

Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo para gestão da demanda de energia elétrica

Carlos Henggeler Antunes

Deptº de Engª Electrotécnica e de Computadores - Universidade de Coimbra

Iniciativa Energia para a Sustentabilidade - EfS

INESC Coimbra

ch@deec.uc.pt; <http://www2.deec.uc.pt/~ch>



Instituto de
Engenharia de Sistemas
e Computadores de Coimbra



Motivação

Integração de geração distribuída + evolução dos sistemas de energia elétrica para as *smart-grids*

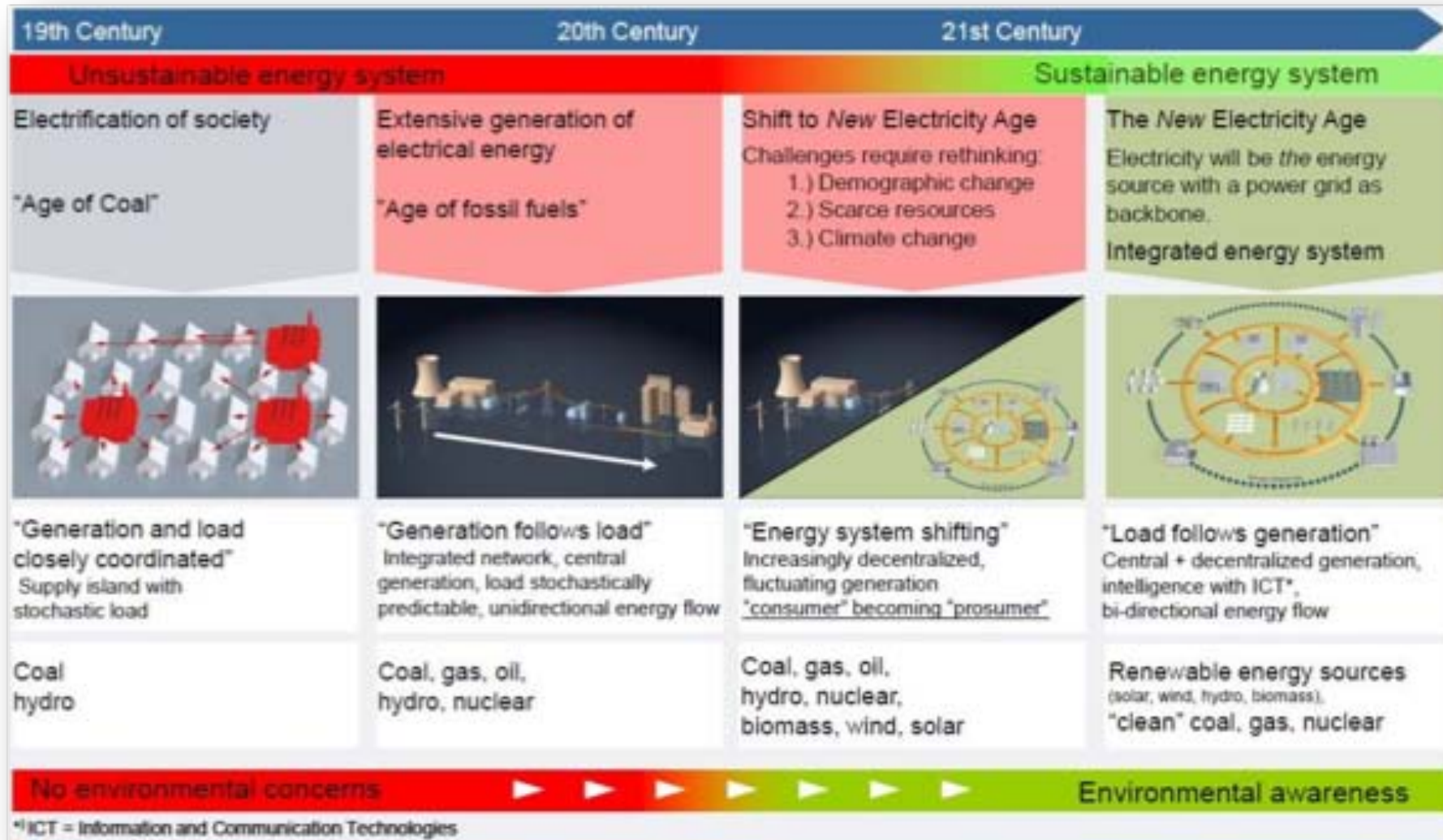
Crescente integração de ICT

Demanda → recurso com potencial de gestão e controlo:
- alteração dos padrões de consumo de eletricidade de modo a satisfazer os requisitos dos serviços de energia dos utilizadores

Gestão da demanda de energia elétrica → papel mais importante na eficiência global do sistema

Atrativa para diferentes intervenientes

Evolução para as *smart grids*



*ICT = Information and Communication Technologies

Smart grids

Rede elétrica que permitirá integrar de forma inteligente as ações de todos os utilizadores a elas ligados produtores centralizados e dispersos, operadores de transporte e distribuição, comercializadores, consumidores assegurando de forma eficiente o abastecimento sustentável, económico e seguro de energia elétrica.

Smart grids

Integra produtos e serviços inovadores com monitorização, controlo, comunicação, e tecnologias de auto-regeneração (*self-healing*) para:

- facilitar a ligação e operação de geradores de todas as tecnologias e tamanhos,
- permitir aos consumidores um papel ativo na otimização da operação global do sistema,
- oferecer aos consumidores mais e melhor informação para escolhas mais diversificadas,
- reduzir o impacto ambiental global do sistema elétrico,
- oferecer níveis acrescidos de fiabilidade e segurança de abastecimento.

Smart grids ... e PO

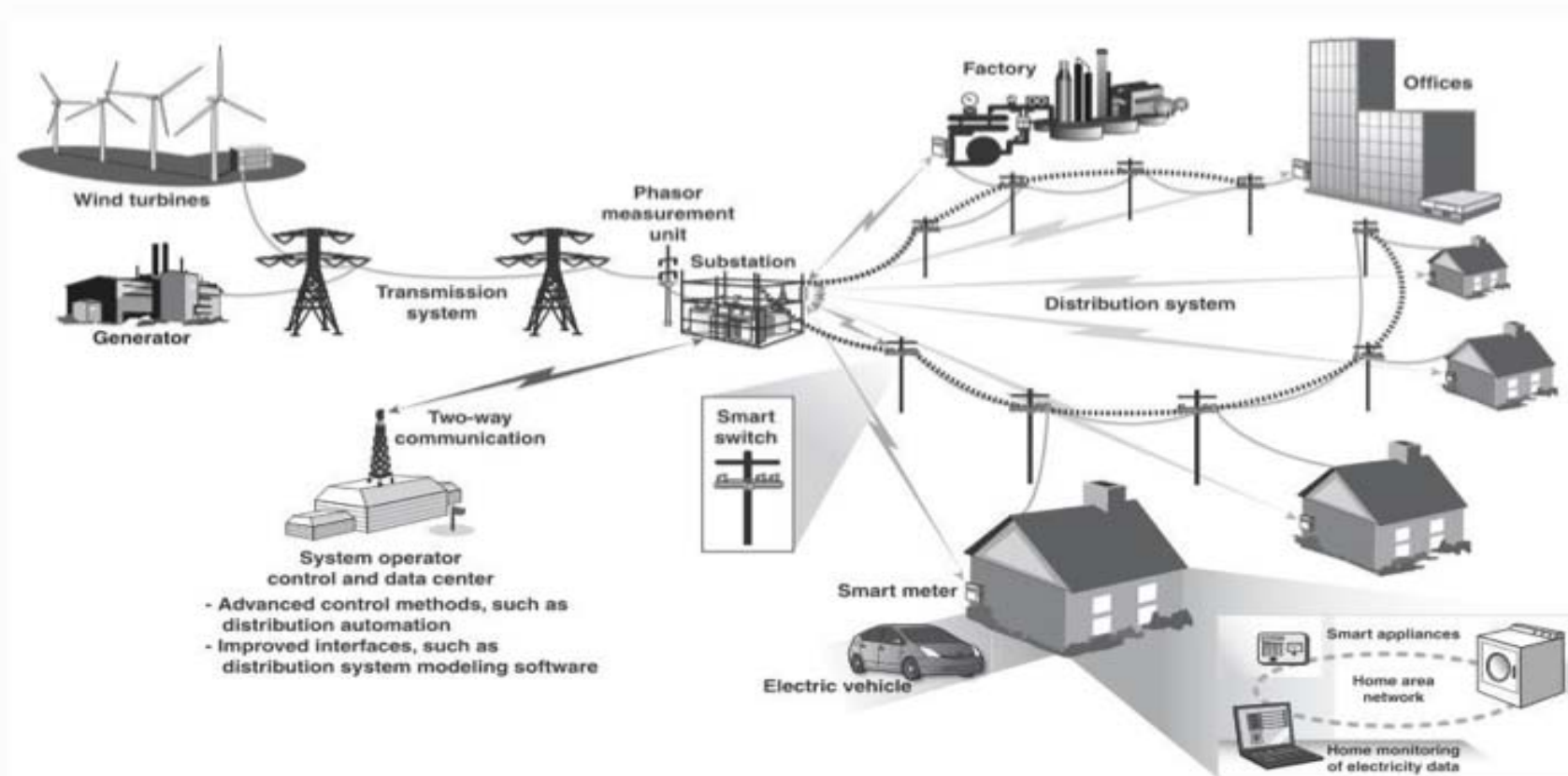
O desenvolvimento das *Smart Grids* envolve questões

- tecnológicas,
- de mercado e comerciais,
- de impacto ambiental,
- de quadro regulatório,
- de estabelecimento de standards,
- de uso de ICT,
- de desenho de estratégias de migração.

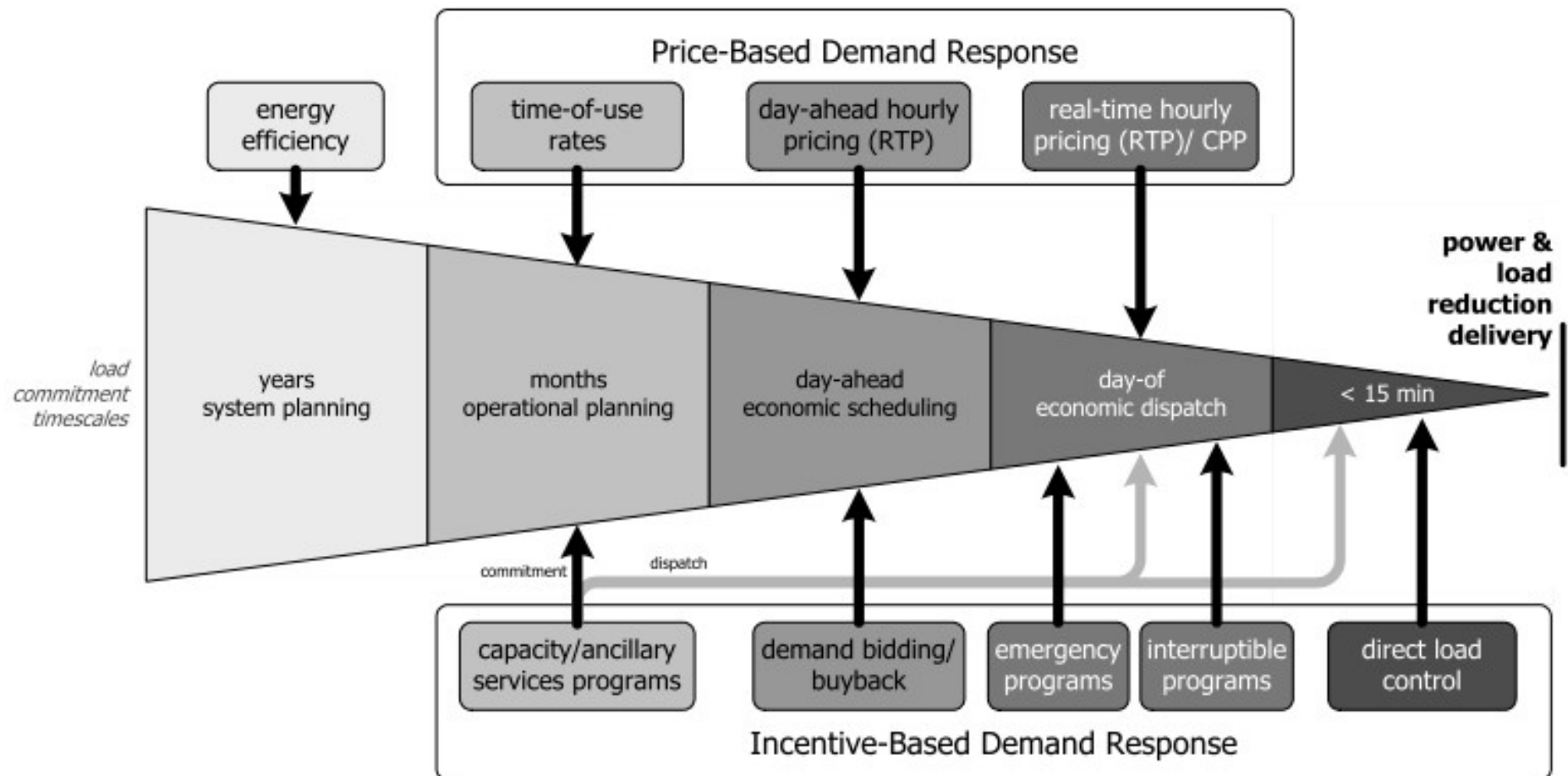
Inteligência distribuída: equipamentos e **algoritmos**.

Gestão integrada de recursos: cargas + geração local + armazenamento (VE)

Smart ... rede, contadores, aparelhos, termóstatos, bairros, cidades, economias, ...



Gestão do lado da demanda



Gestão da demanda

Cargas de utilização final

- desligadas durante curtos períodos de tempo → reduzir a ponta do diagrama de carga e/ou os custos de aquisição,
- funcionamento deslocado no tempo → períodos em que a energia é mais barata,
- parâmetros de controlo alterados temporariamente → pequena diminuição do nível de serviço.

Gestão da demanda

Ações de controlo de cargas → interesse potencial para diversos intervenientes

- consumidores que pretendem minimizar a factura ou maximizar a integração de outros recursos de armazenamento ou geração local,

- fornecedores que pretendem aumentar os lucros ou aumentar a quota de mercado,

- gestor da rede de distribuição que pretende otimizar o funcionamento do sistema

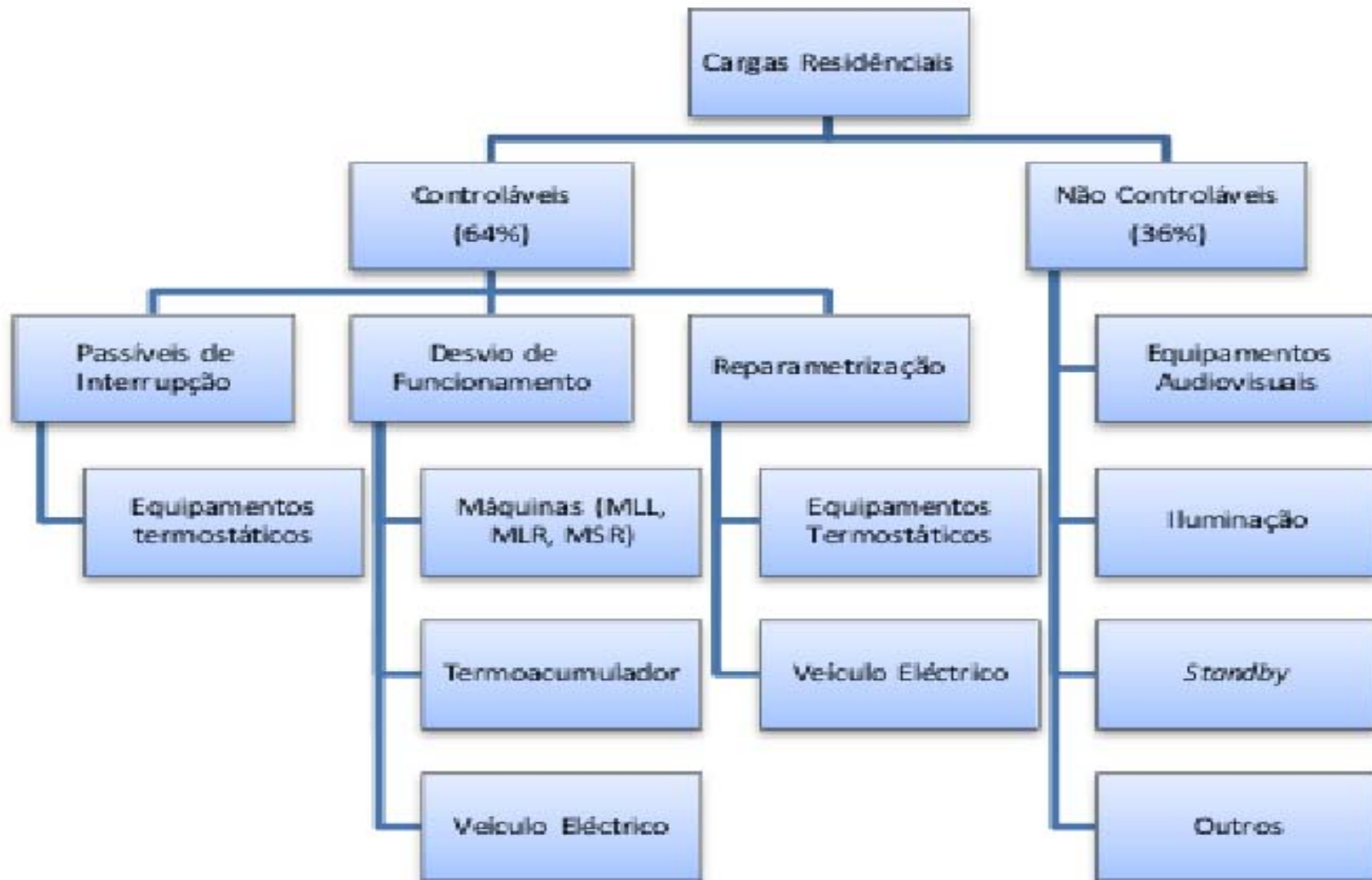
- aumentar a eficiência do mercado de energia

Ações de controlo de cargas

Devem ser concebidas tendo em conta múltiplos aspectos de avaliação:

- diminuição da ponta do diagrama de carga a diferentes níveis de agregação,
- maximizar os lucros,
- minimizar o desconforto causado aos consumidores
- minimizar perdas

Usos finais (sector residencial)



Controlo direto de cargas

Alterar a forma e amplitude dos padrões de procura

Reduzir a ponta do diagrama de cargas evitando restrições de capacidade e/ou picos de preços

Ações de controlo → padrões on/off aplicados às cargas controláveis, agrupadas de acordo com tipo, características físicas, localização, etc.

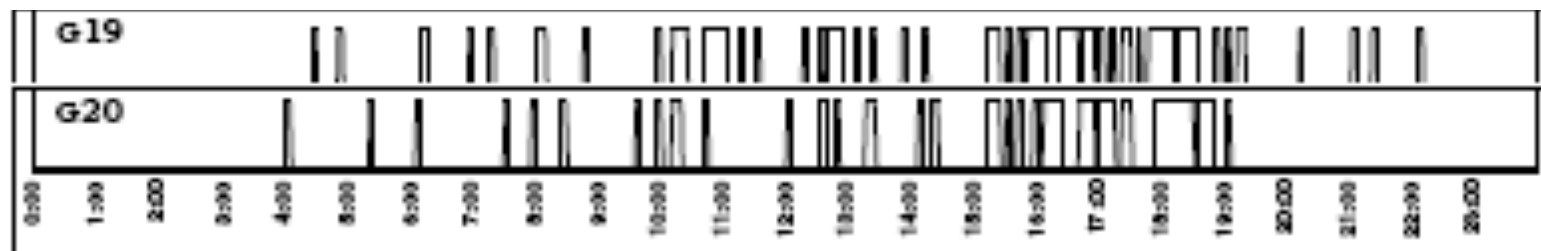
Efeito indesejável → efeito de restituição (*payoff*) devido ao restabelecimento “demasiado simultâneo” da alimentação após interrupção → ponta mais elevada do que existiria sem ações de controlo!

Controlo direto de cargas

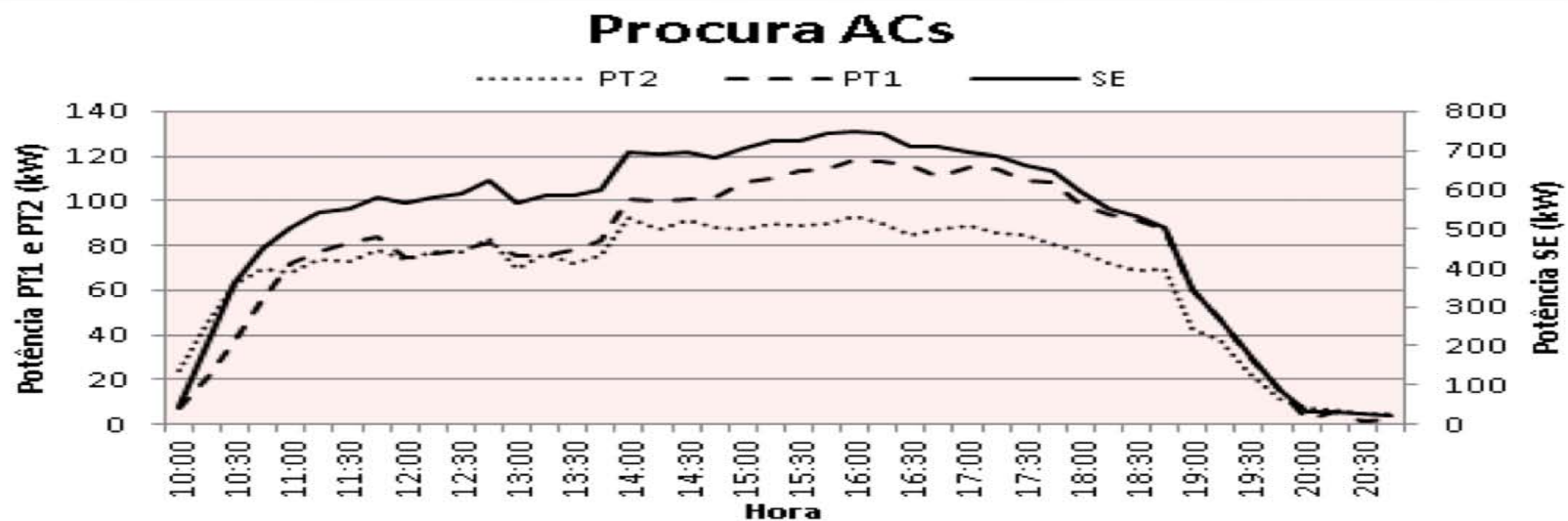
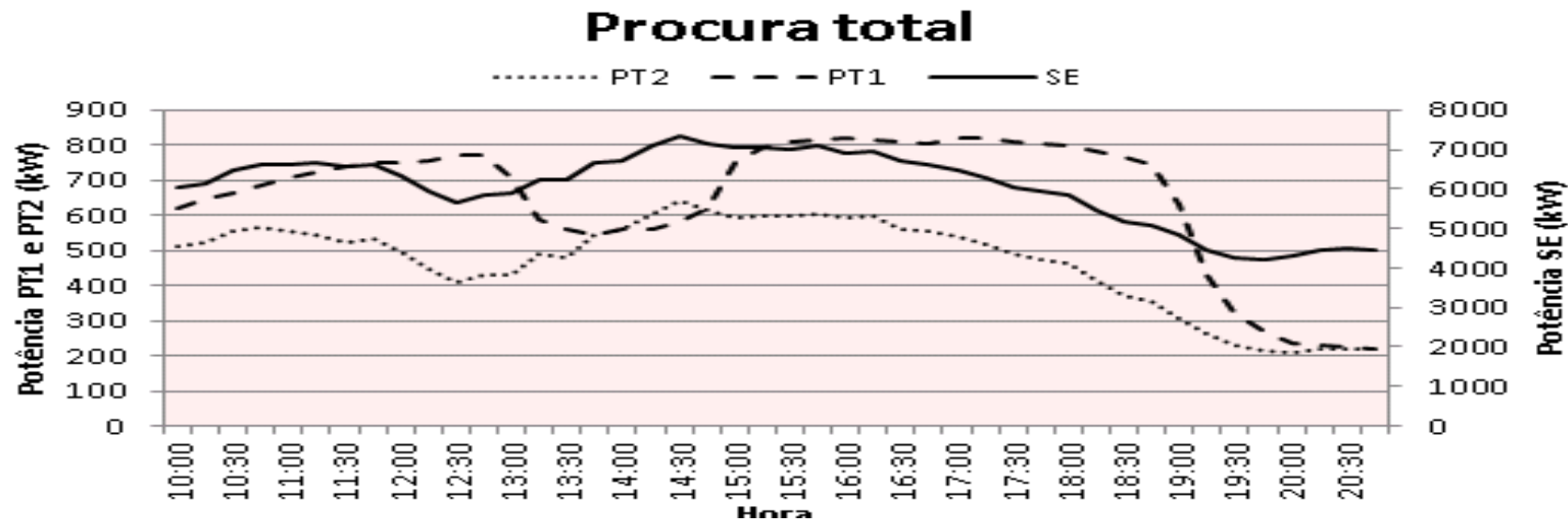
Problema combinatório: identificação dos padrões on/off a aplicar em grupos de cargas sob controlo → duração e localização no tempo de cada período off

Diferentes durações dos períodos on/off → maior flexibilidade no controlo de cargas

→ melhores resultados nas múltiplas perspetivas de análise: económica, técnica, qualidade de serviço



Controlo direto de cargas



Funções objetivo

Minimizar a ponta do diagrama de carga, avaliada a diferentes níveis de agregação da demanda

- sub-estação (SE),
- postos de transformação (PT1, PT2)

Minimizar desconforto imposto ao consumidor

- número de minutos
- máximo intervalo

Maximizar lucros

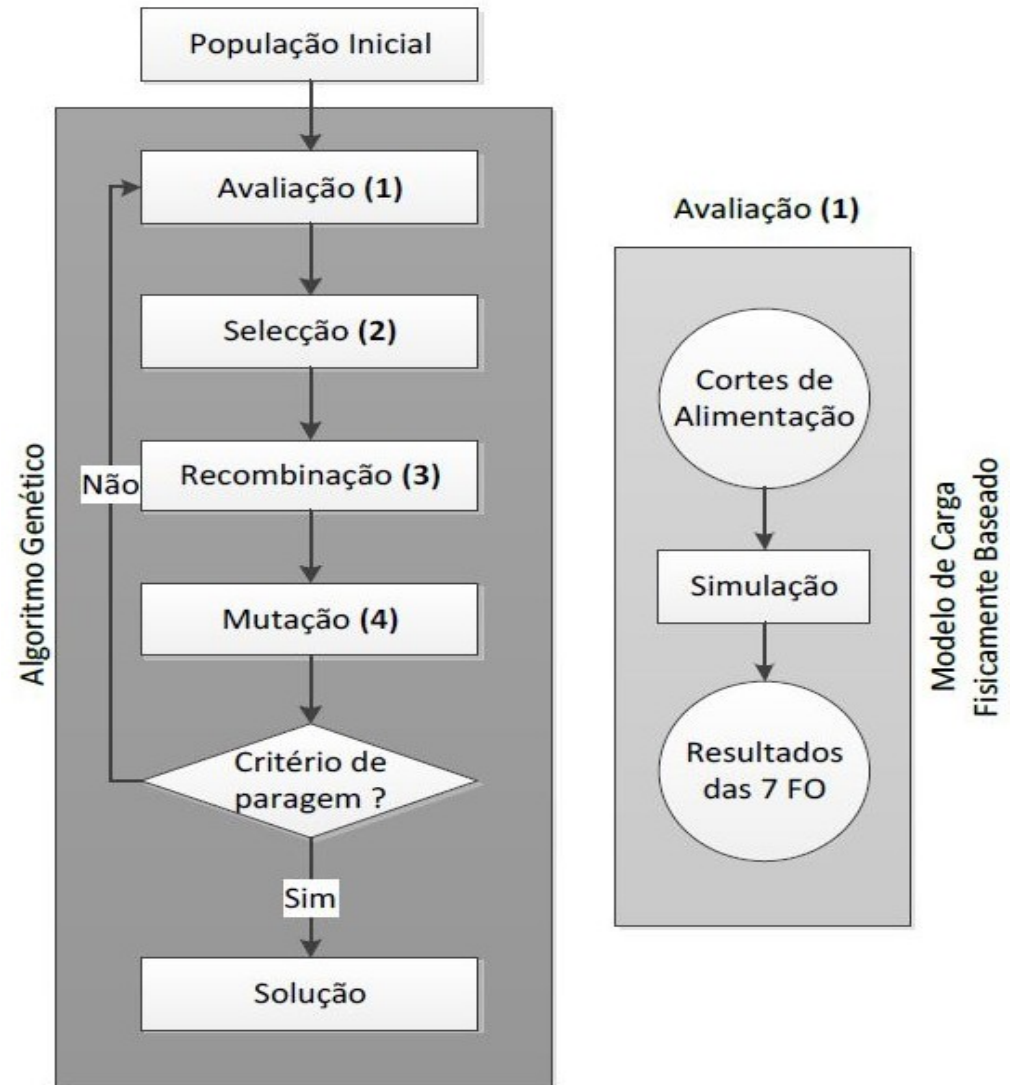
Minimizar perdas

Algoritmo genético multi-objetivo

Design (não requerendo pré-especificação) + seleção das ações de controlo

Modelos fisicamente baseados reproduzem os fenómenos físicos (incluindo efeito de *payback*) que ocorrem nas cargas sujeitas às ações de controlo

Cargas: AC + EWH



Algoritmo genético multi-objetivo

Principais características

Representação: binária

Tamanho da população: 100

Seleção: torneio binário

Mutação: controlo adaptativo (de acordo com os valores obtidos para cada função objectivo)

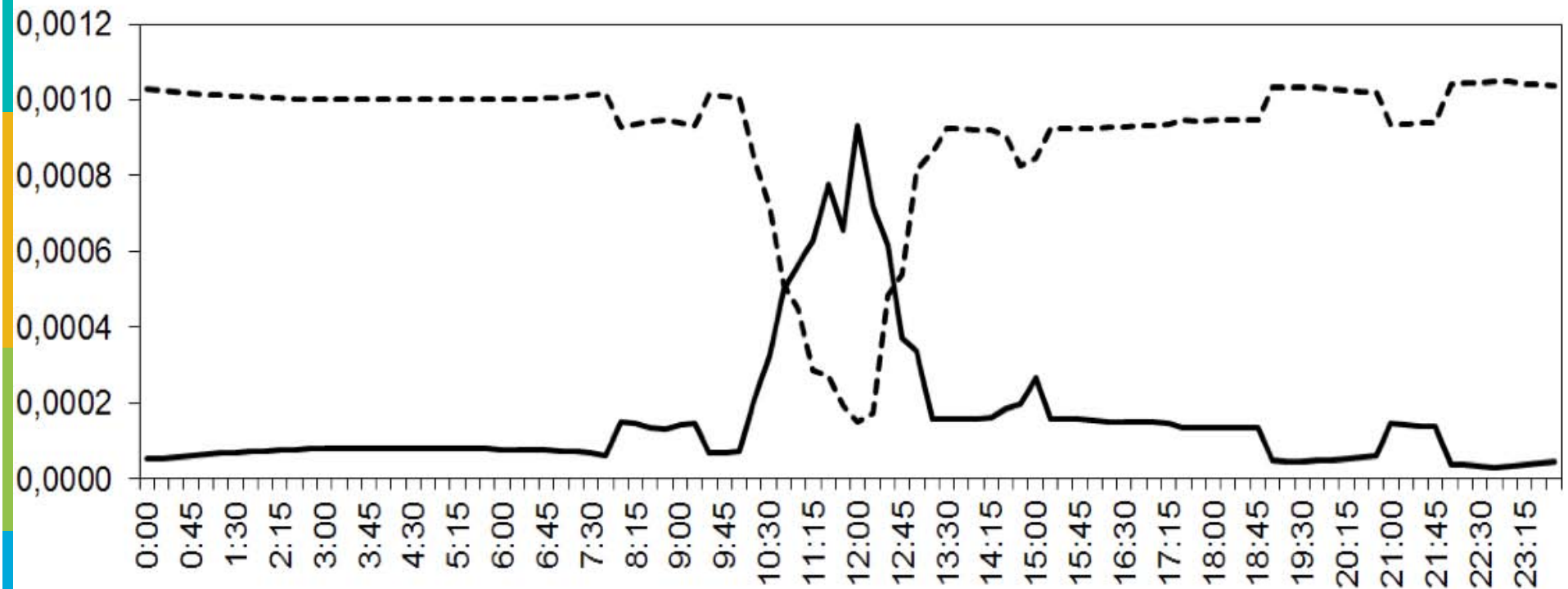
Cruzamento: um ponto, prob. 0.7

Restrições: penalização da *fitness*

Comportamento elitista (baseado na distância de cada indivíduo a um ponto meta-óptimo)

Possibilidade de introduzir interativamente níveis de aspiração e de reserva

Controlo adaptativo da probabilidade de mutação



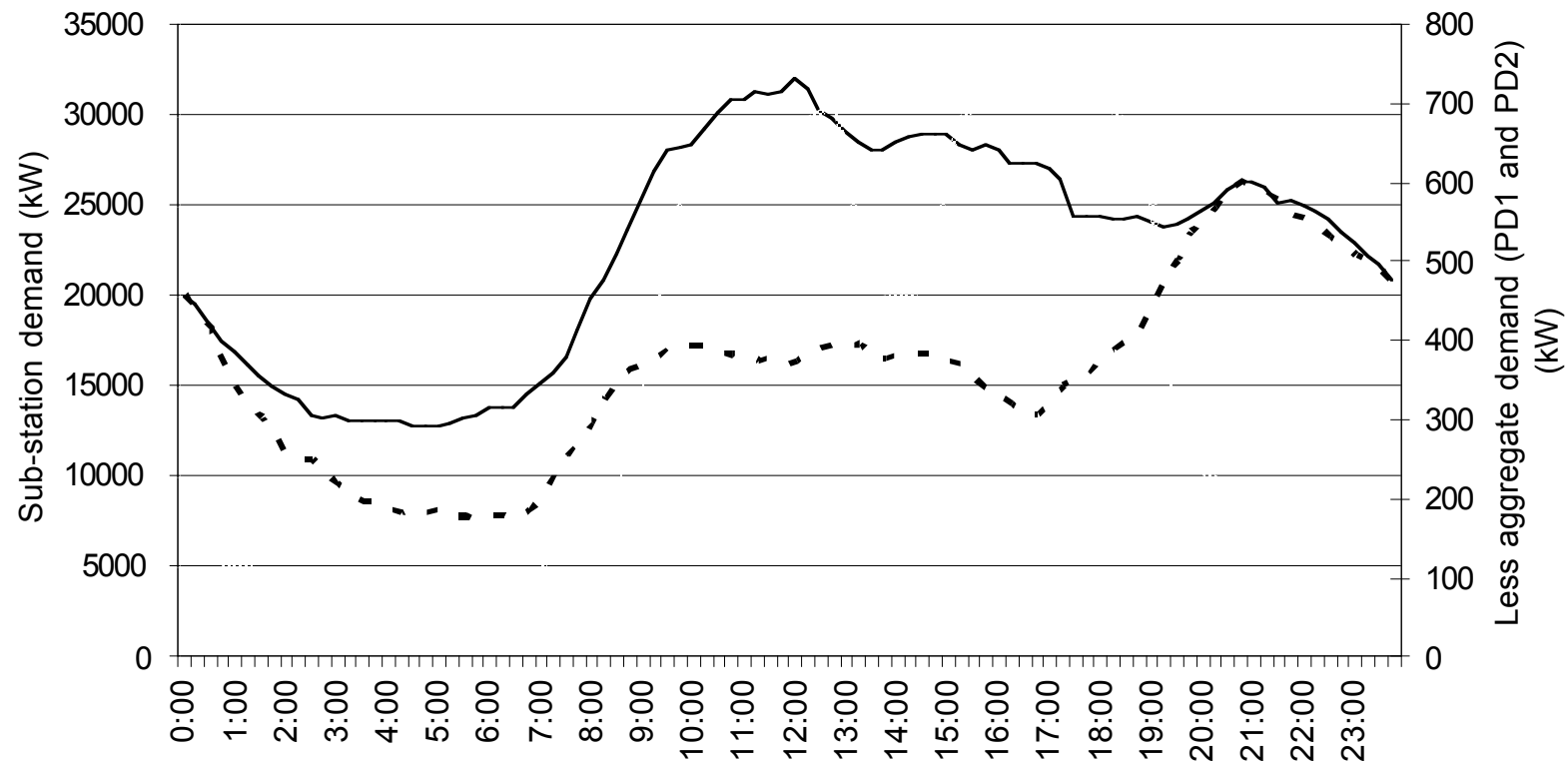
Algoritmo genético multi-objetivo

1860 cargas (1415 EWH + 445 AC) em 20 grupos

Limiares de conforto associados às cargas controláveis: 45°C para AQS e 25°C para a temperatura ambiente

Dia útil, verão; Ponta: 31632 kW (SE), 602 kW (PT1), 707 kW (PT2)

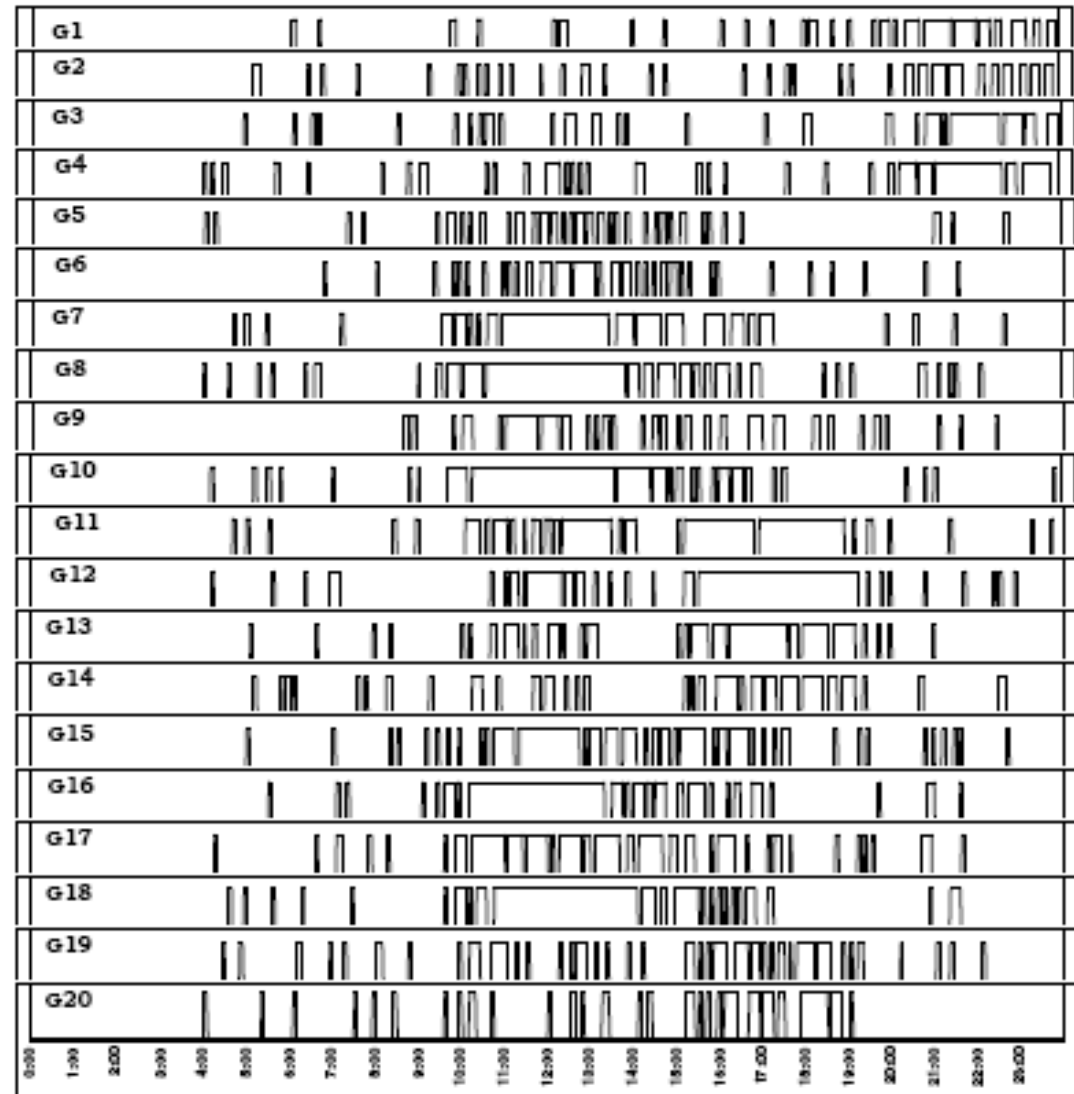
Demand at the three aggregation levels (PA- full; PD1- dotted; PD2- pattern)



Algoritmo genético multi-objetivo

Funções objetivo:

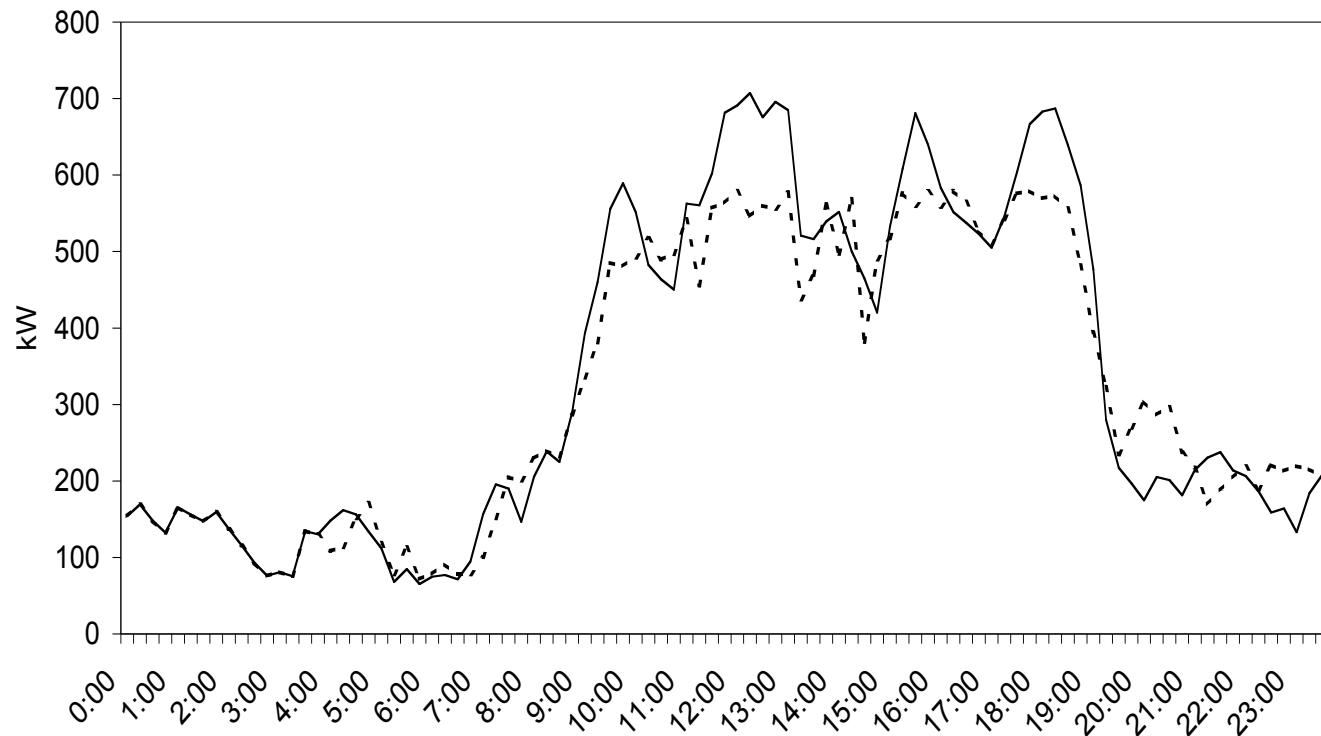
- SE: 30901 kW
- PT1: 562 kW
- PT2: 579 kW,
- tempo total de violação do limiar de conforto: 0
- máximo intervalo contínuo de violação do limiar de conforto: 0
- factor de perdas: 0.53518
- lucros: 7335 k€



Algoritmo genético multi-objetivo

- Diagrama de carga no PT2 sem e com ações de controlo
- Redução da ponta: no PT2 = 128 kW (43.8% da carga sob controlo no período de ponta, 18.1% da ponta); na SE = 731 kW (33.6% da carga sob controlo, 2.31% da ponta).

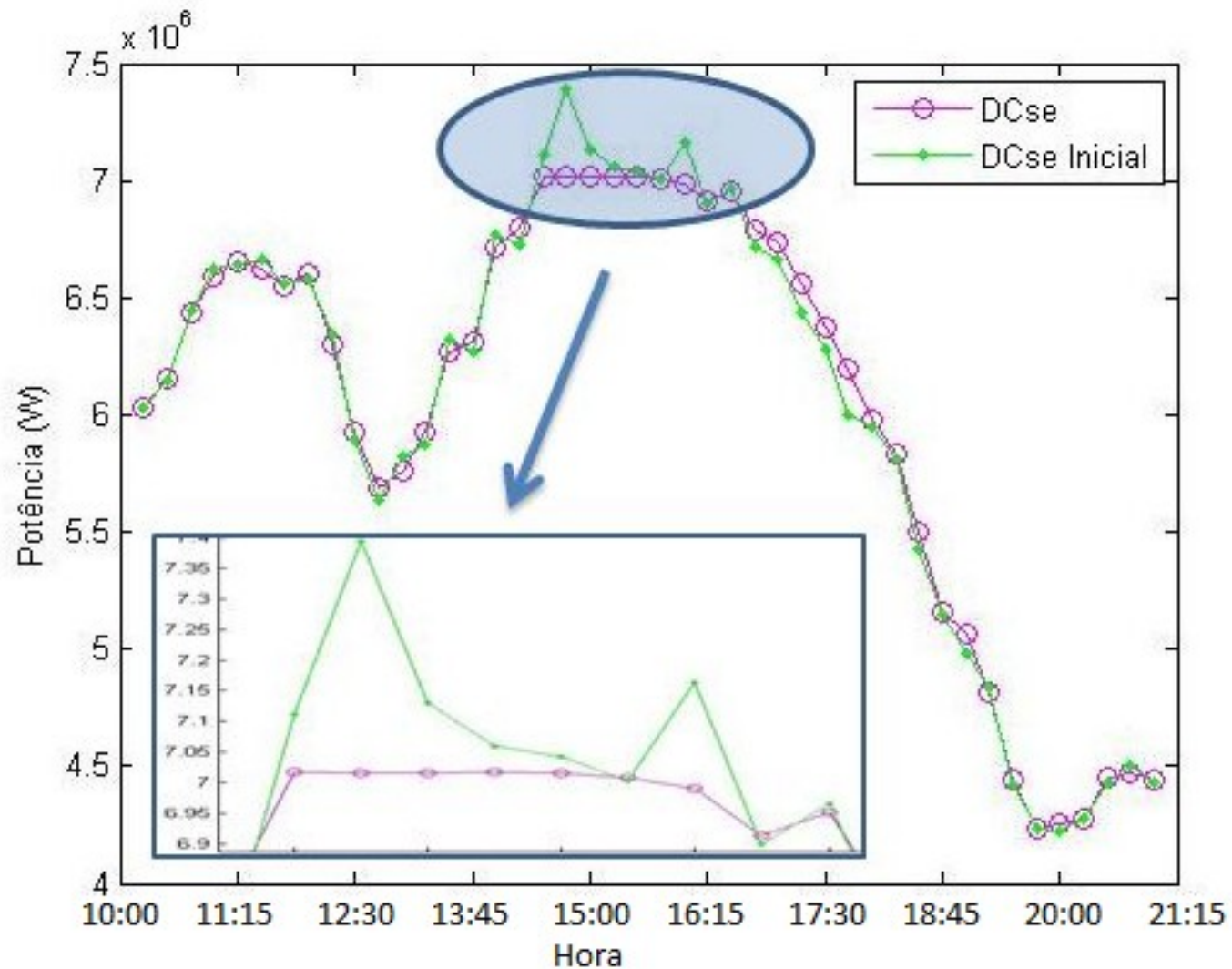
Demand at PT2: without (thin) and with (dotted) power curtailments



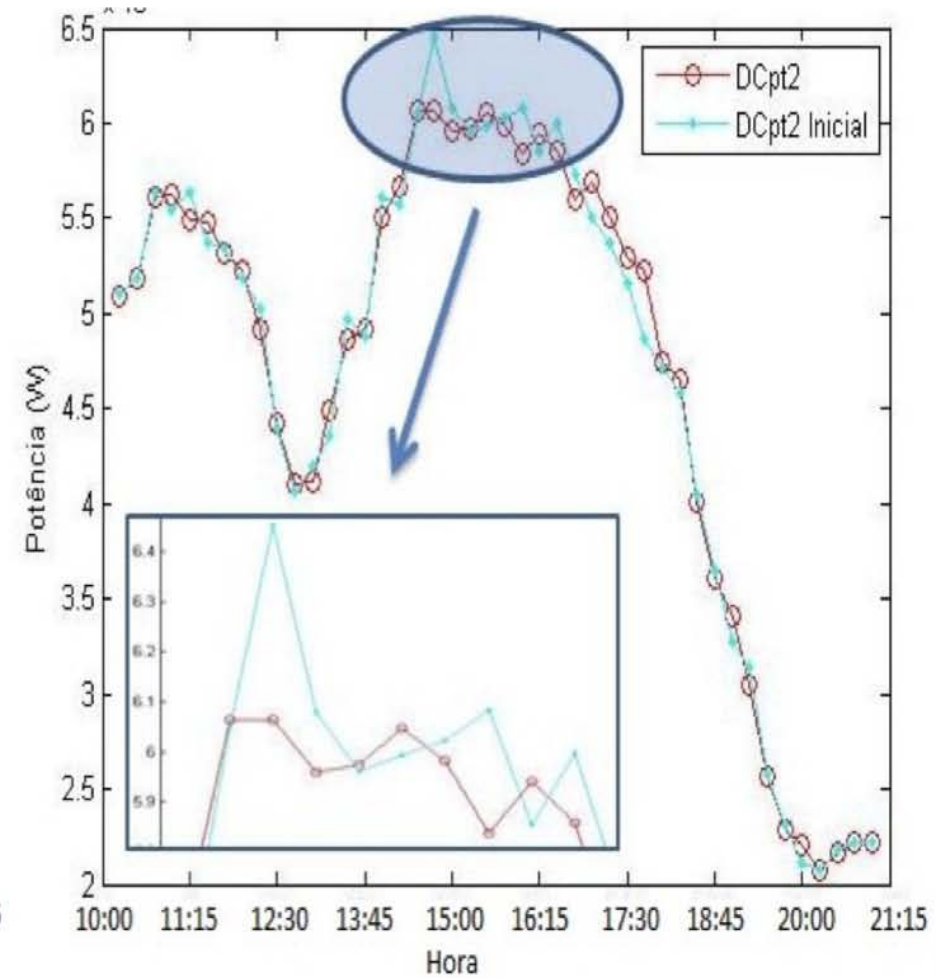
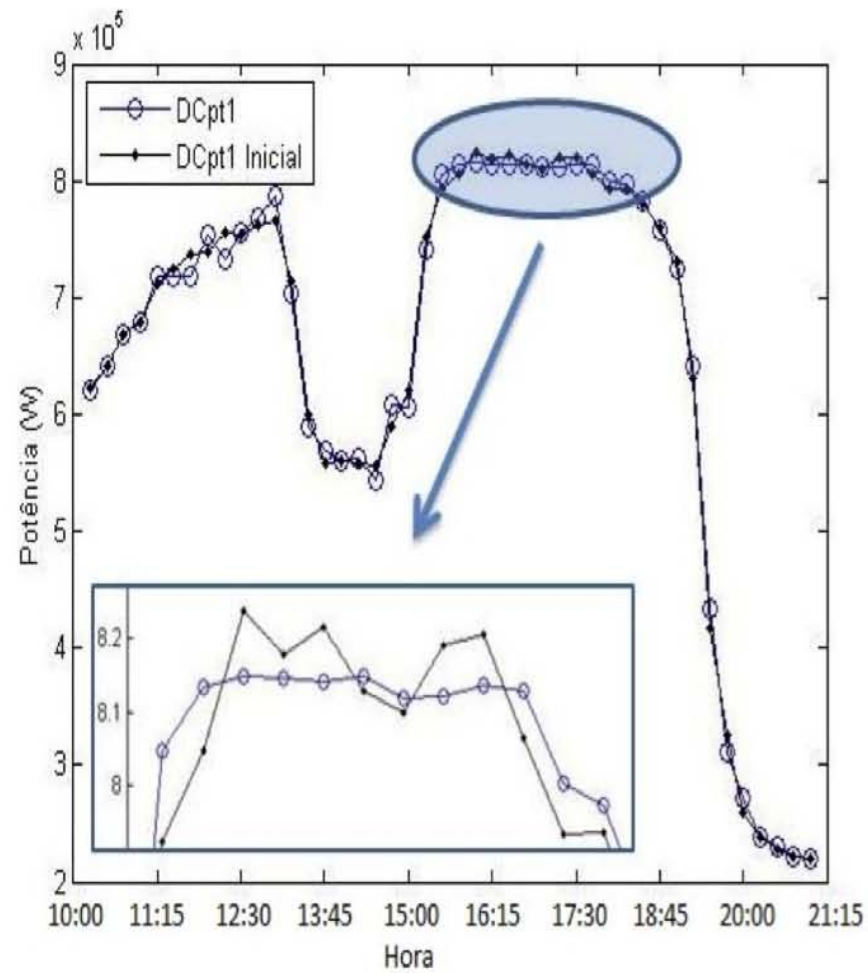
Controlo directo de cargas + reparametrização

Grupo	Nº de ACs	Potência (kW)	BMmin (oC)	BMmax (oC)	PT/SE
1	15	1,6	22,5	23	PT2
2	20	2,8	23	23,5	PT1
3	30	2,7	22,5	23	SE
4	20	4	23	23,5	SE
5	25	1,6	23,5	24	SE
6	20	1,4	23,5	24	SE
7	35	2,4	22	22,5	SE
8	20	2,4	23	23,5	SE
9	20	4	22,5	23	PT1
10	30	3,8	23	23,5	SE
11	15	1,8	23,5	24	PT2
12	25	8	22	22,5	SE
13	30	2,4	23,5	24	SE
14	20	3,4	22,5	23	PT2
15	30	2,4	23,5	24	SE
16	25	1,6	23,5	24	SE
17	10	2,4	23	23,5	PT1
18	15	1,4	23,5	24	PT1
19	15	1,8	23,5	24	PT2
20	15	1,6	22,5	23	PT1
21	10	1,8	23,5	24	PT2
22	15	1,4	23,5	24	PT1
23	20	1,4	23,5	24	SE
24	20	2,4	23	23,5	SE

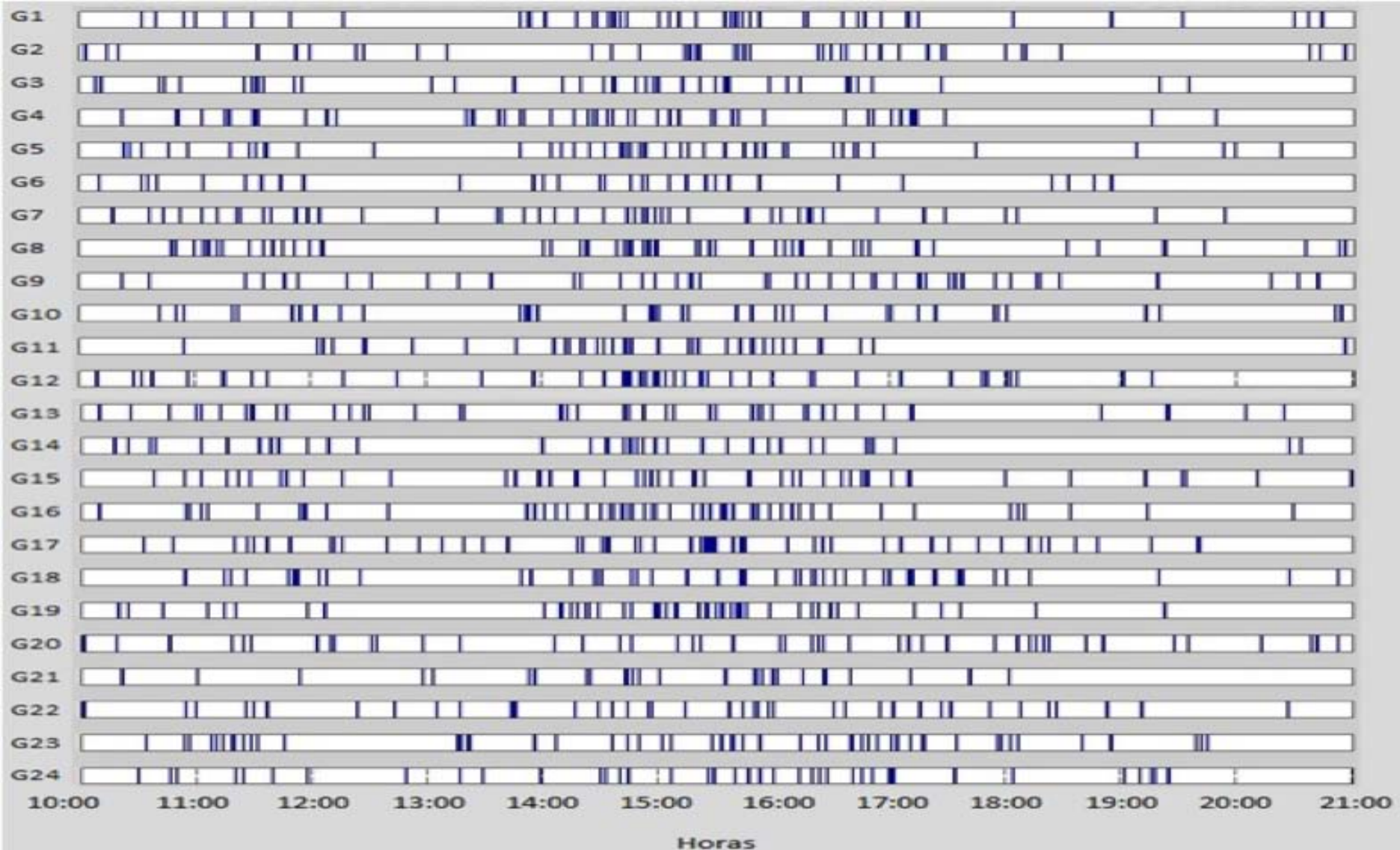
Acções de controlo direto de cargas



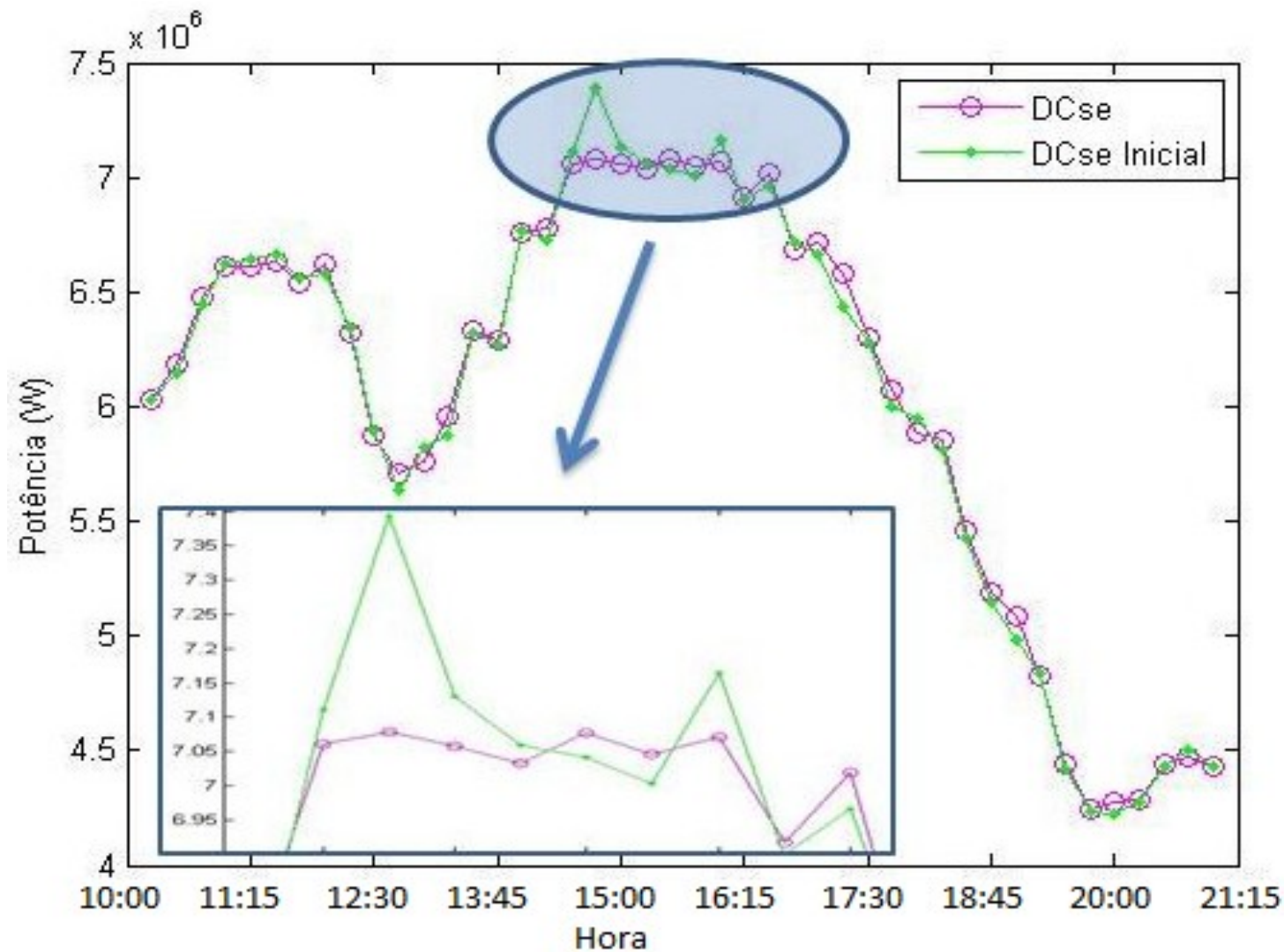
Acções de controlo direto de cargas



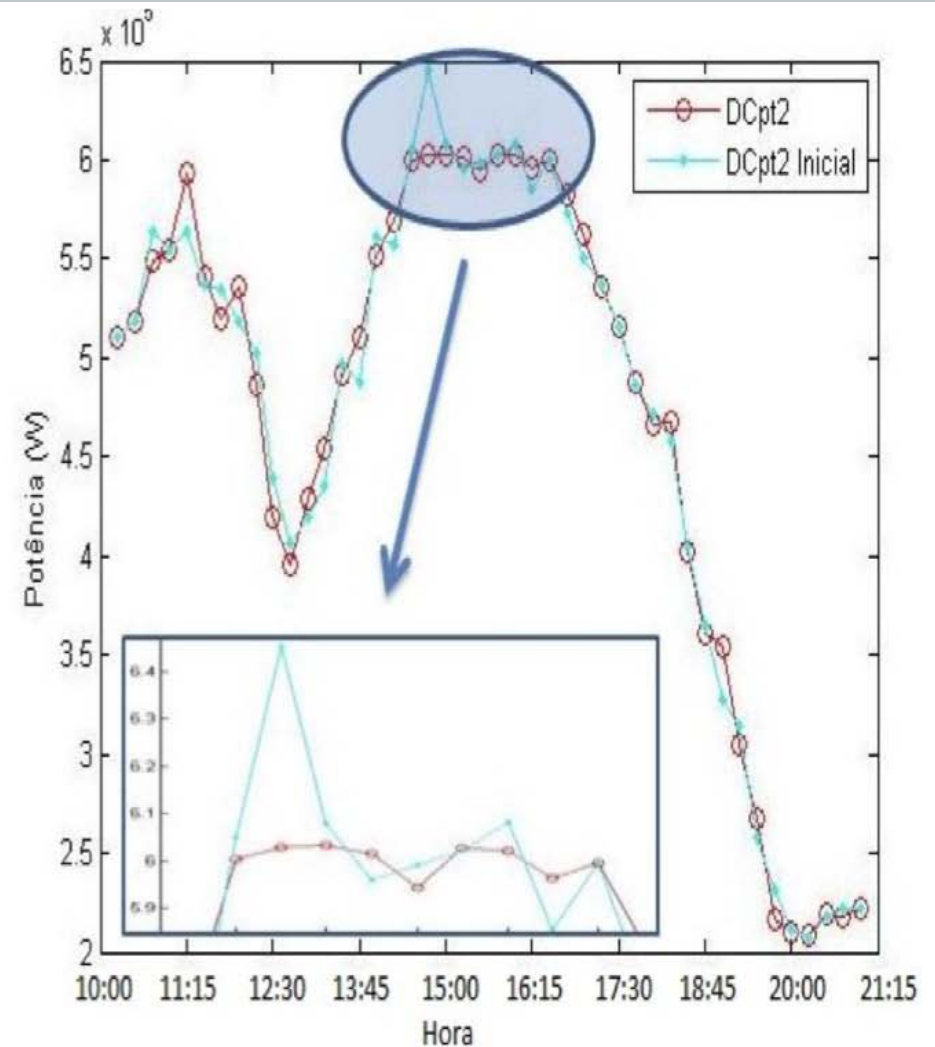
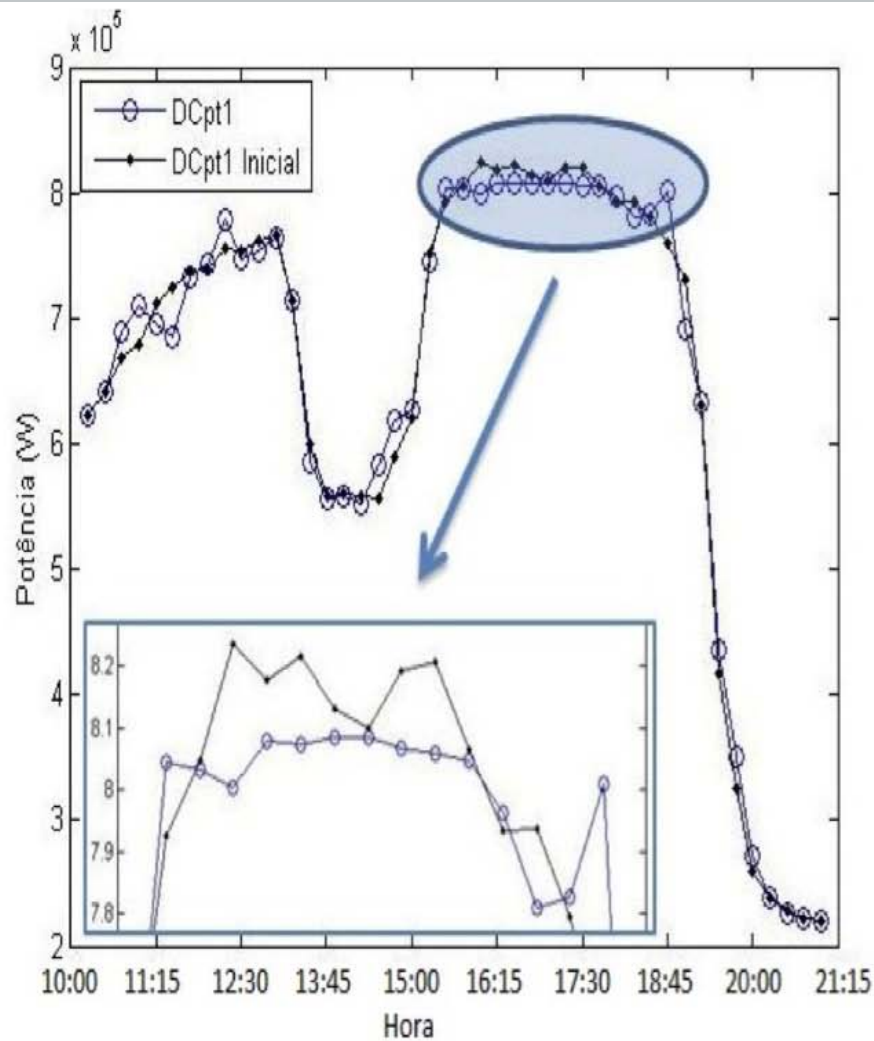
Acções de controlo direto de cargas



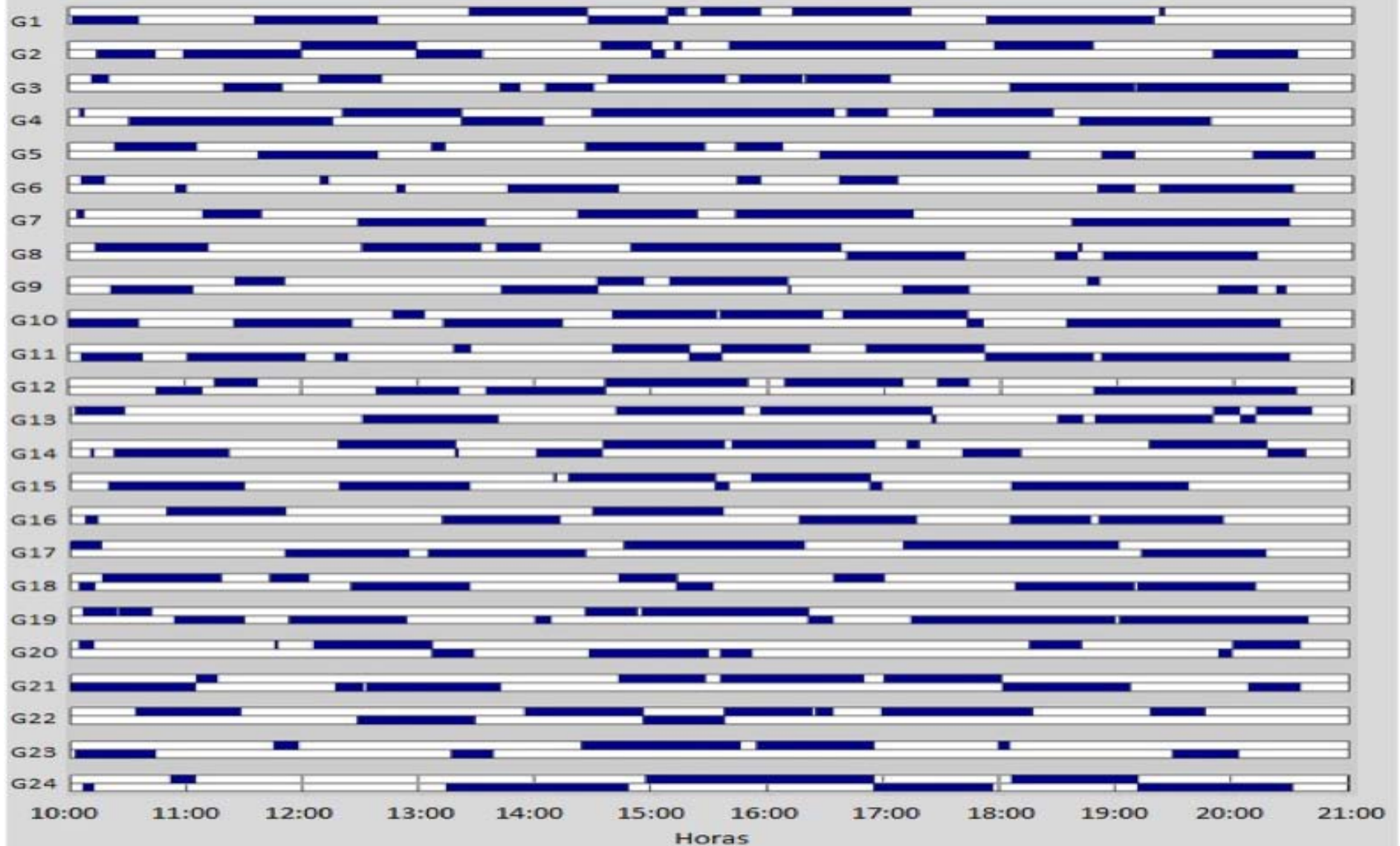
Reparametrização da banda morta



Reparametrização da banda morta



Reparametrização da banda morta



Gestão de cargas (residenciais)

Optimizar o escalonamento de cargas eléctricas (residenciais) de acordo com sinais da rede + restrições/preferências definidas pelo utilizador

Minimizar a conta de eletricidade, tendo em conta as preferências e assegurando a qualidade dos serviços de energia

Restrições:

- nível de potência contratada,
- preferências relativas aos períodos admissíveis/preferidos para o funcionamento de cada carga,
- energia “usável” em cada período de tempo para ter em conta variações na carga base (não controlável).

Gestão de cargas (residenciais)

Tarifas dinâmicas (num contexto *smart grid*)

Atitude proativa do consumidor residencial típico para otimizar o uso de energia eléctrica face a variáveis dinâmicas

preços da eletricidade

condições climatéricas

requisitos de conforto

disponibilidade de geração local

armazenamento (VE)

Gestão de cargas (residenciais)

Principal objetivo do escalonamento de cargas:

- ajudar os consumidores a tirar partido de diferentes utilizações dos serviços de energia para reduzir a conta de eletricidade através da implementação de ações de resposta da demanda

Ações de controlo sobre cargas controláveis → atrasar ou antecipar os ciclos de funcionamento das cargas, respeitando as preferências dos utilizadores.

Gestão de cargas (residenciais)

Carga não disponível para ações de controlo

Cargas controláveis

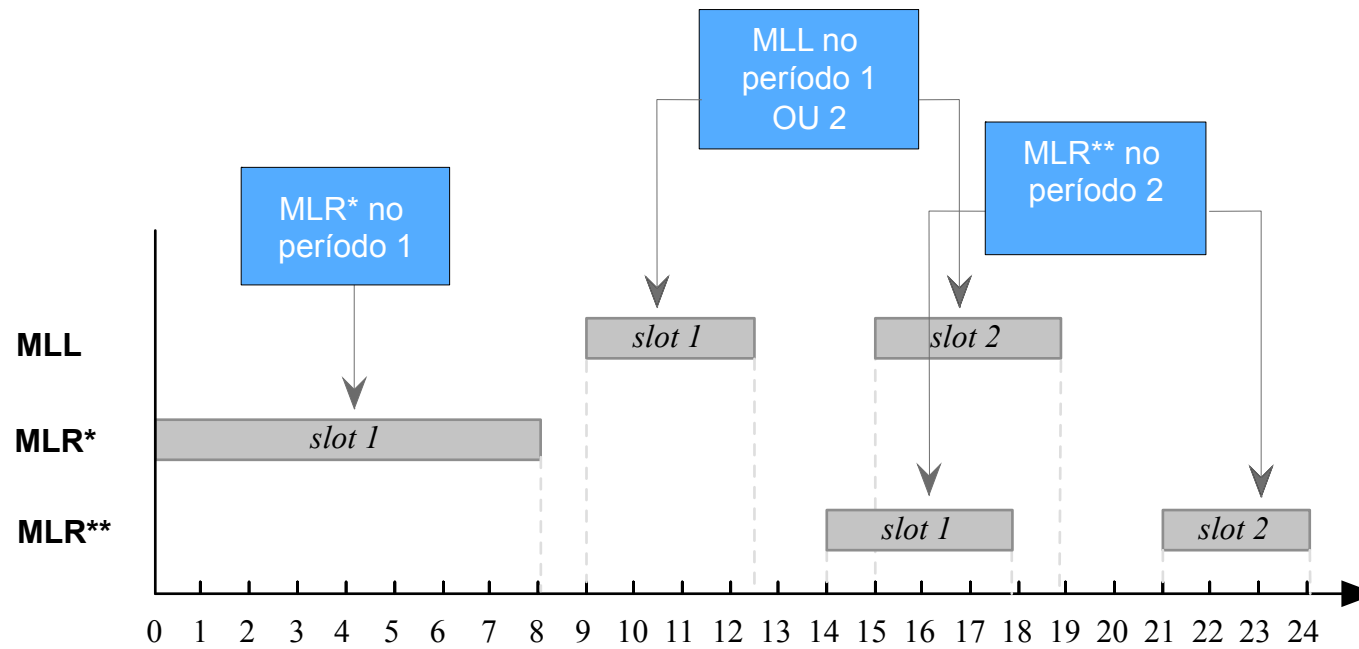
- interrompíveis
- deslocáveis
- reparametrizáveis

Variação do preço €/kWh

Vários níveis de potência contratada

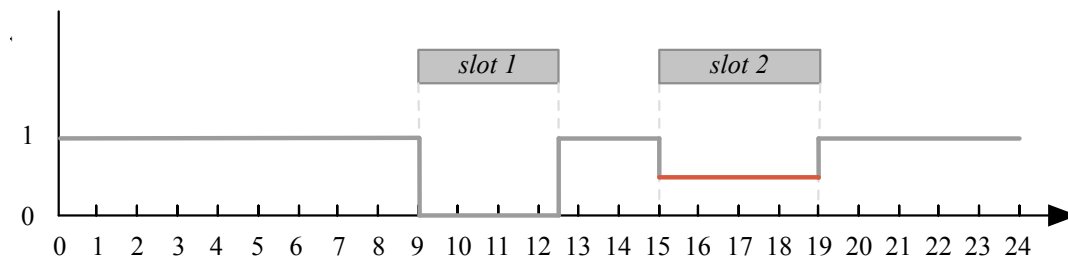
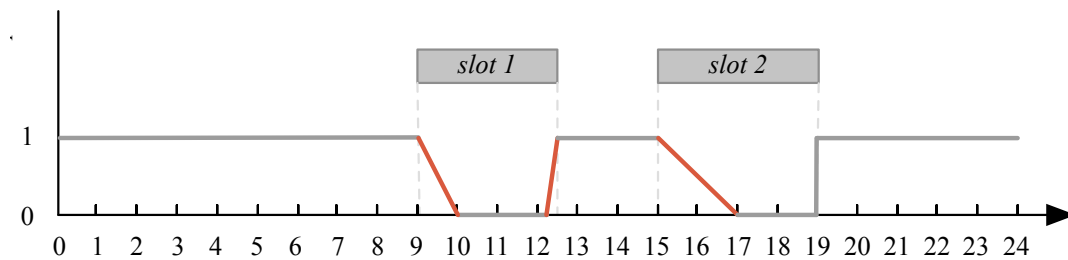
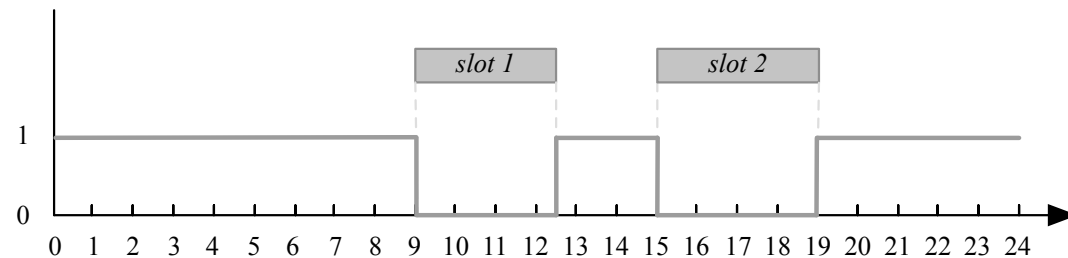
Preferências sobre períodos de tempo de funcionamento

Gestão de cargas (residenciais)



Gestão de cargas (residenciais)

Penalidades associadas às preferências sobre períodos de tempo de utilização de cada carga



Gestão de cargas (residenciais)

Função objectivo =

€ energia consumida pelas cargas controláveis +

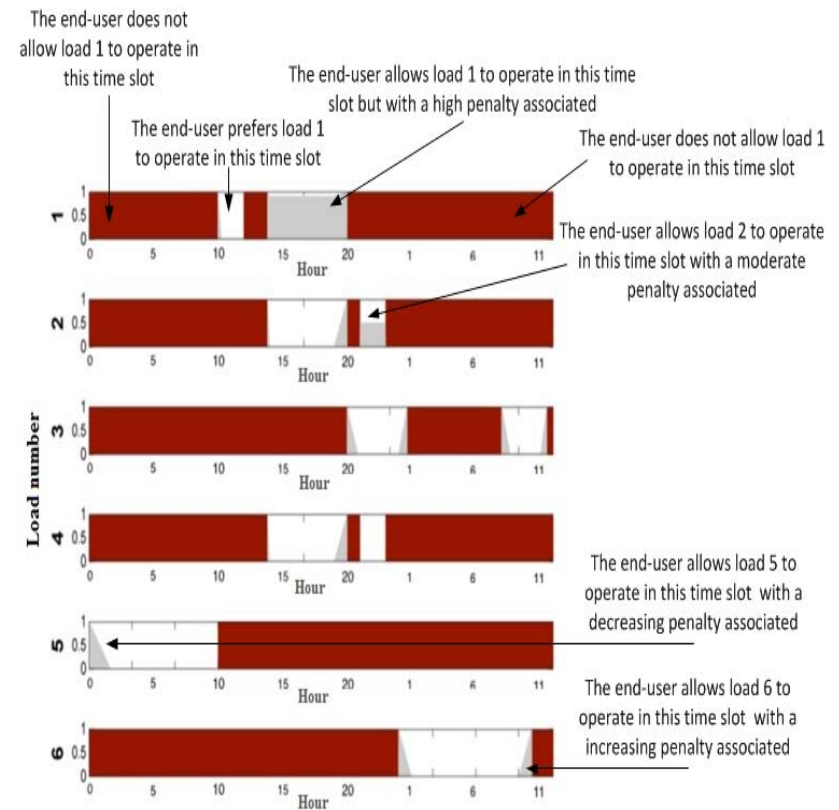
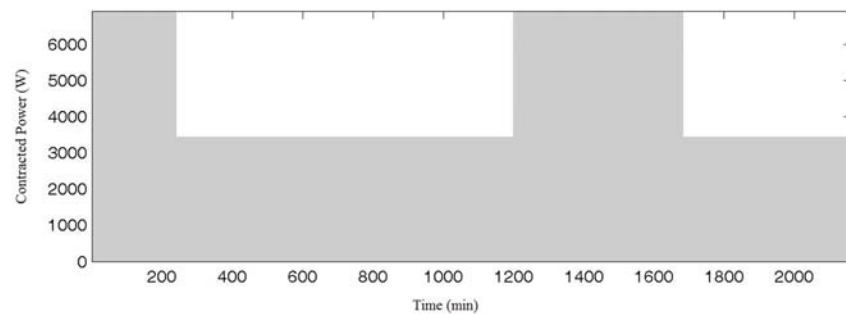
€ penalidade associada às preferências +

€ penalidade relativa a (potência contratada – ponta) +

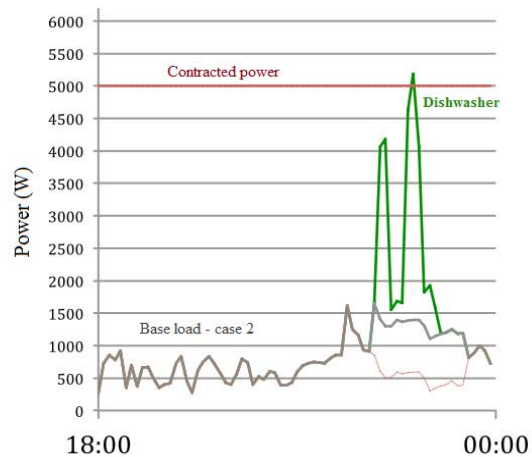
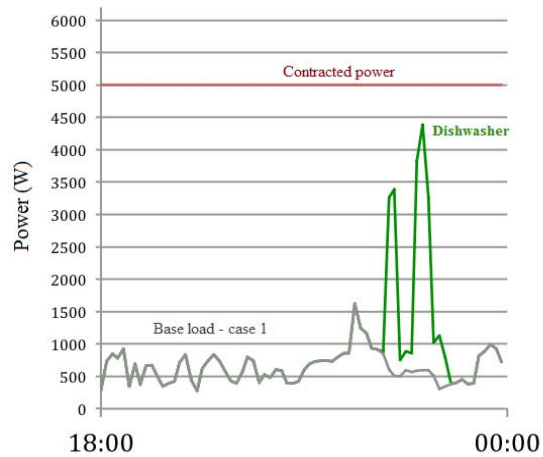
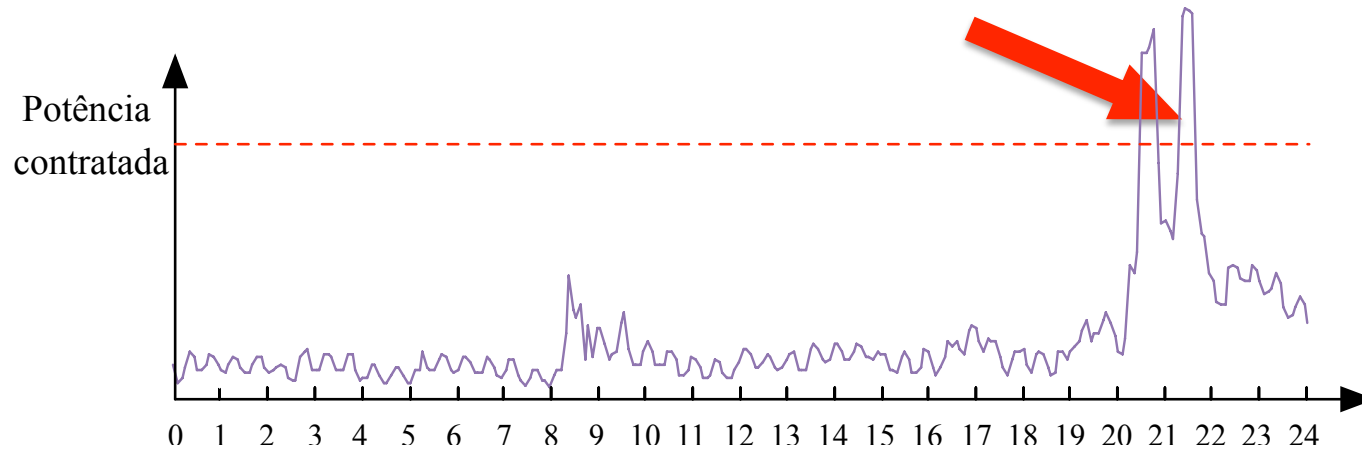
€ penalidade relativa a energia “usável” em cada período

de tempo

Gestão de cargas (residenciais)

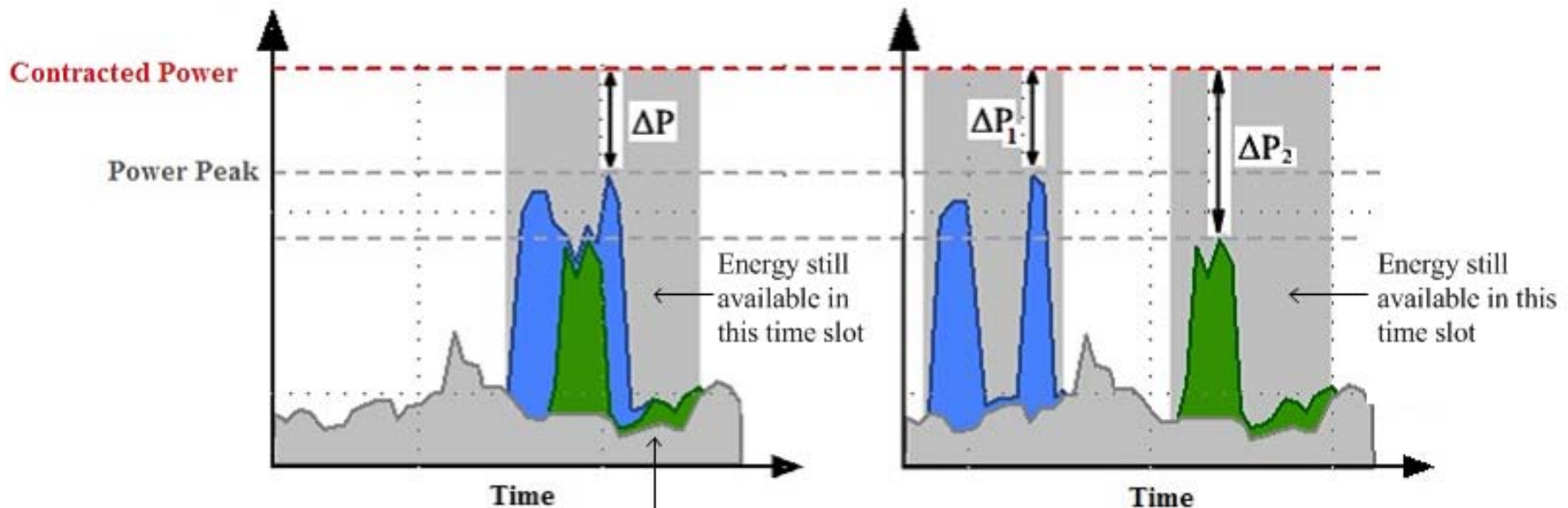


Gestão de cargas (residenciais)



Varição da carga base (não controlável) → interrupção dos serviços de energia (solução não admissível)

Gestão de cargas (residenciais)



If there is a significant increase in the base load, the contracted power may be exceeded. To avoid that situation, there is a penalty associated to ΔP . The penalty will increase with the decrease of ΔP .

There is a penalty associated to the energy still available in the time slot where a given working cycle was allocated. This penalty will increase with the decrease of the available energy. The aim is to avoid interruptions in the energy services provided if the base load varies abruptly.

AG MO para gestão de cargas cíclicas

Principais características

Representação: *string* de inteiros (minuto em que o ciclo tem início)

Tamanho da população: 200

Seleção: torneio ternário

Cruzamento: máscara binária, prob. 0.5

Mutação: desvio max 5 min., prob. 0.8

Elitismo: 5% pop. (substituem indivíduos com pior *fitness*)

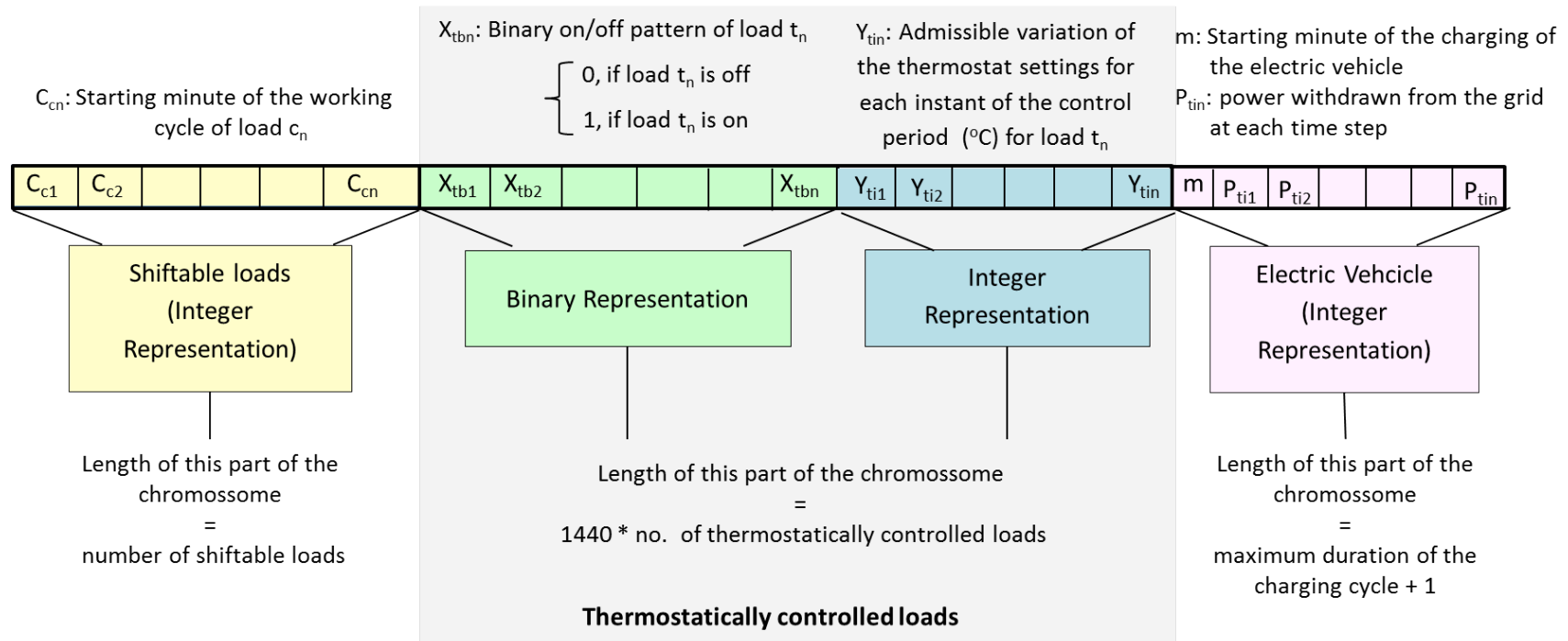
Load	1	2	3	4
Crossover?	Yes	No	Yes	Yes
Parent 1	1200	30	550	400
Parent 2	1189	49	589	369
Child 1	1189	30	589	369
Child 2	1200	49	550	400

Loads	1	2	3	4
Child 1*	1189	25	589	369
Child 2*	1200	49	555	400

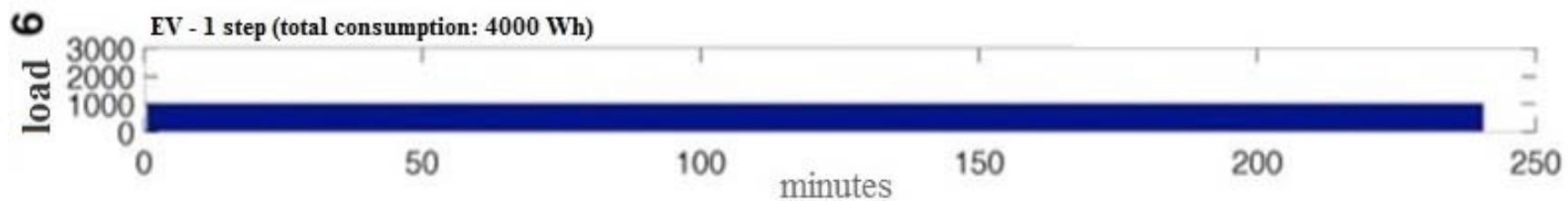
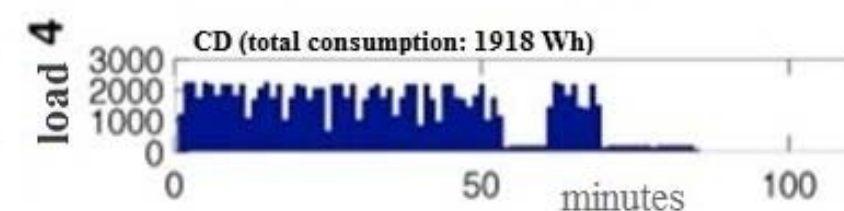
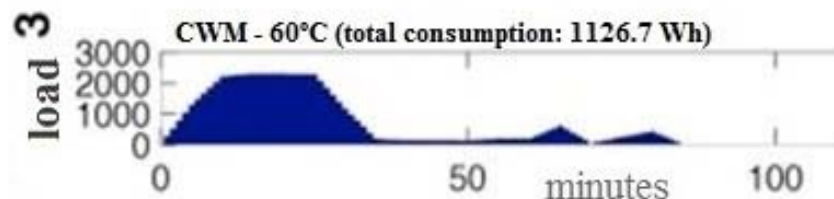
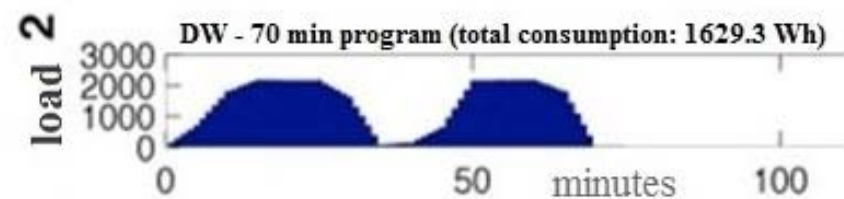
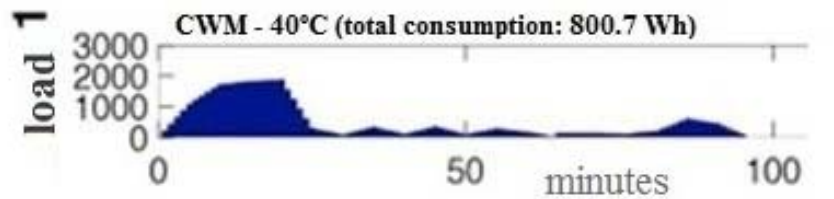
AG MO para gestão de cargas cíclicas

Nova representação:

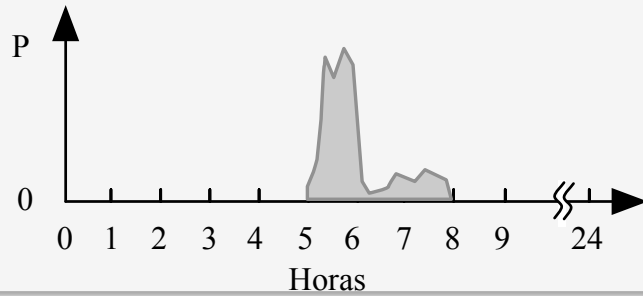
- cargas deslocáveis (minuto de início)
- cargas termostáticas (padrão on/off ou variação do ponto de operação)
- VE (minuto de início e nível de potência de carregamento)



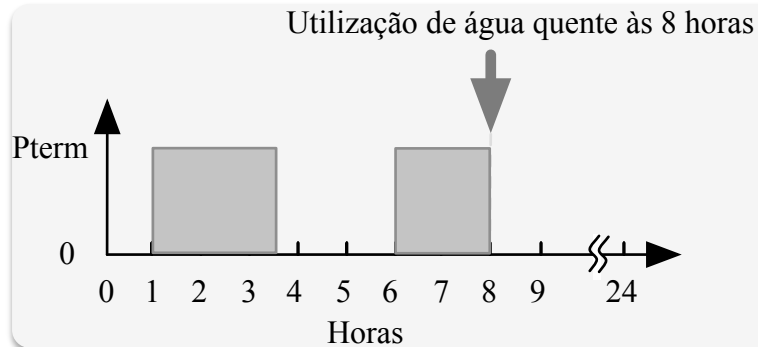
Gestão de cargas (residenciais)



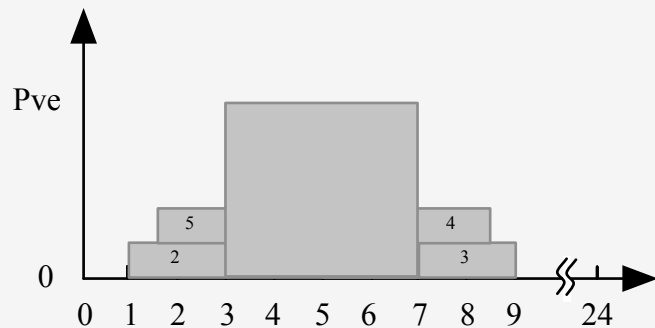
Gestão de cargas (residenciais)



- MLR
- MSR
- MLL

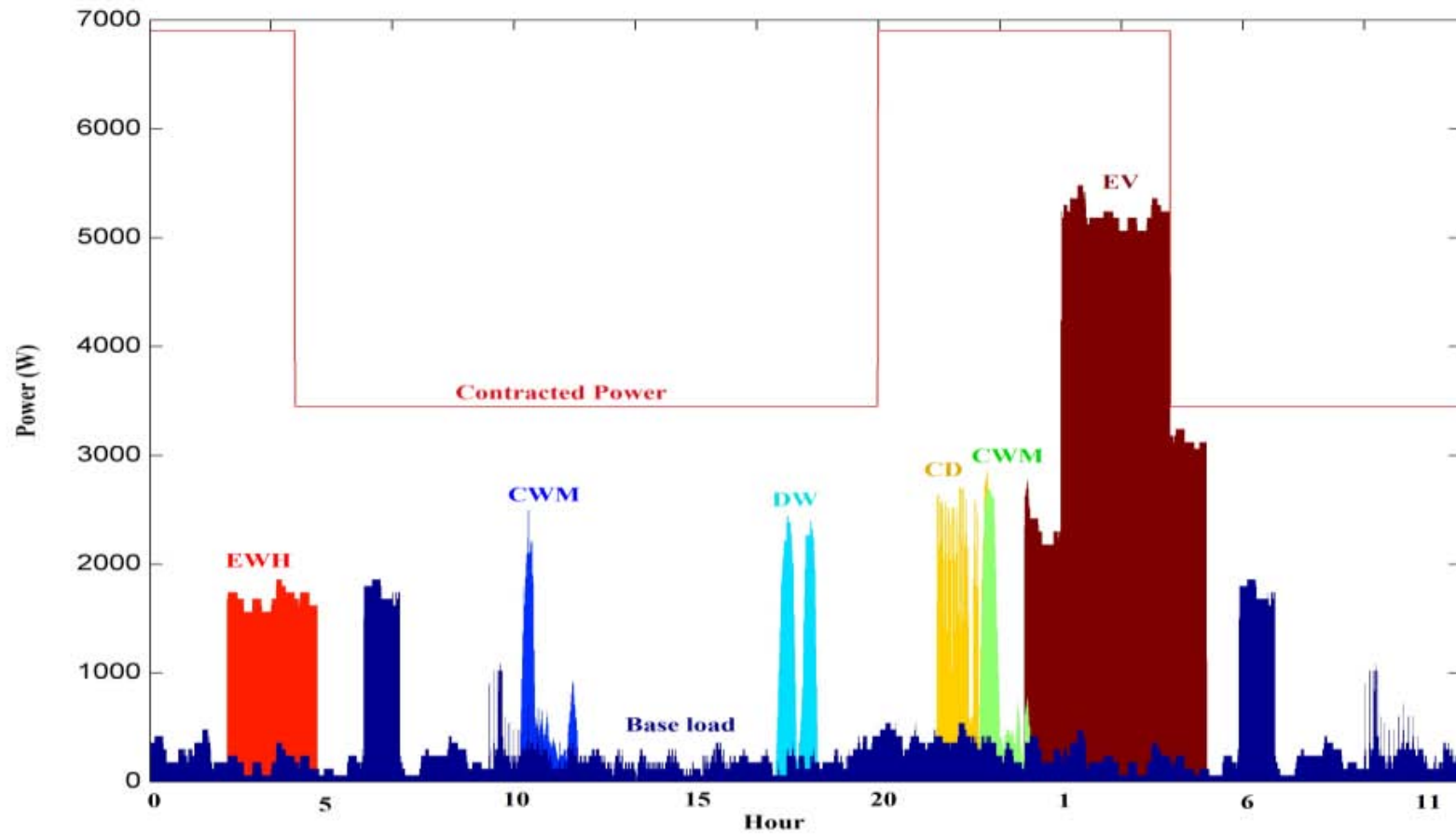


- EHW



- VE

Gestão de cargas (residenciais)



Agregador

Agregador: intermediário entre os EMS em cada casa e a rede para coordenar a disseminação em larga escala de DR

Providenciar serviços de sistema → aumentar a eficiência, assegurar maior segurança e fiabilidade e qualidade de serviço

Usar a flexibilidade dos recursos do lado da procura e as restrições técnicas da rede e das cargas controláveis → contribuir para o equilíbrio oferta/procura e mitigar a intermitência das fontes renováveis

Agregador

Cluster de utilizadores com características semelhantes: potência contratada, perfil de uso, localização, ...

Baseline perfil de consumo de cada *cluster* + resposta a sinais de disponibilidade/quantidade enviados pelo agregador

Função objetivo: maximizar os lucros do agregador, resultantes de “vender” à rede a flexibilidade dos *clusters* de utilizadores e recompensar os consumidores participantes (pelas cargas desviadas/desligadas de acordo com os pedidos)

Agregador

Modelo de programação inteira mista

Variáveis binárias

- enviar ou não uma oferta à rede (O_t),
- enviar ou não um pedido a cada *cluster* (A_t),

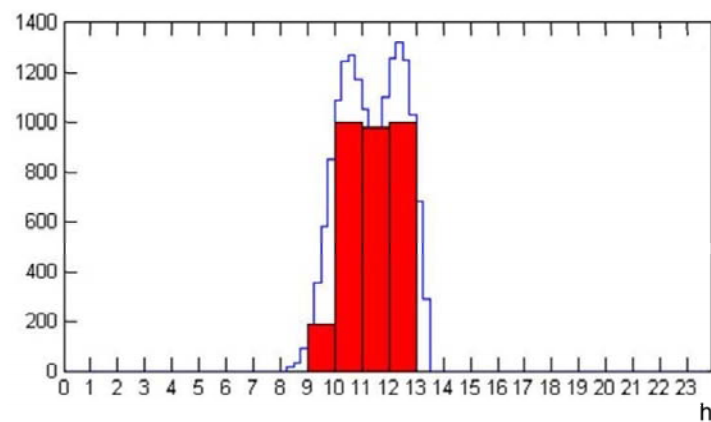
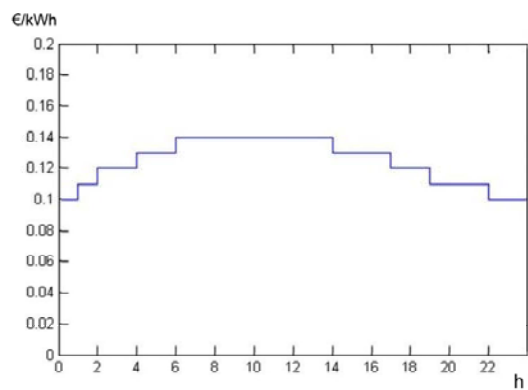
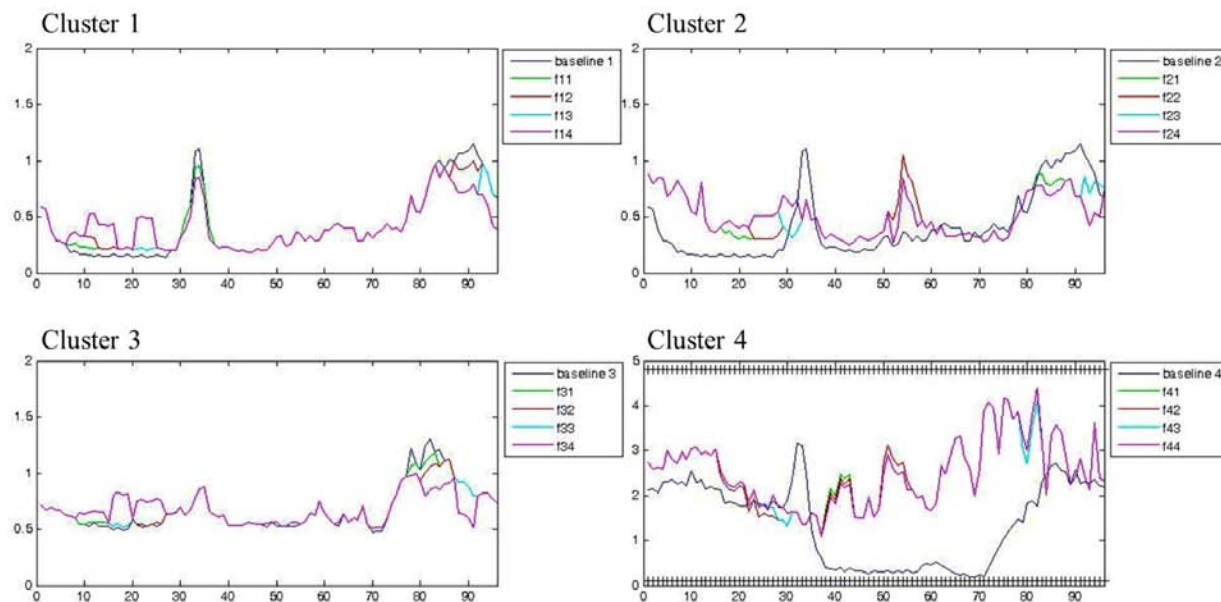
Variáveis contínuas

- quantidade de energia que o agregador pode oferecer à rede (E_t)
- diferença entre o consumo *baseline* de cada cluster e a sua função de resposta (D_t)

Restrições técnicas e funcionais

Sol. k	O_1	...	O_t	...	O_T	E_1	...	E_t	...	E_T	A_{10}	A_{20}	...	A_{cr}	...	A_{CR}	D_1	...	D_t	...	D_T
-----------	-------	-----	-------	-----	-------	-------	-----	-------	-----	-------	----------	----------	-----	----------	-----	----------	-------	-----	-------	-----	-------

Agregador



Sumário

Modelos e métodos para otimizar a gestão da demanda de energia elétrica relevantes num contexto *smart grid*

Natureza combinatória dos problemas

Múltiplos eixos de avaliação

- económicos
- técnicos
- qualidade de serviço

Desafios para os modelos e métodos de PO

Referências

- A. Soares, A. Gomes, C. H. Antunes, H. Cardoso. “Domestic load scheduling using genetic algorithms”, In: A. I. Esparcia-Alcázar (Ed.), “Applications of Evolutionary Computation”, Proc. 16th European Conference, EvoApplications 2013, Vienna, Austria, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7835, 142-151, 2013.
- A. Gomes, J. Martinho, C. H. Antunes. “A physically-based model for simulating inverter type air conditioners/heat pumps”, Energy, vol. 50, 110-119, 2013.
- A. Gomes, C. H. Antunes, J. Martinho, E. Oliveira. “Otimização multiobjetivo com algoritmos evolutivos – uma aplicação no setor elétrico”. Actas Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa, Rio de Janeiro, Brazil, September 2012.
- A. Soares, M. Lopes, C. H. Antunes, A. Gomes, N. Martins, “Smart(er) Energy Management Systems in Smart(er) Grids”, Proc. of the Int. Workshop on Energy Efficiency for a More Sustainable World, Ponta Delgada, Portugal, September 2012.
- M. Lopes, C. H. Antunes, A. R. Soares, A. Carreiro et al. “An automated energy management system in a smart grid context”, 2012 IEEE ISSST – Int. Symposium on Sustainable Systems and Technology, Boston, USA, May 2012.
- A. Soares, A. Gomes, C. H. Antunes. “Integrated management of residential energy resources”, EPJ Web of Conferences, vol. 33, 05005, 2012.

Referências

- A. Gomes, C. H. Antunes, E. Oliveira. “Direct load control in the perspective of an electricity retailer – a multi-objective evolutionary approach”. In: A. Gaspar Cunha, R. Takahashi, G. Schaefer, L. Costa (Eds.), “Soft Computing in Industrial Application”, Advances in Intelligent and Soft Computing, vol. 96, 13-26, Springer, 2011.
- A. Gomes, C. H. Antunes, A. G. Martins. “Improving the responsiveness of NSGA-II using an adaptive mutation operator – a case study”. International Journal of Advanced Intelligence Paradigms, vol. 2, no. 1, 4-18, 2010.
- A. Gomes, C. H. Antunes, A. G. Martins. “Physically-Based Load Demand Models for Assessing Electric Load Control Actions”, 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, July 2009.
- A. Gomes, C. H. Antunes, A. G. Martins. “Design of an adaptive mutation operator in an electrical load management case study”. Computers and Operations Research, vol. 35, issue 9, 2925 – 2936, 2008.
- A. Gomes, C. H. Antunes, A. G. Martins. “A multiple objective approach to electric load management using an interactive evolutionary algorithm”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 3, 1004-1011, 2007.
- A. Gomes, C. H. Antunes, A. G. Martins. "A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, nº. 2, 1173-1180, May 2004.

Apoios

* INESC Coimbra

- Projeto Estratégico (Ref. FCT PEst-C/EEI/UI0308/2011)

- Projeto Energy Box – Desenvolvimento e implementação de um sistema de gestão de energia com resposta dinâmica da procura (Ref: FCT MIT/SET/0014/2009)

* Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra

* Projeto EMSURE – *Energy and Mobility for Sustainable Regions* (Ref. CENTRO-07-0224-FEDER-002004)

