



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Controlo Preditivo Distribuído em Edifícios para Conforto

Térmico e Alocação de Cargas

RUI MANUEL RODRIGUES DE CAMPOS

(Licenciado em Engenharia Electrotécnica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Prof. Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja

Eng.º Filipe André de Sousa Figueira Barata

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Elmano da Fonseca Margato

Vogais:

Prof. Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja

Eng.º Filipe André de Sousa Figueira Barata

Prof. Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes

Dezembro 2013



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Controlo Preditivo Distribuído em Edifícios para Conforto

Térmico e Alocação de Cargas

RUI MANUEL RODRIGUES DE CAMPOS

(Licenciado em Engenharia Electrotécnica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica – ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Prof. Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja

Eng.º Filipe André de Sousa Figueira Barata

Júri:

Presidente: Professor Doutor Elmano da Fonseca Margato

Vogais:

Prof. Doutor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja

Eng.º Filipe André de Sousa Figueira Barata

Prof. Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes

Dezembro 2013

“Se os teus projetos forem para um ano, semeia o grão; se forem para dez anos, plante uma árvore; se forem para cem, educa o povo”
Provérbio chinês

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de uma forma consciente ou não para a realização desta dissertação de mestrado.

Aos professores José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja e Filipe André de Sousa Figueira Barata, um muito obrigado por toda a disponibilidade, orientação e apoio dado.

Ao amigo Nuno Miguel Caetano Félix por estar sempre disposto a dar suporte e motivação na realização desta dissertação.

Aos meus colegas e amigos que estiveram sempre ao meu lado.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em particular à Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Sistemas de Potência e Automação.

E especialmente um enorme agradecimento a toda a minha família que sempre me apoiou e motivou neste momento delicado do meu percurso académico e de vida.

Resumo

A Gestão da Procura ou *Demand-Side Management* (DSM) de energia nos edifícios tem por base um aumento na eficiência na utilização de energia através da alteração da forma e da amplitude do diagrama de carga do consumidor.

O DSM envolve uma combinação de estratégias como o armazenamento de energia, controlo de temperaturas, alocação de cargas e o alisamento de picos de consumo.

Nesta dissertação estudam-se metodologias de controlo preditivo distribuído do tipo Modelo de Controlo Preditivo (MPC) que possam ser aplicadas ao controlo de um sistema de climatização em edifícios e que permitam outras cargas (como por exemplo carregamento de um carro eléctrico) se conectem à rede na hora mais favorável para o consumidor.

O algoritmo proposto é uma metodologia de controlo preditivo distribuído especificamente para edifícios com diferentes características e com diferentes necessidades térmicas e de cargas. Os edifícios partilham um recurso energético renovável limitado e, simultaneamente, procuram satisfazer as suas exigências de conforto térmico e obter o perfil de consumo mais adequado às suas necessidades. A abordagem foi testada e validada com vários cenários.

Os resultados obtidos demonstram que a utilização do controlo preditivo distribuído num contexto de DSM são uma estratégia válida que possibilita obter conforto térmico e alocação de cargas permitindo uma redução de consumo e de custos.

Palavras-chave

Gestão da procura, controlo preditivo, optimização, controlo distribuído, sistemas dinâmicos e controlo de climatização.

Abstract

The Demand Side Management (DSM) in buildings aims to increase the energy usage efficiency by reducing the peak loads and changing the consumer load profile.

DSM promotes the energy savings through a combination of different strategies like thermal control, peak clipping, load shifting and energy storage.

In this thesis, a distributed predictive control methodology is studied, MPC (Model Predictive Control) is applied to an air conditioning control system in buildings to provide thermal comfort allowing also that other appliances (eg charging an electric car) may be connected to the network in the most favorable time by load shifting.

The proposed algorithm is a customized distributed predictive control methodology for buildings with different characteristics and different thermal needs and loads. Buildings also share a limited green energy resource and must fulfill their indoor comfort constraints along with the best load profile. The validity of the approach was tested with several scenarios.

Results show that the distributed model predictive control strategy provides indoor comfort and load shifting in DSM context providing a valid methodology to achieve less consumption and price reduction.

Keywords

Demand side management, predictive control, optimization, distributed control, dynamic systems and climate control.

Índice

1	Introdução.....	23
1.1	Motivação.....	25
1.2	Estado de arte.....	26
1.3	Formulação do problema.....	27
1.4	Principal contribuição.....	28
1.5	Estrutura da dissertação.....	29
2	Visão geral do Sistema.....	31
2.1	Identificação do sistema.....	33
2.1.1	Equivalências de modelos térmicos e eléctricos.....	33
2.2	Modelo termodinâmico da habitação.....	37
2.2.1	Modelo discreto de uma habitação.....	38
2.3	Modelo de Controlo Preditivo (MPC).....	41
2.4	Algoritmo simplificado.....	46
2.4.1	Sem preferência do utilizador.....	47
2.4.2	Com preferência do utilizador.....	51
3	Resultados.....	55
3.1	Validação do algoritmo.....	57
3.1.1	Validação do MPC aliado ao modelo termodinâmico da habitação;.....	57
3.1.2	Validação da alocação das cargas.....	61
3.1.3	Validação da partilha de recursos de uma habitação para a outra;.....	64
3.2	Simulações.....	65

3.2.1	Cargas eléctricas utilizadas	66
3.2.2	Recurso inicial utilizado	70
3.2.3	Simulação sem preferência do utilizador N=1	71
3.2.4	Simulação sem preferência do utilizador N=12	78
3.2.5	Simulação sem preferência do utilizador N=24	85
3.2.6	Simulação com preferência do utilizador N=24	91
4	Conclusões	101
4.1	Principais pontos	103
4.2	Trabalho futuro	106
5	Bibliografia	109
	Anexos	115
	Anexo I - Conceitos básicos de termodinâmica	117
	Anexo II -Artigo Científico	121

Índice de figuras

Figura 1 – Ilustração da equivalência de um sistema térmico de uma habitação para um eléctrico	34
Figura 2 – Equivalência de um sistema térmico de uma parede com janela a um circuito eléctrico.....	36
Figura 3 – Ilustração de um esquema de um MPC discreto.....	41
Figura 4 – Evolução da temperatura exterior durante um período de 24 horas.....	57
Figura 5 – Evolução das perturbações térmicas.....	58
Figura 6 – Restrição da temperatura interior durante 24 horas	58
Figura 7 – Restrição de potência/recurso para a potência de climatização.....	59
Figura 8 - Evolução da potência de climatização dentro das restrições para a simulação de validação	60
Figura 9 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições para a simulação de validação	60
Figura 10 - Perfil das cargas para a simulação de validação	62
Figura 11 - Recurso de potência para a validação do algoritmo de alocação de cargas....	62
Figura 12 - Potência de total, cargas e recurso limitado.....	63
Figura 13 – Resultado da evolução da temperatura interior	63
Figura 14 - Resultado da partilha de recursos.....	64
Figura 15 - Evolução das perturbações externas durante 24 horas	65

Figura 16 - Evolução da temperatura no exterior durante 24 horas.....	65
Figura 17 - Restrição/Zona de conforto térmico.....	66
Figura 18 – Recurso renovável inicial limitado	70
Figura 19 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1)...	71
Figura 20 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1)	71
Figura 21- Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1).....	72
Figura 22 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1)...	72
Figura 23 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1)	73
Figura 24 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1).....	73
Figura 25 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=1)...	74
Figura 26 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=1)	74

Figura 27 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (N=1). 74

Figura 28 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=1) 75

Figura 29 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1) 75

Figura 30 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1) 76

Figura 31 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1)..... 76

Figura 32 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=12). 78

Figura 33 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 Simulação sem preferência utilizador N=12) 78

Figura 34 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=12)..... 79

Figura 35 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 Simulação sem preferência utilizador (N=12). 79

Figura 36 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=12) 80

Figura 37 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=12).....	80
Figura 38 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12).	81
Figura 39 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12)	81
Figura 40 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12).....	81
Figura 41 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=12)	82
Figura 42 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12)	82
Figura 43 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12)	83
Figura 44 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12).....	83
Figura 45 Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)	85
Figura 46 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)	85

Figura 47 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)..... 86

Figura 48 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24). 86

Figura 49 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24) 86

Figura 50 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24)..... 87

Figura 51 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24). 87

Figura 52 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24) 87

Figura 53 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24)..... 88

Figura 54 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=24) 88

Figura 55 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24) 89

Figura 56 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24)	89
Figura 57 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24).....	89
Figura 58 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação com preferência utilizador N=24).	93
Figura 59 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação com preferência utilizador N=24)	94
Figura 60 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24).....	94
Figura 61 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24).	95
Figura 62 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24)	95
Figura 63 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24).....	96
Figura 64 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24).	96

Figura 65 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24) 97

Figura 66 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24)..... 97

Figura 67 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação com preferência utilizador N=24) 98

Figura 68 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação com preferência utilizador N=24) 98

Figura 69 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação com preferência utilizador N=24) 98

Figura 70 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio Simulação com preferência utilizador (N=24)..... 99

Figura 71 – Ilustração de um exemplo de transferência de energia por condução 118

Índice de tabelas

Tabela 1 – Tabela de equivalências de variáveis de sistema eléctrico..... 33

Tabela 2 - Tabela de equivalências do sistema eléctrico ao sistema térmico 36

Tabela 3 - Parâmetros para simulação de validação..... 59

Tabela 4 – Parâmetros MPC para a habitação 1..... 67

Tabela 5– Descrição das cargas para a habitação 1 - Simulação sem preferência utilizador	68
Tabela 6 - Parâmetros MPC para a habitação 2.	68
Tabela 7– Descrição das cargas para a habitação 2 - Simulação sem preferência utilizador	68
Tabela 8 - Parametros MPC para a habitação 3.	69
Tabela 11 – Descrição das cargas para a habitação 3 - Simulação sem preferência utilizador	69
Tabela 12 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=1).	76
Tabela 13 – Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=1).	77
Tabela 14 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=12).	83
Tabela 15 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=12).	84
Tabela 16 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=24).	90
Tabela 17 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=24).	90
Tabela 18 - – Descrição das cargas para a habitação 1 - Simulação com preferência utilizador	92

Tabela 19 – Descrição das cargas para a habitação 2 - Simulação com preferência utilizador	92
Tabela 20 – Descrição das cargas para a habitação 3 - - Simulação com preferência utilizador	93
Tabela 21 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação com preferência utilizador N=24).....	99
Tabela 22 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação com preferência utilizador N=24).....	100

1

Introdução

1.1 Motivação

O conforto térmico é um aspecto importante na satisfação de um indivíduo que tem uma percepção directa e imediata sobre o conforto, pelo que para o garantir recorre à variação da temperatura tendo em consideração o momento actual e não a possível evolução futura. A energia utilizada para a climatização de uma habitação corresponde a uma parte significativa do total de energia consumida, estimando-se que na Europa o sector residencial consome cerca de 35,3% de energia, da qual 75% é para aquecimento de água e climatização [1].

Do ponto de vista económico, social e ambiental é importante adaptar novas técnicas de controlo e modelos que permitam a diminuição do consumo energético nestas áreas. Torna-se interessante a inclusão de previsões meteorológicas, eventos/ocupação de espaços e disponibilidade de recursos energéticos renováveis.

É também importante gerir a alocação de cargas como as máquinas de lavar roupa, máquinas de secar e o carregamento de carros eléctricos que poderão equilibrar o diagrama de rede e permitir poupança energética ao apresentarem um funcionamento flexível em termos de horário para o utilizador.

O desenvolvimento destas tecnologias permite a melhor gestão de recursos disponíveis e a redução da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, permitindo a racionalização dos recursos energéticos vindos de energias não renováveis, diminuindo consequentemente a dependência das mesmas.

1.2 Estado de arte

A resolução do problema que se pretende apresentar é controlar a temperatura interior de um conjunto de habitações que partilham um recurso de energia limitado e alocar cargas de modo a que o consumo de energia seja otimizado.

O problema comum é o de gerir as cargas e manter a temperatura interior de uma habitação. Os programas de gestão de procura (DSM), com o foco no sector residencial, podem rentabilizar um sistema de energia influenciando a activação de cargas eléctricas consoante a energia presente em conjunto com varias estratégias definidas. O problema do deslize de cargas definido por J.Zhange, A. Middelberg e X. Xia em [2] é modelado como um problema de controlo discreto no tempo e resolvido usando técnicas *standard* de optimização. Esta abordagem é útil para alguns problemas para o sector residencial com dinâmicas em tempo real. Estes pontos aliados ao conceito de redes eléctricas inteligentes são chamados de redes inteligentes (Smart Grids).

Várias estratégias já são apresentadas, incluindo o DSM nas redes inteligentes em [3], apresentam uma interação entre o sector residencial, o sector comercial e o industrial. A sua estratégia de gestão de procura consegue uma diminuição no congestionamento da rede de 10-20% e do ponto de vista do consumidor uma poupança energética de 5-10%.

Em Portugal a empresa Energias de Portugal (EDP) apresenta actualmente a InovGrid que consiste em redes bidireccionais que potenciam a utilização de todos os recursos energéticos. Apresenta também um tratamento da informação relativa ao trânsito de energia. Estes aspectos permitem uma gestão da rede em tempo real, potenciando a optimização dos fluxos de energia [4].

Para a metodologia abordada foi utilizada uma ferramenta específica para resolver o problema, o Modelo de Controlo Preditivo. De uma forma primitiva é possível equiparar o controlo preditivo com determinadas características do ser humano. Todos temos a capacidade de prever e de actuar com base nesta forma, como podemos constatar quando nos desviamos de um obstáculo que está mais adiante no nosso caminho. Aliar esta capacidade de prever um comportamento futuro de um processo sobre um horizonte temporal finito [5] e minimizar uma função de custo sobre uma inequação com restrições [6], resume a ideia do MPC.

A substituição de um controlo clássico (PID) por um MPC de uma forma bem dimensionada pode apresentar um aumento de eficiência numa fábrica de 3-5% [7].

Desde cedo têm havido investigações teóricas sobre o assunto, por Kleinmann [8] e mais tarde por Gilbert [9]. Também a aplicação industrial do MPC [10] aparece poucos anos depois da primeira investigação teórica referida neste parágrafo e mais tarde começa a ser mais aceite nos processos industriais em 1985 [11]. Com mais de 1750 aplicações industriais, o MPC em 1996 era a tecnologia de controlo de processos para fábricas mais implementado [12].

Durante os últimos anos o MPC tem sido utilizado para reduzir e otimizar o consumo de energia no sector residencial, especialmente actuando na temperatura [13].

1.3 Formulação do problema

O cenário considera um condomínio formado por uma rede distribuída de habitações, que possui um parque de energia renovável que produz energia eléctrica.

As habitações possuem diferentes cargas, características térmicas, perturbações térmicas (seja por ocupação ou temperatura exterior), diferentes parâmetros de controlo e, conseqüentemente, diferentes necessidades de energia para climatização dos espaços.

A ideia é aplicar o controlo preditivo para regular a temperatura interior de cada habitação considerando-se que todas as casas partilham um recurso renovável limitado. As cargas programáveis são colocadas em funcionamento nos instantes que permitam minimizar a energia para climatização. Em cada habitação existe uma prioridade das cargas a serem colocadas em funcionamento. Se o recurso renovável for insuficiente para satisfazer todas as necessidades, o consumo é feito à rede eléctrica. É prioritário que o consumo de energia para climatização seja realizado através do recurso de energia renovável limitado. O preço cobrado a cada habitação por consumo do recurso renovável e por consumo de energia da rede é de 0,10€/kWh e de 0,151 €/kWh [14], respectivamente.

1.4 Principal contribuição

A principal contribuição desta dissertação baseia-se na demonstração teórica com base em simulações computacionais de um algoritmo de controlo preditivo distribuído em edifícios para conforto térmico e alocação de cargas com recursos renováveis limitados. Vários cenários serão considerados para observar os resultados obtidos nesta dissertação.

A realização desta dissertação resultou na elaboração de um Artigo Científico (Anexo 6.2), tendo o mesmo sido apresentado na conferência *International Conference on Renewable Energy Research and Applications* (ICRERA) 2013. Os artigos seleccionados irão ser publicados no *IEEE Transactions on Power Electronics*, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, e *International Journal of Renewable Energy Research*. O artigo foi

elaborado em parceria entre o Eng. Filipe André de Sousa Figueira Barata, a minha pessoa e Prof. Doutor Rui Neves Silva, onde são abordados alguns temas também presentes nesta dissertação.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em 4 capítulos.

No primeiro capítulo explica a motivação que levou à escrita da dissertação, o estado de arte da tecnologia e o problema que será abordado.

No segundo capítulo é demonstrado o sistema que irá ser abordado, as suas características físicas e a formulação matemática e computacional utilizada para abordar o problema. São explicados os dois algoritmos utilizados.

O terceiro capítulo inicia-se por validar os algoritmos utilizados e definir os respectivos parâmetros. Mostra as simulações numéricas utilizando o *software* MATLAB e a análise de cada situação. Apresentam-se vários tipos de simulações específicas onde são alterados vários parâmetros.

Por último, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros, tendo em conta o estudo e/ou aplicação deste tema.

2

Visão geral do sistema

2.1 Identificação do sistema

2.1.1 Equivalências de modelos térmicos e eléctricos

Neste capítulo é demonstrada a semelhança entre um modelo de um sistema térmico (Anexo I) e um modelo de um sistema eléctrico. Estes sistemas embora distintos tornam-se equivalentes, pois possuem parâmetros que funcionam e tem comportamentos semelhantes. Para tal, identificam-se as variáveis que funcionam de forma análoga, as variáveis de esforço, de fluxo, de armazenamento e de dissipação de energia.

O acto do transporte da energia está associado à variável de fluxo, enquanto o que faz activar esse transporte é uma variável de esforço. As variáveis de armazenamento têm a capacidade de armazenar energia, quer esta seja em esforço ou fluxo.

Para os sistemas eléctricos as fontes de energia podem ser fontes de corrente ou de tensão, respectivamente variáveis de fluxo e esforço. Para o armazenamento de energia há o condensador que armazena tensão, logo é um armazenamento de esforço e a bobine que armazena corrente, armazenamento de fluxo. Por último as resistências, aquelas que dissipam energia, variáveis de dissipação [15].

	Variáveis				
	Esforço	Fluxo	Armazenamento		Dissipação
			Esforço	Fluxo	
Sistema eléctrico	Tensão, $v (V)$	Corrente, $i (A)$	Condensador, $c (F)$	Bobina, $l (H)$	Resistência, $r (\Omega)$

Tabela 1 – Tabela de equivalências de variáveis de sistema eléctrico

De seguida irá proceder-se à identificação das variáveis acima descritas para um sistema térmico. Considerando a *Lei de Fourier* (equação 48, Anexo I), o fluxo de calor corresponde ao fluxo de corrente eléctrica I , a variação de temperatura ΔT com a variação de tensão V e a resistência térmica R com a resistência eléctrica, observa-se a similaridade à *Lei de Ohm*:

$$i = \frac{v}{r} \equiv q = \frac{\Delta T}{R}$$

Equação 1

Na Equação 1 pode identificar-se o fluxo de calor como variável de fluxo, a temperatura como variável de esforço e a resistividade térmica como variável de dissipação.

De forma semelhante, o condensador considera-se a variável de armazenamento de esforço e do lado do sistema térmico a variável que armazena esforço é a capacidade térmica. Desta forma, através da Equação 2 é perceptível que a capacitância é análoga à capacidade térmica:

$$i = c \frac{dv}{dt} \equiv q = C \frac{\Delta T}{dt} \quad \text{onde } C = mc_p$$

Equação 2

A figura abaixo traduz as equivalências entre o sistema térmico e eléctrico:

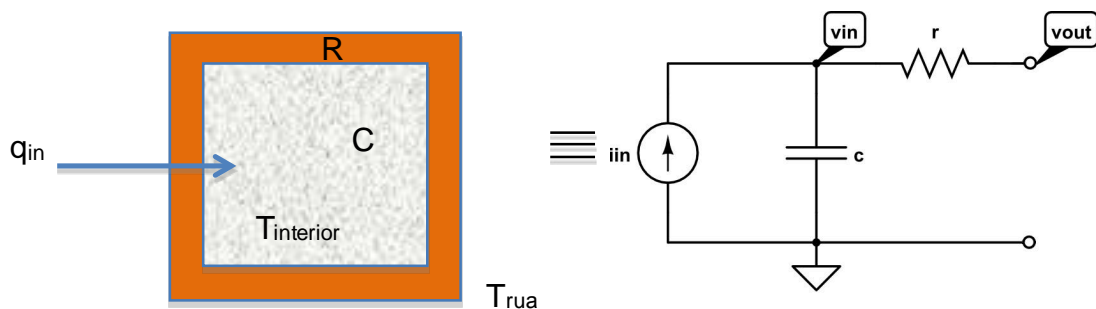


Figura 1 – Ilustração da equivalência de um sistema térmico de uma habitação para um eléctrico

A Figura 1 ilustra a equivalência de uma habitação para um circuito eléctrico. O v_{out} e v_{in} referem-se às tensões nos respectivos nós, passando ao equivalente térmico, corresponde à T_{rua} e $T_{interior}$, respectivamente.

Através de uma análise segundo a *1ª Lei de Kirchhoff* ao circuito eléctrico da Figura 1, arbitrando às correntes i_1 e i_2 o sentido horário em cada ramo, respectivamente:

$$i_{in} - i_1 - i_2 = 0$$

Equação 3

$$i_1 = c \frac{d(v_{in})}{dt}$$

Equação 4

$$i_2 = \frac{v_{in} - v_{out}}{r}$$

Equação 5

$$i_{in} = c \frac{d(v_{in})}{dt} + \frac{v_{in} - v_{out}}{r}$$

Equação 6

Assim pode-se reescrever a equação final do sistema eléctrico para o sistema térmico usando as referências da Tabela 2:

$$q_{in} = C \frac{dT_{interior}}{dt} + \frac{T_{interior} - T_{rua}}{R}$$

Equação 7

A primeira parcela do lado direito da igualdade da Equação 7 de primeira ordem diz respeito ao calor que é armazenado na divisão. A segunda parcela refere-se às perdas de calor.

Ainda no que diz respeito à resistividade térmica, quando um fluxo de calor atravessa uma parede com uma janela, com a presença de dois materiais com diferentes

resistividades, o seu equivalente eléctrico (resistividade térmica equivalente) é uma associação em paralelo de resistências conforme mostra a figura seguinte:

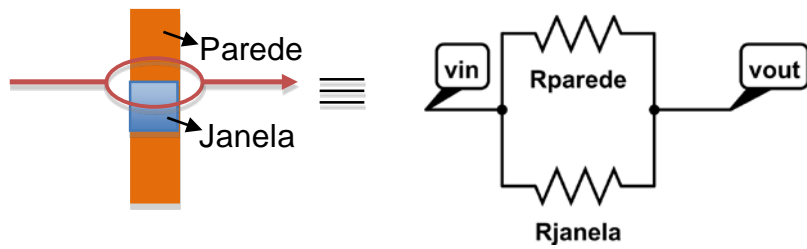


Figura 2 – Equivalência de um sistema térmico de uma parede com janela a um circuito eléctrico

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{parede}} + \frac{1}{R_{janela}} = \frac{R_{janela} + R_{parede}}{R_{janela}R_{parede}}$$

Equação 8

$$R_{eq} = \frac{R_{janela} + R_{parede}}{R_{janela}R_{parede}}$$

Equação 9

A tabela seguinte mostra as equivalências entre o sistema térmico e eléctrico:

	Variáveis				
	Esforço	Fluxo	Armazenamento		Dissipação
			Esforço	Fluxo	
Sistema eléctrico	Tensão, v (V)	Corrente, i (A)	Condensador, c (F)	Bobina, l (H)	Resistência, r (Ω)
Sistema térmico	Temperatura, ΔT (°C)	Fluxo de calor, q (W)	Capacidade térmica, C (J/(kgK))	-	Resistividade térmica, R (K/m)

Tabela 2 - Tabela de equivalências do sistema eléctrico ao sistema térmico

2.2 Modelo termodinâmico da habitação

De modo a criar um modelo de controlo preditivo é necessário obter um modelo dinâmico do sistema.

Um modelo termodinâmico é aquele que armazena e providencia trocas de calor. Um exemplo é uma janela de vidro que armazena calor proveniente da incidência de radiação solar criando uma troca devido à diferença de temperatura de uma face para outra da janela. Esta troca origina uma alteração de temperatura no interior da habitação.

A termodinâmica de uma habitação está dependente de vários factores, tais como as características dos seus materiais (tipo de matéria e as suas dimensões) e perturbações exteriores (variação da temperatura exterior).

A habitação para o qual o MPC é desenhado é constituída com apenas uma divisão, com as acessibilidades e janelas em vidro.

O circuito equivalente da habitação está ilustrado na Figura 2. Fazendo o balanço energético a uma habitação, o calor armazenado $q_{armazenado}$ é a diferença entre o calor que entra q_{in} e as perdas de calor q_{out} [13]:

$$q_{armazenado} = q_{in} - q_{out}$$

Equação 10

A Equação 7 descreve um modelo de primeira ordem da dinâmica dominante de uma habitação. A resistência térmica equivalente é constituída pela resistência térmica de janelas, portas, chão, tecto e parede, de forma equivalente ao demonstrado na Equação 9.

A habitação desenhada para o controlo MPC:

$$\frac{dT_{interior}}{dt} = \frac{1}{C} \left(q_{in} - \frac{T_{interior} - T_{rua}}{R_{eq}} \right)$$

Equação 11

$T_{interior}$ corresponde à temperatura dentro da habitação ($^{\circ}C$), C à capacitância térmica (kJ/K) e q_{in} à potência utilizada para a climatização.

2.2.1 Modelo discreto de uma habitação

No tópico anterior foi obtido um modelo contínuo no tempo para representação das dinâmicas dominantes da habitação apenas com uma divisão, Equação 11. O conceito de modelo contínuo não necessita de intervalos de tempo para explicar mudanças. A mudança acontece como uma variação momentânea a cada instante de tempo [16].

Para aplicar o modelo obtido e utilizá-lo numa ferramenta computacional foi convertido o modelo contínuo no tempo para um modelo discreto. Desta forma, o conceito tempo passa a ser baseado na distinção intervalos/amostras de tempo.

Assim, recorrendo à discretização de Euler com uma amostra de tempo Δt , o modelo contínuo foi convertido num modelo discreto [13]:

$$T(k + 1) = AT(k) + Bu(k) + d(k)$$

Equação 12

Onde $A = 1 - \frac{\Delta t}{R_{eq} \cdot C}$; $B = \frac{\Delta t}{C}$; $d = \frac{P_d \cdot \Delta t}{C} + \frac{T_{oa} \cdot \Delta t}{R_{eq} \cdot C}$; $u(k)$ é a energia necessária para a climatização da habitação, se $u > 0$ é aquecimento, se $u < 0$ arrefecimento, $T(k)$ representa a temperatura no interior, $d(k)$ representa perturbações térmicas externas (kW). Esta última

poderá ser provocada pelo fluxo de ocupantes, qualquer tipo de radiação, portas e/ou janelas a abrirem e fecharem para o fluxo de ar.

Com a variável k a descrever o instante de tempo, para $k=1$ a Equação 12 será:

$$T(1) = AT(0) + Bu(0) + d(0)$$

Equação 13

Para instante seguinte, $k=2$:

$$T(2) = AT(1) + Bu(1) + d(1)$$

Equação 14

Substituindo Equação 13 em Equação 14:

$$T(2) = A[AT(0) + Bu(0) + d(0)] + Bu(1) + d(1)$$

Equação 15

Até aqui pode-se observar que o instante seguinte a k é calculado em função de todos instantes que o antecedem.

Para o instante $k=3$, já com uma substituição análoga à feita na Equação 15:

$$\begin{aligned} T(3) &= A[A[AT(0) + B.u(0) + d(0)] + Bu(1) + d(1)] + Bu(2) + d(2) \\ &= A^3T(0) + A^2Bu(0) + A^2d(0) + ABu(1) + Ad(1) + Bu(2) + d(2) \end{aligned}$$

Equação 16

Para o instante $k=4$, da mesma forma têm-se:

$$T(4) = A^4T(0) + A^3Bu(0) + A^3d(0) + A^2Bu(1) + A^2d(1) + ABu(2) + Ad(2) + Bu(3) + d(3)$$

Equação 17

É visível na sequência de instantes um padrão, então para um horizonte preditivo genérico N , as equações podem ser escritas na seguinte forma matricial:

$$G = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ AB & B & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2B & AB & B & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3B & A^2B & AB & B & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & B & 0 \\ A^N B & A^{N-1}B & \dots & \dots & AB & B \end{bmatrix}$$

Equação 18

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A & 1 & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2 & A & 1 & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3 & A^2 & A & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 & 0 \\ A^N & A^{N-1} & \dots & \dots & A & 1 \end{bmatrix}$$

Equação 19

$$T_s = [A \quad A^2 \quad A^3 \quad \dots \quad A^N]$$

Equação 20

Com $T = T_s T(0) + G \cdot U + WD$ e substituindo Equação 18, Equação 19 e a Equação

20 obtém-se:

$$T = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} T(0) + \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ AB & B & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2B & AB & B & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3B & A^2B & AB & B & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & B & 0 \\ A^N B & A^{N-1}B & \dots & \dots & AB & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ u(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A & 1 & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2 & A & 1 & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3 & A^2 & A & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 & 0 \\ A^N & A^{N-1} & \dots & \dots & A & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(0) \\ d(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ d(N-1) \end{bmatrix}$$

Equação 21

2.3 Modelo de Controlo Preditivo (MPC)

A cada instante o ser humano aplica uma lei de controlo, apesar de não haver noção da mesma. É possível verificar semelhanças entre um MPC e o controlo clássico através de uma situação bastante vulgar [5].

Num cenário em que um individuo quer controlar a sua trajectória, o MPC é equivalente ao individuo ter o horizonte à sua frente. Assim, é capaz de antecipar obstáculos (perturbações) em função do horizonte que consegue captar visualmente (horizonte de predição) e manter-se num trilho delimitado (restrições). No controlo clássico o individuo apenas poderá olhar à sua retaguarda à medida que avança, ou seja, só actua após as perturbações acontecerem.

O objectivo do controlo preditivo é utilizar um modelo dinâmico de um sistema para prever o comportamento das saídas tendo em conta as perturbações que o afectam. Com base na predição, a cada instante de tempo, é calculada uma sequência de valores óptimos através da optimização do processo que maximiza o rendimento do sistema enquanto satisfaz as restrições. Apenas o primeiro valor da sequência de valores óptimos é aplicado ao modelo, sendo o processo repetido no seguinte instante de tempo de acordo com o horizonte. A figura seguinte ilustra um esquema de um MPC discreto no tempo:

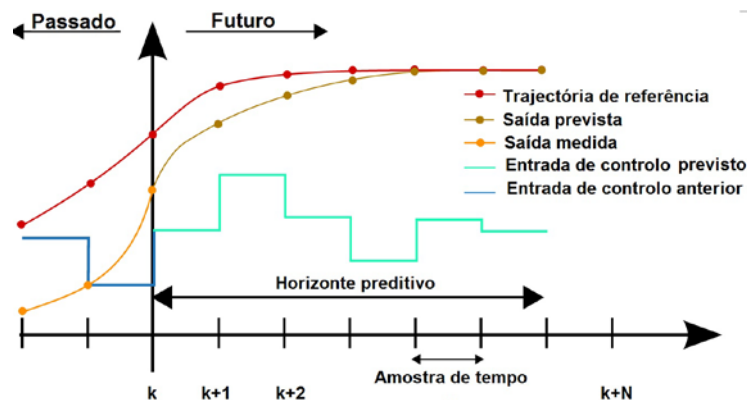


Figura 3 – Ilustração de um esquema de um MPC discreto

O objectivo a atingir com este MPC é o de minimizar a energia utilizada para climatizar a habitação, isto é, minimizar a energia total consumida utilizada para aquecimento e arrefecimento, minimizar os picos de consumo energético e manter as temperaturas dentro de uma gama de conforto definida.

O princípio de controlo da climatização da habitação passa por compreender os parâmetros do sistema, tais como a temperatura da habitação, previsões de perturbações térmicas exteriores e da evolução da temperatura exterior com base em previsões meteorológicas e actuar nos equipamentos que controlam a climatização.

O MPC desenvolvido tem em consideração, em conformidade com essas limitações de potência impostas ao sistema, os limites de conforto térmico, os picos de potência e o consumo efectuado. O problema é dado por uma função de minimização a resolver, para cada uma das habitações para cada instante:

$$\min_{U, \bar{\varepsilon}, \underline{\varepsilon}, \bar{\gamma}, \underline{\gamma}} \sum_{k=0}^{N-1} u_{t+k|t}^2 \Delta t + \Phi \max\{u_{t|t}^2, \dots, u_{t+N-1|t}^2\} + \rho \sum_{k=0}^{N-1} (\bar{\varepsilon}_{t+k|t}^2 + \underline{\varepsilon}_{t+k|t}^2) + \psi \sum_{k=0}^{N-1} (\bar{\gamma}_{t+k|t}^2 + \underline{\gamma}_{t+k|t}^2)$$

Equação 22

Sujeita às seguintes restrições:

$$T_{t+k+1|t} = AT_{t+k|t} + Bu_{t+k|t} + d_{t+k|t}$$

Equação 23

$$\underline{T} - \underline{\varepsilon}_{t+k|t} \leq T \leq \bar{T} + \bar{\varepsilon}_{t+k|t}$$

Equação 24

$$\underline{U}_{A_i} - \underline{\gamma}_{t+k|t} \leq U \leq \bar{U}_{A_i} + \bar{\gamma}_{t+k|t}$$

Equação 25

$$\underline{\gamma}_{-t+k|t}, \bar{\gamma}_{t+k|t}, \underline{\varepsilon}_{t+k|t}, \bar{\varepsilon}_{t+k|t} \geq 0$$

Equação 26

Na Equação 22, u representa a entrada de controlo de potência, ϕ é a penalização dos picos de consumo de potência, ρ é a penalização pela violação da zona de conforto térmico, ψ a penalização da violação das restrições de potência, e N é o horizonte de previsão. Na Equação 24, $\bar{\varepsilon}$ e $\underline{\varepsilon}$ são vectores de violação das restrições de temperatura, que estão fora da zona de conforto definida em \bar{T} e \underline{T} . Na Equação 33, $\bar{\gamma}$ e $\underline{\gamma}$ são vectores de violação de potência que estão fora dos limites impostos em \bar{U}_{A_i} e \underline{U}_{A_i} (positivos e negativos visto haver necessidade de aquecer ou arrefecer a habitação).

A Equação 26 garante apenas que as penalizações têm de ser zero ou positivas. Num problema de minimização, as restrições de têm de estar no formato $Ax < B$,

$$x = [u, \underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}, \underline{\gamma}, \bar{\gamma}]^T$$

Equação 27

Assim sendo, substituindo a Equação 21 na restrição de igualdade de temperatura da Equação 24, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \underline{T}(1) \\ \underline{T}(2) \\ \underline{T}(3) \\ \vdots \\ \underline{T}(N) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{\varepsilon}(1) \\ \underline{\varepsilon}(2) \\ \underline{\varepsilon}(3) \\ \vdots \\ \underline{\varepsilon}(N) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} T(0) + \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ AB & B & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2B & AB & B & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3B & A^2B & AB & B & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & B & 0 \\ A^N B & A^{N-1}B & \dots & \dots & AB & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ u(N-1) \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ A & 1 & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ A^2 & A & 1 & \ddots & \dots & \vdots \\ A^3 & A^2 & A & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 & 0 \\ A^N & A^{N-1} & \dots & \dots & A & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(0) \\ d(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ d(N-1) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \bar{T}(1) \\ \bar{T}(2) \\ \bar{T}(3) \\ \vdots \\ \bar{T}(N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}(1) \\ \bar{\varepsilon}(2) \\ \bar{\varepsilon}(3) \\ \vdots \\ \bar{\varepsilon}(N) \end{bmatrix}$$

Equação 28

Onde a restrição de limite mínimo de temperatura é dado por:

$$\underline{T} - \underline{\varepsilon} \leq T$$

Equação 29

$$\underline{T} - \underline{\varepsilon} \leq T_s T(0) + G.U + WD$$

Equação 30

$$-(\underline{\varepsilon} + GU) \leq -(\underline{T} - T_s T(0) - WD)$$

Equação 31

Através da Equação 31 e multiplicando pela Equação 26 resulta as matrizes

A1 e B1:

$$A1 = [G; I_N; 0_N; 0_N; 0_N]$$

Equação 32

$$B1 = -(\underline{T} - T_s T(0) - WD)$$

Equação 33

Similamente, para o limite superior de temperatura pode ser expresso da seguinte forma:

$$T \leq \bar{T} + \bar{\varepsilon}$$

Equação 34

$$T_s T(0) + GU + WD \leq \bar{T} + \bar{\varepsilon}$$

Equação 35

$$(\bar{\varepsilon} + GU) \leq -(\bar{T} - T_s T(0) - WD)$$

Equação 36

Através Equação 36 e multiplicando mais uma vez pela Equação 26 resulta as matrizes $A2$ e $B2$:

$$A2 = [G; 0_N; I_N; 0_N; 0_N]$$

Equação 37

$$B2 = \bar{T} - T_s T(0) - WD$$

Equação 38

As restrições de igualdade Equação 25, mínimo e máximo são dados pelas (Equação 36 à Equação 38) e (Equação 39 à Equação 40), respetivamente:

$$\underline{U} - \underline{\Upsilon} \leq U$$

Equação 39

$$-\underline{\Upsilon} - U \leq -\underline{U}$$

Equação 40

$$U \leq \bar{U} + \bar{\Upsilon}$$

Equação 41

$$U - \bar{\Upsilon} \leq \bar{U}$$

Equação 42

Através da Equação 40 e Equação 42 resultam as matrizes $A3$, $A4$, $B3$ e $B4$:

$$A3 = [-I_N; 0_N; 0_N; -I_N; 0_N]$$

Equação 43

$$B3 = \underline{U}$$

Equação 44

$$A4 = [I_N; 0_N; 0_N; 0_N; -I_N]$$

Equação 45

$$B4 = \bar{U}$$

Equação 46

Finalmente no formato $Ax=b$, assume a forma:

$$\begin{bmatrix} -A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} -B1^T \\ B2^T \\ B3^T \\ B4^T \end{bmatrix}$$

Equação 47

2.4 Algoritmo simplificado

Este algoritmo partilha um recurso renovável U predefinido e limitado para um condomínio. Cada habitação do condomínio utilizará a energia necessária para satisfazer o conforto térmico de acordo com os parâmetros para ela definido e colocar as cargas em funcionamento. Existirá uma ordem de acesso ao recurso, pelo que a segunda habitação só poderá satisfazer as suas necessidades, depois da primeira, e assim sucessivamente.

É prioritário o consumo de energia proveniente do recurso renovável e, em último caso, utilizar a potência disponível da rede. O problema é resolvido quando é encontrada o ponto de maior eficiência energética e os parâmetros de conforto são atingidos. Variam em duas metodologias a forma das cargas serem alocadas.

2.4.1 Sem preferência do utilizador

Este tópico tem a particularidade das cargas, caso haja recurso renovável disponível, puderem ser estudadas no maior número de horas possíveis para a sua alocação, sem intervenção do utilizador.

- Algoritmo:

Horizonte temporal a considerar - CH

Recurso renovável U predefinido

O condomínio definido por $A_h = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ H \end{bmatrix}, h = 1, 2, \dots, H$

Cada conjunto de cargas $C_i = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ I \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, I$

As cargas C_i são definidas por uma amplitude a_i e uma duração (em horas) d_i . E sujeitas às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^I d_i \leq CH$$

$$a_i \leq \text{Potência activa contratada à rede}$$

Traçar o perfil de consumidor do utilizador:

Perfil de consumidor definido por $PL_h = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ H \end{bmatrix}, h = 1, 2, \dots, H$ (Utilizado para

eventualmente criar uma ordem de acesso ao recurso)

Para um ciclo₁ de $h=1$ até H

(para todas as habitações/agentes do condomínio)

$$\bar{U}_h(1: CH) = U$$

$$\underline{U}_h(1: CH) = -\bar{U}_h(1: CH)$$

$$dUs_h(1: CH) = \min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{rua}, T_{inicial}, P_{externa}) \text{ (Resolve o problema)}$$

$$PL(h) = \sum_{j=1}^{CH} dUs(h) + \sum_{m=1}^I C_{h,i}$$

(Soma os elementos do vector da potência de climatização com os elementos a potência total que cada conjunto de carga vai consumir)

Fim do ciclo₁

Com a hora estabelecida de acesso Agente 1, Agente 2, Agente 3...

Para um ciclo₂ de $h=1$ até H

(para todas as habitações/agentes do condomínio)

$$Pdisp_{h,0}(1: CH) = \bar{U}_{h,0}(1: CH) - dUs_h(1: CH)$$

(Para a primeira vez estima o valor de potência disponível utilizado a potência de climatização aproximada calculada para o perfil de consumidor)

Para um ciclo_{2.1} de $i=1$ até I

(para todas as cargas i do conjunto de cargas do agente h)

$$flag=0$$

(indica que esta carga ainda não utilizou nenhum recurso)

$$Pdisp_{h,i}(1: CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1: CH) - \min(dUs_{h,i-1}(1: CH))$$

(Estima o valor de potência disponível utilizado a potência de climatização mínima da carga anterior)

Para um ciclo_{2.1.1} de $j=1$ até CH

(Corre cada hora do horizonte temporal escolhido CH)

Se $\exists C_{h,i} : Pdisp_{h,i}(j:j + d_i) \geq a_i$

(se existir uma carga i do conjunto de cargas da habitação h em que haja potência disponível para garantir o seu funcionamento durante a sua duração)

$$\bar{U}_{h,i}(1:CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1:CH) - C_{h,i}(j:j + d_i)$$

(Retira ao recurso a carga para a hora escolhida)

$$\underline{U}_{h,i}(1:CH) = -\bar{U}_{h,i}(1:CH)$$

$$dUx_{h,i}(1:CH) =$$

$$\min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{outside}, T_{inicial}, P_{externa})$$

(Resolve o problema)

$$flag=1$$

(indica que foi utilizado o recurso renovável para o funcionamento da carga i)

Caso contrário: $\nexists C_{h,i} : Pdisp_{h,i}(j:j + d_i) \geq a_i \& flag = 0$

$$\bar{U}_{h,i}(1:CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1:CH) - C_{h,i}(j:j + d_i)$$

(Retira ao recurso a carga para a hora escolhida)

$$\forall \bar{U}_{h,i} : \bar{U}_{h,i} < 0 := \bar{U}_{h,i} = 0$$

(Para todos os elementos do vector $\bar{U}_{h,i}$ que sejam inferior a zero, passam a ser 0, ou seja, se a potência disponível for maior que a potência da carga i vai consumir o excedente à rede naquele momento)

$$\underline{U}_{h,i}(1:CH) = -\bar{U}_{h,i}(1:CH)$$

$$dUx_{h,i}(1:CH) = \min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{rua}, T_{inicial}, P_{externa})$$

$flag=-1$

(indica que foi utilizado a rede para o funcionamento da carga i)

Fim da condição

Fim do ciclo2.1.1

$$\bar{U}_{h,i+1} = \bar{U}_{h,i} : \min(dUx_{h,i})$$

(Escolhe o recurso para o qual foi mínimo a potência de climatização para usar na carga seguinte, assim a carga $i+1$ já tem em consideração os recursos consumidos pela carga i)

Fim do ciclo2.1

$\bar{U}_{h,o} = \bar{U}_{h,i} : \min(dUx_{h,i}) - \min(dUx_{h,i})$ (Escolhe o recurso inicial a ser utilizado na habitação $h+1$ o remanescente de potência da habitação h)

Fim do ciclo2

2.4.2 Com preferência do utilizador

Neste ponto as cargas são alocadas e estudadas de acordo com a preferência do utilizador. Essa preferência é traduzida em uma hora de início e respectiva variação, ou seja, quantas horas antes e depois podem ser consideradas com caso possível.

- Algoritmo:

Horizonte temporal a considerar - CH

Recurso renovável U predefinido

O condomínio definido por $A_h = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ H \end{bmatrix}, h = 1, 2, \dots, H$

Cada conjunto de cargas $C_i = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ I \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, I$

As cargas C_i são definidas por uma amplitude a_i , duração (em horas) d_i , hora de início t_i e o variação em que elas podem andar, se nenhuma 0, 1 uma hora para trás outra para a frente o_i e sujeitas às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^I d_i \leq CH$$

$$a_i \leq \text{Potencia activa contratada à rede}$$

$$\begin{cases} t_i - o_i - d_i \geq 0 \\ t_i + o_i + d_i \leq CH \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{\tau} = t_i - o_i \\ \overline{\tau} = t_i + o_i \end{cases}$$

Traçar o perfil do consumidor:

Perfil de consumidor definido por $PL_h = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ H \end{bmatrix}$, $h = 1, 2, \dots, H$ (Utilizado para eventualmente criar uma ordem de acesso ao recurso)

Para um ciclo₁ de $h=1$ até H

(para todas as habitações/agentes do condomínio)

$$\bar{U}_h(1: CH) = U$$

$$\underline{U}_h(1: CH) = -\bar{U}_h(1: CH)$$

$$dUs_h(1: CH) = \min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{rua}, T_{inicial}, P_{externa}) \text{ (Resolve o problema)}$$

$$PL(h) = \sum_{j=1}^{CH} dUs(h) + \sum_{m=1}^l C_{h,i}$$

(Soma os elementos do vector da potência de climatização com os elementos a potência total que cada conjunto de carga vai consumir)

Fim do ciclo₁

Com a hora estabelecida de acesso Agente 1, Agente 2, Agente 3...

Para um ciclo₂ de $h=1$ até H

(para todas as habitações/agentes do condomínio)

$$Pdisp_{h,0}(1: CH) = \bar{U}_{h,0}(1: CH) - dUs_h(1: CH)$$

(Para a primeira vez estima o valor de potência disponível utilizado a potência de climatização aproximada calculada para o perfil de consumidor)

Para um ciclo_{2.1} de $i=1$ até l

(para todas as cargas i do conjunto de cargas do agente h)

$$flag=0$$

(indica que esta carga ainda não utilizou nenhum recurso)

$$Pdisp_{h,i}(1:CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1:CH) - \min(dUs_{h,i-1}(1:CH))$$

(Estima o valor de potência disponível utilizado a potência de climatização mínima da carga anterior)

Para um ciclo $j = \underline{\tau}$ até $\bar{\tau}$

(Corre as horas com a variação pretendida pelo utilizador)

$$\text{Se } \exists C_{h,i} : Pdisp_{h,i}(j:j + d_i) \geq a_i$$

(se existir uma carga i do conjunto de cargas da habitação h em que haja potência disponível para garantir o seu funcionamento durante a sua duração)

$$\bar{U}_{h,i}(1:CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1:CH) - C_{h,i}(j:j + d_i)$$

(Retira ao recurso a carga para a hora escolhida)

$$\underline{U}_{h,i}(1:CH) = -\bar{U}_{h,i}(1:CH)$$

$$dUx_{h,i}(1:CH) = \min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{outside}, T_{inicial}, P_{externa})$$

(Resolve o problema)

$$flag=1$$

(indica que foi utilizado o recurso renovável para o funcionamento da carga i)

$$\text{Caso contrário: } \nexists C_{h,i} : Pdisp_{h,i}(j:j + d_i) \geq a_i \& flag = 0$$

$$\bar{U}_{h,i}(1:CH) = \bar{U}_{h,i-1}(1:CH) - C_{h,i}(j:j + d_i)$$

(Retira ao recurso a carga para a hora escolhida)

$$\forall \bar{U}_{h,i}: \bar{U}_{h,i} < 0 := \bar{U}_{h,i} = 0$$

(Para todos os elementos do vector $\bar{U}_{h,i}$ que sejam inferior a zero, passam a ser 0, ou seja, se a potência disponível for maior que a potência da carga i vai consumir o excedente à rede naquele momento)

$$\underline{U}_{h,i}(1: CH) = -\bar{U}_{h,i}(1: CH)$$

$$dUx_{h,i}(1: CH) = \min MPC(\bar{U}, \underline{U}, \bar{T}, \underline{T}, \psi, \rho, k, T_{rua}, T_{inicial}, P_{externa})$$

$$flag = -1$$

(indica que foi utilizado a rede para o funcionamento da carga i)

Fim da condição

Fim do ciclo_{2.1.1}

$$\bar{U}_{h,i+1} = \bar{U}_{h,i}: \min(dUx_{h,i})$$

(Escolhe o recurso para o qual foi mínimo a potência de climatização para usar na carga seguinte, assim a carga $i+1$ já tem em consideração os recursos consumidos pela carga i)

Fim do ciclo_{2.1}

$$\bar{U}_{h,0} = \bar{U}_{h,1}: \min(dUx_{h,1}) - \min(dUx_{h,1}) \text{ (Escolhe o recurso inicial a ser utilizado na habitação } h+1 \text{ o remanescente de potência da habitação } h)$$

Fim do ciclo₂

3

Resultados

3.1 Validação do algoritmo

A validação do algoritmo divide-se em três partes:

- Validação do MPC aliado ao modelo termodinâmico da habitação;
- Validação da alocação das cargas;
- Validação da partilha de recursos de uma habitação para a outra.

3.1.1 Validação do MPC aliado ao modelo termodinâmico da habitação;

Considerou-se que a habitação está exposta a dois tipos de perturbações, a temperatura no exterior (Figura 4) e a um conjunto que engloba a ocupação dos espaços, o fluxo de calor devido a uma janela aberta, eletrodomésticos em funcionamento (Figura 5).

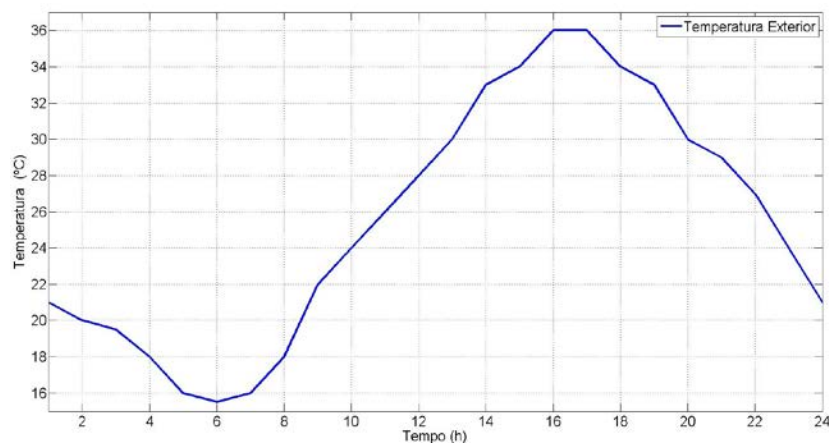


Figura 4 – Evolução da temperatura exterior durante um período de 24 horas

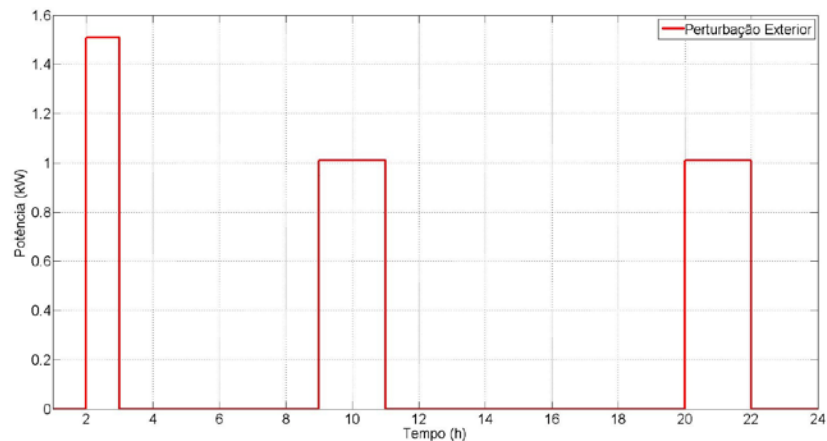


Figura 5 – Evolução das perturbações térmicas

À medida que o dia vai evoluindo estas perturbações influenciam a temperatura interior e o controlador MPC irá tentar compensar estas perturbações externas antecipando-as consoante o seu horizonte de predição, de modo a manter a temperatura dentro dos limites estipulados.

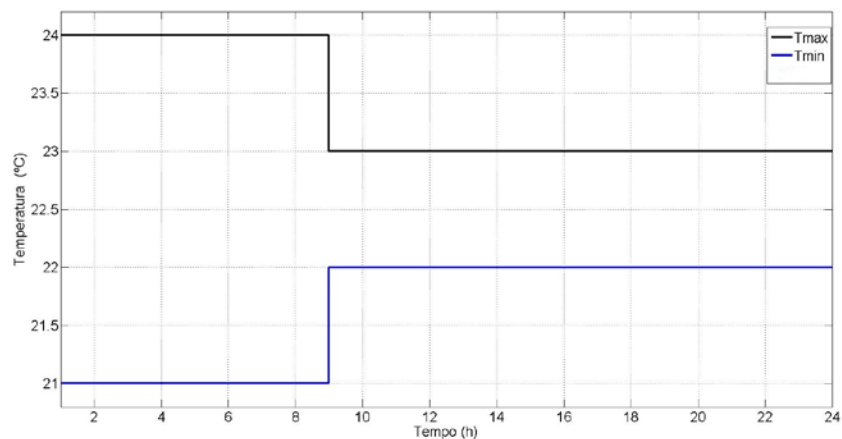


Figura 6 – Restrição da temperatura interior durante 24 horas

A potência utilizada para a climatização, ou seja, para manter a temperatura interior dentro da restrição, também é limitada e previsível, como se pode verificar na Figura 7:

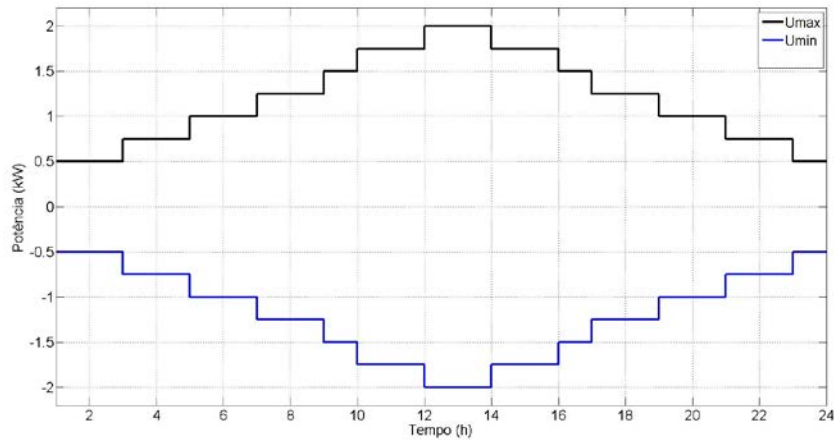


Figura 7 – Restrição de potência/recurso para a potência de climatização

A representação de um recurso de potência positivo (U_{max}) e um recurso de potência negativo (U_{min}) é meramente ilustrativa, de modo a compreender se o recurso está a ser utilizado para aquecimento ou arrefecimento da habitação.

As restrições da Figura 6 e da Figura 7 podem ser ultrapassadas dependendo dos parâmetros indicados para a penalização.

Com a conjugação dos parâmetros acima indicados consegue-se constituir vários perfis de consumo dos utilizadores.

ρ	ψ	N	k	$T_{inical interior}$ (°C)
500	200	24	2	22

Tabela 3 - Parâmetros para simulação de validação

Com a resolução do problema obteve-se os seguintes resultados:

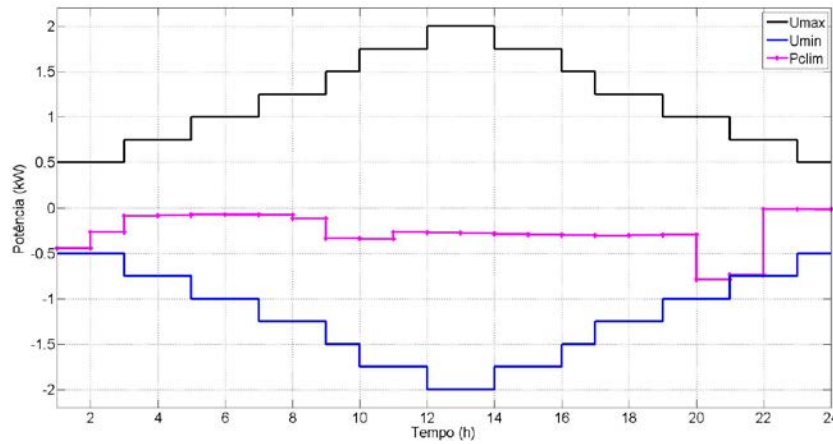


Figura 8 - Evolução da potência de climatização dentro das restrições para a simulação de validação

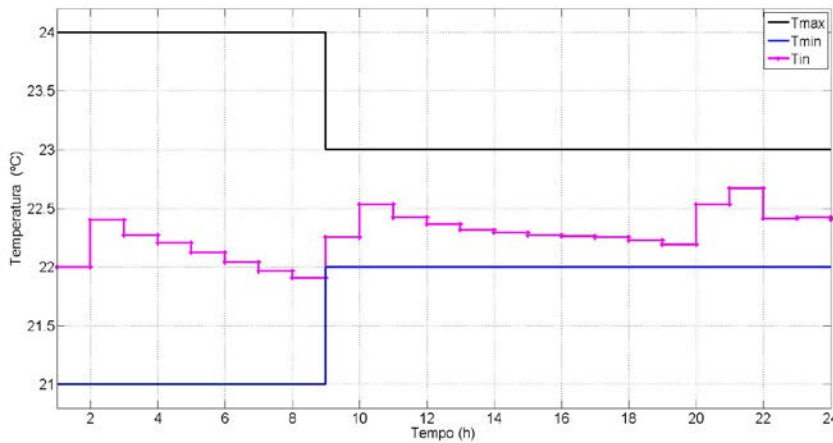


Figura 9 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições para a simulação de validação

Numa primeira análise, é visível que grande parte do tempo a energia é utilizada para arrefecimento da habitação, pois as perturbações térmicas da Figura 5 são fluxos de calor positivos e a temperatura exterior é na maior parte das horas superior à temperatura interior inicial.

Devido a um horizonte de predição de 24 horas, o controlador é capaz de visualizar as perturbações previsíveis dentro do mesmo e actuar de modo a respeitar as restrições e a minimizar a potência utilizada para climatização.

Na análise da Figura 8 é notória a compensação das perturbações ao arrefecer antecipadamente a habitação. Os momentos em que há maior utilização de potência dão-

se durante a hora 1, entre as 8 e 11 horas e entre as 20 e as 22 horas, indo de encontro com as perturbações mostradas na Figura 5. Nestas horas há valores mais altos na temperatura interior.

A influência da temperatura exterior é visível pois está sempre a ser utilizada energia para tentar compensar os seus valores superiores à temperatura interior.

Visto que a energia utilizada para a climatização não ultrapassou as restrições e os parâmetros escolhidos (Tabela 3) constituem um utilizador com um perfil *standard* (dá igual importância a todos os parâmetros), a temperatura interior não deverá sair dos limites.

3.1.2 Validação da alocação das cargas

O objectivo deste algoritmo é tentar alocar, ao deslizar, uma carga nos momentos em que há disponibilidade no recurso para esta funcionar. Primeiro, foram dimensionadas duas cargas. Estas são referentes a duas utilizações comuns:

A primeira carga será um carregamento completo regular do i MiEV, um dos primeiros dos veículos eléctricos comercializados na Europa [17]. O seu perfil é o seguinte:

Duração (d_1): 6 horas;

Amplitude (a_1): 3,68kW;

A segunda carga será um programa de lavagem de duas horas de uma máquina de lavar roupa Samsung de classe de eficiência energética A+++ [18]. O seu perfil é o seguinte:

Duração (d_2): 2 horas;

Amplitude (a_2): 0,885kW;

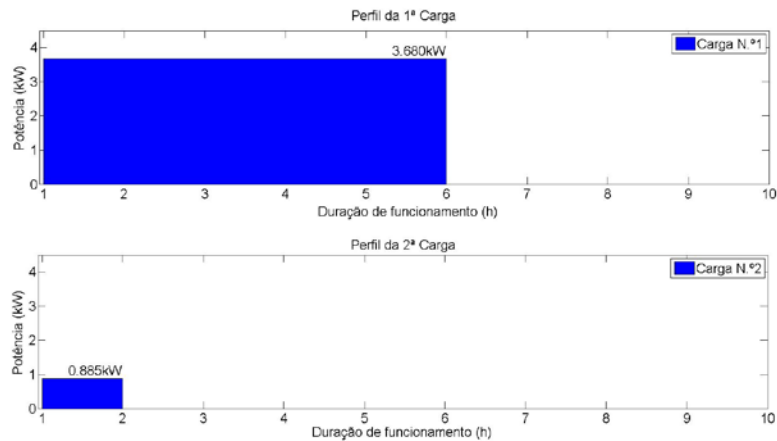


Figura 10 - Perfil das cargas para a simulação de validação

De modo a validar este algoritmo foi criado um recurso com a particularidade de durante as 3 e as 4 horas haver 2kW de potência e durante as 16 e as 21 horas haver 4,7kW. Para as restantes horas o recurso estaria limitado a 0,5kW de modo a apenas ser possível a sua utilização para a potência de climatização.

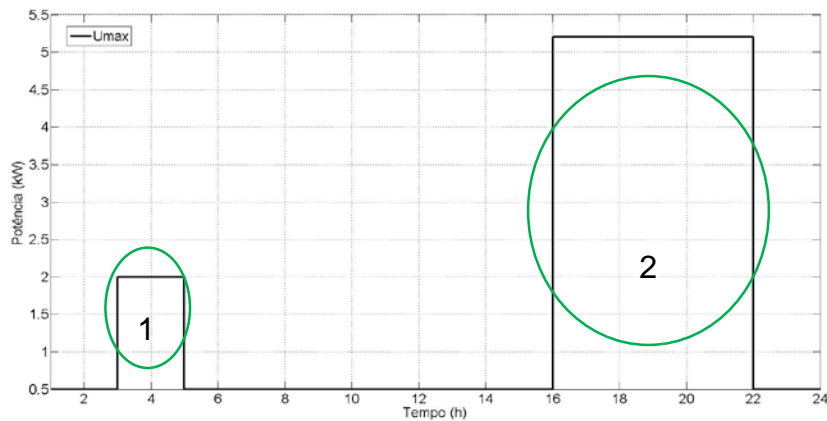


Figura 11 - Recurso de potência para a validação do algoritmo de alocação de cargas

Este recurso na Figura 11 garante que as cargas indicadas acima têm alocação possível nas horas indicadas e assinadas por 1 e 2.

As perturbações e perfis de consumo dos utilizadores são os mesmos que foram utilizados no ponto anterior, Figura 4, Figura 5 e Tabela 3.

- Resultados:

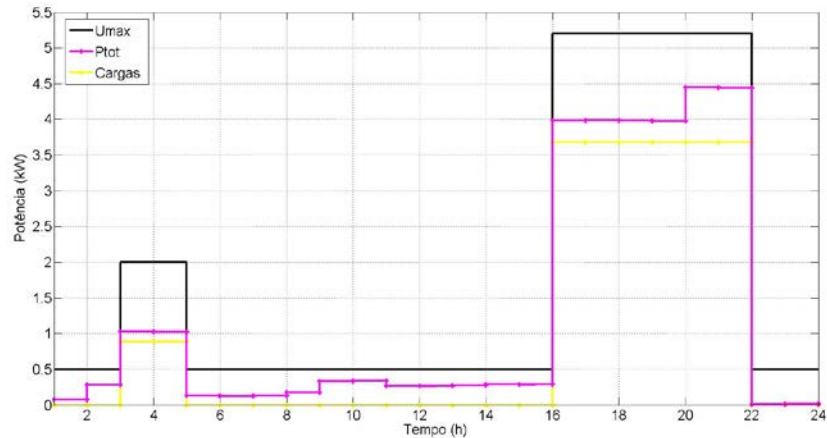


Figura 12 - Potência de total, cargas e recurso limitado

Na Figura 12 observa-se que o algoritmo comportou-se correctamente e alocou/encaixou as cargas no local em que havia recurso disponível, validando assim o mesmo.

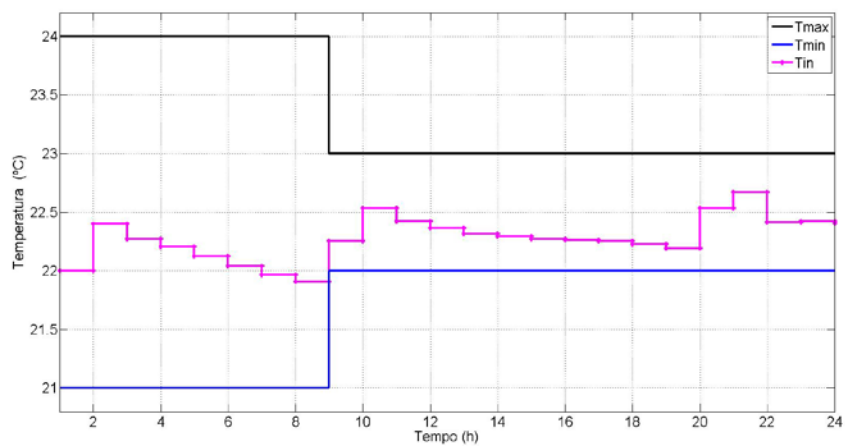


Figura 13 – Resultado da evolução da temperatura interior

3.1.3 Validação da partilha de recursos de uma habitação para a outra;

Com um dos objectivos centrado na partilha de um recurso renovável entre várias habitações de um condomínio, pretende-se que após uma habitação beneficiar do recurso, disponibilize o excedente do recurso para outra.

Ao considerar a simulação do tópico anterior, a Figura 12 será correspondente à primeira habitação a aceder ao recurso.

- Resultado:

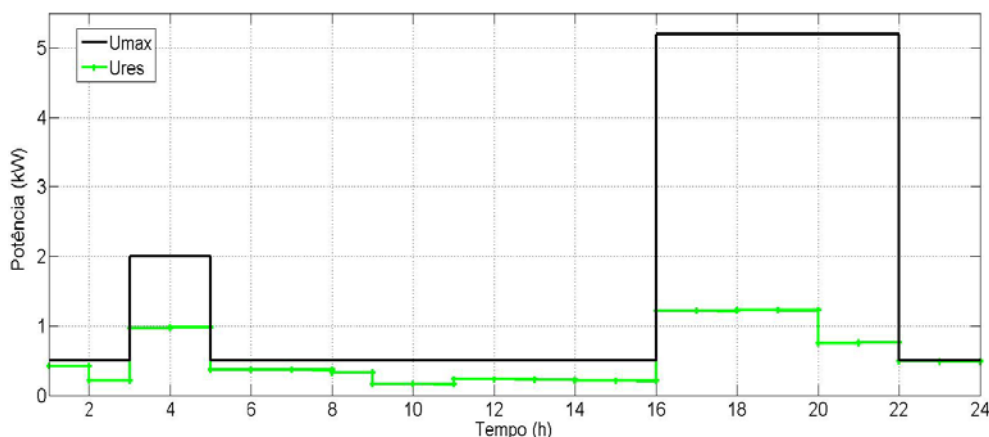


Figura 14 - Resultado da partilha de recursos

Na Figura 14, ilustrado a preto encontra-se o recurso inicial a ser utilizado pela primeira habitação e a verde encontra-se o recurso disponível para a segunda habitação que resulta da diferença entre o recurso inicial e a potência total consumida (climatização e cargas).

3.2 Simulações

No caso em que o utilizador não indica a hora de início, é pretendido observar a forma como o controlador reage com os horizontes preditivos de 1,12 e 24.

Para todas as simulações que se seguem, salvo indicação do contrário, os seguintes factores são comuns a todas:

- Perturbações externas:

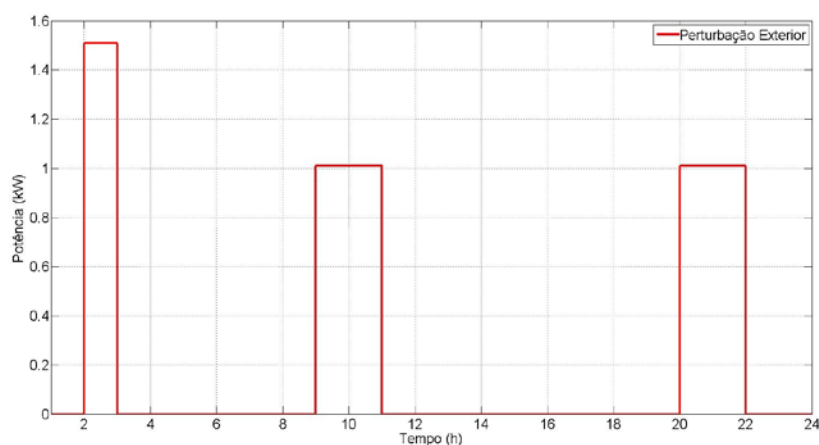


Figura 15 - Evolução das perturbações externas durante 24 horas

- Temperatura exterior:

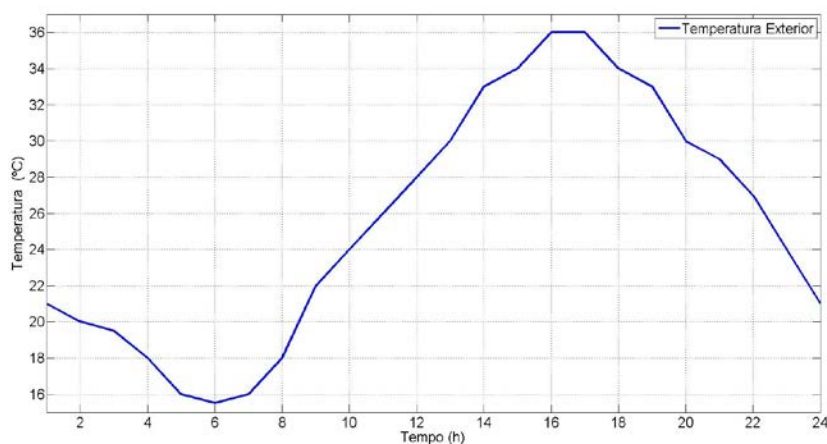


Figura 16 - Evolução da temperatura no exterior durante 24 horas

- Restrição de temperatura:

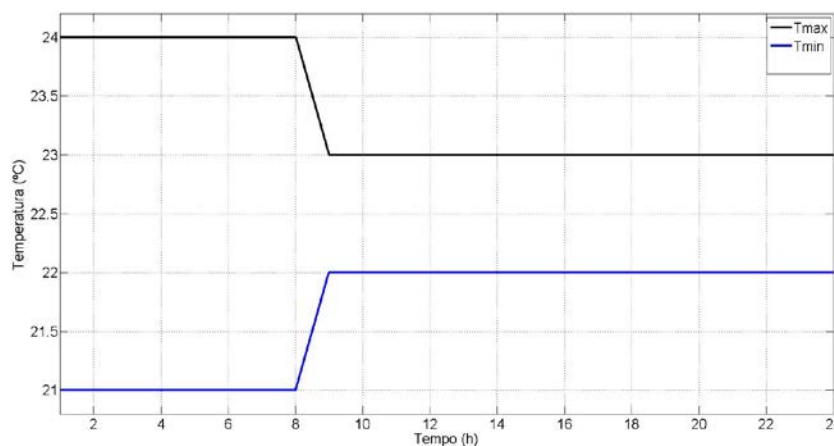


Figura 17 - Restrição/Zona de conforto térmico

3.2.1 Cargas eléctricas utilizadas

Define-se como uma carga eléctrica um equipamento que consome um determinado nível de energia durante um intervalo de tempo. Para as simulações foram escolhidos a título de exemplo, cinco tipos de cargas em função de utilizações comuns e que possa ter uma hora de funcionamento mais flexível:

- Bateria *i MiEV*:

O carregamento regular do *i MiEV*, um dos primeiros dos veículos eléctricos comercializados na Europa, se o utilizador pretender um carregamento completo, este tem a duração de 6 horas, a uma potência de 3,68kW;

- Máquina de lavar roupa:

Uma máquina de lavar roupa Samsung com classe de eficiência energética A+++. Dependendo do programa de lavagem, poderá ter diferentes períodos de funcionamento, a uma potência de 0,886kW.

- Máquina de secar roupa:

Uma máquina de secar roupa Siemens com classe de eficiência energética A++ [19], com duração definida pelo utilizador, dependendo do programa, a uma potência de 1,4kW.

- Ferro engomar:

Um ferro de engomar Siemens [20], com a duração a ser definida em cada caso. A potência é de 3,3kW.

- Aspirador:

Um aspirador Siemens Eco+ [21], com a duração a ser definida em cada caso. A potência é de 1,8kW.

De forma a traçar os perfis de consumo dos utilizadores distintos foi dada maior ou menor importância às penalizações de picos de consumo de potência (k), violação da zona de conforto térmico (ρ) e à violação das restrições de potência (ψ). Para a primeira habitação foi traçado um perfil de consumidor regular/*standard*, com os parâmetros apresentados na Tabela 4 e Tabela 5.

ρ	ψ	k	$T_{\text{inicial interior}}$ (°C)
500	100	2	22

Tabela 4 – Parâmetros MPC para a habitação 1

Ordem de acesso (<i>i</i>)	Carga (<i>C_i</i>)	Duração (<i>d_i</i>) (<i>h</i>)	Amplitude (<i>a_i</i>) (<i>kW</i>)
1	Máquina de lavar roupa	2	0,886
2	Ferro de engomar	2	3,300
3	Aspirador	1	1,800

Tabela 5– Descrição das cargas para a habitação 1 - Simulação sem preferência utilizador

A segunda habitação tem um perfil de consumidor mais económico em termos energéticos. Os valores escolhidos para os parâmetros (Tabela 6 e Tabela 7) têm como objectivo obter menores consumos, menos picos de potência deixando o conforto térmico para segundo plano.

ρ	ψ	<i>k</i>	<i>T</i> _{inicial interior} (°C)
1	1000	200	22

Tabela 6 - Parâmetros MPC para a habitação 2

Ordem de acesso (<i>i</i>)	Carga (<i>C_i</i>)	Duração (<i>d_i</i>) (<i>h</i>)	Amplitude (<i>a_i</i>) (<i>kW</i>)
1	Carregamento 50% do carro eléctrico	3	0,886
2	Aspirador	1	1,800

Tabela 7– Descrição das cargas para a habitação 2 - Simulação sem preferência utilizador

O perfil de consumo da terceira habitação é simétrico ao escolhido para a segunda habitação. Neste perfil (Tabela 8 e Tabela 11) o utilizador dá mais importância ao conforto térmico e penaliza menos o consumo de energia.

ρ	ψ	k	$T_{\text{inicial interior}}$ (°C)
500000000	1	0,01	22

Tabela 8 - Parametros MPC para a habitação 3

Ordem de acesso (i)	Carga (C_i)	Duração (d_i) (h)	Amplitude (a_i) (kW)
1	Carregamento completo do carro eléctrico	6	3,680
2	Máquina de secar roupa	3	1,400
3	Máquina de lavar roupa	2	0,886

Tabela 9 – Descrição das cargas para a habitação 3 - Simulação sem preferência utilizador

3.2.2 Recurso inicial utilizado

A energia elétrica produzida pelo parque de energia renovável, que constitui o recurso inicial, será uma combinação de recursos provenientes de energias renováveis. A energia solar apresenta um peso mais significativo pois é, em Portugal, a que se apresenta mais acessível aos consumidores por parte das empresas especialistas no ramo.

Para este trabalho, utilizou-se como exemplo uma solução de microgeração da EDP de 10kW [22], tendo em consideração esta solução juntamente com um diagrama de irradiação solar diário e a compensação de outros recursos para as horas de pouca radiação solar, considerou-se o seguinte recurso com um pico máximo de 10kW:

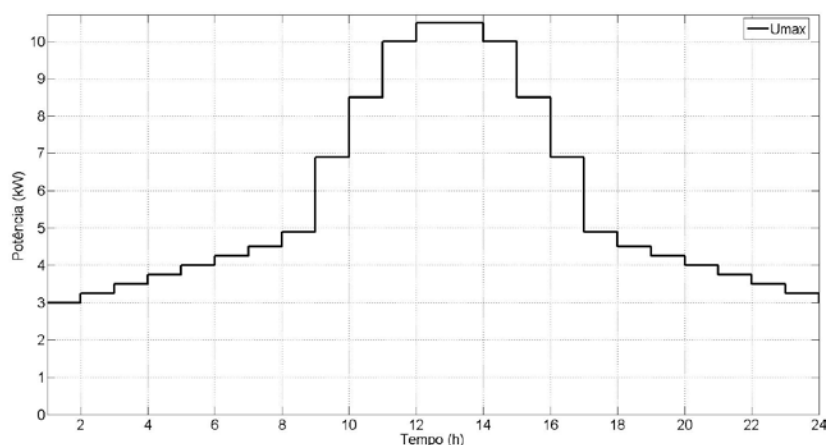


Figura 18 – Recurso renovável inicial limitado

As simulações dividem-se em duas partes. Uma em que o algoritmo escolhe por si a melhor hora de um horizonte de 24 horas para a carga funcionar. Nesta irá também observar-se a importância do horizonte preditivo (N). Na outra, o algoritmo escolhe a melhor hora de um conjunto de horas indicado por um utilizador.

3.2.3 Simulação sem preferência do utilizador N=1

Neste tópico procede-se as simulações para todas as habitações em que o utilizador não interage com a alocação das cargas, o horizonte preditivo é 1 hora.

- Habituação 1:

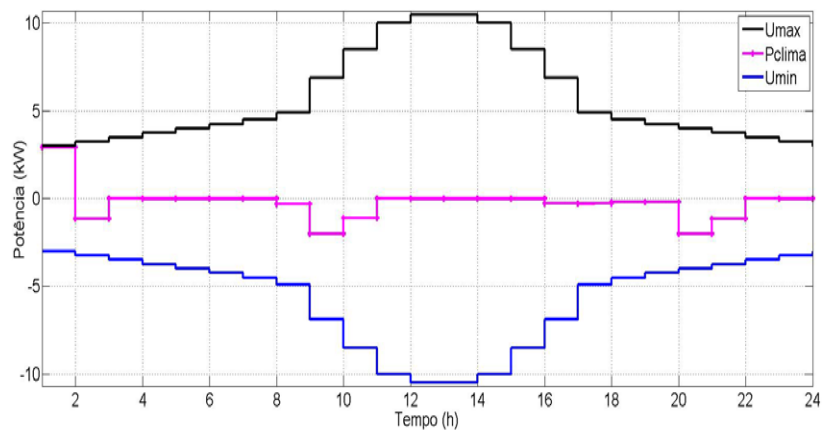


Figura 19 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

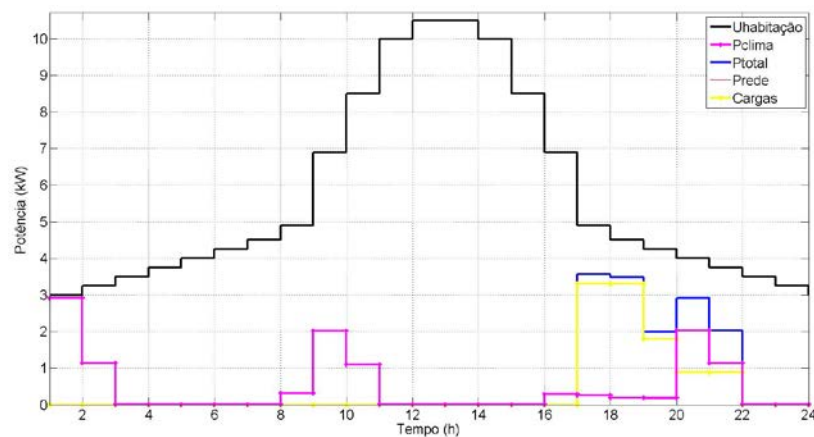


Figura 20 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

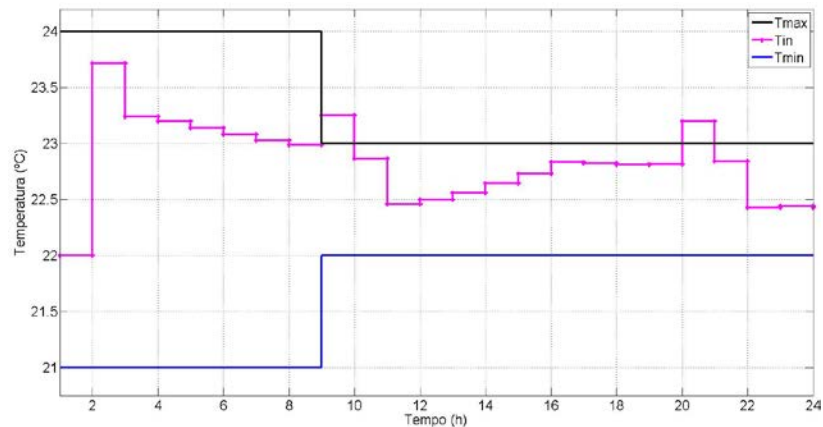


Figura 21- Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

É observado que na habitação 1 a única restrição violada é a temperatura, pelas 9 horas e pelas 20 horas. Estes instantes coincidem com o início de funcionamento das cargas, com a particularidade de no último instante ser antecedido de uma perturbação térmica externa de 1,01kW

- Habitação 2

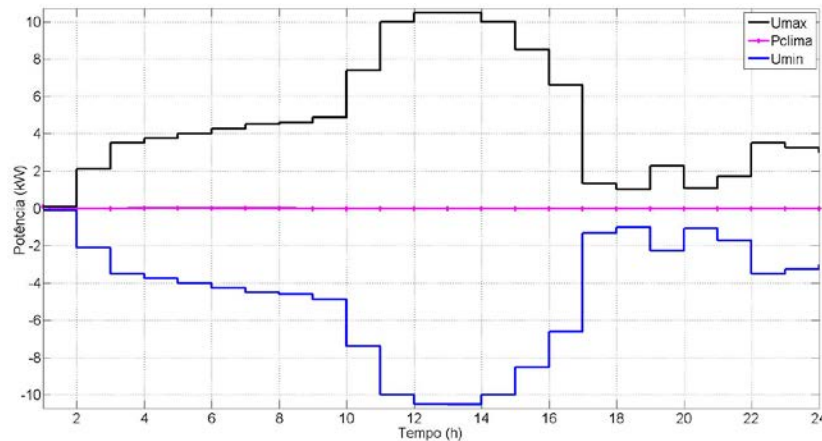


Figura 22 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

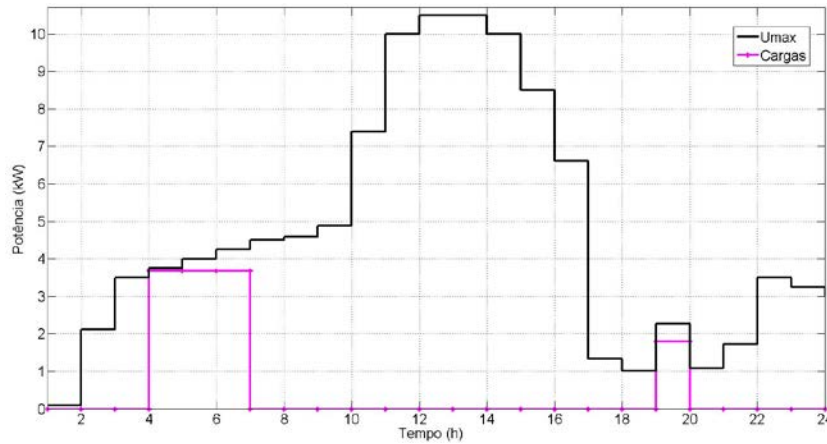


Figura 23 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

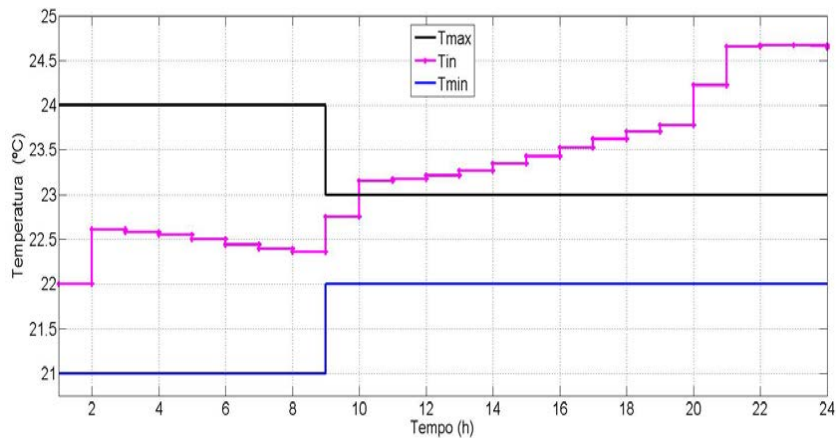


Figura 24 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

Na habitação 2 a restrição da temperatura é violada sendo a potência utilizada para a climatização foi diminuta. Às 9 horas, após a primeira carga entrar em funcionamento e haver uma perturbação térmica externa de 1,01kW, a temperatura interna ultrapassa os limites de conforto. Tal deve-se aos parâmetros escolhidos para o perfil de consumidor, sendo o economicista é mais compensador estar fora dos limites de conforto do que consumir energia para manter a temperatura na região escolhida.

- Habituação 3:

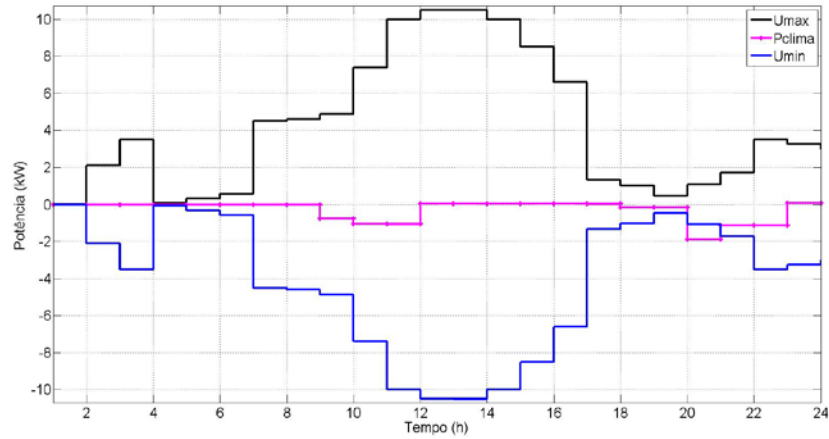


Figura 25 – Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

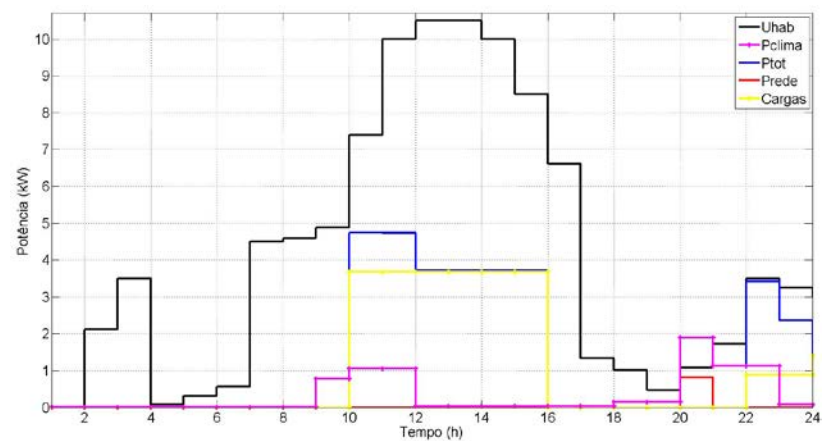


Figura 26 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=1)

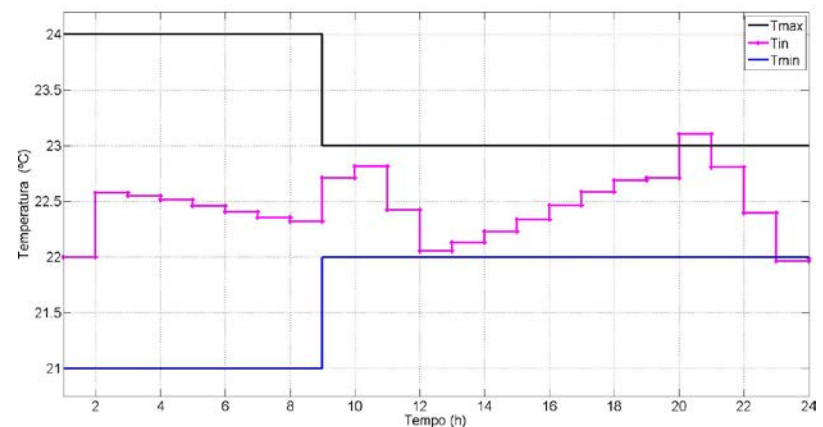


Figura 27 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (N=1)

Neste caso existe violação de duas restrições, da temperatura e do recurso renovável. Ambas ocorrem quando existe a perturbação térmica externa de 1,01kW às 20 horas. Apesar do perfil de consumidor privilegiar a temperatura nos limites independentemente da energia, existiu uma pequena violação de temperatura.

- Resumo

As seguintes figuras mostram a evolução das três habitações em conjunto, para o recurso, potência consumida à rede, potência consumida para climatização e a evolução da temperatura.

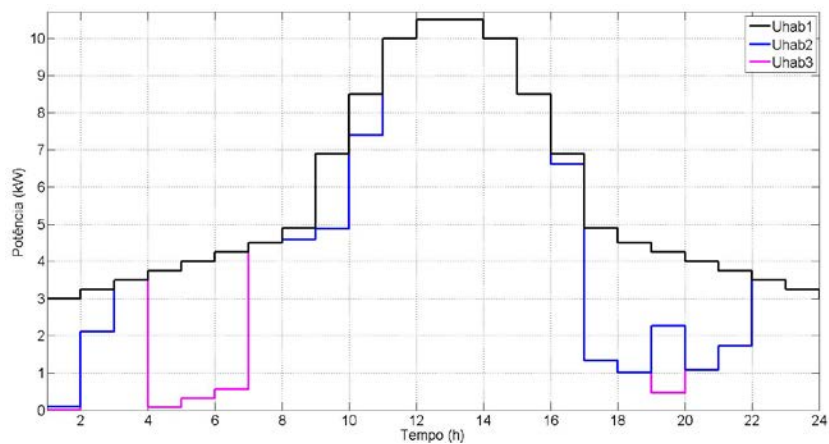


Figura 28 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=1)

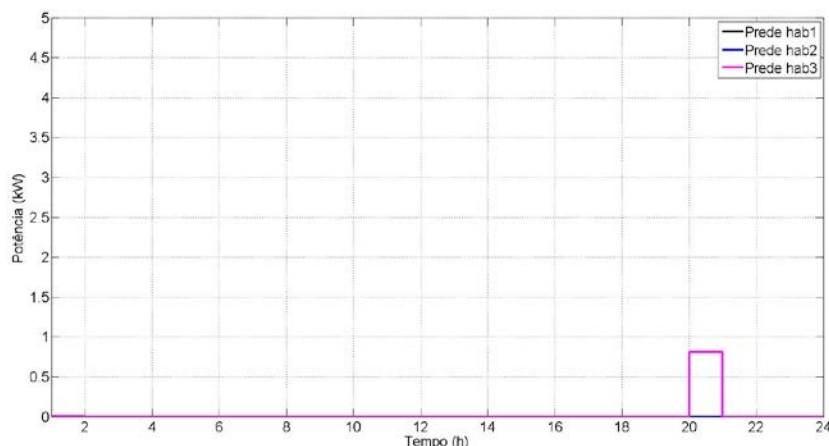


Figura 29 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1)

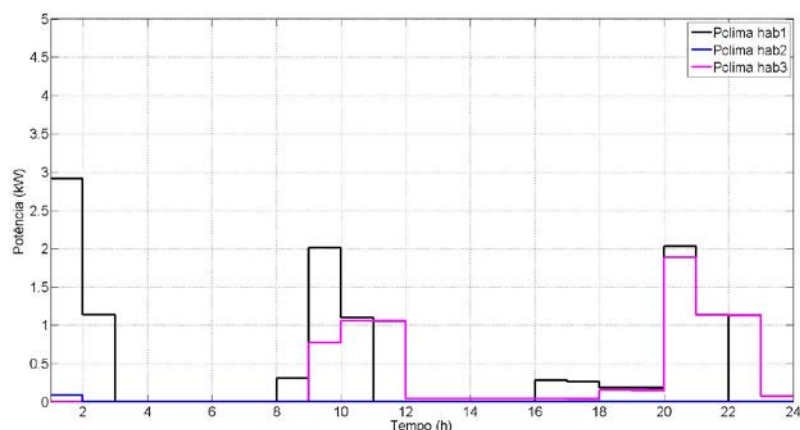


Figura 30 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1)

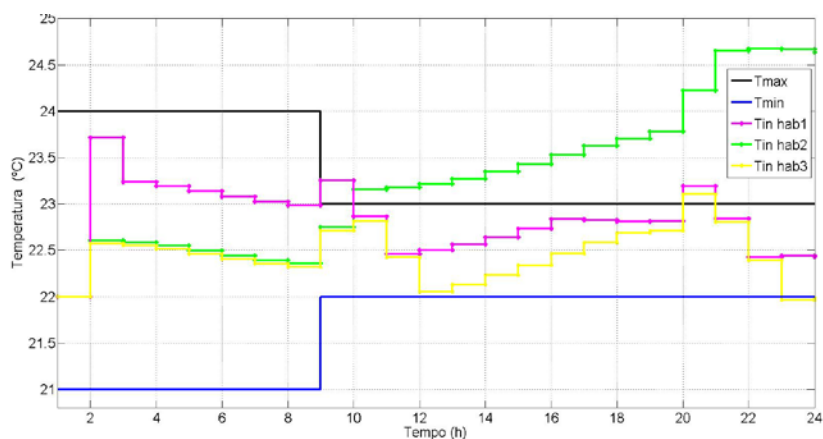


Figura 31 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=1)

	Custo da energia consumida do recurso	Custo da energia consumida da rede
Habitação 1	2,17 €	0,00 €
Habitação 2	1,29 €	0,00 €
Habitação 3	3,50 €	0,12 €
Subtotal Condomínio	6,97 €	0,12 €
Total Condomínio		7,09 €

Tabela 10 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=1)

	Potência Climatização (kW)	Potência Total (kW)	Carga 1 hh:mm	Carga 2 hh:mm	Carga 3 hh:mm
Habituação 1	11,5676	21,7396	15:00- 16:00	3:00-4:00	19:00
Habituação 2	0,0905	12,9305	8:00- 10:00	21:00	-
Habituação 3	7,6602	35,7122	12:00- 17:00	22:00- 24:00	17:00- 18:00
Condomínio	19,3183	70,3823	-	-	-

Tabela 11 – Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=1)

Nesta simulação com o horizonte de predição a 1, ou seja, o algoritmo só consegue antecipar em uma hora, observou-se que houve violações nas restrições de temperatura em todos os casos, muito devido ao horizonte. Os consumos de energia coincidem com os perfis de consumidores escolhidos.

Apenas na terceira habitação houve necessidade de recorrer à energia da rede.

Em termos de custo o preço que o condomínio pagaria seria 7,09€, sendo que 0,12€ foi energia consumida da rede. Num cenário linear de 1 mês de 31 dias, o preço seria $7,09\text{€} \times 31 = 219,79\text{€}$, sendo que 3,80€ seriam pagos à distribuidora eléctrica.

3.2.4 Simulação sem preferência do utilizador N=12

Neste tópico procede-se as simulações para todas as habitações em que o utilizador não interage com a alocação das cargas, o horizonte preditivo é 12 horas.

- Habitação 1

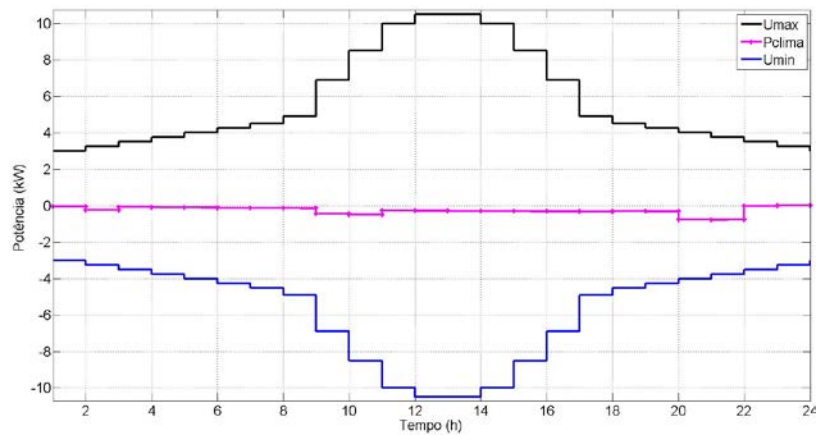


Figura 32 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

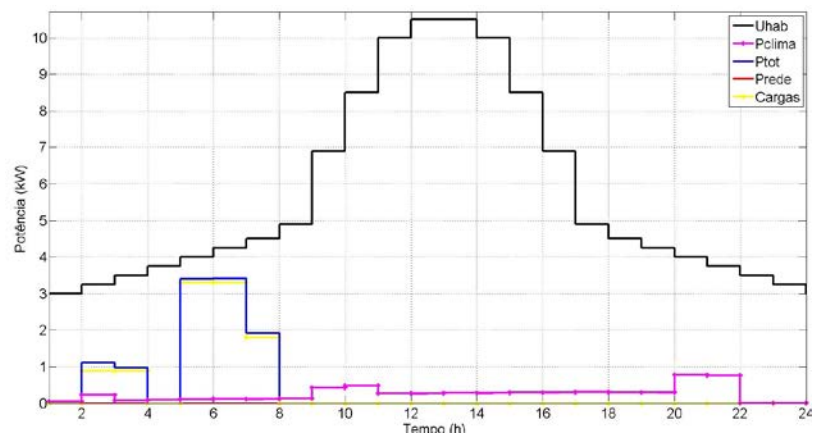


Figura 33 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 Simulação sem preferência utilizador N=12)

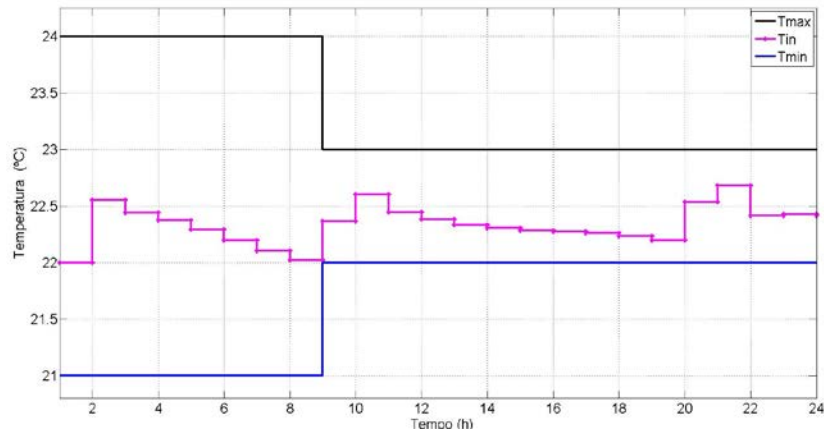


Figura 34 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

Na primeira habitação não houve violação de nenhuma restrição devido ao aumento do horizonte de predição, assim o MPC “arrefeceu” os espaços para acomodar as perturbações previstas.

- Habitação 2

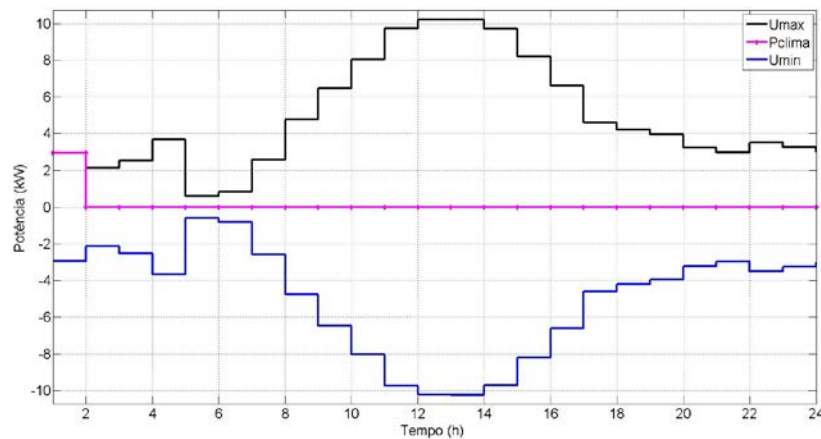


Figura 35 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 Simulação sem preferência utilizador (N=12)

Na habitação 2 há um pico de potência de climatização logo na primeira hora devido à perturbação externa de 1,51kW.

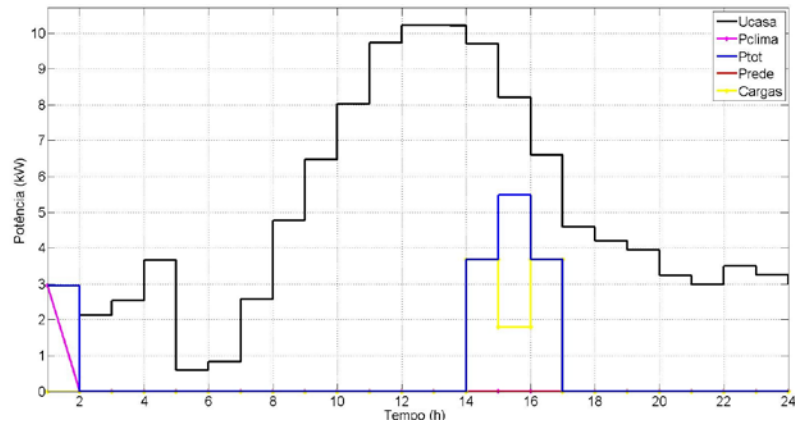


Figura 36 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

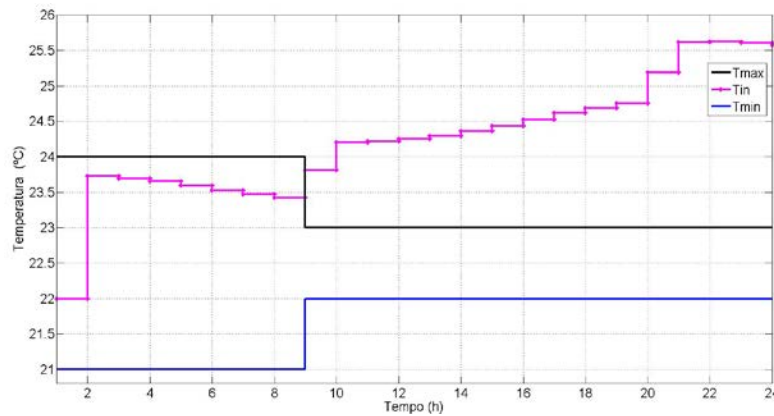


Figura 37 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

A temperatura sai dos limites estipulados, porém, vai de encontro ao perfil de consumo do utilizador.

- Habituação 3:

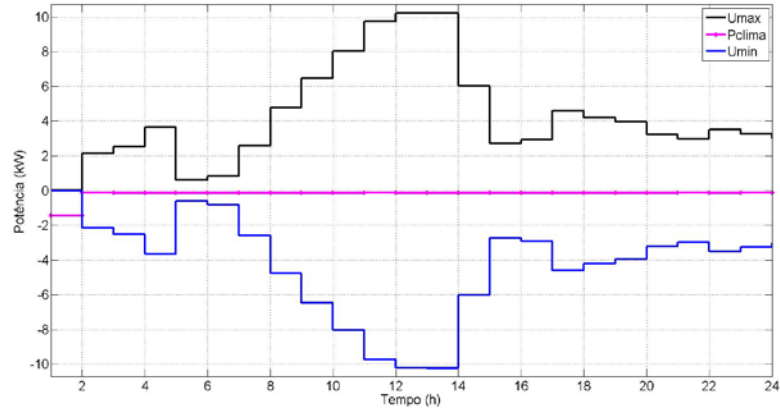


Figura 38 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

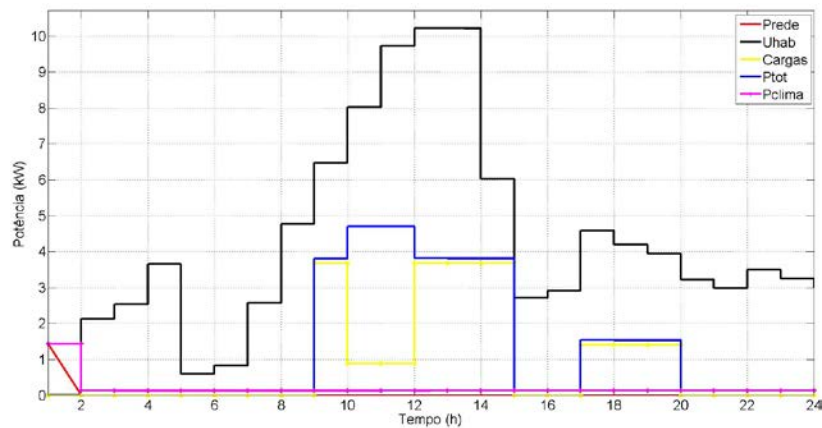


Figura 39 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

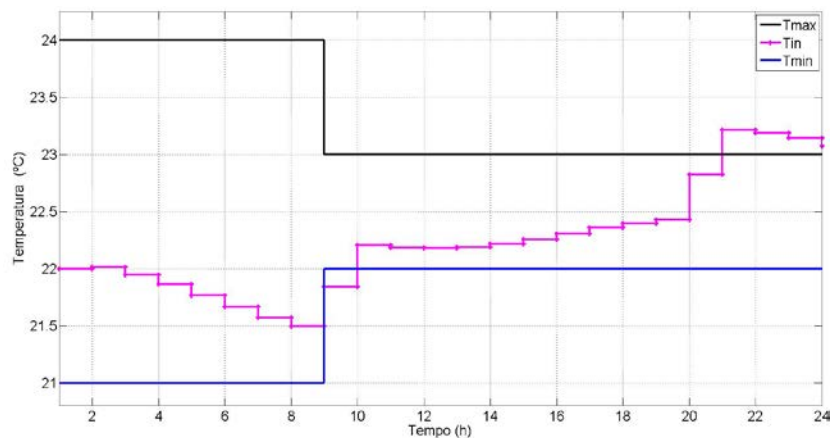


Figura 40 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=12)

A influência das perturbações térmicas externas de 1,01kW coincide com os momentos em que a temperatura sai dos limites, 9 horas e 20 horas. Também é assinalável o facto de pelas 9 horas uma carga entrar em funcionamento e a perturbação térmica externa às 20 horas é antecedida do funcionamento de uma carga.

- Resumo:

As seguintes figuras mostram a evolução das três habitações em conjunto, para o recurso, potência consumida à rede, potência consumida para climatização e a evolução da temperatura.

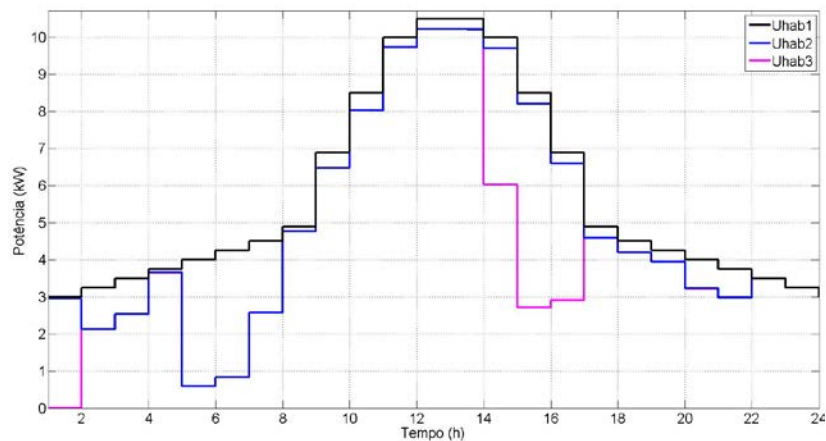


Figura 41 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=12)

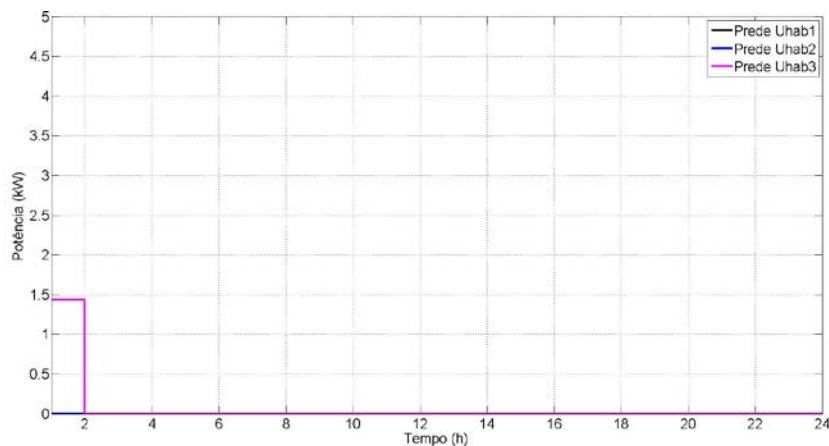


Figura 42 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12)

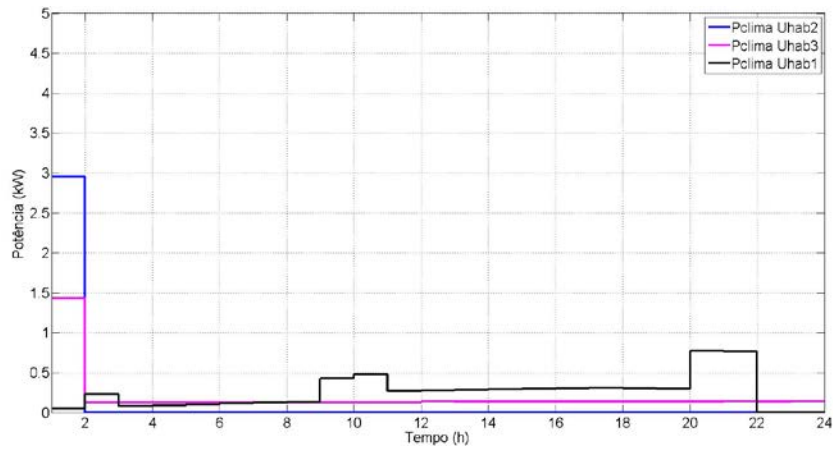


Figura 43 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12)

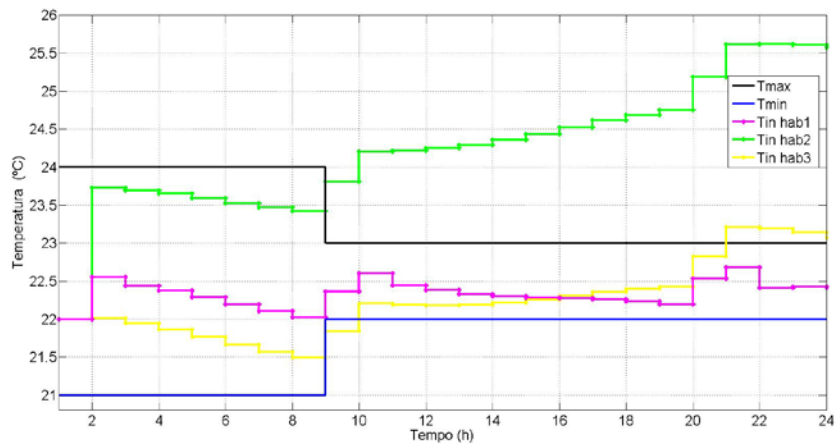


Figura 44 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=12)

	Custo da energia consumida do recurso	Custo da energia consumida da rede
Habituação 1	1,62 €	0,00 €
Habituação 2	1,58 €	0,00 €
Habituação 3	3,11 €	0,22 €
Subtotal Condomínio	6,31 €	0,22 €
Total Condomínio		6,53 €

Tabela 12 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=12)

	Potência Climatização (kW)	Potência Total (kW)	Carga 1 hh:mm	Carga 2 hh:mm	Carga 3 hh:mm
Habituação 1	6,0114	16,1834	2:00-3:00	5:00-6:00	07:00
Habituação 2	2,9746	15,8146	14:00- 16:00	15:00	-
Habituação 3	4,5259	32,5779	9:00- 14:00	17:00- 19:00	10:00- 11:00
Condomínio	13,5119	64,5759	-	-	-

Tabela 13 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=12)

Com o horizonte de predição a 12 observou-se um progresso nos resultados de temperatura relativamente à simulação com horizonte de predição a 1.

Relativamente à potência de climatização os resultados degradam-se na habitação 2 devido ao pico inicial da perturbação térmica externa. Os resultados progrediram na habitação 1 e 3.

Nenhum funcionamento de cargas com o horizonte de predição a 12 coincide com o de 1. Os consumos de energia coincidem com os perfis de consumidor. Apenas na terceira habitação houve necessidade de recorrer à energia da rede.

Em termos de custo o preço que o condomínio pagaria seria 6,53€, sendo que 0,22€ foi energia consumida da rede. Num cenário linear de 1 mês de 31 dias, o preço seria $6,53\text{€} \times 31 = 202,45\text{€}$, sendo que 6,71€ seriam pagos à distribuidora eléctrica. Apesar de consumir mais energia da rede que a estratégia anterior, num mês conseguir-se-ia poupar $219,75 - 202,45 = 17,33\text{€}$.

3.2.5 Simulação sem preferência do utilizador N=24

Neste tópico procede-se às simulações para todas as habitações em que o utilizador não interage com a alocação das cargas, o horizonte preditivo é 24 horas.

- Habituação 1:

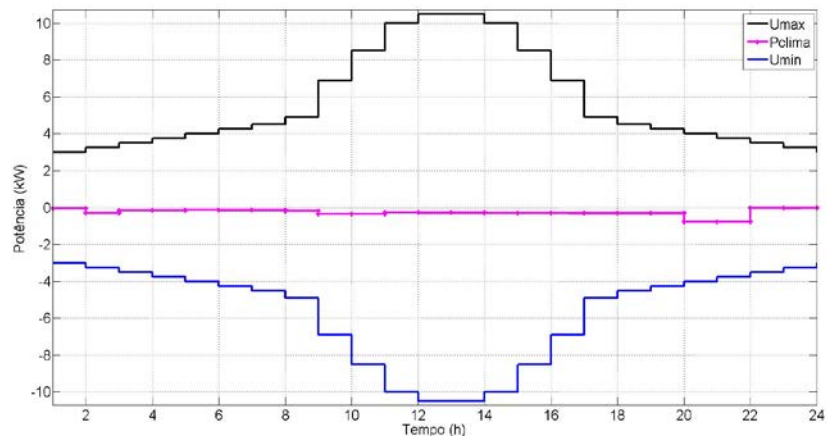


Figura 45 Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

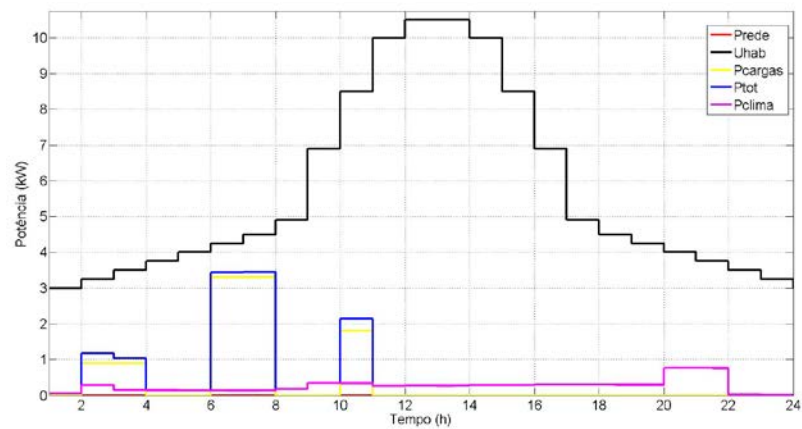


Figura 46 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

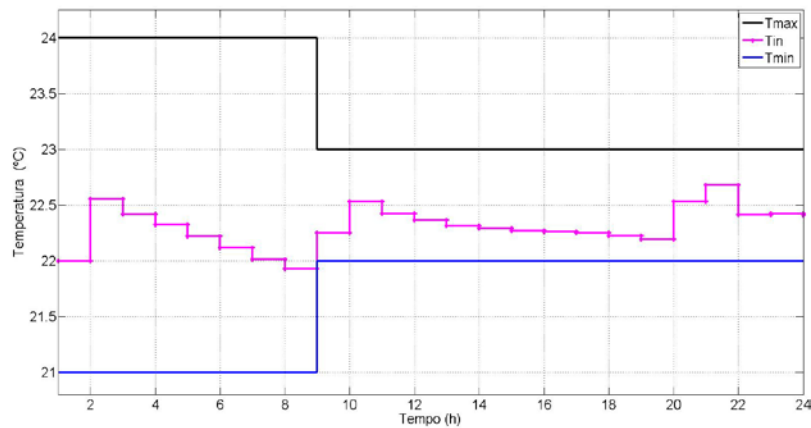


Figura 47 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 1 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

Na primeira habitação não houve violação de nenhuma restrição.

- Habitação 2:

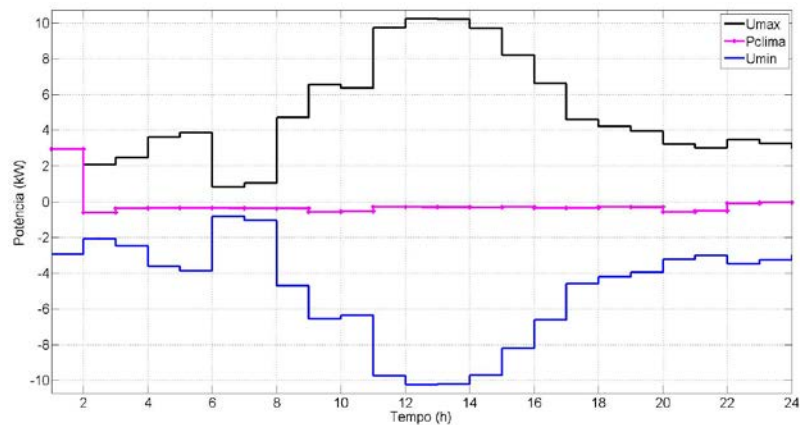


Figura 48 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

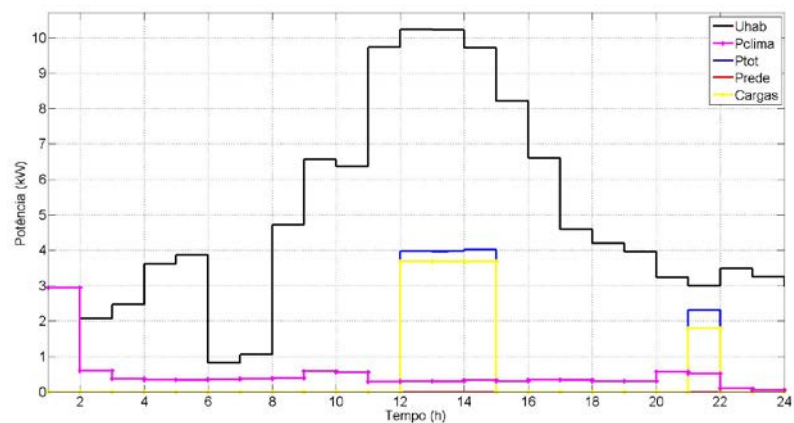


Figura 49 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

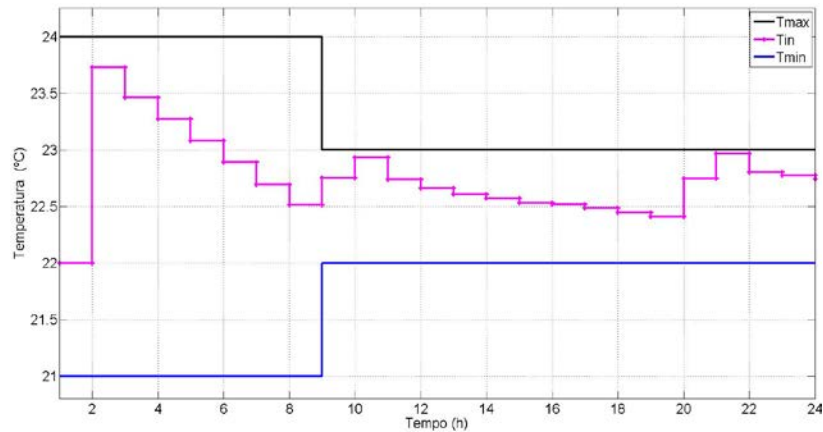


Figura 50 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

Na segunda habitação não houve violação de nenhuma restrição.

- Habitação 3:

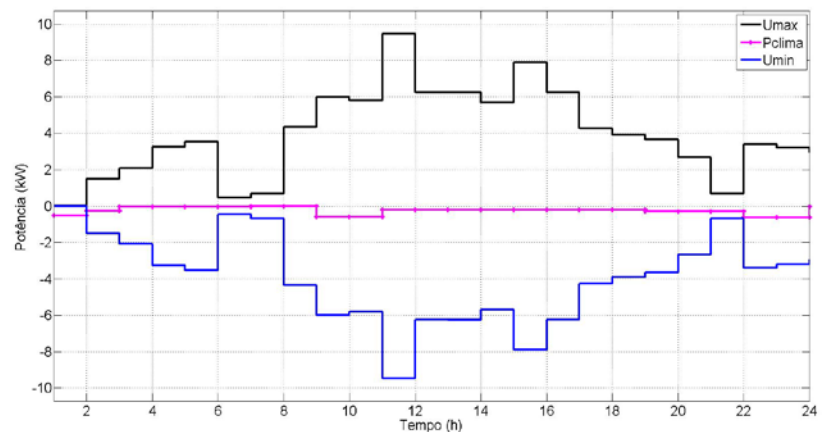


Figura 51 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

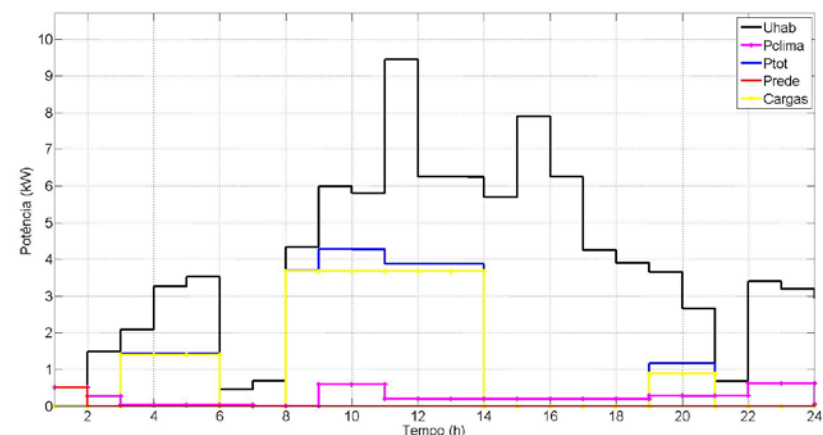


Figura 52 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

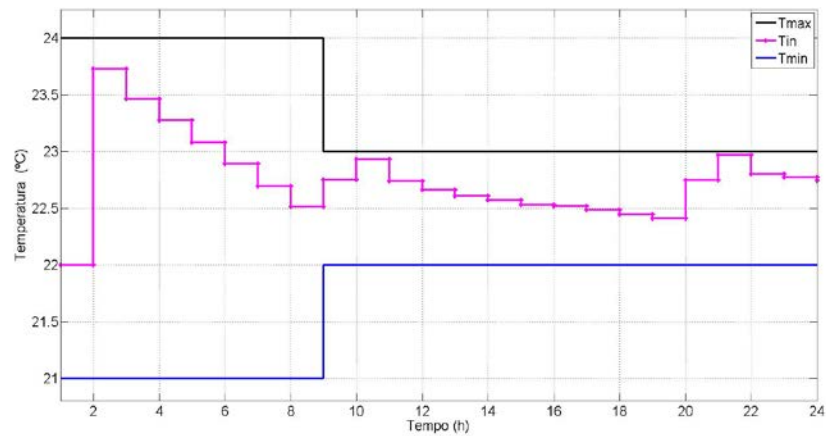


Figura 53 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação sem preferência utilizador N=24)

Na terceira habitação é utilizada energia da rede e a temperatura excede os limites, porém em momentos diferentes. O consumo à rede é à primeira hora é devido à perturbação térmica externa e ao facto de recurso renovável já ser diminuto. A temperatura é afectada às 21 horas por um conjunto de perturbações, uma carga das 19 horas, às 20 horas e pela perturbação térmica externa às 20 horas com a duração de 2 horas.

- Resumo:

As seguintes figuras mostram a evolução das três habitações em conjunto, para o recurso, potência consumida à rede, potência consumida para climatização e a evolução da temperatura.

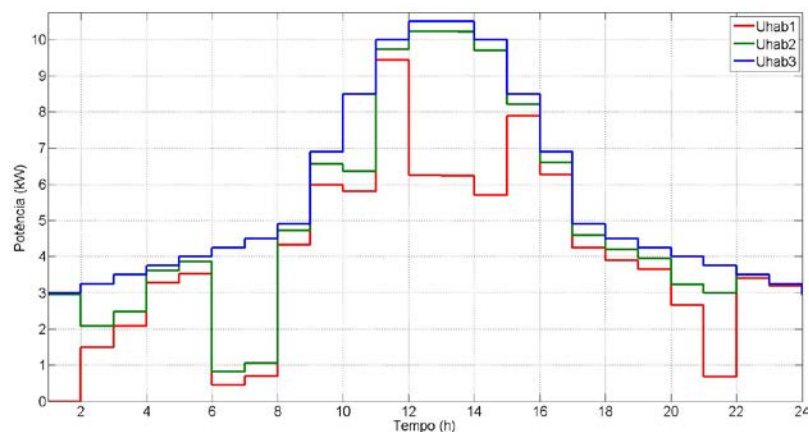


Figura 54 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação sem preferência utilizador N=24)

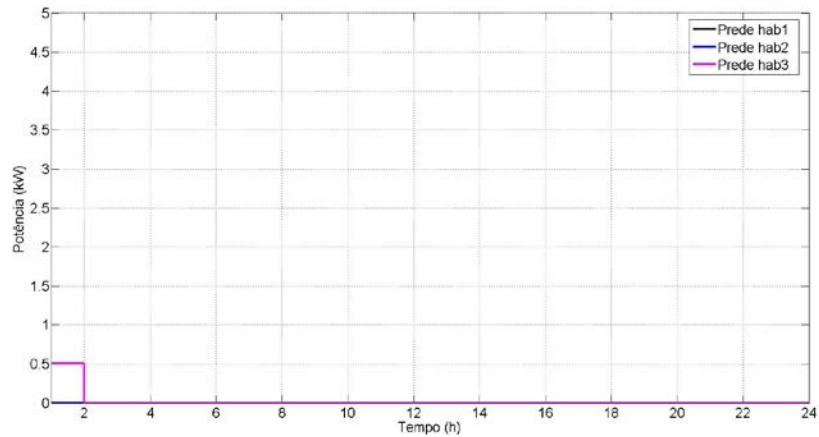


Figura 55 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24)

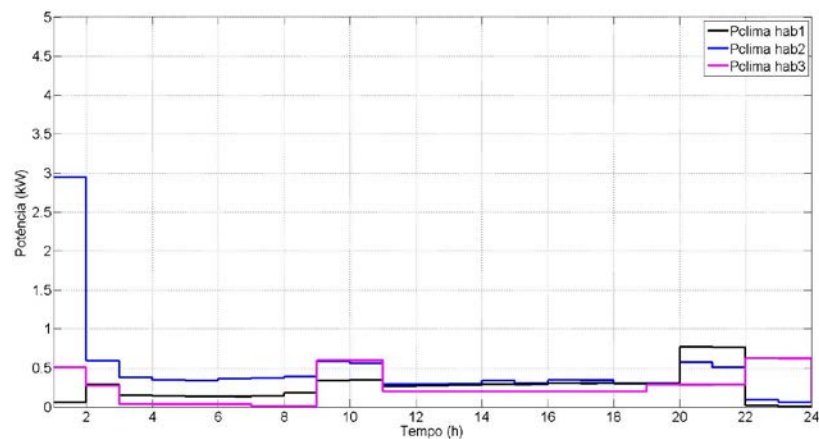


Figura 56 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24)

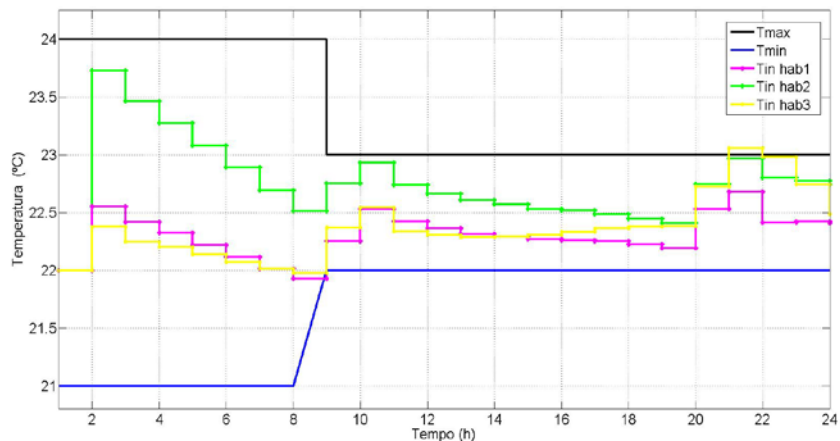


Figura 57 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio (Simulação sem preferência utilizador N=24)

	Custo da energia consumida do recurso	Custo da energia consumida da rede
Habituação 1	1,62 €	0,00 €
Habituação 2	2,38 €	0,00 €
Habituação 3	3,34 €	0,08 €
Subtotal Condomínio	7,34 €	0,08 €
Total Condomínio	7,42 €	

Tabela 14 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação sem preferência utilizador N=24)

	Potência Climatização (kW)	Potência Total (kW)	Carga 1 hh:mm	Carga 2 hh:mm	Carga 3 hh:mm
Habituação 1	6,0598	16,2302	2:00-3:00	6:00-7:00	10:00
Habituação 2	10,9207	23,7607	12:00-14:00	21:00	
Habituação 3	5,8613	33,9133	8:00-13:00	3:00-5:00	19:00 - 20:00
Condomínio	22,8418	73,9042			

Tabela 15 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação sem preferência utilizador N=24)

Esta simulação apresenta os melhores resultados em termos de controlo de temperatura e os piores no consumo energético.

Em termos de potência de climatização gastou cerca de 40% de energia a mais do que a simulação com um horizonte de predição a 12 horas. Todavia, foi a que provocou menos consumo de energia da rede.

O controlo de temperatura interna permitiu manter este sempre dentro dos limites seleccionados.

Em termos de custo o preço que o condomínio pagaria seria 7,42€, sendo que 0,08€ foi energia consumida da rede. Num cenário linear de 1 mês de 31 dias, o preço seria $7,42\text{€} \times 31 = 229,90\text{€}$, sendo que 2,37€ seriam pagos à distribuidora eléctrica. Apesar de consumir mais energia do recurso que a estratégia anterior, foi o que interagiu menos com a distribuidora eléctrica.

O conforto térmico foi atingido essencialmente ao custo do recurso de energia renovável, obtendo-se um dos objectivos pretendidos, maximizar o consumo das energias renováveis e minimizar o consumo da rede.

3.2.6 Simulação com preferência do utilizador N=24

Este algoritmo, conforme explicado em 2.3.2, tem a particularidade de possibilitar ao utilizador indicar uma hora de sua preferência para iniciar o seu funcionamento e uma respectiva variação de horário. A variação diz respeito ao número de horas antes e depois da hora indicada.

Para as cargas foi definida uma hora de início que se revele bastante comum dentro das utilizações diárias do consumidor. A variação depende conforme a opção do utilizador. Tarefas de lavandaria como lavar a roupa e secar, foram consideradas serem efectuadas depois das 17 horas, enquanto o carregamento do carro eléctrico poderá acontecer durante a noite de modo a estar carregado antes de o utilizador sair de manhã.

Carga (C_i)	Duração (d_i) (h)	Amplitude (a_i) (kW)	Hora de preferência (t_i) (h)	Varição (o_i) (h)
Máquina de lavar roupa	2	0,886	19	1
Ferro de engomar	2	3,300	21	0
Aspirador	1	1,800	10	3

Tabela 16 - – Descrição das cargas para a habitação 1 - Simulação com preferência utilizador

Carga (C_i)	Duração (d_i) (h)	Amplitude (a_i) (kW)	Hora de preferência (t_i) (h)	Varição (o_i) (h)
Carregamento 50% do carro eléctrico	3	3,680	4	3
Aspirador	1	1,800	20	2

Tabela 17 – Descrição das cargas para a habitação 2 - Simulação com preferência utilizador

Carga (C_i)	Duração (d_i) (h)	Amplitude (a_i) (kW)	Hora de preferência (t_i) (h)	Varição (o_i) (h)
Carregamento completo do carro eléctrico	6	3,680	2	1
Máquina de secar roupa	3	1,400	20	1
Máquina de lavar roupa	2	0,886	18	2

Tabela 18 – Descrição das cargas para a habitação 3 - Simulação com preferência utilizador

- Simulações:
- Habitação 1:

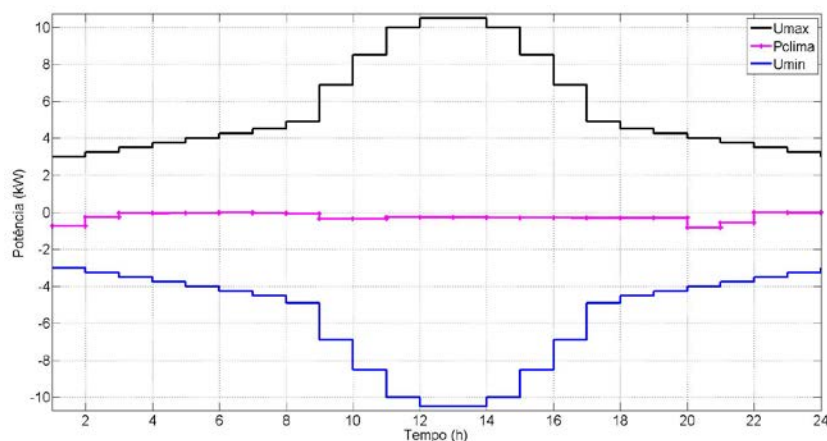


Figura 58 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação com preferência utilizador N=24)

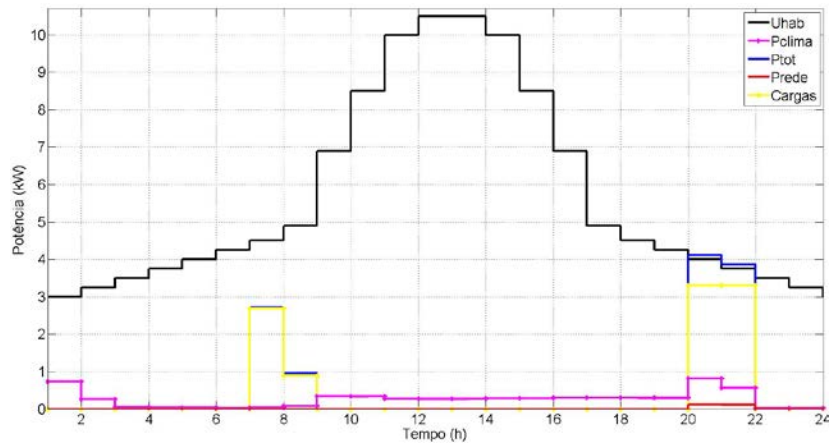


Figura 59 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 1 (Simulação com preferência utilizador N=24)

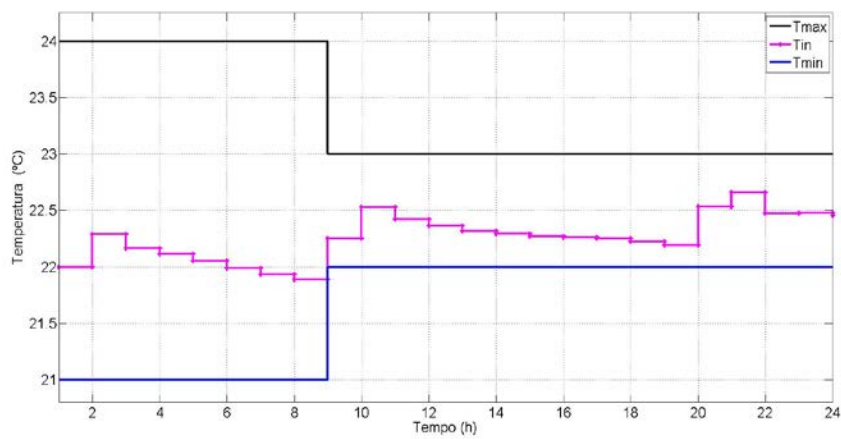


Figura 60 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24)

Na primeira habitação houve necessidade de recorrer à energia da rede. A temperatura manteve-se dentro dos limites estipulados.

- Habituação 2:

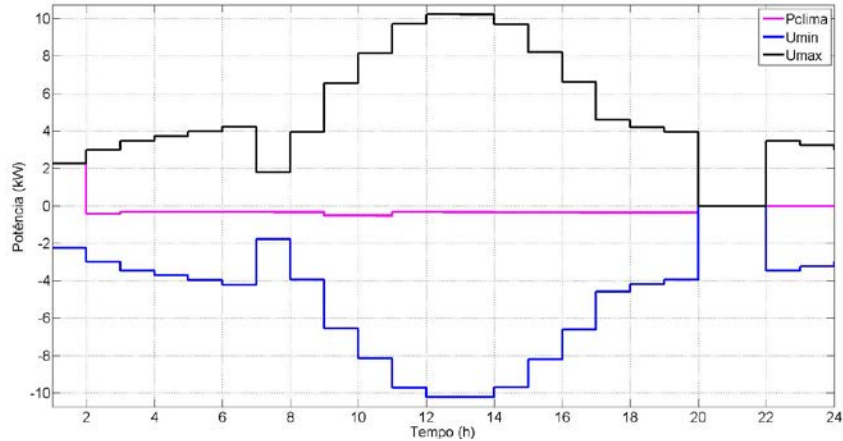


Figura 61 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24)

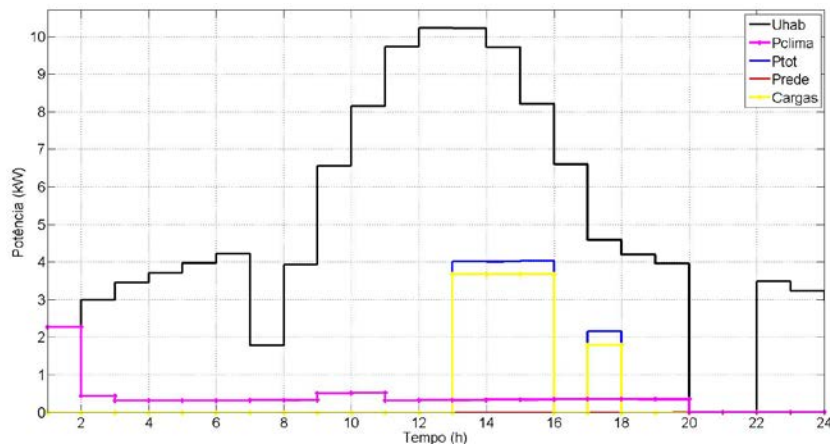


Figura 62 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24)

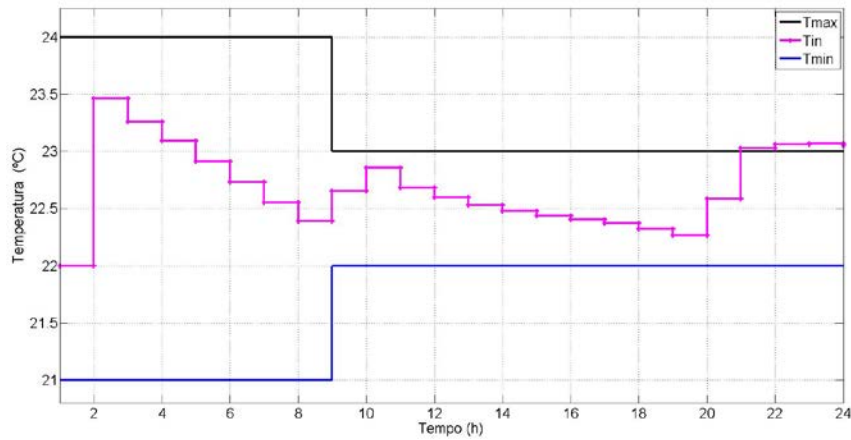


Figura 63 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 2 (Simulação com preferência utilizador N=24)

A temperatura excedeu os limites a partir das 21 horas (inclusive) devido à insistência de recurso e ao facto do consumidor apresentar um perfil conservativo em termos energéticos.

- Habitação 3:

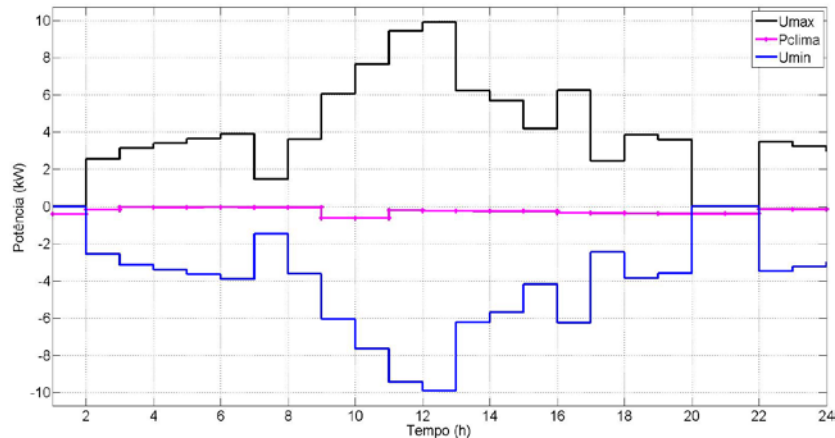


Figura 64 - Evolução da potência de climatização perante as restrições/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24)

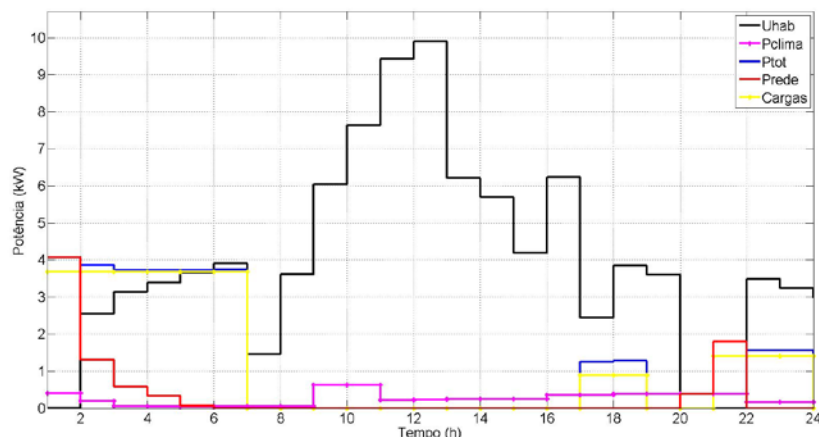


Figura 65 - Evolução da potência de climatização, potência total e cargas perante a restrição/Recurso limitado disponível para a habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24)

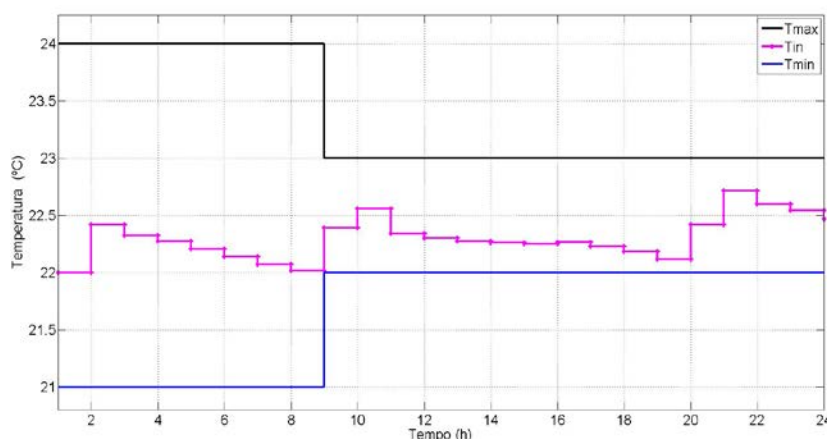


Figura 66 - Evolução da temperatura interior dentro das restrições na habitação 3 (Simulação com preferência utilizador N=24)

Na terceira habitação a temperatura não saiu da restrição imposta, contudo, das 20 às 21 horas a energia que está a ser consumida é da rede. Isto deve-se ao facto de não haver recurso renovável e estar perante uma perturbação térmica externa, ao evitar que a temperatura não ultrapassa-se os limites, foi gasta mais energia.

- Resumo:

As seguintes figuras mostram a evolução das três habitações em conjunto, para o recurso, potência consumida à rede, potência consumida para climatização e a evolução da temperatura.

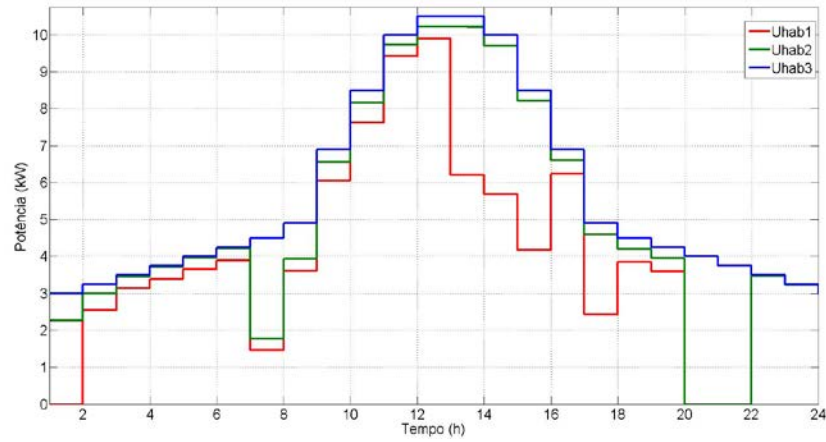


Figura 67 - Evolução das restrições/recurso limitado (Simulação com preferência utilizador N=24)

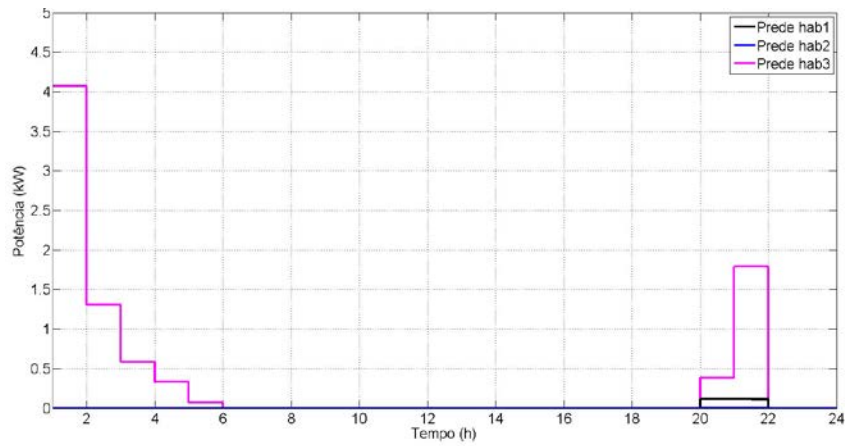


Figura 68 - Evolução da utilização da potência da rede no condomínio (Simulação com preferência utilizador N=24)

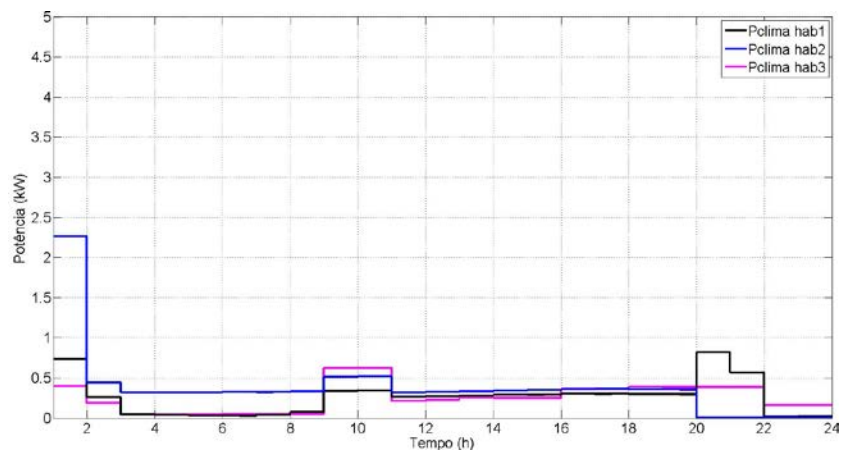


Figura 69 - Evolução da potência de climatização no condomínio (Simulação com preferência utilizador N=24)

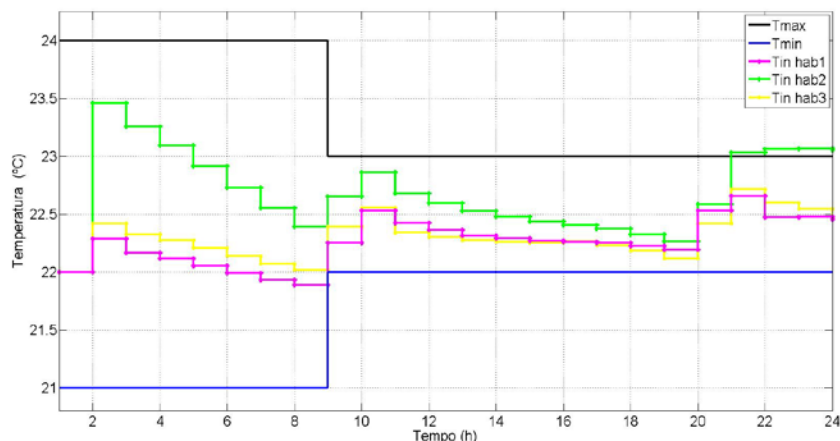


Figura 70 - Evolução das temperaturas interiores dentro das restrições no condomínio Simulação com preferência utilizador (N=24)

	Custo da energia consumida do recurso	Custo da energia consumida da rede
Habitação 1	1,59 €	0,04 €
Habitação 2	2,16 €	0,00 €
Habitação 3	2,56 €	1,29 €
Subtotal Condomínio	6,31 €	1,33 €
Total Condomínio	7,63 €	

Tabela 19 – Resumo dos custos, energia do recurso renovável e energia da rede (Simulação com preferência utilizador N=24)

	Potência Climatização (kW)	Potência Total (kW)	Carga 1 hh:mm	Carga 2 hh:mm	Carga 3 hh:mm
Habituação 1	5,9601	16,1321	7:00-8:00	20:00- 21:00	07:00
Habituação 2	8,7556	21,5956	13:00- 15:00	17:00	
Habituação 3	6,0502	34,1022	1:00-6:00	21:00- 23:00	17:00- 18:00
Condomínio	20,7659	71,8299			

Tabela 20 - Resumo de potências e horas de funcionamento das cargas (Simulação com preferência utilizador N=24)

Os resultados obtidos nesta simulação são os que apresentam a maior interação com a energia da rede, devido ao facto de ser o utilizador a impôr as horas possíveis de funcionamento. Em alguns casos são sobrepostas as cargas das várias habitações e é consumido demasiado recurso num determinado instante.

Em termos energéticos, foi gasto menos do que no caso em que não havia interação do consumidor com um horizonte preditivo de 24 horas, mas a temperatura na habitação dois excedeu os limites.

Em termos de custo, o preço que o condomínio pagaria seria 7,63€, sendo que 1,29€ foi energia consumida da rede. Num cenário linear de 1 mês de 31 dias, o preço seria $7,63\text{€} \times 31 = 236,55\text{€}$, sendo que 41,09€ eram pagos à distribuidora eléctrica. Esta estratégia custa mais 34,10€ que a estratégia mais económica ($N=12$).

4

Conclusões

4.1 Principais pontos

Foram aplicadas duas estratégias com base num modelo de controlo preditivo, de modo a controlar a temperatura interior da habitação, gerir cargas e partilhar um recurso de energia renovável num condomínio.

O controlador utiliza a previsão meteorológica, uma previsão de perturbações térmicas externas e gere o melhor horário de funcionamento das cargas. Desta forma, permite calcular a quantidade de energia mínima para manter a temperatura no interior da habitação, de modo a manter o conforto estipulado perante as limitações impostas pelo recurso de energia renovável.

As duas estratégias passam pela forma de gerir as cargas, uma em que o controlador calcula por si qual a melhor hora e outra em que controlador calcula a melhor hora consoante as horas indicadas pelo consumidor.

O controlador demonstrou a validade da sua aplicação em dois momentos. Um primeiro momento ao conseguir manter a temperatura interior da habitação perante as perturbações térmicas. Um segundo momento conseguindo gerir as cargas de modo a que seja utilizado apenas o recurso renovável e a minimizar a energia utilizada para a climatização com uma gestão/alocação óptima das mesmas.

Referentes à primeira estratégia em que o utilizador/consumidor não intervém, foram utilizados vários horizontes de predição 1, 12 e 24 horas, de modo a perceber qual seria o impacto dos mesmos e o mais razoável a ponderar. Dois resultados destacaram-se, um pelo cumprimento do conforto térmico, outro por ser o mais eficiente energeticamente.

Com um horizonte de predição de 12 horas obteve-se os melhores resultados a nível energético, cerca de menos 30% de energia para o horizonte de 1 e 40% para o de 12. O conforto não é cumprido em duas habitações, mas nos dois casos podem ser aceitáveis, pois na segunda habitação o conforto térmico não tem grande ênfase e na terceira habitação sai do conforto no máximo de 0,5°C durante 4 horas.

Com o horizonte de predição de 24 horas obteve-se os melhores resultados a nível de conforto térmico, com apenas uma variação mínima fora dos limites em cerca de 0,1°C numa hora. Com este horizonte de predição obteve-se o menor consumo de energia da rede. Este horizonte apresenta a menor interação com a distribuidora eléctrica o que permite assumir que é o horizonte ideal para uma estratégia que vise a independência da mesma.

Com o consumidor a indicar a sua preferência em termos de horas de início e variações possível das cargas, obteve-se resultados similares com a primeira, à exceção do consumo de energia à rede, que foi superior. O conforto não é novamente cumprido na segunda habitação devido ao perfil do consumidor escolhido. Em termos energéticos gasta menos cerca de 9% da primeira estratégia com o horizonte a 24 horas e mais 46% com o horizonte de 12 horas.

Em suma, o controlador apresentou resultados válidos perante as condições apresentadas. Com o horizonte preditivo a 1 hora obteve-se resultados que provam que mesmo assim o controlador pode ser usado para eficiência energética sem comprometer o conforto.

O objectivo foi cumprido com o aumento do horizonte preditivo, atingindo-se o conforto térmico com o funcionamento das cargas e com a partilha de recursos, apresentado eficiência energética.

A escolha do horizonte preditivo, perante estas condições de simulação, vai de encontro à importância dada ao conforto e consumos energéticos. Numa situação de ambiente de temperatura controlada, o horizonte de 24 horas apresentou-se como o mais adequado, pois na maior parte dos casos manteve-se dentro dos limites e com pouca variação. Num uso doméstico, o horizonte de 12 horas poderá ser adequado pois aproxima-se dos parâmetros de conforto térmico. Comparando esta estratégia com a que pressupõe a interação com o consumidor (a pior do ponto de vista económico e energético), permite uma redução de custos de 34,1€ por mês, cerca de 409€ por ano.

4.2 Trabalho futuro

Este controlador revelou-se capaz de resolver, com eficiência, o problema proposto. Porém, o modelo deverá ser mais preciso de forma a apresentar resultados mais fiáveis ao controlo térmico de um edifício e gestão de cargas.

Perante o algoritmo desenvolvido seria interessante evoluir de uma amostra de tempo de uma hora para um minuto de forma a observar os resultados de controlo térmico e obter uma gestão de cargas mais precisa.

Seria interessante aplicar um método mais dinâmico na variação dos parâmetros de conforto térmico, tolerância aos picos de potência e sensibilidade ao gasto adicional de energia consoante as restrições dos mesmos vão sendo satisfeitas ao longo do tempo.

Em trabalhos futuros, visto que este algoritmo tem um objectivo mais geral para demonstrar a possibilidade dos resultados, deverá ser mais desenvolvido para casos específicos, de modo diminuir o tempo de simulação. A duração da simulação com um horizonte de predição de 24 horas sem preferência horária foi cerca de 24 horas com utilização do processador entre 90 a 100%!

Num cenário em que o contracto com o distribuidor eléctrico fosse uma tarifa tri-horária, os momentos em que a energia da rede fosse mais dispendiosa poderiam ser ignorados.

Outro caso a considerar seria passar de um horizonte temporal de apenas 24 horas para 48, de modo a obter resultados mais amplos, em vez de aproximações lineares. Contudo, este aumento seria exposto em imprecisão, visto que as previsões meteorológicas neste espaço temporal vão perder exactidão.

Com este aumento de horizonte seria pertinente aplicar um cenário de armazenamento da energia do recurso renovável que fosse excedente e utilizá-la num dia seguinte.

No futuro, será indispensável a implementação destas estratégias de um ambiente de simulação com o programa Matlab para um ambiente físico real. Esta implementação primária deverá ser feita de uma forma progressiva com o intuito de aperfeiçoar o controlador e este conseguir reagir às variáveis de controlo, satisfazendo o utilizador.

5

Bibliografia

Bibliografia

- [1] E. S. T. T. Platform, “Solar Heating and Cooling for a Sustainable Energy Future in Europe,” European Solar Thermal Technology Platform, Bruxelas, 2009;
- [2] J.Zhang, A. Middelberg e X. Xia, “An optimal control model for load shifting in application un the energy management of a colliery,” *Applied Energy*, vol 86, 2009;
- [3] T. Logenthiran, D. Srinivasan e T. Z. Shun, “Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization,” *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, VOL. 3, NO. 3, Setembro 2012;
- [4] “EDP Distribuição,” [Online]. Disponível em:
<http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx>;
- [5] E. F. Camacho e C. Bordons, Model Predictive Control, Springer-Verlag, 1999;
- [6] J. Maciejovski, Predictive Controle with Constrains, Pearson Education Limited, 2002;
- [7] D. Morrison, “ISA,” Intech, 1 Março 2005. [Online]. Disponível em:
http://www.isa.org/Template.cfm?Section=InTech_Home1&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=42556;
- [8] B. L. Kleinman, “An easy way to stabilize a linear constant,” em *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1970;

- [9] E. Gilbert e S. Keerthi, "Optimal infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete-time systems: stability and moving-horizon approximations," *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1988;
- [10] J. Richalet, A. Rault, J. Testud e J. Papon, Model predictive heuristic control: Applications, *Automatica*, 1976;
- [11] Stoorvogel, T. J. v. d. Boom e A. A., Model Predictive Control, 2010;
- [12] S. Qin e T. Badgwell, An overview of industrial model predictive control technology, *Chemical Process Control - V, AIChE Symposium Series - American Institute of Chemical Engineers*, 1997;
- [13] Y. Ma, A. Kelman, A. Daly e F. Borrelli, "Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage," *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, Janeiro 2012;
- [14] "Microgeração EDP - Vende a energia que produz," [Online]. Disponível em: <http://www.microgeracaoedp.com/venda-a-energia-que-produz>;
- [15] D. M. März e P. Nance, "Thermal Modeling of Power-electronic Systems," *Infineon Technologies AG, Munich*, 2000;
- [16] G. Ossimitz e M. Mrotzek, "The Basics of System Dynamics: Discrete vs. Continuous Modelling of Time," University of Klagenfurt - Department of Mathematics;
- [17] "Mitsubishi-Motors," [Online]. Disponível em: <http://www.mitsubishimotors.pt/Portugal/world/environment/tab.aspx#/environmentiev/3-imiev-benefits>;

[18] “Samsung,” [Online]. Disponível em:

<http://www.samsung.com/pt/consumer/home-appliances/washing-machine/washers/WF80F5E2W2W/EP-spec;>

[19] “Siemens-Home,” [Online]. Disponível em:

<http://www.siemens-home.pt/produtos/m%C3%A1quinas-de-lavar-e-m%C3%A1quinas-de-secar-roupa/m%C3%A1quinas-de-secar-roupa/secadoras-de-condensa%C3%A7%C3%A3o/WT48Y740EE.html?source=browse;>

[20] “Siemens-Home,” [Online]. Disponível em:

<http://www.siemens-home.pt/produtos/pequenos-electrodom%C3%A9sticos/ferros-de-engomar/TS12XTRM.html?source=browse;>

[21] “Siemens-Home,” [Online]. Disponível em:

<http://www.siemens-home.pt/produtos/pequenos-electrodom%C3%A9sticos/aspiradores/VSZ5XTRM11.html?source=browse;>

[22] “Microgeração EDP,” [Online]. Disponível em:

<http://www.microgeracaoedp.com/solucoes-de-microgeracao-edp;>

[23] M. J. d. Oliveira, Termodinâmica, Editora Livraria da Física, 2005;

[24] Y. Cenge e M. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw-Hill Education, 2012;

Anexos

Anexo I - Conceitos básicos de termodinâmica

A temperatura ($^{\circ}\text{C}$) é uma grandeza que caracteriza o estado térmico de um corpo ou um sistema. Nos sistemas, a energia transfere-se através de calor, trabalho e radiação, entre um sistema não isolado e a vizinhança. Estas transferências originam variação de energia interna, traduzida pela 1^a Lei da Termodinâmica [23].

Num sistema fechado, como uma habitação, poderá haver fluxo de energia de duas formas: trocas de calor ou trocas de trabalho.

O trabalho (J) é uma transferência de energia associada a uma força que actua durante um determinado deslocamento. Considere-se um aquecedor elétrico que aquece um sistema isolado, quando integrado numa habitação, a energia que transfere para o sistema é proveniente do trabalho, ou seja, um fluxo orientado de electrões que se desloca através de uma resistência produzindo efeito de joule.

A transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação entre sistemas com temperaturas diferentes, até que estes atinjam o equilíbrio térmico.

Todos os materiais apresentam diferentes propriedades condutoras perante a transmissão de energia. A forma de calor por unidade tempo, é a condutividade térmica ($W/(m.K)$).

A transferência de energia por condução ocorre das partículas com mais energia de uma substância para as suas adjacentes que possuem um nível de energia menor. Esta interação ocorre nos três estados físicos da matéria: sólidos, líquidos e gasosos. Considere-se um copo com água a uma temperatura ambiente:

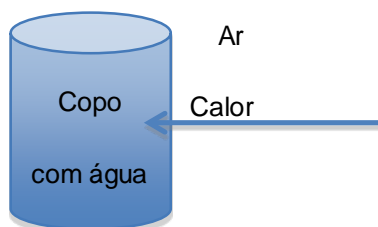


Figura 71 – Ilustração de um exemplo de transferência de energia por condução

Segundo a *Lei de Fourier* da condução de calor, o fluxo de calor numa direcção x é proporcional ao gradiente negativo nessa direcção [24]:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (Wm^{-1})$$

Equação 48

Aplicando a *Lei de Fourier* à Figura 1 e considerando que as temperaturas apresentam uma distribuição linear ao longo da espessura do vidro, em sintonia com a lei da condução do calor, observa-se que o fluxo de calor q que atravessa o vidro de espessura L é proporcional à diferença de temperatura ΔT que se apresenta na superfície exterior (ar) e interior (água) ao longo do vidro e a área A é normal à direcção do fluxo de calor e inversamente proporcional à espessura do vidro. A Equação 48 pode simplificar-se:

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

Equação 49

onde k representa a condutividade térmica do material.

A Equação 49 pode ser simplificada:

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

Equação 50

$$R = \frac{L}{kA} \quad (km^{-1})$$

Equação 51

Assim como cada material possui uma diferente condutividade térmica, irá oferecer uma diferente resistividade ao fluxo de calor. Esta propriedade é a resistência térmica do material e designada como R na Equação 51. Adicionalmente a estas perdas de calor devido a resistência térmica de cada material existe ainda a capacidade térmica.

A capacidade térmica de cada material é a propriedade que mede a capacidade de armazenamento de calor. Num exemplo mais simples considere-se um copo de água ao sol durante o dia. A sua temperatura vai aumentando ao longo do dia à condição da radiação solar que vai incidido nela e desta forma a sua energia armazenada aumenta. De noite, a energia vai sendo libertada e a água vai baixando a sua temperatura.

A capacidade térmica C de cada material está sempre associado a sua massa m e ao seu calor específico c_p ($J/(mol.K)$), Equação 52.

$$C = mc_p \left(\frac{J}{kgK} \right)$$

Equação 52

A transferência por convecção é outro modo de transferência de calor que ocorre entre uma superfície sólida e um líquido ou gás em movimento. Um exemplo simples será um líquido a passar na canalização de um radiador, ou seja, um movimento fluído de um líquido que em contacto com a canalização promove uma transferência de calor ao longo da superfície. A transferência convecção também envolve transferência por condução.

O fluxo de energia transferida por convecção é determinado pela Lei de arrefecimento de Newton, Equação 53:

$$q = hA\Delta T \quad (W)$$

Equação 53

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, este depende do meio, fluxo e da geometria, A é a área da superfície onde ocorre a transferência de calor, ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e a massa em movimento.

A radiação é a forma de transferência de calor que consiste em energia transmitida no espaço através de ondas electromagnéticas, ao contrário das outras formas de transferência de calor, a radiação não necessita um meio interveniente. Mas a emissão e a recepção requerem a presença de uma substância. O exemplo mais espontâneo é a radiação proveniente do Sol a aquecer a superfície da Terra. Outro exemplo, é uma pessoa a aquecer-se à lareira.

A *Lei de Stefan-Boltzmann* dá o fluxo máximo de radiação que pode ser emitida de uma superfície a uma temperatura absoluta T_s :

$$q = \sigma AT_s^4 \quad (W)$$

Equação 54

Onde A é a área da superfície e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6679 \times 10^{-8} \text{m}^2 \text{K}^{-4}$). A superfície de emissão de um corpo preto perfeito, ou seja, emite o máximo de radiação é dado:

$$q = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (W)$$

Equação 55

a emissividade é dada por ε . Nesta abordagem apenas foi falado de um caso específico, a radiação tem várias larguras de onda e são absorvidas de e emitidas em superfícies diferentes.

Anexo II -Artigo Científico

F. A. Barata, R. Campos e R. N. Silva - *Distributed MPC for Thermal House Comfort with Shifting Loads and Limited Energy Resources.*

Conforme referenciado em 1.4 é parte integrante da presente dissertação um artigo científico para a ICRERA 2013, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Madrid 2013.*

Este artigo resulta em parceria entre o Eng.º Filipe André de Sousa Figueira Barata, a minha pessoa e o Prof. Doutor Rui Neves da Silva no estudo de uma metodologia de controlo MPC para conforto térmico com deslize de cargas e recursos energéticos limitados.

Distributed MPC for Thermal House Comfort with Shifting Loads and Limited Energy Resources

F. A. Barata

ADESPA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)

R. Conselheiro Emídio Navarro 1,
1959-007 Lisboa, Portugal
fbarata@deea.isel.ipl.pt

R. Campos

ADESPA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)

R. Conselheiro Emídio Navarro 1,
1959-007 Lisboa, Portugal
A32701@alunos.isel.pt

R. Neves-Silva

DEE-FCT

Universidade Nova de Lisboa
Monte da Caparica, 2829-516

Caparica, Portugal
rns@fct.unl.pt

Abstract— This paper presents a distributed predictive control methodology for indoor thermal comfort that optimizes the consumption of a limited shared energy resource using a demand-side management approach that involves a power price auction and shifting appliance loads. The control objective of each subsystem is to minimize the energy cost while maintaining the indoor temperature in range. In a distributed coordinated environment, the control uses multiple dynamically decoupled agents (one for each subsystem/house) aiming to achieve satisfaction of available energy coupling constraints. The system is simulated with several houses in a distributed environment.

Keywords—DMPC; limited renewable energy resource; DSM; load shifting

I. INTRODUCTION

Currently buildings account for 40% of the world's energy and almost half of the today's green house gas emissions. This means that buildings contribute more greenhouse gases than traffic, which is estimated at 31%, and industry, estimated at 28%. When we breakdown and analyse buildings' energy consumption the most worrying aspect is that most of this energy used for heating or cooling [1]. Therefore, it is important economically, socially, and environmentally to reduce the energy consumption of buildings.

The desired approach here presented intends to take advantage from the innovative technology characteristics provided by future Smart Grids (SGs) [2]. In the smart world, simple household appliances, like dishwashers, clothes dryers, heaters, air conditioners will be fully controllable in order to achieve the network maximum efficiency. Renewable energies will be a common presence and any kW provided by these technologies sources should not be wasted. Active Demand-Side Management (DSM) will control the loads in order to adapt them to the available renewable energy source. DSM studies are focused in the development of load control manipulation models [3, 4], and electricity incentive prices to promote load management [5, 6]. In buildings, DSM is based on an effective reduction of the energy needs by changing the shape and amplitude consumers load diagram. The DSM can

involve a combination of several strategies, pricing, load management curves and energy conservation implemented for one more energy efficient use.

Load shifting is common practice of managing electricity supply and demand so that peak energy use is shifted to less busy periods. Properly done, load shifting helps meet the goals of improving energy efficiency and reducing emissions by smoothing the daily peaks and valleys of energy use and optimising existing generation assets. Load shifting may be accomplished in several ways. Demand response programmes shift load by controlling the function of air conditioners, refrigerators, water heaters, heat pumps, and similar electric loads at maximum demand times.

Focusing on the residential sector, most recent works, [7, 8, 9] provide interesting architectures and different approaches for load shifting simulation models. The work here present is distinguished because intends to provide a solution that is able to in a distributed network, adjust the demand to an intermittent limited energy source, using load shift and also maintain the indoor comfort.

To help to achieving these goals, is used the Model Predictive Control (MPC) that during the last years, has been granted to reduce and optimize the energy consumption in the residential sector namely to deal with temperature set points regulations [10, 11]. The MPC have also advantage in distributed systems [12, 13]. Distributed Model Predictive Control (DMPC) allows the distribution of decision-making while handling constraints in a systematic way. DMPC strategies can be characterized by the type of couplings or interactions assumed between constituent subsystems [14]. The DMPC strategy here presented uses the method of subsystems sharing coupled constraints [14, 15].

The work contributes with a methodology to manage energy networks from the demand side with strong presence of intermittent energy sources. In a distributed network, a constraint in the available renewable resource and the shifting appliance load, presented here, introduces a novelty that intends to give response to problem mentioned above. The

solution allows smart appliances to shift their operation to the periods that most benefit the consumers. This procedure ensures, at the same time, that the smart appliance is turned on when the renewable resource is available and consequently the energy price is lower. With this approach the system will minimize the consumer energy costs by maximizing the use of renewables adjusting the demand to the available resources. The profile of delivered energy depends on several factors, such as price of conventional energy and availability of renewable energy.

II. GLOBAL SYSTEM OVERVIEW

A. Built distributed scenario

The scenario built considers a distributed network that involves a residential community, with electricity power source generated by their own renewable energy park.

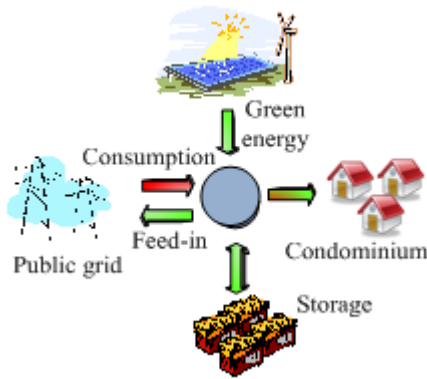


Fig. 1. Implemented scheme.

The houses have different thermal loads, thermal characteristics, occupancy and comfort temperature bounds, and consequently with different energy needs for heating/cooling the spaces. The idea is to apply a predictive control law to maintain the temperature and power consumption inside their bounds. It is considered that:

- Houses must share a limited predictable renewable *green* resource;
- The *green* or clean resource must be always consumed or storage and it is limited to a maximum available that varies in time.
- Each house has a known fixed 24 hours consumption profile, C_i and it is established a priority level from 1 (low) to 3 (high), that indicates the importance of each hour is in consumption.
- The agents make their bid in the auction (more details about the auction algorithm can be seen in previous work [16]) with one day ahead to show how much intend to pay per kWh to consume the *green* resource in each one of the next 24 hours;
- The bid value of each house is made according the chosen priority level, the hours with high priority levels indicates high consumption and consequently a higher bid value.

- The access to the *green* resource is done hourly according to the bid value made. The house that is able to pay more uses the needed stock first, and the second can use only the remainder energy, and so on;
- Each house select the load value (LV), the duration (LVd), the turned on time (ToT) and the “sliding level” (SL) of one/two “shifted loads”. The SL indicates that the load can be turned on SL hours before and after the chosen ToT ;
- Outside temperature, disturbances, fixed consumption profile and daily comfort temperature bounds are known by each system inside the prediction horizon (N);
- The *green* resource that is not consumed at a certain instant is stored in batteries up to capacity value (BcV). When BcV is reached it is considered that the remaining *green* resource is delivered to the grid;
- If the *green* resource is insufficient to satisfy the demand required by the houses, the *red* resource (from grid) must be consumed.
- The *red* resource has a fixed kW price that is always higher than the *green*.
- The *red* resource consumed for comfort implies a penalty in the final cost function (3) when the soft constraint violation imposed by the maximum available *green* resource is exceeded

Therefore, using the demand side management, by negotiating the energy price and the consumer comfort, the distributed loads can be managed and shifted in order to guarantee that all constraints are satisfied. The global system includes an auction (provided by the market operator) that, according to the bid value made by the houses/agents defines an order to access to the *green* resource. The *green* resource consumption is made by the agents sequentially by the auction order, and the information about the remainder *green* resource is passed to the next agent as the maximum *green* available resource. As mentioned, when the *green* resource becomes insufficient to satisfy all the demand, the *red* is available.

B. Thermal model of the house

House models can be simple or more complex depending on the objective. The house model used is a first order model that describing the dominant dynamics of the house.

$$\frac{dT_{house}}{dt} = \frac{1}{C} (Q_{heat} - Q_{losses} + Q_{Pd}) \quad (1)$$

where, Q_{losses} is heat and cooling losses (kW), T_{house} is the inside temperature ($^{\circ}C$), C the thermal capacitance ($kJ/^{\circ}C$), and Q_{heat} the heat and cooling power (kW). The house temperature dynamics take into account the heating/cooling needs and also the heat losses to the environment. The plant model representation (1) can be approximated by a discrete model using Euler discretization with a sampling time of Δt

$$T(k+1) = AT(k) + Bu(k) + v(k), \quad (2)$$

where $A = 1 - \frac{\Delta t}{RC}$, $B = \frac{\Delta t}{C}$, $v = \frac{P_d \Delta t}{C} + \frac{T_{oa} \Delta t}{RC}$, R is the thermal resistance ($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$), $u(k)$ is the necessary heat/cooling power, $T(k)$ is the indoor temperature, $v(k)$ is a disturbance signal resulting from P_d the external disturbances (kW) (e.g. load generated by occupants, direct sunlight, electrical devices or doors and windows aperture to recycle the indoor air), and T_{oa} , the temperature of outside air ($^{\circ}\text{C}$). Note that the indoor space is cooled when $u(k) < 0$ and heated when $u(k) > 0$.

C. Shifting loads approach

Each one of the systems starts by choosing their loads characteristics, LV , LVd , ToT and SL for one or two loads. With this data, all the possible loads schedule combinations ($PLSC_S$) are established. At each time step, it's verified if inside the predictive horizon N , any combination that exceeds the maximum available green energy \overline{UL}_{A_i} can be initially discharge. The values of the remaining feasible load sequence combinations ($FLSC_S$) are subtracted to the \overline{UL}_{A_i} , and the resulting a set of combinations \overline{UT}_{A_i} (see Table IV e.g) are tested in the minimization problem as maximum available green resource for comfort (3-7). The alternative yielding less consumption is chosen. Once one sequence is started, all the others that are different until the current step time are eliminated until the final load sequence is chosen "FLSeq".

D. DMPC formalization

At each time step, each one of the agents must solve his MPC problem. The objectives are: minimize the energy consumption to heating and cooling; minimize the peak power consumption; maintain the zones within a desired temperature range and maintain the used power within the green available bounds. The problem to be solved by each agent, assumes the following form:

$$\min_{U, \bar{\varepsilon}, \underline{\varepsilon}, \bar{\gamma}, \underline{\gamma}} \sum_{k=0}^{N-1} u_{t+k|t}^2 \Delta t + \phi \max \{ u_{t|t}^2, \dots, u_{t+N-1|t}^2 \} \quad (3)$$

$$+ \rho \sum_{k=1}^N (\bar{\varepsilon}_{t+k|t}^2 + \underline{\varepsilon}_{t+k|t}^2) + \psi \sum_{k=1}^N (\bar{\gamma}_{t+k|t}^2 + \underline{\gamma}_{t+k|t}^2)$$

subject to the following constraints,

$$T_{t+k+1|t} = AT_{t+k|t} + Bu_{t+k|t} + v_{t+k|t}, \quad (4)$$

$$\underline{T} - \underline{\varepsilon}_{t+k|t} \leq T \leq \bar{T} + \bar{\varepsilon}_{t+k|t}, \quad (5)$$

$$\underline{U}_{A_i} - \underline{\gamma}_{t+k|t} \leq U \leq \bar{U}_{A_i} + \bar{\gamma}_{t+k|t}, \quad (6)$$

$$\underline{\gamma}_{t+k|t}, \bar{\gamma}_{t+k|t}, \underline{\varepsilon}_{t+k|t}, \bar{\varepsilon}_{t+k|t} \geq 0. \quad (7)$$

In (3), u represents the power control inputs, ϕ is the penalty on peak power consumption, ρ is the penalty on the comfort constraint violation, ψ the penalty on the power constraint violation and N is the length of the prediction

horizon. In (5), $\bar{\varepsilon}$ and $\underline{\varepsilon}$ are the vectors of temperature violations that are above and below the desired comfort zone defined by \bar{T} and \underline{T} . In (6), coupled constraint, $\bar{\gamma}$ and $\underline{\gamma}$ are the power violations that are above or lower the maximum, \bar{U}_{A_i} , and minimum, \underline{U}_{A_i} , available green power for heating/cooling the space, with $\underline{U}_{A_i} = -\bar{U}_{A_i}$. A scheme of the system implemented is shown in the next picture.

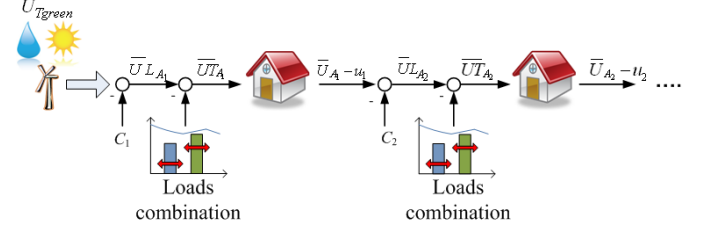


Fig. 2. Implemented power distribution.

$$C_i = [c_i(k), \dots, c_i(k+N)]^T, \quad (8)$$

$$U_{Tgreen} = [u_{Tgreen}(k), \dots, u_{Tgreen}(k+N)]^T, \quad (9)$$

$$u_i = [u_i(k), \dots, u_i(k+N)]^T, \quad (10)$$

where, for a generic Agent i at the control horizon, U_{Tgreen} represents the green available total resource, C_i the fixed consumption profile and u_i the used power to heating/cooling the space that results from the optimization program. The total consumption can be written as,

$$P_{used}(k) = \sum_{i=1}^3 [u_i(k) + C_i(k) + FLSeq(k)]. \quad (11)$$

More details about the implemented algorithm are omitted due the lack of space in this paper.

III. RESULTS

The presented results were obtained with an optimization *Matlab* routine that finds a constrained minimum of a quadratic cost function that penalizes the sum of the several objectives (3).

A. One house scenario

To simplify better understand the used approach, the first results here present show only the shifting loads procedure for one house with thermal disturbance (P_d), Fig. 4 (no fixed consumption profile and storage are considered).

Table I shows the used scenario parameters.

TABLE I. SCENARIO PARAMETERS

Parameters							
R ($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$)	C ($\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$)	ρ	ψ	ϕ	Δt (h)	N	$T(0)$ ($^{\circ}\text{C}$)
50	9.2×10^3	5000	5	2	1	24	21

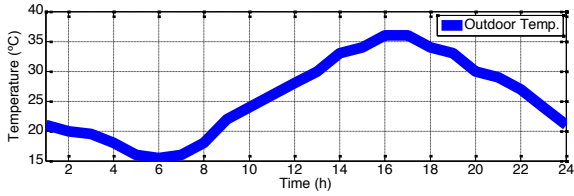


Fig. 3. Outdoor temperature forecasting (T_{oa}).

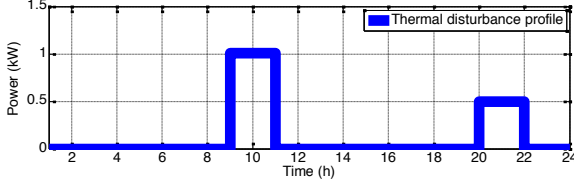


Fig. 4. Disturbance forecasting (P_d).

The *Loads* that can be daily shifted have the characteristics present in the next Table II, and, Table III shows all the loads combinations in the 24hours period.

TABLE II. SHIFTED LOADS CHARACTERISTICS

Loads	LV (kW)	LVd (h)	ToT (h)	SL (h)
Load 1	2	3	8	1
Load 2	2.5	2	16	3

TABLE III. POSSIBLE LOADS SCHEDULE COMBINATIONS

FLSC _s	Time (h)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0

The system tests all the 21 the combinations present in the table. As mentioned above, the hypotheses that do not respect the maximum predicted *green* resource are discharge, and the remaining ones, Table IV, are tested in (3-7).

TABLE IV. FEASIBLE SHIFTED LOADS COMBINATIONS

FLSC _s	Time (h)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	2,5	0	0	0	0	0

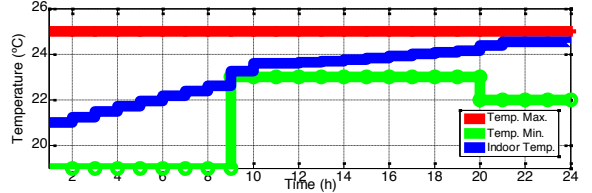


Fig. 5. Indoor temperature and comfort.

The comfort limits varies during the 24 period and it can be seen that the indoor temperature is always maintained inside the constrained bounds. The sequence where only *green* energy is consumed, the costs are lower and the indoor comfort range is respected is found, "*FLSeq*".

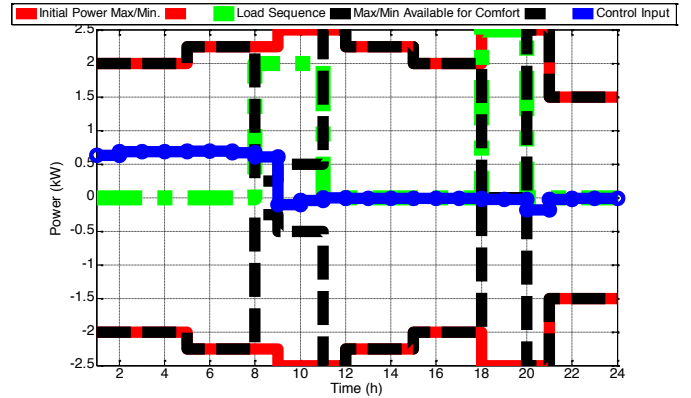


Fig. 6. Used power to heat/cool the space (*Control input*), shifted loads (*Load sequence(#13)*), predicted *green* resource (*Initial Power Max/Min*) and the maximum *green* resource available for comfort (*Initial Power Max/Min - Load sequence*).

Due the thermal disturbance and shifted *Load 1* locations, the period between 7-11a.m is extremely demanding, and by this fact between 8-9 a.m *red* energy is consumed. In Fig. 7 are the total energy costs of the *FLSC_s* shown in Table III, and can be seen that the first is the less expensive

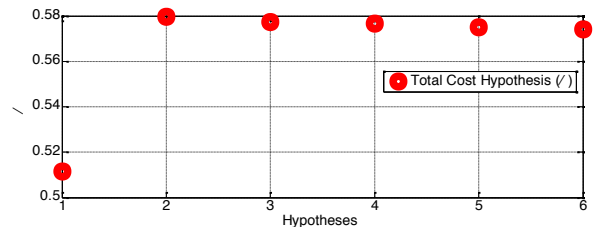


Fig. 7. Total energy costs of *FLSC_s*.

B. Distributed scenario

It is considered that all houses have the same outdoor temperature presented in Fig. 3. The thermal characteristics (Table V), load disturbances profile (Fig. 8) and comfort temperature bounds are different for all houses. The batteries capacity is 3kWh.

TABLE V. DISTRIBUTED SCENARIO PARAMETERS

Parameter	A_1	A_2	A_3	Units
R	50	25	75	$^{\circ}\text{C}/\text{kW}$
C	9.2×10^3	4.6×10^3	11×10^3	$\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$
ρ	100	100	300	-
ψ	500	200	300	-
Φ	2	2	2	-
Δt	1	1	1	H
N	24	24	24	-
$T(0)$	21	23	24	$^{\circ}\text{C}$

To incentive the clean resource consumption, it is considered that the *green* energy price per kWh has a maximum auction value (0.09€/kWh) always cheaper than the *red* energy price (0.17€/kWh). The next table shows the bid value for each one of the priority levels.

TABLE VI. BID VALUE FOR EACH CONSUMPTION LEVEL BY HOUSE

Consumption	Priority Level	House 1	House 2	House 3
0-1 kW	1	$2/5 * 0.09$	$3/5 * 0.09$	$1/2 * 0.09$
1-2 kW	2	$7/10 * 0.09$	$4/5 * 0.09$	$2/3 * 0.09$
>2 kW	3	$8.5/10 * 0.09$	$9/10 * 0.09$	$3/4 * 0.09$

TABLE VII. SHIFTED LOADS CHARACTERISTICS FOR DISTRIBUTED SCENARIO

House	Loads	LV (kW)	LVd (h)	ToT (h)	SL (h)
1	Load 1	1	2	7	1
	Load 2	2	4	18	2
2	Load 1	2	3	9	1
	Load 2	2	2	21	2
3	Load 1	3	3	8	1
	Load 2	3	3	13	1

The fixed consumption profile and thermal disturbance profile are presented in Fig. 8.

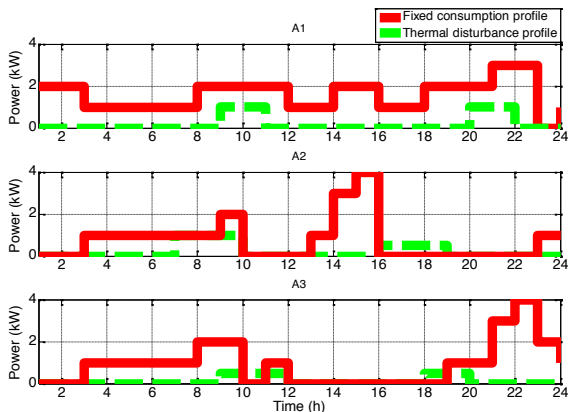


Fig. 8. Fixed consumption and thermal disturbance profile of each house (C_1 , C_2 and C_3).

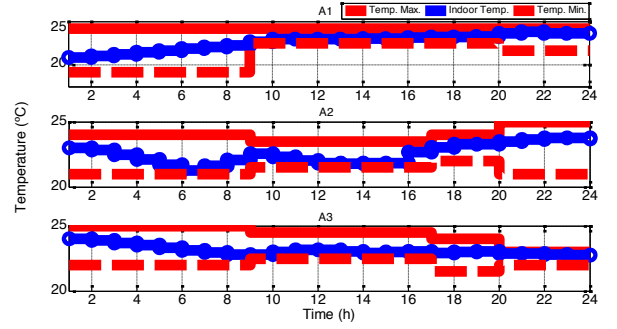


Fig. 9. A_1 , A_2 and A_3 indoor temperature and their constraints.

In Fig. 9, it can be seen that the comfort constraints are respected, the indoor temperature is always inside the comfort zone in all houses. Taking advantage of the predictive knowledge of the thermal disturbance and making use of the space thermal storage, it can also be seen that in all houses the MPC treats the indoor temperature before the thermal disturbance beginning.

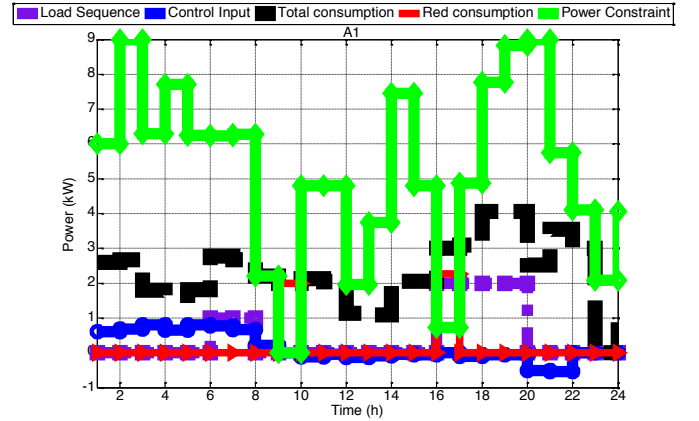


Fig. 10. Power profile A_1 .

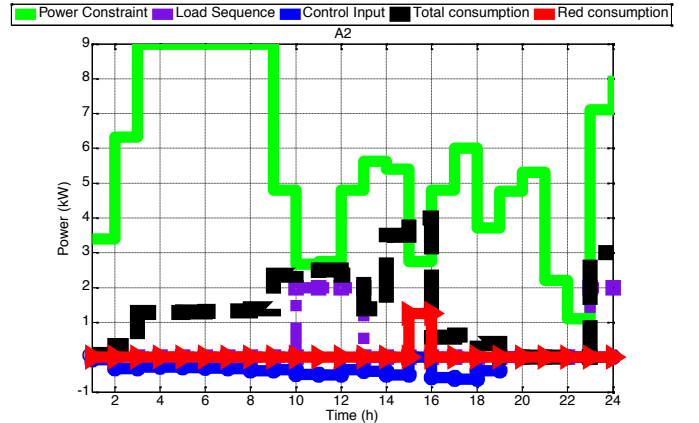


Fig. 11. Power profile A_2 .

In Fig.10 and Fig. 11, it can be seen that the shifted loads were located in zones with mostly *green* energy available. Due the access order imposed by the auction, the maximum available energy may change hourly, and by this fact the available resource prediction is not as effective as with one house only. Also, due the $SL=1$ of both loads of House 3, in Fig. 12 the chosen $FLSeq_3$ is located here the consumption of

red resource is obliged. It is obvious in this case that these conditionalities are extra restrictions on our optimization algorithm.

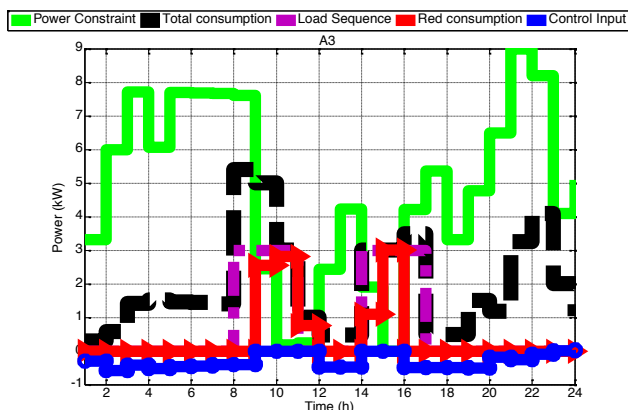


Fig. 12. Power profile A_3 .

The used power to heat/cool the space is maintained inside the constrained bounds in all houses. Note that the consumption for comfort is only made when the “Power Constraint” is higher than “Total consumption” (11).

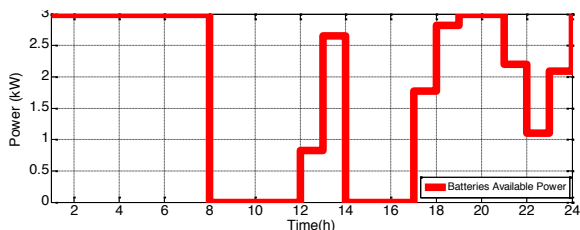


Fig. 13. Batteries profile.

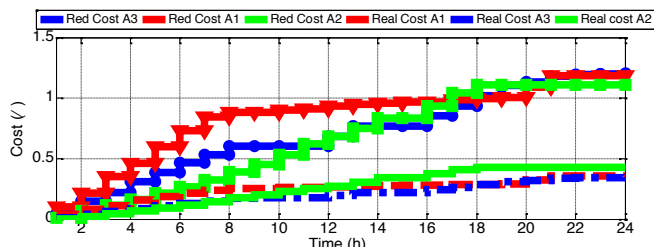


Fig. 14. Consumption costs.

Fig. 15 demonstrates the advantage of the auction scheme. For each one of the houses it can be seen that the “Real Cost” is much lower than the cost of not to bidding auction and only consume the red resource “Red Cost” at a higher fixed price.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, a distributed MPC control technique was validated in order to provide thermal house comfort in an environment with strong presence of intermittent/limited renewable energy sources. The approach boils to a control problem of multiple subsystems subject to coupled constraint.

The approach shows that, predictive control MPC to provide house comfort and the DSM with price auction and rescheduling of appliance loads, are a valid methodology to achieve less consumption and price reduction. The system is more effective as higher is the loads flexibility, one high SL allows the system to choose in a large range and consequently to place charges in the most favourable zones.

REFERENCES

- [1] U.S. Energy Information Administration: Available on: <http://www.eia.gov/>
- [2] P. Perrod, R. Critchley, E. Catz, M. Bazargan, “New participants in SmartGrids and associated challenges in the transition towards the grid of the future”. In: IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009, Bucharest. Page(s): 1 – 5.
- [3] S. Callaway, “Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy”, Energy Conversion and Management 50 (2009) 1389–1400.
- [4] A. Molderink, V. Bakker, M. Bosman, J. Hurink and G. Smith, “Management and Control of Domestic Smart Grid Technology”, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 1, Issue: 2, 2010, Page(s): 109 – 119.
- [5] F. Saffre and R. Gedge, “Demand-Side Management for the Smart Grid”, Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP, Page(s): 300 – 303I.
- [6] V. Hamidi, F. Li and F. Robinson, “The effect of responsive demand in domestic sector on power system operation in the networks with high penetration of renewable”, IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, Page(s): 1 – 8.
- [7] S. Gottwalt, W. Ketter, C. Block, J. Collins, and C. Weinhardt, “Demand side management simulation of household behavior under variable prices.” Energy Policy, vol. 39, no. 12, pp. 8163 – 8174, 2011
- [8] A. Di Giorgio, L. Pimpinella, F. Liberati, “A Model Predictive Control Approach to the Load Shifting Problem in a Household Equipped with an Energy Storage Unit”, 20th Mediterrean Conference on Control and Automation (MED 2012), Barcelona, 3-6 July 2012.
- [9] E. Matallanas, M. Castillo-Cagigal, A. Gutierrez, F. Monasterio Huelin, E. Caamano-Martin, D. Masa, and J. Jimenez-Leube, “Neural network controller for Active Demand-Side Management with PV energy in the residential sector,” Applied Energy, vol. 91, no. 1, pp.90 – 97, 2012.
- [10] P. Moroşan, R. Bourdais, D. Dumur and J. Buisson, “Building temperature regulation using a distributed model predictive control”. American Control Conference (ACC), 2010. Pp. 3174 – 3179.
- [11] Y. Ma, A. Kelman, A. Daly and F. Borrelli, “Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage”. IEEE Control System Magazine, February 2012. Vol 32, n°1, pp. 44 – 64.
- [12] R. Negenborn, Multi-Agent Model Predictive Control with Applications to Power Networks. In: PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Nederland, 2007.
- [13] R. Scattolini, “Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control – A review”. In: Journal of Process Control 2009, Vol.19. Pp 723–731.
- [14] P. Trodden and A. Richards, “Distributed model predictive control of linear systems with persistent disturbances”, International Journal of Control, Vol. 83, No. 8, August 2010, 1653–1663.
- [15] T. Keviczky, F. Borrelli, and G. Balas, “Decentralized Receding Horizon Control for Large Scale Dynamically Decoupled Systems”. In: Automatica, 2006, Vol. 42, pp. 2105–2115.
- [16] F. Barata and R. Neves-Silva, “Distributed model predictive control for thermal house comfort with auction of available energy”. In: Proceedings of International Conference on Smart Grid Technology, Economics and Policies (SG-TEP 2012).