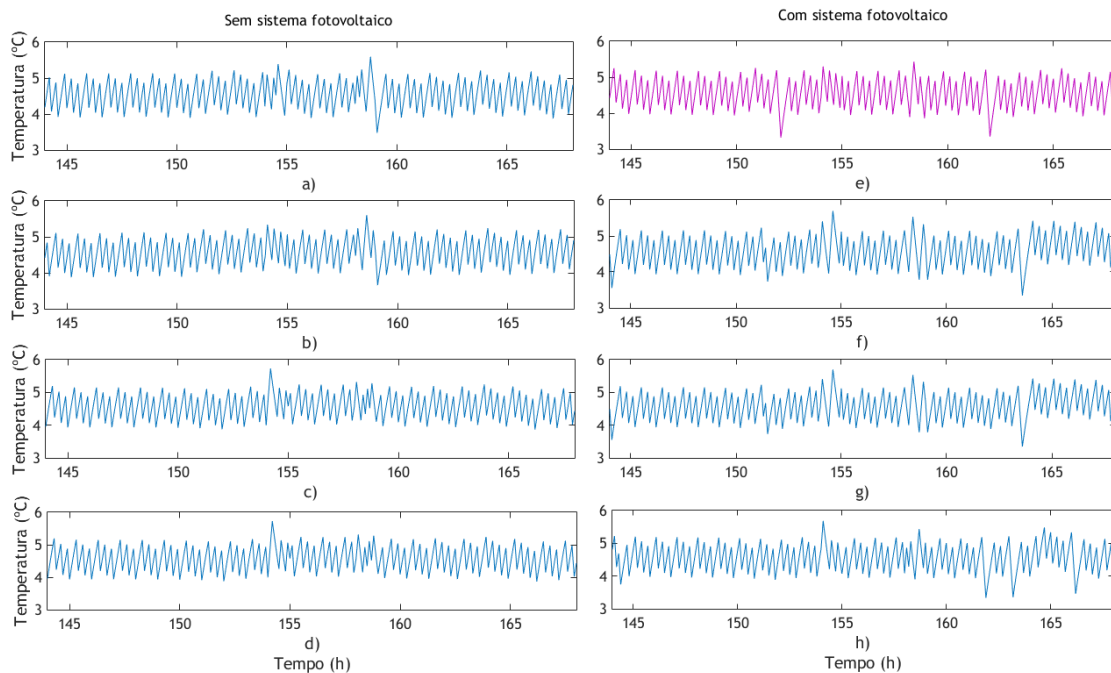


Figura 5.27: Desempenho das restantes arquiteturas de controlo do FR com inclusão de pesos, no período de verão. a) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, sem PV, b) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, sem PV, c) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, sem PV, d) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, sem PV, e) Desempenho da estratégia agregada à tarifa simples, com PV, f) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo semanal, com PV, g) Desempenho da estratégia agregada à tarifa bi-horária de ciclo diário, com PV, h) Desempenho da estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, com PV.

a cumprir os limites estipulados. Com este tipo de abordagem, são alcançadas poupanças energéticas, que se irão refletir na fatura energética a pagar à rede.

Na Figura 5.27, encontram-se representadas as restantes estratégias do MPC com pesos agregados as restantes tarifas.

Analisando os cenários em que não se inclui o sistema fotovoltaico, verificam-se diferenças entre as várias estratégias aplicadas. Estas diferenças resultam dos pesos associados às variáveis manipuladas em cada instante de tempo. Estes pesos variam conforme o período da tarifa. Assim, comparando a estratégia de pesos associada à tarifa simples com a estratégia associada à estratégia agregada à tarifa tri-horária de ciclo diário, por exemplo, verifica-se uma ligeira subida da temperatura média, do frigorífico, no período de ponta.

As arquiteturas de pesos propostas para o cenário em que se inclui o painel fotovoltaico apresenta uma clara diminuição da temperatura média entre as 153h e as 163h (9h e as 19h). Esta diminuição, coincide com o período em que existe grande produção de potência fotovoltaica, ou seja, energia disponível para consumo a custo zero. Assim um peso baixo é associado à variável manipulável e consequentemente a temperatura é transitada para limites inferiores, por forma a rentabilizar essa energia.

Na Figura 5.28, encontra-se representado o consumo de energia ao longo do dia, apresentado pelo frigorífico de acordo com a estratégia de controlo aplicada.

Assim sendo, a estratégia ON / OFF enunciada, apresenta um número de ciclos inferior às restantes estratégias, no entanto, estes apresentam maior duração. Trata-se claramente duma es-

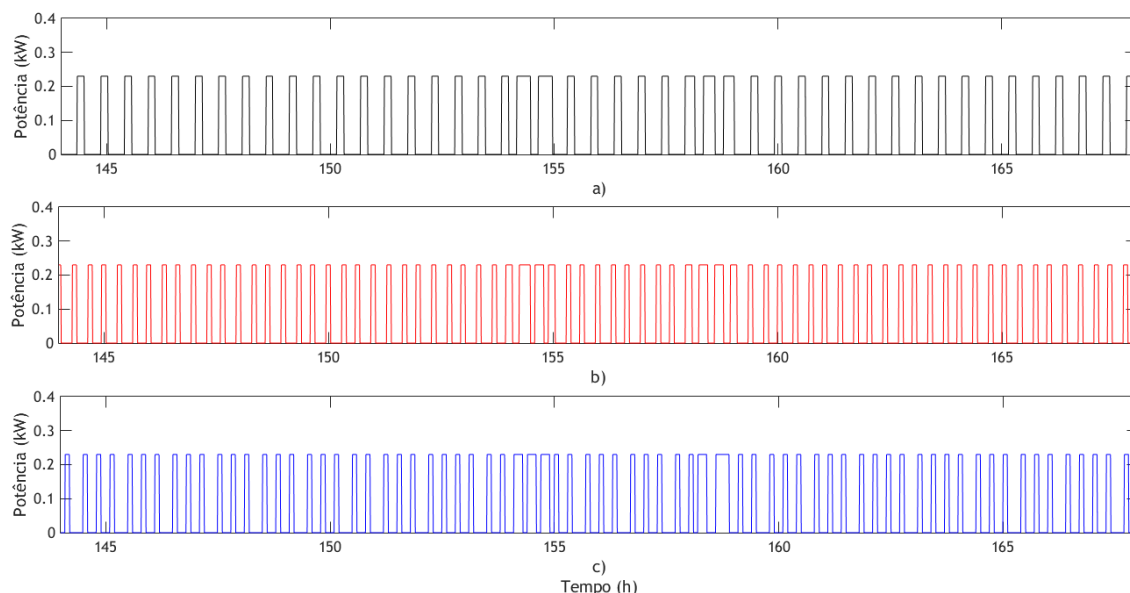


Figura 5.28: Consumo de energia elétrica por parte do frigorífico no período de verão sem inclusão de PV. a) Estratégia de controlo ON / OFF, b) Estratégia de controlo PID, c) Estratégia de controlo MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal.

estratégia que não tem qualquer conhecimento acerca das variáveis exteriores, intrínsecas ao sistema. A duração destes impulsos está diretamente ligada aos distúrbios causados pela abertura e fecho da porta do frigorífico, uma vez que não existem variações da temperatura envolvente ao frigorífico, suficientemente capaz de afetar o seu funcionamento.

A estratégia PID, apresenta, por sua vez um maior número de ciclos realizados, fruto da menor variação de temperatura que a sua estratégia adota. Verificam-se também, impulsos com maior duração nos períodos de alta taxa de solicitação do frigorífico. À semelhança do controlador ON / OFF, este também não conhece os períodos tarifários pelo que pode inclusivamente, adotar uma estratégia que consuma mais energia em períodos onde o consumo deveria ser menor.

A estratégia MPC com peso associada à tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta um consumo energético diferenciado. O seu comportamento tira partido do conhecimento por parte do controlador, acerca dos períodos tarifários. Assim, verificam-se períodos onde claramente existe intenção, por parte do controlador, em consumir menos energia, como é o caso do período de ponta entre as 153,5h e as 157h (9:30h e as 13h).

Por forma a aprofundar as diferenças existentes entre as arquiteturas com e sem peso, decidiu-se analisar a energia elétrica consumida pelo sistema frigorífico, proveniente do sistema PV. Assim, na Figura 5.29 encontra-se representada a energia consumida pelo frigorífico proveniente da rede e do sistema fotovoltaico.

Analisando os resultados, constata-se que a estratégia do MPC sem pesos, apresenta maior número de ciclos realizados quando comparado com a arquitetura MPC com pesos. No entanto, o MPC com pesos associados, apresenta impulsos de maior duração.

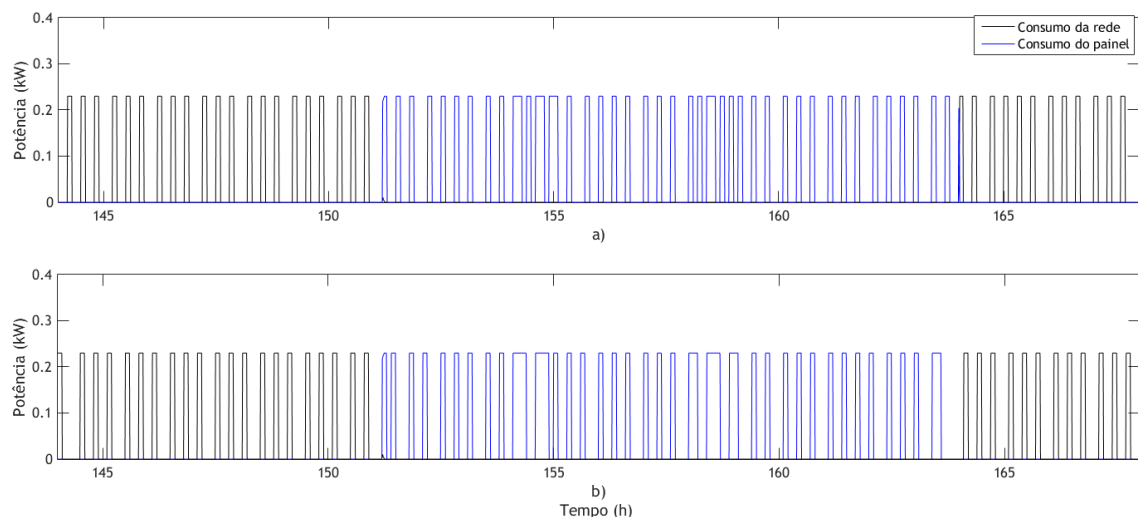


Figura 5.29: Consumo energético do frigorífico, proveniente da rede e do painel fotovoltaico para as estratégias MPC sem peso (a) e MPC com peso associado à tarifa tri-horária de ciclo semanal (b).

5.2.3.1 Resultados económicos alcançados no período de verão

De seguida nas Tabelas 5.14 e 5.15, são apresentados os resultados obtidos para os cenários sem e com sistema fotovoltaico respetivamente, no período de verão.

Na Tabela 5.14, encontra-se representado o custo obtido para o período de verão selecionado, sendo que neste cenário não é utilizado o sistema fotovoltaico proposto. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo frigorífico, ao longo do período em estudo. O objetivo destas simulações, passa por perceber qual será a tarifa mais vantajosa a aplicar na residência.

Analisando com mais atenção a Tabela 5.14, e à semelhança dos resultados obtidos anteriormente verifica-se que a estratégia de controlo ON / OFF é a mais desvantajosa em todos os casos testados.

O controlo PID, que apresenta um comportamento mais errático que o ON / OFF, apresenta poupanças na ordem dos 0.5% em relação ao controlo ON / OFF. Neste equipamento a vantagem do controlador PID é menor.

A estratégia MPC, por sua vez, apresenta poupanças ligeiramente superiores ao controlo PID. O controlador MPC sem pesos, é capaz de alcançar poupanças duas vezes superiores aquelas que foram alcançadas com recurso à estratégia PID, graças a uma escolha mais adequada do trajeto seguido pela sua temperatura interior.

Com o intuito de ainda conseguir melhores resultados do ponto de vista económico, foi simulada uma outra estratégia, em que se adicionaram pesos nas variáveis do controlador MPC.

A estratégia MPC com pesos presente na Tabela 5.14, apresenta custos menores face à estratégia sem pesos. A estratégia de pesos associado à tarifa bi-horária de ciclo diário, apresenta poupanças que alcançam os 2.6% como podemos observar na Tabela 5.16. Contudo, apesar de ser a estratégia que apresenta poupanças percentuais superiores, não coincide, com a estratégia que apresenta menor valor final a pagar. A tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta menor valor final a pagar.

Na Tabela 5.15, encontram-se representados os resultados obtidos para o período de verão, no qual se inclui um sistema fotovoltaico. Tal como nos equipamentos anteriores, face à energia disponível para consumo a custo zero, é empírico que o valor final a pagar seja menor.

A estratégia MPC sem pesos, passa por fazer um uso mais constante do frigorífico durante as horas de produção fotovoltaica, como podemos ver na Figura 5.26.

Com a estratégia de pesos sugerida, o controlador MPC possui a capacidade de compreender que durante os períodos de produção fotovoltaica, deve usar o máximo possível de energia proveniente do sistema PV. Para além disso, fora dos períodos de produção fotovoltaica, são adicionados pesos variáveis, de acordo com os diferentes períodos tarifários, levando o controlador a fazer um uso mais eficiente da energia.

Tabela 5.14: Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de verão (Valores em Euros).

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com peso
		Custo (€/ semana)		
Tarifa simples	2.060	2.052	2.033	2.014
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.979	1.970	1.957	1.934
Tarifa bi-horária de ciclo diário	2.045	2.033	2.015	1.992
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.895	1.885	1.873	1.850
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.987	1.976	1.944	1.944

Tabela 5.15: Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de verão.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com peso
		Custo (€/ semana)		
Tarifa simples	0.864	0.849	0.841	0.839
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.689	0.672	0.669	0.656
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.636	0.617	0.615	0.615
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.656	0.646	0.637	0.626
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.638	0.618	0.617	0.606

Tabela 5.16: Poupanças alcançadas no equipamento Frigorífico, em relação à estratégia ON / OFF, no período de verão.

	PID	MPC	MPC com pesos
Sem sistema PV			
	Poupança (%)		
Tarifa simples	0.41%	1.32%	2.23%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.46%	1.09%	2.28%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.58%	1.50%	2.60%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.51%	1.13%	2.37%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.57%	2.19%	2.19%
Com sistema PV			
Tarifa simples	1.66%	2.61%	2.87%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	2.46%	3.00%	4.81%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	2.89%	3.23%	3.32%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.51%	2.98%	4.62%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	3.15%	3.33%	4.98%

No cenário em que se incluí o sistema fotovoltaico, constatou-se que a tarifa bi-horária de ciclo diário, apresenta melhores resultados que a tarifa bi-horária de ciclo semanal, como podemos ver na Tabela 5.9. Analisando a Figura 5.29, percebe-se que o sistema fotovoltaico consegue disponibilizar energia suficiente para o FR, sensivelmente até as 164h (20:00h). Ou seja, a partir das 164h, o sistema consome energia da rede. Consultando a Figura 4.5, compreende-se que no caso da tarifa bi-horária de ciclo semanal, o sistema estará até as 168h a consumir energia da rede num período fora de vazio. Por outro lado, no caso da tarifa bi-horária de ciclo diário, apesar de o sistema trabalhar cerca de uma hora (entre as 164h e as 165h, isto é, entre as 20:00h e 21:00h), num período de fora de vazio, as restantes três horas, até as 168h, passam-se num período de vazio.

Também a tarifa tri-horária de ciclo diário, apresenta melhores poupanças que a tarifa tri-horária de ciclo semanal, como podemos ver na Tabela 5.15. À semelhança do que se passa na tarifa bi-horária o sistema fotovoltaico consegue fornecer energia suficiente ao FR, até as 164h (20:00h). Ou seja, a partir das 164h o sistema consome energia da rede. Consultando a Figura 4.5, compreende-se que no caso da tarifa tri-horária de ciclo semanal, o sistema estará até as 168h a consumir energia da rede num período de cheias. Por outro lado, no caso da tarifa tri-horária de ciclo diário, apesar de o sistema trabalhar cerca de uma hora (entre as 164h e as 165h, isto é, entre as 20:00h e 21:00h), num período de ponta, as restantes três horas, até as 168h, passam-se num período de vazio. Desta forma apesar de o fim de semana ser mais benéfico, sob o ponto de vista económico, na tarifa tri-horária de ciclo semanal, não é suficiente para colmatar os ganhos económicos alcançados durante os dias úteis.

5.2.3.2 Resultados económicos alcançados no período de inverno

No período de inverno, optou-se por não explicar as figuras referentes ao comportamento da temperatura interior do frigorífico, uma vez que estas apresentam um comportamento muito semelhante ao apresentado no período de verão. O comportamento é muito semelhante, uma vez que o frigorífico se encontra dentro do edifício. Assim este não estará sujeito a grandes variações de temperatura provocadas pela temperatura exterior ao edifício. As únicas diferenças encontradas face ao período de verão, são relativas às tarifas de eletricidade e à temperatura interior do edifício. Desta forma, apenas o valor a final a pagar é que será afetado.

Desta forma, neste subcapítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas várias simulações propostas. O objetivo passa por compreender qual a estratégia que permite alcançar melhores resultados económicos. Nas Tabelas 5.17 e 5.18, são apresentados os resultados obtidos para os cenários sem e com sistema fotovoltaico respetivamente, para o período de verão. Na Tabela 5.19, encontra-se representado um quadro resumo de todas as simulações realizadas no período de inverno.

Na Tabela 5.17, encontra-se representado o custo obtido para o período de inverno selecionado, sendo que neste cenário não é contabilizado o sistema fotovoltaico proposto. Os custos enunciados nesta tabela, representam o valor da energia ativa a pagar, consumida pelo frigorífico, ao longo do período em estudo. O objetivo destas simulações, passa por perceber qual será a tarifa mais vantajosa a aplicar na residência.

Assim, na Tabela 5.17, e à semelhança dos resultados obtidos anteriormente, verifica-se que a estratégia de controlo ON / OFF é mais uma vez, a estratégia mais desvantajosa em todos os casos testados.

O controlo PID, que apresenta um comportamento mais errático que o ON / OFF, apresenta poupanças na ordem dos 1% em relação ao controlo ON / OFF. Relativamente ao período de verão, verifica-se um aumento nas poupanças alcançadas com o controlador PID.

A estratégia MPC, apresenta poupanças menos satisfatórias que os alcançados no período de verão. Inclusive, a estratégia MPC, consegue apresentar resultados negativos face ao controlo PID. Estes resultados, resultam dum sistema tarifário mais desvantajoso no período de inverno.

De forma a alcançar melhores resultados, do ponto de vista económico, foi estruturada e simulada uma outra estratégia para o controlador MPC em que se adicionaram pesos nas variáveis do controlador.

A estratégia MPC com pesos presente na Tabela 5.17, apresenta custos menores face à estratégia sem pesos. A estratégia de pesos associado à tarifa tri-horária de ciclo diário, apresenta poupanças que alcançam os 3.74%, como podemos observar na Tabela 5.19. Contudo, apesar de ser a estratégia que apresenta poupanças percentuais superiores, não coincide com a estratégia que apresenta o valor final mais baixo a pagar.

As tarifas de ciclo diário, (bi-horária de ciclo diário e a tri-horária de ciclo diário) apresentam reduções percentuais maiores, devido ao carácter variável da tarifa ao longo de toda a semana. Já as tarifas de ciclo semanal, apresentam reduções menores uma vez que, durante o fim de semana a tarifa apresenta um comportamento menos variável, ou seja, mais constante. Assim, é mais complicado para o MPC com pesos conseguir alcançar maiores poupanças.

Na Tabela 5.18, apresentam-se os resultados obtidos para o cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico. Neste caso, o controlador MPC com pesos, consegue alcançar poupanças bastante superiores aquelas que foram obtidas no cenário sem sistema fotovoltaico. Este fenómeno deve-se à existência dum conjunto de pesos que induz o sistema a consumir o máximo possível de energia produzida localmente, sem que as restrições impostas sejam violadas.

É também notável que o preço final a pagar seja menor, fruto da produção local. Contudo, a diferença alcançada em relação ao período de verão é ainda substancial, pois, a produção fotovoltaica no período de inverno é bastante reduzida.

Neste cenário, a tarifa bi-horária de ciclo diário apresenta poupanças que atingem os 7,70%. Apesar disto, a tarifa que apresenta menor valor a pagar é a tarifa tri-horária de ciclo diário. Nas tarifas de ciclo diário, apesar de o fim de semana ser bastante mais prejudicial, do ponto de vista económico, os períodos de ponta são de menor duração, contribuindo assim para um preço menor a pagar.

Tabela 5.17: Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário sem sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
		Custo (€/ semana)		
Tarifa simples	1.769	1.753	1.759	1.725
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.658	1.642	1.643	1.616
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.736	1.713	1.717	1.682
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.631	1.621	1.620	1.592
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.690	1.666	1.663	1.627

Tabela 5.18: Resultados obtidos no equipamento Frigorífico no cenário com sistema fotovoltaico, sendo o período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
		Custo (€/ semana)		
Tarifa simples	1.267	1.253	1.242	1.215
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.111	1.103	1.092	1.065
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.127	1.116	1.103	1.040
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.102	1.094	1.082	1.045
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.115	1.105	1.095	1.031

Tabela 5.19: Poupanças alcançadas no equipamento Frigorífico, em relação à estratégia ON / OFF, no período de inverno.

	PID	MPC	MPC com Pesos
Sem sistema PV			
	Poupança (%)		
Tarifa simples	0.91%	0.55%	2.50%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.01%	0.95%	2.57%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.34%	1.10%	3.12%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.63%	0.67%	2.44%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.39%	1.58%	3.74%
Com sistema PV			
Tarifa simples	1.14%	1.97%	4.15%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.80%	1.78%	4.15%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.96%	2.17%	7.70%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.76%	1.85%	5.19%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.95%	1.87%	7.60%

Relativamente ao período de inverno, verifica-se uma diminuição dos custos envolvidos, no cenário em que não se contabiliza a presença do sistema fotovoltaico, quando comparado com o período verão. Este acontecimento, deve-se sobretudo a uma menor temperatura interior do edifício. Isto é, no verão a temperatura interior da habitação ronda os 23°C , enquanto no período de inverno a temperatura ronda os 20°C . Desta forma, a temperatura exterior ao frigorífico é mais vantajosa no inverno, pois, o frigorífico necessita de menos esforço para manter a temperatura interior nos limites predefinidos.

Por outro lado, no período de inverno, o cenário com sistema fotovoltaico, apresenta melhores resultados no período de verão. Este acontecimento, contraditório ao apresentado no cenário sem sistema fotovoltaico, deve-se essencialmente às elevadas produções fotovoltaicas que se apresentam nesse período.

5.3 Análise geral dos resultados obtidos

5.3.1 Período de verão

Os resultados relativos ao custo dos três equipamentos domésticos testados, no período de verão, encontram-se representados na Tabela 5.20.

Na Tabela 5.21, apresentam-se os resultados finais obtidos para o período de verão. A poupança enunciada na tabela é relativa aos resultados obtidos pelo controlo ON / OFF.

Esta análise é realizada, de forma a compreender as poupanças suscetíveis de alcançar nos três equipamentos testados, Ar-condicionado, Termo-acumulador de água e Frigorífico.

No cenário em que não se inclui o sistema fotovoltaico, verifica-se que a estratégia MPC sem pesos consegue melhores resultados que o controlador PID e conseqüentemente que o controlador ON / OFF. A estratégia MPC com pesos associados à tarifa tri-horária de ciclo diário, permite alcançar poupanças que atingem os 5,23%.

Neste cenário verifica-se que as tarifas de ciclo diário apresentam reduções percentuais maiores que as conseguidas com recurso a tarifas de ciclo semanal. Este facto está diretamente relacionado com o número de períodos tarifários existentes em cada uma das tarifas. Isto é, nas tarifas de ciclo semanal, o fim de semana apresenta preços bastante mais baixos que o resto da semana. Assim sendo, o controlador MPC com pesos não consegue ganhar tanta vantagem face aos restantes controladores, pois o preço do domingo, por exemplo, é constante durante o dia todo. Nas tarifas de ciclo diário, os períodos tarifários são indiferentes do dia semanal pelo que existe sempre oportunidade para o MPC com pesos, mostrar o seu conhecimento acerca das tarifas praticadas.

Contabilizando agora o contributo do sistema fotovoltaico instalado na proposta habitação doméstica, verifica-se que o preço final a pagar é bastante mais reduzido quando comparado com o cenário em que não se o inclui.

Observando a Tabela 5.20, e analisando os valores obtidos em cada cenário verificamos que, por exemplo, no controlador ON / OFF são conseguidas poupanças de 38,53€.

Tabela 5.20: Custo total semanal para os três equipamentos testados no período de verão.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
Cenário Sem Sistema Fotovoltaico, Custo Total Semanal (€)				
Tarifa simples	53.585	52.924	52.727	51.409
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	51.658	51.031	50.784	49.032
Tarifa bi-horária de ciclo diário	56.395	55.494	55.140	53.398
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	48.986	48.434	48.119	46.534
Tarifa tri-horária de ciclo diário	54.486	53.609	53.199	51.635
Cenário Com Sistema Fotovoltaico, Custo Total Semanal (€)				
Tarifa simples	20.982	20.751	21.305	20.209
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	18.166	18.151	18.722	17.649
Tarifa bi-horária de ciclo diário	17.857	17.618	18.038	17.242
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	17.180	17.007	17.480	16.548
Tarifa tri-horária de ciclo diário	17.854	17.629	17.996	17.220

Quando sujeito a uma tarifa bi-horária de ciclo diário. Querendo com isto, demonstrar a influência dum sistema fotovoltaico numa habitação residencial.

No cenário com sistema fotovoltaico, verifica-se que o controlador MPC apresenta poupanças percentuais negativas. Este acontecimento deve-se sobretudo ao comportamento do Ar Condicionado neste período. Apesar de os restantes equipamentos não apresentarem resultados negativos, o sistema de AC representa uma grande fatia do consumo pelo que o resultado final é fortemente influenciado pelo seu comportamento.

A estratégia ON / OFF, como já explicado anteriormente, está associada a um elevado consumo do sistema AC, durante o período de produção fotovoltaica. Desta forma apesar de a estratégia ON / OFF apresentar um consumo de energia maior, esta apresenta custo zero, pelo que o resultado final será melhor. Assim apesar de o MPC apresentar uma trajetória mais vantajosa esta não é suficiente para apresentar resultados mais vantajosos.

Com a inclusão da estratégia de pesos no controlador MPC, verifica-se um aumento das poupanças percentuais atingidas. A tarifa tri-horária de ciclo semanal apresenta a melhor poupança percentual vem como o preço mais baixo a pagar, como podemos observar nas Tabelas 5.20 e 5.21.

Tabela 5.21: Poupanças semanais alcançadas nos três equipamentos domésticos testados no período de verão.

	PID	MPC	MPC com Pesos
Cenário Sem Sistema Fotovoltaico, Poupança Total Semanal (%)			
Tarifa simples	1.23%	1.60%	4.06%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	1.21%	1.69%	5.08%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.60%	2.23%	5.31%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.13%	1.77%	5.01%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.61%	2.36%	5.23%
Cenário Com Sistema Fotovoltaico, Poupança Total Semanal (%)			
Tarifa simples	1.10%	-1.54%	3.69%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.08%	-3.06%	2.85%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	1.34%	-1.01%	3.45%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	1.01%	-1.74%	3.68%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	1.26%	-0.79%	3.55%

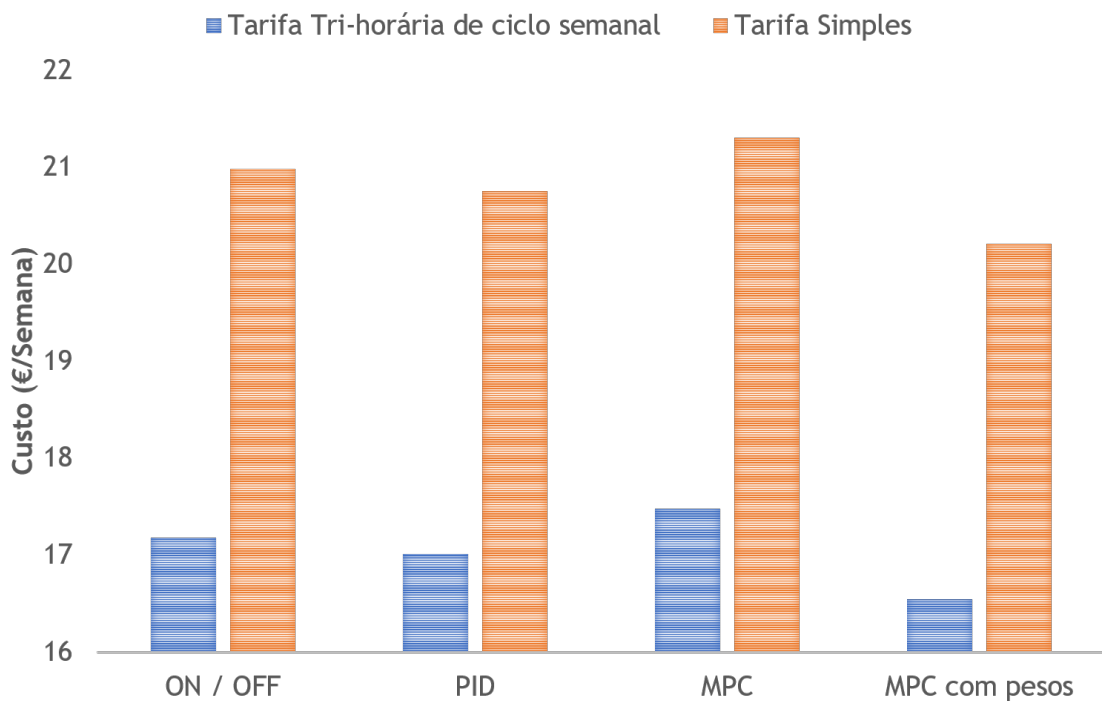


Figura 5.30: Custo semanal dos vários controladores testados, face à tarifa utilizada, no período de verão.

Outro aspeto que merece ser realçado, é a importância da escolha da tarifa adequada, na Figura 5.30, demonstra-se a diferença do valor final a pagar entre duas tarifas no período de verão. Desta forma, é possível compreender que a simples escolha da tarifa influencia de forma acentuada os resultados finais. Nesta Figura, a tarifa tri-horária de ciclo semanal é comparada com a tarifa simples, constata-se que no caso do controlador MPC com pesos, por exemplo, a diferença é de 3,66€. Sendo esta a principal razão que justifica a simulação das cinco tarifas propostas.

5.3.2 Período de inverno

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados globais obtidos no período de inverno. Apresentando-se os custos envolvidos, as taxas de redução obtidas bem como as justificações necessárias à compreensão.

Na Tabela 5.23, apresentam-se as poupanças finais obtidas para o período de inverno. A poupança enunciada na tabela é relativa aos resultados obtidos pelo controlo ON / OFF.

Esta análise é realizada de forma a compreender as poupanças suscetíveis de alcançar, no período de inverno, nos três equipamentos testados, Ar-condicionado, Termo-acumulador de água e Frigorífico.

Analisando a Tabela 5.22, verifica-se facilmente que os custos totais envolvidos, são de valor mais elevado. Sendo, que o principal responsável por este aumento, foi o Ar-Condicionado, tendo o seu custo aumentado cerca de 190%, face ao período de verão. Este aumento acentuado de custo, deve-se principalmente as baixas temperaturas que se fazem sentir no período de inverno selecionado. Além disso, ao contrário do período de verão, durante a noite o sistema de Ar-Condicionado é bastante requisitado pelo sistema de controlo, contribuindo assim para o aumento do custo a pagar.

Aliado aos factos enunciados, o sistema fotovoltaico instalado, face à baixa irradiância a que é sujeito, apresenta produções de energia muito menores que as apresentadas no período de verão. Como podemos observar na Tabela 5.22, a diferença de custo a pagar em ambos os cenários, apresenta uma diferença consideravelmente inferior, quando comparada com a conseguida no período de verão. Desta forma, o sistema global será obrigado a que requisitar mais energia à rede.

Na Tabela 5.22, em ambos os cenários apresentados, verifica-se que a tarifa tri-horária de ciclo semanal, apresenta o melhor resultado do ponto de vista económico.

Na Tabela 5.23, apresentam-se as poupanças globais alcançadas no período de inverno. Com principal destaque para a tarifa tri-horária de ciclo semanal que apresenta a maior redução em ambos os cenários propostos. Em contradição com o período de verão, verifica-se que o cenário sem sistema fotovoltaico apresenta poupanças percentuais, inferiores às conseguidas no cenário em que se inclui o sistema fotovoltaico. O principal fator contribuidor para este aumento de poupança, no cenário com sistema PV, está relacionado com a curta e medíocre produção fotovoltaica que existe no período de inverno. Ao contrário, do que acontece no período de verão, em que o Ar-condicionado, quase satisfaz as suas necessidades energéticas a partir do sistema PV e assim a redução de custos possível de alcançar, é menor.

Tabela 5.22: Custo total semanal para os três equipamentos testados no período de inverno.

	ON / OFF	PID	MPC	MPC com Pesos
Cenário Sem Sistema Fotovoltaico, Custo Total Semanal (€)				
Tarifa simples	85.315	85.186	84.496	83.897
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	77.081	76.807	76.529	75.138
Tarifa bi-horária de ciclo diário	80.002	79.854	79.555	78.168
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	76.294	76.028	75.691	74.280
Tarifa tri-horária de ciclo diário	78.277	78.263	77.900	76.445
Cenário Com Sistema Fotovoltaico, Custo Total Semanal (€)				
Tarifa simples	72.593	72.238	71.570	70.376
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	63.192	62.762	62.222	61.087
Tarifa bi-horária de ciclo diário	64.968	64.941	63.991	62.729
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	62.887	62.463	61.717	60.374
Tarifa tri-horária de ciclo diário	64.175	64.360	63.357	61.976

Tabela 5.23: Poupanças semanais alcançadas nos três equipamentos domésticos testados no período de inverno.

	PID	MPC	MPC com Pesos
Cenário Sem Sistema Fotovoltaico, Poupança Total Semanal (%)			
Tarifa simples	0.15%	0.96%	1.66%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.35%	0.72%	2.52%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.18%	0.56%	2.29%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.35%	0.79%	2.64%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	0.02%	0.48%	2.34%
Cenário Com Sistema Fotovoltaico, Poupança Total Semanal (%)			
Tarifa simples	0.49%	1.41%	3.05%
Tarifa bi-horária de ciclo semanal	0.68%	1.54%	3.33%
Tarifa bi-horária de ciclo diário	0.04%	1.50%	3.45%
Tarifa tri-horária de ciclo semanal	0.67%	1.86%	4.00%
Tarifa tri-horária de ciclo diário	-0.29%	1.27%	3.43%

Saliente-se também, que as poupanças atingidas, no cenário sem sistema fotovoltaico, em termos percentuais, são de natureza geral inferior às obtidas no período de verão. Uma vez que o Ar-Condicionado é responsável por 70% dos gastos energéticos, no período de inverno, sem dúvida que é o principal responsável por esta causa.

A principal justificação para a redução das poupanças alcançadas, está relacionado com os períodos noturnos, em que as tarifas flutuantes, apresentam um preço constante durante longos períodos, fazendo com que se torne complicado conseguir traçar uma trajetória mais vantajosa do ponto de vista económico. Para além, de que é no período noturno, que o Ar-Condicionado apresenta maior consumo.

Mais uma vez, com a Figura 5.31, pretende-se demonstrar a importância da escolha de tarifa adequada.. Desta forma, é possível compreender que a simples escolha da tarifa influencia de forma acentuada os resultados finais. Nesta Figura a tarifa tri-horária de ciclo semanal é comparada com a tarifa simples e constata-se que no caso do controlador MPC com pesos, por exemplo, a diferença é de 10,00€. A diferença é bastante superior à encontrada no período de verão uma vez que, os custos envolvidos também são maiores. Por conseguinte, esta Figura 5.31, é apresentada de forma a justificar a necessidade de simular as cinco tarifas propostas.

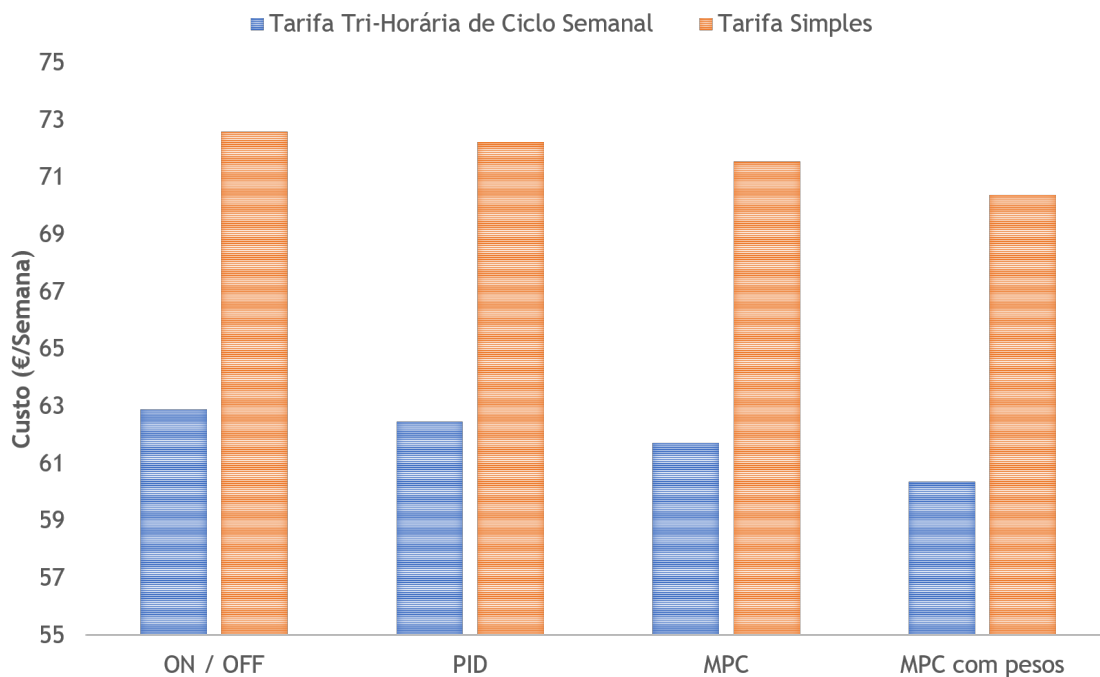


Figura 5.31: Custo semanal dos vários controladores testados, face à tarifa utilizada, no período de inverno.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1 Satisfação dos Objetivos

Este capítulo tece a análise crítica dos resultados e as considerações finais. Sucintamente, o desenvolvimento deste trabalho permitiu um aprofundamento dos conhecimentos ao redor do Modelo de Controlo Preditivo para o controlo de equipamentos domésticos - o Modelo de controlo Preditivo (MPC) no que toca ao seu âmbito, à sua abrangência e à sua aplicação na realidade.

O principal objetivo deste trabalho, foi apresentar a aplicação de uma abordagem sistemática de utilização do Modelo de Controlo Preditivo (MPC), numa habitação residencial em Portugal Continental, mais precisamente em Paranhos, Porto, de modo a identificar através de simulações efetuadas, os custos existentes nos vários equipamentos sugeridos, tendo como propósito a redução da fatura energética a pagar no final.

O sistema de controlo preditivo, apresentou-se como um tipo de controlo, capaz de antecipar o efeito que cada uma das variáveis do sistema terá na função objetivo. No caso concreto, o MPC permitiu antecipar efeitos de meteorologia, preço de eletricidade, entre outras variáveis. Deste modo, foram conseguidas trajetórias de comportamentos dos equipamentos mais vantajosas do ponto de vista económico.

Através da aplicação dos vários modelos, foi possível colocar em prática o que foi apresentado e estudado na teoria, aprofundar o conhecimento e a aprendizagem, através das dificuldades e desafios encontrados em cada etapa de aplicação do modelo concetual. Assim, foi possível demonstrar que para cada estudo de caso é necessário ao investigador desenvolver alternativas para tornar um modelo concetual aplicável no aspeto prático, posto que todos os sistemas apresentam as suas características particularidades.

Nesta dissertação, analisamos então os problemas no projeto e implementação de políticas de controlo preditivo de carácter económico para três aplicações residenciais: climatização de espaços, refrigeração, aquecimento de águas. A estes três equipamentos adicionou-se um sistema de produção de energia através de tecnologia fotovoltaica.

Deste modo, o trabalho abordou o potencial de economia de custos em sistemas domésticos de aquecimento e arrefecimento por meio de uma estratégia de controlo preditiva baseada em modelos

previamente definidos. O objetivo principal, passou por comparar três regulações convencionais de temperatura, o controlo ON / OFF e o controlo PID, com um método de controlo preditivo. Sendo o período de simulação igual a 168 horas, ou seja, uma semana completa.

Para os sistemas de climatização, refrigeração, e aquecimento de águas, a estratégia adotada, visou permitir um consumo de energia flexível e eficiente, e que permitisse aproveitar de forma ótima a energia produzida pelo sistema fotovoltaico. Desta forma, pretendeu-se promover o uso de tecnologias de produção sustentável de energia, ao mesmo tempo, em que criamos novas oportunidades de negócios.

Na minha ótica, ao permitir o uso do armazenamento de energia sobre a forma térmica, abrimos a possibilidade de reduzir os custos operacionais, respeitando as condições impostas à priori. Além disso, esta metodologia permitiu uma menor penetração da energia fotovoltaica na rede, contribuindo para um melhor funcionamento do Sistema Elétrico Nacional (SEN), uma vez que são diminuídos os riscos de sobretensão em redes de distribuição, fruto da injeção de energia ativa em períodos de baixo consumo.

A experiência demonstrou, que projetar os vários controladores propostos, eficientemente, é necessário estar ciente de como os atuadores trabalham. Assim, os designers devem ter um conhecimento preciso, sobre como os comandos de atuação que podem influenciar o sistema controlado, caso contrário a atuação pode realmente levar a efeitos negativos. Desta forma, os modelos e controladores devem ser derivados e projetados, somente após uma profunda compreensão da estrutura de todo o sistema.

Outra lição aprendida, é que existe realmente espaço para melhorar a eficiência energética dos edifícios atuando apenas sobre as leis de controlo. A prática atual, passa por não considerar informações importantes, como previsões meteorológicas. Além disso, o atual esquema de controlo negligencia as considerações de eficiência energética. Portanto, sentiu-se a vontade de afirmar que uma abordagem mais consciente do controlo das condições internas poderia contribuir com sérias melhorias, tanto sobre o conforto dos ocupantes, como sobre no valor das faturas energéticas.

Ressalte-se também que, a transição para um sistema inteligente, livre de combustíveis fósseis - uma Smart Grid - é atualmente alimentada por ambiciosas políticas energéticas, especialmente em Portugal. Os recursos energéticos distribuídos, como os sistemas de climatização, termo-acumuladores e frigoríficos aplicados em edifícios residências, deverão participar de forma flexível na diminuição do consumo em certos períodos, de modo a contribuírem para um melhor funcionamento do sistema global de energia.

6.1.1 Crítica aos Resultados Obtidos

A implementação e o uso do MPC em habitações residenciais produziu resultados claramente satisfatórios. No Capítulo 5, demonstram-se as poupanças que foram possíveis de alcançar com o uso do controlador MPC.

Do meu ponto de vista, os resultados simulados, apresentam propriedades promissoras, apesar de à primeira vista, as economias poderem ser vistas pequenas. Mas, quando multiplicadas pelos dias de um ano e considerando a implementação em escala maior, as famílias podem beneficiar de

uma redução significativa, enquanto a retração do consumo de energia também tem um impacto positivo nas emissões de gases de efeito estufa na rede elétrica a montante.

Constatou-se também, que as estratégias de pesos associadas a cada período e cenário, são de elevada importância, tendo um papel preponderante no resultado final. Nesta dissertação concluiu-se que o uso da estratégia de pesos associada à tarifa Tri-horária de ciclo semanal, se mostrou como a mais vantajosa de todas. Sendo que os pesos apresentaram um comportamento extremamente importante na medida em que, por exemplo, evitam que se consuma demasiada energia em períodos de ponta e consequentemente, se aumente a fatura de eletricidade a pagar.

Mostrou-se que os resultados obtidos pela aplicação do MPC são muito encorajadores, no entanto, para a transferência comercial da tecnologia, é preciso manter em mente dois problemas. Primeiro, cada edifício é único e o potencial da poupança de MPC depende de muitos fatores, como dos equipamentos em uso, construção de edifícios ou condições climáticas. Em segundo lugar, a análise completa dos benefícios de custo não deve incluir apenas economias de energia, mas também o custo da implementação do MPC, ou seja, a modelagem que em particular, se apresenta como a parte mais demorada.

A abordagem de implantação proposta por este trabalho, poderá ser aplicada noutros edifícios, como escolas, hospitais, espaços comerciais, entre outras, contribuindo significativamente para a redução da fatura energética, permitindo assim alcançar um novo nível de eficiência energética.

Este trabalho também apresentou uma revisão bibliográfica, sobre outros métodos de controlo, através duma fundamentação teórica que se abordou no Capítulo 2, onde se procurou dar maior ênfase às aplicações necessárias para o entendimento do estudo de caso apresentado.

6.2 **Trabalhos Futuros**

Este trabalho apresentou a melhoria de implantação de estratégias de controlo preditivo para a melhoria dos gastos energéticos numa habitação doméstica em Portugal. Através deste estudo, foi possível demonstrar as poupanças que se podem alcançar adotando estratégias de controlo mais sofisticadas.

Há muitas direções por explorar para melhorar ainda mais os métodos apresentados nesta dissertação. Uma necessidade imediata é o desenvolvimento de protótipos e ensaios extensivos na vida real para provar de forma positiva o potencial económico, avaliar o potencial duma maior penetração de fontes de energia renováveis e avaliar a robustez. Esses testes são necessários para finalmente decidir se métodos mais sofisticados, devem ser perseguidos em futuras investigações. Modelos, ajuste e verificação de robustez e desempenho são desafios que agora limitam a implementação do MPC.

Com o objetivo de melhorar ainda mais os contributos do MPC em habitações domésticas sugerem-se os seguintes trabalhos a desenvolver futuramente:

- **Validação do modelo** O desempenho da estratégia de controlo preditivo depende fortemente da precisão do modelo do sistema. Os modelos de sistema apresentados no capítulo 4 precisam de ser validados.

- **Estimativa de parâmetros em tempo real** Para ter uma abordagem "plug-and-play", técnicas de estimação de parâmetros são sugeridas para serem usadas de modo a identificar os parâmetros do modelo de sistema desconhecido.
- **Comparação com Redes Neurais** As redes neurais, também podem ser usadas para simular a dinâmica do sistema, a fim de estimar as futuras saídas do sistema e obter informações de sensibilidade de entrada e saída. Assim é empírica a necessidade de comparar a estratégia das Redes Neurais com a estratégia do MPC.
- **Uso de Baterias** A utilização de baterias capazes de armazenar os excessos de produção fotovoltaica, durante os períodos de elevada produção, pode contribuir em muito para a redução dos custos operacionais do sistema global.
- **Demand Response** Alterações no consumo de eletricidade por parte dos clientes finais, em resposta a alterações do preço da eletricidade ao longo do tempo, podem induzir uma menor utilização de eletricidade em períodos de preços elevados no mercado grossista. Desta forma, a rede pode alterar os padrões comuns de consumo, através do envio de sinais que se transformam em pesos associados às variáveis de controlo. Por conseguinte, com este tipo de abordagem contribui-se para um melhor funcionamento do SEN.

6.3 Contribuições de pesquisa resultantes deste trabalho

Esta secção apresenta a contribuição científica resultante do trabalho realizado e apresentado neste trabalho de dissertação.

O trabalho realizado e publicado na conferência, IEEE Power Tech 2017 Manchester, encontra-se anexado no capítulo [A](#).

6.3.1 Artigos de conferência

[PC1] J.M.F. Silva, R. Godina, E.M.G. Rodrigues, E. Pouresmaeil, J.P.S. Catalão, "Residential MPC controller performance in a household with PV microgeneration", in: Proceedings of the IEEE Power Tech 2017 Conference, Manchester, UK, June 18-22, 2017.

Referências

- [1] J. B. Duarte. Estudos de caso em educação. investigação em profundidade com recursos reduzidos e outro modo de generalização. *Revista Lusófona de Educação*, 11:113 – 132, 2008.
- [2] R. K. Yin. *Case studies research: design and methods*, 3^a ed. ed. Thousands Oaks: Sage Publications, 2003.
- [3] NOAA's National Centers for Environmental Information. Climate at a glance.
- [4] United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change adopted at cop3 in kyoto.
- [5] European Parliament. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions, 2010.
- [6] Direção Geral de Energia e Geologia. Estatísticas rápidas - nº 146 - dezembro de 2016.
- [7] REN. Renewables 2016 global status report, 2016. Disponível em <http://www.ren21.net>, Publicações–Renewables Global Status Report 2016 (Full Report, EN), acedido a última vez em Março de 2017.
- [8] Pervez Hameed Shaikh, Nursyarizal Bin Mohd Nor, Perumal Nallagownden, Irraivan Elamvazuthi, e Taib Ibrahim. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34:409 – 429, 2014. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027>.
- [9] International Energy Agency. Tracking clean energy progress 2016.
- [10] International Partnership for Energy Efficiency Cooperation. Supporting energy efficiency progress in major economies: Annual report 2016.
- [11] European Parliament. Directive 2010/31/eu of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings.
- [12] European Parliament. Energy efficiency for the 2020 goal.
- [13] World Business Council For Sustainable Development. Transforming the market: Energy efficiency in buildings, survey report.
- [14] E.M.G. Rodrigues, R. Godina, E. Pouresmaeil, J.R. Ferreira, e J.P.S. Catalão. Domestic appliances energy optimization with model predictive control. *Energy Conversion and Management*, 142:402 – 413, 2017. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.061>.

- [15] Direção Geral da Energia e Geologia. Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico.
- [16] P. H. Shaikh, N. B. Mohd. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, e T. Ibrahim. Robust stochastic control model for energy and comfort management of buildings. *Australian J. Basic Appl. Sci.*, 7(10):137–144, 2013.
- [17] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, e I. Elamvazuthi. Building energy management through a distributed fuzzy inference system. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(4):3236–3242, 2013.
- [18] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, e J. M. Carrasco. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12):3881–3895, Dec 2010. doi:10.1109/TIE.2010.2076414.
- [19] A. Kawashima, R. Sasaki, T. Yamaguchi, S. Inagaki, A. Ito, e T. Suzuki. Energy management systems based on real data and devices for apartment buildings. Em *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, páginas 003212–003217, Nov 2015. doi:10.1109/IECON.2015.7392595.
- [20] M. Schicktanz e T. Núñez. Modelling of an adsorption chiller for dynamic system simulation. *International Journal of Refrigeration*, 32(4):588 – 595, 2009. Progress in Sorptive Cooling Systems. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.02.011.
- [21] M. Hatami, G. Domairry, e S.N. Mirzababaei. Experimental investigation of preparing and using the {H₂O} based nanofluids in the heating process of {HVAC} system model. *International Journal of Hydrogen Energy*, páginas –, 2017. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.104.
- [22] Y.H. Yau. The use of a double heat pipe heat exchanger system for reducing energy consumption of treating ventilation air in an operating theatre—a full year energy consumption model simulation. *Energy and Buildings*, 40(5):917 – 925, 2008. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.07.006.
- [23] Alessandro Beghi, Luca Cecchinato, Mirco Rampazzo, e Francesco Simmini. Energy efficient control of {HVAC} systems with ice cold thermal energy storage. *Journal of Process Control*, 24(6):773 – 781, 2014. Energy Efficient Buildings Special Issue. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.008.
- [24] P.M. Ferreira, A.E. Ruano, S. Silva, e E.Z.E. Conceição. Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings. *Energy and Buildings*, 55:238 – 251, 2012. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.002.
- [25] Verhelst J., Van Ham G., Saelens D., e Helsens L. Model selection for continuous commissioning of hvac-systems in office buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:673 – 686, 2017. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.119.
- [26] Comfort-based fuzzy control optimization for energy conservation in {HVAC} systems. *Control Engineering Practice*, 32:172 – 182, 2014. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.007.
- [27] Shengwei Wang e Zhenjun Ma. Supervisory and optimal control of building hvac systems: A review. *HVAC&R Research*, 14(1):3–32, 2008. doi:10.1080/10789669.2008.10390991.

- [28] Z. Wu, Q. S. Jia, e X. Guan. Optimal control of multiroom hvac system: An event-based approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(2):662–669, March 2016. doi:10.1109/TCST.2015.2446955.
- [29] T. W. Ching. An investigation on electrical performance of variable-frequency drives for air-conditioning applications. Em *2008 IEEE Canada Electric Power Conference*, páginas 1–7, Oct 2008. doi:10.1109/EPC.2008.4763373.
- [30] Alessandro; Sangiovanni-Vincentelli Alberto Maasoumy, Mehdi; Pinto. Model-based hierarchical optimal control design for hvac systems. *RCProceedings of the ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference*, 2014.
- [31] Z.R. Radakovic, V.M. Milosevic, e S.B. Radakovic. Application of temperature fuzzy controller in an indirect resistance furnace. *Applied Energy*, 73(2):167 – 182, 2002. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00077-6.
- [32] Luis A. Medinelli Sanino e Ricardo A. Rojas Reischel. Modeling and identification of solar energy water heating system incorporating nonlinearities. *Solar Energy*, 81(5):570 – 580, 2007. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2007.01.012.
- [33] T. K. Chien, L. Y. Chiou, S. S. Sheu, J. C. Lin, C. C. Lee, T. K. Ku, M. J. Tsai, e C. I. Wu. Low-power mcu with embedded rram buffers as sensor hub for iot applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 6(2):247–257, June 2016. doi:10.1109/JETCAS.2016.2547778.
- [34] Guang Geng e G. M. Geary. On performance and tuning of pid controllers in hvac systems. Em *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications*, páginas 819–824 vol.2, Sep 1993. doi:10.1109/CCA.1993.348229.
- [35] Servet Soyguder, Mehmet Karakose, e Hasan Alli. Design and simulation of self-tuning pid-type fuzzy adaptive control for an expert {HVAC} system. *Expert Systems with Applications*, 36(3, Part 1):4566 – 4573, 2009. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.05.031.
- [36] A.I. Dounis e C. Caraiscos. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7):1246 – 1261, 2009. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015.
- [37] Qing-Guo Wang, Chang-Chieh Hang, Yong Zhang, e Qiang Bi. Multivariable controller auto-tuning with its application in hvac systems. Em *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, volume 6, páginas 4353–4357 vol.6, 1999. doi:10.1109/ACC.1999.786390.
- [38] A.P. Wemhoff. Calibration of {HVAC} equipment {PID} coefficients for energy conservation. *Energy and Buildings*, 45:60 – 66, 2012. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.021.
- [39] Raad Z. Homod, Khairul Salleh Mohamed Sahari, Haider A.F. Almurib, e Farrukh Hafiz Nagi. Gradient auto-tuned takagi–sugeno fuzzy forward control of a {HVAC} system using predicted mean vote index. *Energy and Buildings*, 49:254 – 267, 2012. doi:http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.013.
- [40] Andrew Kusiak e Guanglin Xu. Modeling and optimization of {HVAC} systems using a dynamic neural network. *Energy*, 42(1):241 – 250, 2012. 8th World Energy System Conference, {WESC} 2010. doi:http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.063.

- [41] M. Zaheer-uddin e N. Tudoroiu. Neuro-pid tracking control of a discharge air temperature system. *Energy Conversion and Management*, 45(15–16):2405 – 2415, 2004. doi:<http://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.016>.
- [42] K.M. Tsang. Auto-tuning of fuzzy logic controllers for self-regulating processes. *Fuzzy Sets and Systems*, 120(1):169 – 179, 2001. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)00054-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00054-8).
- [43] Lon-Chen Hung, Hung-Ping Lin, e Hung-Yuan Chung. Design of self-tuning fuzzy sliding mode control for {TORA} system. *Expert Systems with Applications*, 32(1):201 – 212, 2007. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2005.11.008>.
- [44] Servet Soyguder e Hasan Alli. Predicting of fan speed for energy saving in {HVAC} system based on adaptive network based fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 36(4):8631 – 8638, 2009. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.033>.
- [45] Miha Mraz. The design of intelligent control of a kitchen refrigerator. *Mathematics and Computers in Simulation*, 56(3):259 – 267, 2001. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4754\(01\)00281-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4754(01)00281-6).
- [46] C.P. Underwood. Fuzzy multivariable control of domestic heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 90:957 – 969, 2015. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.068>.
- [47] Jian Liang e Ruxu Du. Thermal comfort control based on neural network for hvac application. Em *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, páginas 819–824, Aug 2005. doi:10.1109/CCA.2005.1507230.
- [48] F. Tahersima, J. Stoustrup, H. Rasmussen, e P.G. Nielsen. Thermal analysis of an hvac system with trv controlled hydronic radiator. páginas 756–761, 2010. cited By 13. doi:10.1109/COASE.2010.5584535.
- [49] Hamed Moradi, Majid Saffar-Avval, e Firooz Bakhtiari-Nejad. Nonlinear multivariable control and performance analysis of an air-handling unit. *Energy and Buildings*, 43(4):805 – 813, 2011. doi:<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.022>.
- [50] M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, J. Tu, e D. Hodgson. Mimo robust control for hvac systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(3):475–483, May 2008. doi:10.1109/TCST.2007.903392.
- [51] S.A.K. Al-Assadi, R.V. Patel, M. Zaheer-uddin, M.S. Verma, e J. Breitingner. Robust decentralized control of {HVAC} systems using -performance measures. *Journal of the Franklin Institute*, 341(7):543 – 567, 2004. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2004.06.001>.
- [52] Gregor P. Henze, Clemens Felsmann, e Gottfried Knabe. Evaluation of optimal control for active and passive building thermal storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(2):173 – 183, 2004. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.06.001>.
- [53] Erik M. Greensfelder, Gregor P. Henze, e Clemens Felsmann. An investigation of optimal control of passive building thermal storage with real time pricing. *Journal of Building Performance Simulation*, 4(2):91–104, 2011. doi:10.1080/19401493.2010.494735.

- [54] B. Dong. Non-linear optimal controller design for building hvac systems. Em *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, páginas 210–215, Sept 2010. doi:10.1109/CCA.2010.5611260.
- [55] Yongmin Yan, Jin Zhou, Yaolin Lin, Wei Yang, Ping Wang, e Guoqiang Zhang. Adaptive optimal control model for building cooling and heating sources. *Energy and Buildings*, 40(8):1394 – 1401, 2008. doi:http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.01.003.
- [56] S.Joe Qin e Thomas A. Badgwell. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7):733 – 764, 2003. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
- [57] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, V. Semeraro, M. Morari, e R. S. Smith. Brcm matlab tool-box: Model generation for model predictive building control. Em *2014 American Control Conference*, páginas 1063–1069, June 2014. doi:10.1109/ACC.2014.6858967.
- [58] L. Peeters, J. Van der Veken, H. Hens, L. Helsen, e W. D’haeseleer. Control of heating systems in residential buildings: Current practice. *Energy and Buildings*, 40(8):1446 – 1455, 2008. doi:http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.016.
- [59] M. Killian e M. Kozek. Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. *Building and Environment*, 105:403 – 412, 2016. doi:http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.034.
- [60] Sorin C. Bengea, Anthony D. Kelman, Francesco Borrelli, Russell Taylor, e Sathish Narayanan. Implementation of model predictive control for an hvac system in a mid-size commercial building. *HVAC&R Research*, 20(1):121–135, 2014. doi:10.1080/10789669.2013.834781.
- [61] Massimo Fiorentini, Josh Wall, Zhenjun Ma, Julio H. Braslavsky, e Paul Cooper. Hybrid model predictive control of a residential {HVAC} system with on-site thermal energy generation and storage. *Applied Energy*, 187:465 – 479, 2017. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.041.
- [62] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, E. Poursmaeil, J. C. O. Matias, e J. P. S. Catalão. Model predictive control technique for energy optimization in residential sector. Em *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, páginas 1–6, June 2016. doi:10.1109/EEEIC.2016.7555815.
- [63] Jan Široký, Frauke Oldewurtel, Jiří Cigler, e Samuel Prívará. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied Energy*, 88(9):3079 – 3087, 2011. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009.
- [64] Sorin C. Bengea, Anthony D. Kelman, Francesco Borrelli, Russell Taylor, e Sathish Narayanan. Implementation of model predictive control for an hvac system in a mid-size commercial building. *HVAC&R Research*, 20(1):121–135, 2014. doi:10.1080/10789669.2013.834781.
- [65] W. Grünfelder e J. Tödtli. The use of weather predictions and dynamic programming in the control of solar domestic hot water systems. *3rd Mediterranean Electrotechnical Conference (Melecon)*, October 1985.

- [66] W. Mai e C. Y. Chung. Economic mpc of aggregating commercial buildings for providing flexible power reserve. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5):2685–2694, Sept 2015. doi:10.1109/TPWRS.2014.2365615.
- [67] C. Sundström, D. Jung, e A. Blom. Analysis of optimal energy management in smart homes using mpc. Em *2016 European Control Conference (ECC)*, páginas 2066–2071, June 2016. doi:10.1109/ECC.2016.7810596.
- [68] Yi Zong, Georg Martin Böning, Rui Mirra Santos, Shi You, Junjie Hu, e Xue Han. Challenges of implementing economic model predictive control strategy for buildings interacting with smart energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 114:1476 – 1486, 2017. doi:http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.141.
- [69] Y. Ma, G. Anderson, e F. Borrelli. A distributed predictive control approach to building temperature regulation. Em *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, páginas 2089–2094, June 2011. doi:10.1109/ACC.2011.5991549.
- [70] G. Mantovani e L. Ferrarini. Temperature control of a commercial building with model predictive control techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4):2651–2660, April 2015. doi:10.1109/TIE.2014.2387095.
- [71] D. Oliveira, E. M. G. Rodrigues, R. Godina, T. D. P. Mendes, J. P. S. Catalão, e E. Poursaeil. Enhancing home appliances energy optimization with solar power integration. Em *IEEE EUROCON 2015 - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, páginas 1–6, Sept 2015. doi:10.1109/EUROCON.2015.7313798.
- [72] Alie El-Din Mady, Gregory M. Provan, Conor Ryan, e Kenneth N. Brown. Stochastic model predictive controller for the integration of building use and temperature regulation. Em *Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI'11*, páginas 1371–1376. AAAI Press, 2011.
- [73] Y. Ma e F. Borrelli. Fast stochastic predictive control for building temperature regulation. Em *2012 American Control Conference (ACC)*, páginas 3075–3080, June 2012. doi:10.1109/ACC.2012.6315347.
- [74] Frauke Oldewurtel, Alessandra Parisio, Colin N. Jones, Dimitrios Gyalistras, Markus Gwerder, Vanessa Stauch, Beat Lehmann, e Manfred Morari. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45:15 – 27, 2012. doi:http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022.
- [75] Gongsheng Huang, Shengwei Wang, e Xinhua Xu. A robust model predictive control strategy for improving the control performance of air-conditioning systems. *Energy Conversion and Management*, 50(10):2650 – 2658, 2009. doi:http://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.014.
- [76] K.J. Åström e T. Hägglund. *Advanced PID Control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [77] Jianbo Bai e Xiaosong Zhang. A new adaptive {PI} controller and its application in {HVAC} systems. *Energy Conversion and Management*, 48(4):1043 – 1054, 2007. doi:http://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.023.
- [78] B. Wittenmark K.J. Astrom. *Adaptive control*. Addison-Wesley, New York, 1995.

- [79] Michael J. Pinnella, Eric Wechselberger, Douglas C. Hittle, e Curt O. Pedersen. Self-tuning digital integral control. volume 92, páginas 202–210, 1986. cited By 24.
- [80] S.G. Brandt. Adaptive control implementation issues. volume 92, páginas 211–219, 1986. cited By 12.
- [81] K.J. Åström, T. Hägglund, e A. Wallenborg. Automatic tuning of digital controllers with applications to hvac plants. *Automatica*, 29(5):1333 – 1343, 1993. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098\(93\)90053-V](http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(93)90053-V).
- [82] E.F. Camacho e C. Bordons. *Model Predictive Control*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2004.
- [83] Basil Kouvaritakis e Mark Cannon. *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London, 2016.
- [84] Mohammad H. Moradi. Predictive control with constraints, j.m. maciejowski; pearson education limited, prentice hall, london, 2002, pp. ix+331, price £35.99, isbn 0-201-39823-0. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 17(3):261–262, 2003. doi:10.1002/acs.736.
- [85] D. Oliveira, E. M. G. Rodrigues, R. Godina, T. D. P. Mendes, J. P. S. Catalão, e E. Poursmaeil. Mpc weights tuning role on the energy optimization in residential appliances. Em *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, páginas 1–6, Sept 2015. doi:10.1109/AUPEC.2015.7324869.
- [86] J. Eykho. *System Identification*. John Wiley and Sons, London UK, 1974.
- [87] José A. Orosa e Armando C. Oliveira. Software tools for {HVAC} research. *Advances in Engineering Software*, 42(10):846 – 851, 2011. doi:<http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.05.028>.
- [88] Brian Coffey, Fariborz Haghghat, Edward Morofsky, e Edward Kutrowski. A software framework for model predictive control with genopt. *Energy and Buildings*, 42(7):1084 – 1092, 2010. doi:<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.022>.
- [89] Samuel Prívará, Zdeněk Váňa, Eva Žáčková, e Jiří Cigler. Building modeling: Selection of the most appropriate model for predictive control. *Energy and Buildings*, 55:341 – 350, 2012. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. doi:<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.040>.
- [90] E. Žáčková, S. Prívará, e Z. Váňa. Model predictive control relevant identification using partial least squares for building modeling. Em *2011 Australian Control Conference*, páginas 422–427, Nov 2011.
- [91] S. Prívará, Z. Váňa, D. Gyalistras, J. Cigler, C. Sagerschnig, M. Morari, e L. Ferkl. Modeling and identification of a large multi-zone office building. Em *2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, páginas 55–60, Sept 2011. doi:10.1109/CCA.2011.6044402.
- [92] Y. Ma, A. Kelman, A. Daly, e F. Borrelli. Predictive control for energy efficient buildings with thermal storage: Modeling, stimulation, and experiments. *IEEE Control Systems*, 32(1):44–64, Feb 2012. doi:10.1109/MCS.2011.2172532.

- [93] David Sturzenegger, Dimitrios Gyalistras, Manfred Morari, e Roy S. Smith. Semi-automated modular modeling of buildings for model predictive control. Em *Proceedings of the Fourth ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, BuildSys '12, páginas 99–106, New York, NY, USA, 2012. ACM. doi:10.1145/2422531.2422550.
- [94] American Society of Heating Refrigerating e Air Conditioning Engineers. *The ASHRAE handbook fundamentals (SI Edition)*. 2005.
- [95] E.H. Mathews, P.G. Richards, e C. Lombard. A first-order thermal model for building design. *Energy and Buildings*, 21(2):133 – 145, 1994. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(94)90006-X.
- [96] Y. Lin, T. Middelkoop, e P. Barooah. Issues in identification of control-oriented thermal models of zones in multi-zone buildings. Em *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, páginas 6932–6937, Dec 2012. doi:10.1109/CDC.2012.6425958.
- [97] M.M. Gouda, S. Danaher, e C.P. Underwood. Low-order model for the simulation of a building and its heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(3):199–208, 2000. doi:10.1177/014362440002100308.
- [98] Cengel YA. *Heat transfer: a practical approach*. 2. McGraw-Hill, 2002.
- [99] Khalid Ibrahim Elamari. Using electric water heaters (ewhs) for power balancing and frequency control in pv-diesel hybrid mini-grids. August 2011.
- [100] James D. Lutz, Xiaomin Liu, James E. McMahon, Camilla Dunham, Leslie J. Shown, e Quandra T McCure. Modeling patterns of hot water use in households. (LBL-37805 Rev.):25, January 1 1996. Formal Report, Energy and Buildings, v: 26, 2, 1997.
- [101] A. Kerim Kar e Ümit Kar. Optimum design and selection of residential storage-type electric water heaters for energy conservation. *Energy Conversion and Management*, 37(9):1445 – 1452, 1996. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(95)00230-8.
- [102] Y.A. Çengel. *Heat Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, 2003.
- [103] Niccolò Aste, Claudio Del Pero, e Fabrizio Leonforte. Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context – a review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, páginas –, 2017. doi:http://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.014.
- [104] Christian J.L. Hermes e Cláudio Melo. A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 31(8):1341 – 1357, 2008. doi:http://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.04.003.
- [105] Jaskó Szilárd Simon Gyula Schné Tamás. Dynamic models of a home refrigerator. *MACRo 2015*, 2015. doi:10.1515/macro-2015-0010.
- [106] A. Molina, A. Gabaldon, J. A. Fuentes, e C. Alvarez. Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programmes. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 150(1):61–66, Jan 2003. doi:10.1049/ip-gtd:20020750.

- [107] Eric C. Kerrigan e Jan M. Maciejowski. Soft constraints and exact penalty functions in model predictive control. Em *Proc. UKACC International Conference (Control, 2000*.
- [108] SunPower. Sunpower x-series residential solar panels | x21-335-blk | x21-345, Dezembro, 2016. Disponível em <https://us.sunpower.com>, Solar Panels Technology–X-Series Solar Panels), acessado a última vez em Março de 2017.

Anexo A

Anexos

Residential MPC Controller Performance in a Household with PV Microgeneration

Jorge M. F. Silva¹, Radu Godina², Eduardo M. G. Rodrigues², Edris Pouresmaeil^{3,4}, João P. S. Catalão^{1,2,3}

¹ INESC TEC and FEUP, Porto 4200-465, Portugal, ² C-MAST, UBI, Covilhã 6201-001, Portugal,

³ INESC-ID, IST, Univ. Lisbon, Lisbon 1049-001, Portugal, ⁴ ESTIA Institute of Technology, ESTIA, F-64210, Bidart, France
 ee12054@fe.up.pt; radugodina@gmail.com; erodrigues0203@gmail.com; edris.pouresmaeil@gmail.com; catalao@ubi.pt

Abstract—The energy demand of the residential sector and the adjacent option for fossil fuels has negative consequences by both greenhouse gases (GHG), CO₂ and other air pollutants emissions. The home energy demand consists mainly of energy requirements for space and water heating along with the energy dedicated for appliances. Therefore, different strategies that aim to stimulate an efficient use of energy need to be reinforced at all levels of human activity. In this paper a comparison is made between a Model Predictive Control (MPC) model, the ON/OFF and proportional-integral-derivative (PID) control models of an air conditioning unit AC system controlling the temperature of a room. The model of the house with local Photovoltaic (PV) solar microgeneration is assumed to be located in a Portuguese city. The household of the case study is subject to the local solar irradiance, temperature and electricity tariff of a summer day.

Index Terms—Model predictive control; Energy management controller; Photovoltaic system; Residential building.

NOMENCLATURE

A_w	The wall area.
A	The state (or system) matrix.
B	The input matrix.
C	The output matrix.
C_{in}	The thermal capacitance of the indoor air.
C_{wl}	The thermal capacitance of the wall.
h_o	The combined convection and radiation heat transfer coefficient.
I	The identity matrix.
$J(k)$	Infinite horizon performance cost.
k	Sampling instant and the current control interval.
$k+i$	The time instant associated to the future state prediction for $i=1 \dots N$.
N	The prediction horizon.
M	Positive definite matrix.
P	The control horizon.

Q_{ac}	The cooling power input to the room.
Q_s	The heat flow into an exterior surface of the house subjected to solar radiation
R_{wd}	The thermal resistance of the windows.
R_{wl}	The thermal resistance of the wall.
$S(t)$	A binary variable that emulates the turn-on and turn-off of the thermostat.
T_{in}	The temperature of the room.
T_{out}	The ambient temperature.
T_s	The wall surface temperature.
T_{wl}	The wall temperature.
U	The non-empty set described with linear inequalities.
$u(\cdot k)$	Future control sequence.
$u(k+i k)$	Future control signals for $i=0 \dots P-1$.
W	Positive definite matrix of the performance weights.
$x(k)$	The state vector.
$x(k k)$	The current state.
$y(k)$	The system output.
$y(k+i k)$	The estimated outputs.

Abbreviations:

AC	Air Conditioner
AC	Air Conditioning Unit
LQ	Linear Quadratic
MPC	Model Predictive Control
ON/OFF	Thermostat
SISO	Single-Input and Single-Output
ToU	Time of Use Tariff

I. INTRODUCTION

Increasing concerns regarding climate change are very present when confronted with the damaging consequences of rapid and uncontrolled urbanization. To cope with the current energy consumption growing rate, several efforts are necessary to oppose environmental threats [1]. Results published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emphasized the requirement to preserve the GHG below 450 ppm CO₂ equivalence by 2050 in order to maintain the increase of the temperature of the planet under 2°C [2].

Countries gradually concentrate their initiatives on reducing the negative environmental repercussions of careless energy consumption. The energy sector is experiencing substantial transformation driven by legislation with the purpose to reduce energy consumption and the consequently related environmental impacts [3]. Presently, the consumption of energy in buildings is responsible for circa 32% of the final energy consumption on the planet. In the case of primary energy consumption, the building sector embody about 40% in most of the IEA (International Energy Agency) nations are accountable for 36% of the European Union (EU) CO₂ emissions [4]. Also, the same sector absorbs 40% of EU final consumption and 60% of electricity consumption [5]. As part of the building sector, the residential sector is accountable for 60% of the final energy consumption and presents the highest prospective to decrease the peak demand which is described by the volatility of energy utilization [6].

Even though the flexibility related with home appliances and time varying prices can accomplish palpable positive results for consumers, the present residential load control operations are largely competed physically, thus signifying demanding challenges to consumers in planning the activity of their appliances in an optimal manner. Several clients might not have enough time to plan such type of scheduling operations and at times when the price variation is quick and recurrent scheduling might be perceived as significantly complex. Therefore, an energy management system (EMS) could be a solution to optimize the operation of appliances [7].

As a whole, two methodologies currently exist aiming to achieve energy savings: the inclusion of more energy efficient equipment in buildings, or the efficient management of the energy consumption through an EMS [8]. In the last ten years, the price of storage, data processing, and communication diminished while the incorporation of EMS has become increasingly effective. Such types of solutions offer additional possibilities for the project and implementation of forefront control methods [9].

The development of numerous control techniques has been proposed for AC systems and are classified into classical control, soft control, hard control, hybrid control, and other control methods. Yet, due to their simplicity, ON/OFF and PID controls are still utilized in several AC systems even though such settings might not be adequate for the entirety of the building. Thus, through the definition of set points for local controllers, the regulatory control is utilized to enhance the global system performance such as costs or energy consumption [10].

Driven by the recent improvements in data storage, communication devices, and computing, it is currently possible to materialize a suitable control technique to surmount the characteristic weaknesses in AC control. The implementation of EMS control strategies could be an auspicious solution for reaching improved results in AC systems when compared to other common control methods. By utilizing embedded EMS control units in AC systems, several improvements in energy efficiency could be obtained without the changes affecting the heating and cooling systems. Such types of controllers our found to be a reliable improvement for dwellings and can be without much effort installed, ran and replaced [11].

Several methods based on the MPC have been created and tested with the purpose to optimize the operation of AC systems [12]. The MPC is, in essence, an optimization based approach in which a clear model is used to predict the performance of the controlled plants over a receding horizon [13]. The popularity of the MPC ascended ever since its first application in the process industry in 1970s.

Presently, MPC is broadly utilized in several industry applications. The common research of MPC is mostly dedicated to a centralized implementation. On the other hand, with the accelerated improvement of energy efficiency technology and the required improvement for the economic behavior, large scale systems, such as EMS, are becoming more complex [14].

The aim of this paper is to compare the MPC performance with the ON/OFF and PID control of a domestic AC system controlling the temperature of a room. The model of the house with local solar microgeneration is assumed to be located in Portugal. Thus, the dwelling is subject to the local temperature, solar irradiance and electricity tariff. The MPC is considered to be superior to the classical control techniques such as ON/OFF and PID controls. PID controllers are inferior due to the reason that they display low accuracy in processes which are either non-linear or have a large time delay. For instance, PID controllers only manage efficiently single input single output (SISO) systems. On the other hand, the MPC is able to manage multiple input-multiple output (MIMO) systems, to show a greater accuracy, to operate with constraints, is robust when facing disturbances and has the capacity to predict the performance of the controlled plants over a receding horizon. However, such advantages are counterweighted with greater computational requirements [15]. The remainder of the paper is organized as follows: in Section II the proposed methodology is developed. Then, in Section III the modelled test case is presented while in Section IV obtained results are thoroughly discussed. Finally, conclusions are drawn in Section IV.

II. METHODOLOGY

The MPC is a control technique which is intended to optimize a series of manipulated variable adjustments bound by a prediction horizon. It functions as such through the use of a process model in order for the optimization predictions of process performance based on a linear or quadratic objective, restrained by equality or inequality constraints.

In such a control technique, the optimization is performed repeatedly on-line – the receding horizon which is the inherent contrast between MPC and other control methods. In perfect circumstances only the suboptimal result for the total solution can be achieved, this is the restriction of such finite-horizon optimization. Yet, the optimization of the receding horizon can efficiently include the uncertainties suffered by the model, also the time-varying disturbances and behavior [16].

The broadest state-space representation of a linear system with p inputs [17], q outputs and n state variables is represented as follows:

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

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

where:

$$x(k) \in \mathbb{R}^n, u(k) \in \mathbb{R}^p, y(k) \in \mathbb{R}^q \quad (3)$$

The consequence of such representation is that the system is observable and controllable.

As stated above, the MPC is an optimization based control law, and in an elemental MPC controller the performance measure is nearly each time a quadratic cost. Through the representation of the positive definite matrices as:

$$M = M^T \succ 0 \quad (4)$$

and the performance weights is given by:

$$W = W^T \succ 0 \quad (5)$$

The optimal control input has to be identified in order to minimize the infinite horizon performance cost:

$$J(k) = \sum_{j=k}^{\infty} x^T(j|k)Mx(j|k) + u^T(j|k)Wu(j|k) \quad (6)$$

In an unconstrained scenario, the solution to this equation is given by the linear quadratic (LQ) controller. Yet, in a constrained scenario, no analytic solution exists. As an alternative, the objective in the MPC is to establish a prediction horizon N and approximate the problem with a finite horizon cost:

$$J(k) = \sum_{j=k}^{k+N-1} x^T(j|k)Mx(j|k) + u^T(j|k)Wu(j|k) \quad (7)$$

The finite horizon is essential since it is due to it that it is possible to solve the problem, but simultaneously, other complications are brought by the finite horizon.

By utilizing the model from (1) and (2), it is possible to predict the state $x(k+j|k)$, given a future control sequence $u(\cdot|k)$ and the current state $x(k|k)$. In such a case, no state estimation is obligatory and it is assumed that $C=I$, therefore, $x(k|k) = x(k)$. Consequently, the prediction is represented as:

$$x(k+j|k) = A^j x(k|k) + \sum_{i=0}^{j-1} A^{j-i-1} Bu(k+i|k) \quad (8)$$

By utilizing such predictions, it is possible to define the following optimization equation:

$$\min_u \sum_{j=k}^{k+N+1} x^T(j|k)Mx(j|k) + u^T(j|k)Wu(j|k) \quad (9)$$

which is subject to:

$$u(k+j|k) \in U \quad (10)$$

and

$$x(k+j|k) = Ax(k+j-1|k) + Bu(k+j-1|k) \quad (11)$$

and thus, it is possible to design a basic MPC controller.

III. CASE STUDY

The AC system climatizes the room through a cooling capacity of 3.516 kW. The heat exchange with the exterior occurs through the outer wall of the room and it is the key cause of disturbance of the preferred thermal comfort level of the room. With the purpose of testing both control strategies, the rate of heat loss/generation through the model of the external wall of the room is simulated using a temperature based time series with significant wide thermal amplitude variation upon 24 hours. The thermostat (TH) and the MPC are set with a limit of ± 1 °C and having as reference 23°C.

A. The model of the room

In order to build pleasant interior environments in terms of temperature in distinct rooms of a house - additional energy needs to be consumed with the purpose to remove or insert heat. Thus, the preferred comfort level is established by choosing a reference temperature and by assessing the space air temperature. The comfort level based on temperature is disrupted by the number of residents that inhabit the dwelling, the thermal mass of the space itself, and by the exchange of heat with the external environment through the external walls as can be observed in Fig. 1. Thus, the temperature dynamics of a room in the house derives from the balance of energy of the outside environment temperatures, the AC equipment that inserts or extracts heat from the room in permutation with the indoor thermal mass as shown in Fig. 1. The time of use (ToU) tariff in this studied case has three price levels: the valley price is quantified by 10.23 cent/kWh, the peak price is characterized by 17.68 cent/kWh and the critical peak price is 22.47 cent/kWh [18].

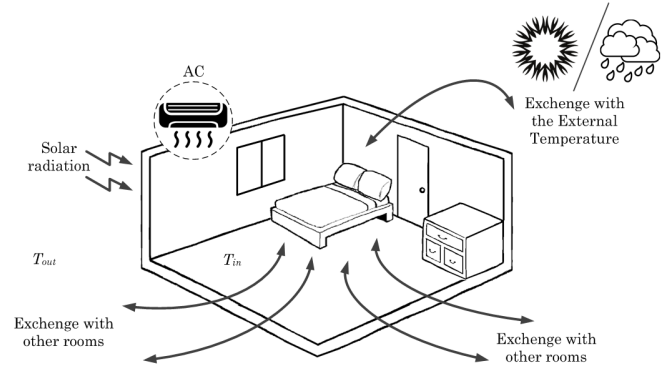


Fig. 1. Indoor environment temperature control.

With the intention of assessing and comparing the behavior of the controller a thermal mass model utilizing a resistance-capacitance circuit analogy is modelled. The aforementioned model contains the heat flow balance between the thermal capacitance of the internal air and the external wall and windows of the room of a house [18]. The following expressions were withdrawn from [19]:

$$\frac{dT_{wl}}{dt} = \frac{Q_s}{C_{wl}} + \frac{T_{in} - T_{wl}}{R_{wl}C_{wl}} \quad (12)$$

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{Q_{ac} \times S(t)}{C_{in}} + \frac{T_{out} - T_{in}}{C_{in}R_{wd}} + \frac{T_{wl} - T_{in}}{C_{in}R_{wl}} \quad (13)$$

$$Q_s = A_w h_o (T_{out} - T_s) \quad (14)$$

where the cooling power input to the room is represented by Q_{ac} , the ambient temperature by T_{out} , T_{in} quantifies the temperature of the room, the wall temperature is given by T_{wl} , the thermal capacitance of the wall by C_{wl} , and the thermal resistance of the wall by R_{wl} , R_{wd} represents the thermal resistance of the windows, the thermal capacitance of the indoor air is given by C_{in} and the heat flow into an exterior surface of the house subjected to solar radiation by Q_s . The combined convection and radiation heat transfer coefficient is quantified by h_o , the wall area is represented by A_w , T_s represents the wall surface temperature. Finally, $S(t)$ represents a binary variable that emulates the turn-on and turn-off of the ON/OFF. For this study, the operation of AC is represented by a power switch block without internal losses. All the data of the physical parameters are acquired from [20].

B. The photovoltaic microgeneration system

With the purpose of modelling a Photovoltaic (PV) microgeneration system it was used PV panels from a German enterprise operating and manufacturing in the PV market. The manufacturing enterprise offers 25 years of linear performance.

In order to simulate the microgeneration PV system, Solarworld-SW-250 monocrystalline panels were selected for this study. This panel performance under standard test conditions presents a maximum power of 250Wp, an open circuit voltage 37.8V, a maximum power point voltage 31.1V, a short circuit current 8.28A and a maximum power point current 8.05A [21].

The PV system for this study contains 4 parallel strings and each one of them contains 10 PV panels signifying that the total installed capacity is 10kWp.

The typical thermostatic and PID control function as a reference to the MPC. As a result, the energy needed to control the appliances, the cost of consuming the energy throughout the off-peak, mid-peak, and on-peak along with the temperature variation are intended as function of weight selection related to the manipulated variable and process output as a portion of the cost function. The calculation of the energy cost depends on the electricity tariff of the Portuguese residential market employed during a period of 24 hours. For the assessment of the time horizon, P control moves number is set to 4 and the N predicted outputs is set to 20.

The aim of the paper is to compare the MPC performance with the ON/OFF and PID control of a domestic AC system controlling the temperature of a room. The model of the house with local solar microgeneration is assumed to be located in Portugal, specifically in the city of Covilhã. The dwelling of the case study is subject to the local solar irradiance, temperature and electricity tariff of a specific day of summer – 8th August, 2016. The daily exterior air temperature of the aforementioned city is presented in Fig. 2. The local solar irradiance is shown in Fig. 3.

IV. RESULTS AND ANALYSIS

By taking into account the exterior temperature of Covilhã on 8th August, 2016, the solar radiation of the same day, a three level ToU tariff was used during the 24h time frame and the transient thermal model of the room equations several results can be obtained. In Fig. 4 can be seen the temperature of the room controlled by the MPC solution. In Fig. 5 can be seen the temperature of the room controlled by the ON/OFF solution. Finally, the behavior of the temperature of the room controlled by the PID solution can be observed in Fig. 6. By comparing the behavior presented in Figs. 4-6 it can be observed that the MPC presents the most erratic performance while the ON/OFF the most stable one.

The energy consumed by the AC during the period in question when controlled by the MPC is lower than the one consumed by the PID and ON/OFF. This can be seen in the Table I. Fig. 7 shows the energy consumed by the AC during the same period of time while controlled by the MPC solution. The consumed energy by using the solutions ON/OFF and PID show a similar behavior. The results presented in the Table I concerning the PV microgeneration confirm that the cost of the energy consumption from the grid is significantly less while showing that the PID is the best solution with PV and MPC without PV.

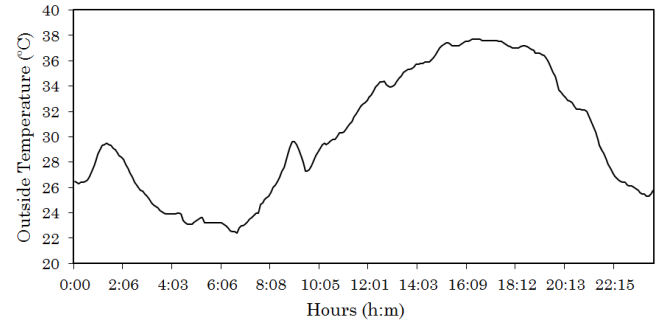


Fig. 2. The exterior temperature of Covilhã on 8th August, 2016.

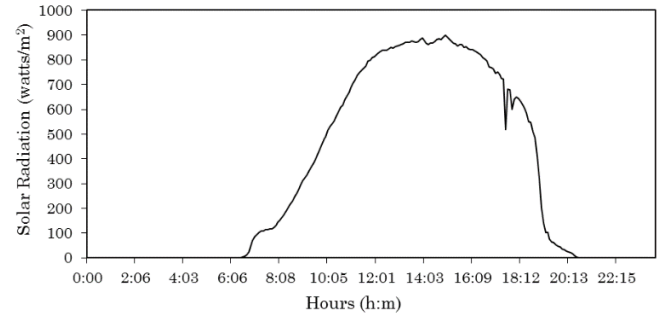


Fig. 3. Solar Radiation (watts/m²) of Covilhã on 8th August, 2016.

TABLE I. THE ENERGY CONSUMPTION AND THE COST

	Without PV		With PV		
	Energy (kWh)	Cost (€)	Energy from grid (kWh)	Energy from PV (kWh)	Cost (€) from grid
ON/OFF	42,3637	7,5234	12,7563	29,6074	2,0203
PID	42,0281	7,4409	12,6780	29,3502	1,9882
MPC	41,5006	7,3898	12,4873	29,0132	1,9916

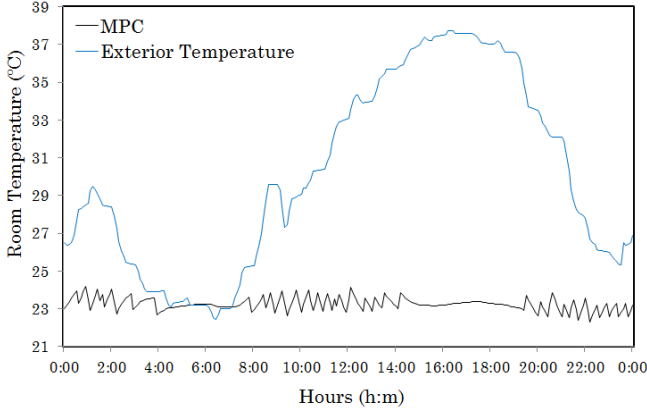


Fig. 4. The temperature of the room controlled by the MPC.

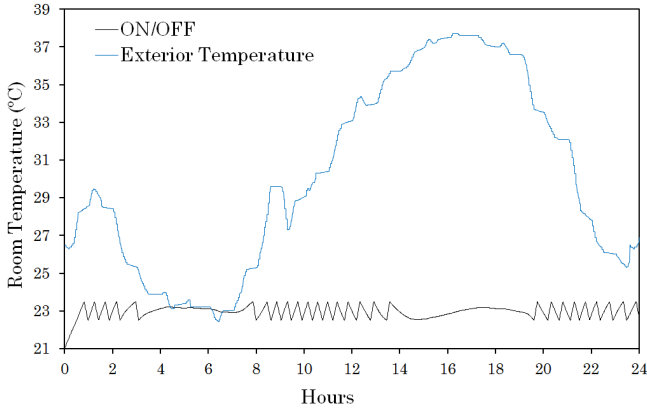


Fig. 5. The energy consumed by the AC by using the ON/OFF solution.

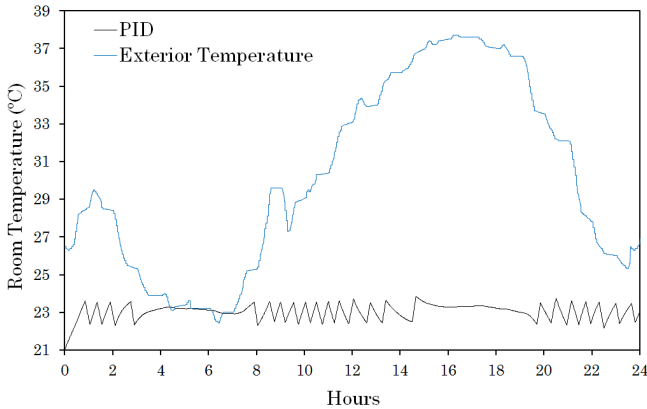


Fig. 6. The energy consumed by the AC by using the PID solution.

By having a PV microgeneration system installed for the house it will significantly lower the bill for the customer as shown in Table I. However, the PID presents a better result by using the PV microgeneration since it operates with a higher

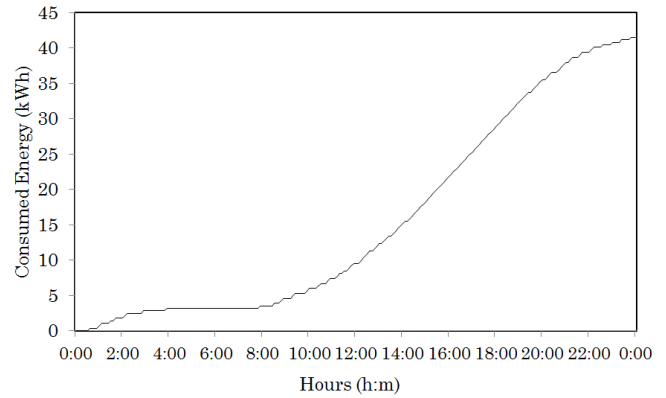


Fig. 7. The energy consumed by the AC by using the MPC solution.

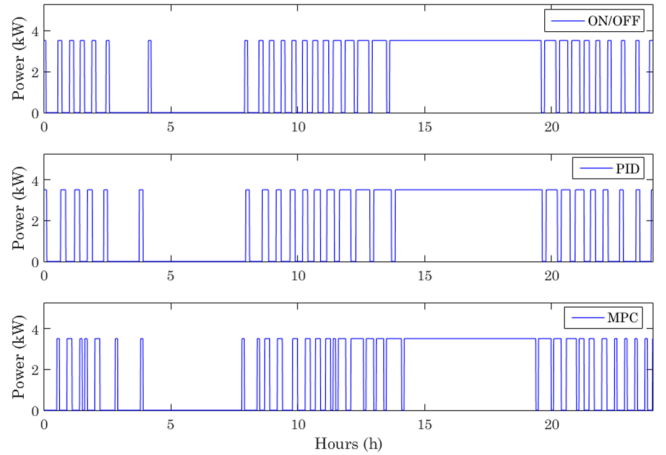


Fig. 8. Periods of operation of the ON/OFF, PID and MPC.

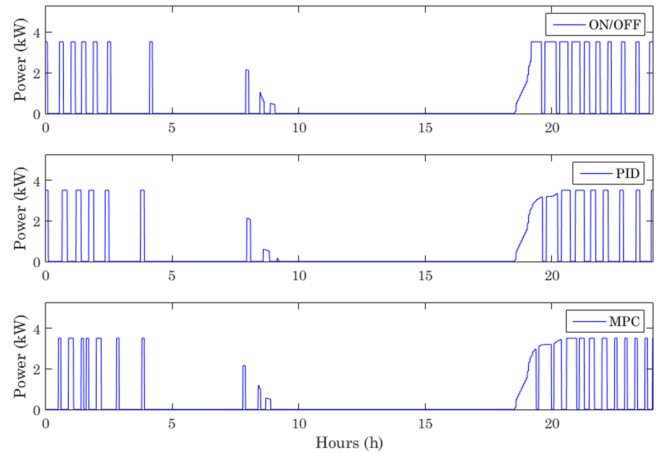


Fig. 9. The power and the consumed energy with PV microgeneration.

activity than others during the day in detriment of the night. Since the PV generates power during the daytime the PID solution is the one that benefits the most from the microgeneration. Fig. 8 shows the behavior of each of the three solutions and the periods of time during the day that they operate. Fig. 9 shows the power and the consumed energy from the grid with PV microgeneration. As can be observed, the energy consumed from the grid is lower during daytime since the AC system consumes a certain amount of energy produced by the PV microgeneration system during daytime.

V. CONCLUSION

In this paper, an MPC strategy with the purpose of stimulating an efficient use of home heating energy has been presented. A comparison was made between the MPC model, the ON/OFF and PID control models of a domestic AC system controlling the temperature of a room. The model of the house with local solar PV microgeneration was assumed to be located in Portugal, namely in the city of Covilhã. The household of the case study was subject to the local solar irradiance, temperature and a summer ToU electricity tariff with three price levels. The results showed that the PV system significantly lowered the electricity bill for the customer. The MPC presented a better behavior when the electricity is consumed only from the grid, while the PID solution is the one that presents a slightly better behavior from the microgeneration, since it operates more during the daytime.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by FEDER funds through COMPETE 2020 and by Portuguese funds through FCT, under Projects SAICT-PAC/0004/2015 - POCI-01-0145-FEDER-016434, POCI-01-0145-FEDER-006961, UID/EEA/50014/2013, UID/CEC/50021/2013, and UID/EMS/00151/2013. Also, the research leading to these results has received funding from the EU Seventh Framework Programme FP7/2007-2013 under grant agreement no. 309048.

REFERENCES

- [1] R. Nishant, T. S. H. Teo, and M. Goh, "Energy Efficiency Benefits: Is Technophilic Optimism Justified?," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 61, no. 3, pp. 476-487, 2014.
- [2] B. Han, E. Bompard, F. Profumo, and Q. Xia, "Paths Toward Smart Energy: A Framework for Comparison of the EU and China Energy Policy," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 423-433, 2014.
- [3] M. E. Morales Udaeta, F. Minoru Maruyam, A. L. Veiga Gimenes, and L. C. Ribeiro Galvao, "Integrated Energy Resources Planning for the Electricity Sector: Targeting Sustainable Development," *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 34, no. 1, pp. 31-38, 2015.
- [4] Rim Missaoui, Hussein Joumaa, Stephane Ploix, and Seddik Bacha, "Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System," *Energy and Buildings*, vol. 71, pp. 155-167, 2014.
- [5] Jean-Nicolas Louis, Antonio Caló, Kauko Leiviskä, and Eva Pongrácz, "Modelling home electricity management for sustainability: The impact of response levels, technological deployment and occupancy," *Energy and Buildings*, vol. 119, pp. 218-232, 2016.
- [6] S. Heinen, D. Elzinga, S.-K. Kim, and Y. Ikeda, "Impact of smart grid technologies on peak load to 2050," Paris, 2011.
- [7] Chen Chen, Jianhui Wang, Yeonsook Heo, and S. Kishore, "MPC-Based Appliance Scheduling for Residential Building Energy Management Controller," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1401-1410, 2013.
- [8] Jingran Ma, S. Joe Qin, and Timothy Salsbury, "Application of economic MPC to the energy and demand minimization of a commercial building," *Journal of Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1282-1291, 2014.
- [9] Wei Liang, Rebecca Quinte, Xiaobao Jia, and Jian-Qiao Sun, "MPC control for improving energy efficiency of a building air handler for multi-zone VAVs," *Building and Environment*, vol. 92, pp. 256-268, 2015.
- [10] Abdul Afram and Farrokh 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.
- [11] W. H. Allen, A. Rubaai, and R. Chawla, "Fuzzy Neural Network-Based Health Monitoring for HVAC System Variable-Air-Volume Unit," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2513-2524, 2016.
- [12] D. Oliveira et al., "Enhancing home appliances energy optimization with solar power integration," in *IEEE EUROCON 2015 - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, Salamanca, 2015.
- [13] D. Oliveira et al., "MPC weights tuning role on the energy optimization in residential appliances," in *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, 2015.
- [14] Michael G. Forbes, Rohit S. Patwardhan, Hamza Hamadah, and R. Bhushan Gopaluni, "Model Predictive Control in Industry: Challenges and Opportunities," in *9th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes*, Whistler, British Columbia, 2015.
- [15] Evan M. Wanjiru, Lijun Zhang, and Xiaohua Xia, "Model predictive control strategy of energy-water management in urban households," *Applied Energy*, vol. 179, pp. 821-831, 2016.
- [16] Y. Zong et al., "Model Predictive Controller for Active Demand Side Management with PV self-consumption in an intelligent building," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, 2012.
- [17] Liuping Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. London: Springer London, 2009.
- [18] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, E. Pouresmaeil, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, "Model predictive control technique for energy optimization in residential sector," in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, 2016.
- [19] Yashen Lin, Timothy Middelkoop, and Prabir Barooah, "Issues in identification of control-oriented thermal models of zones in multi-zone buildings," in *51st IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii, USA, 2012.
- [20] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed.: McGraw-Hill, 2002.
- [21] "SW 250 mono / Version 2.0 and 2.5 Frame," SolarWorld,.