



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
DSEE

Simulação Sistemas de Controle de Demanda Usando elementos de Sistemas Dinâmicos Eventos Discretos

Autor: [Francisco Eugenio de Andrade Leite](#)

**Trabalho apresentado no Curso Sistemas Dinâmicos a Eventos Discretos como parte dos
trabalhos exigidos para aprovação.**

Professor:

Rafael dos Santos Mendes

Resumo

Este trabalho faz procurar usar conceitos relacionados a teoria de sistema dinâmicos a eventos discretos na simulação do controle da demanda de energia, tendo por base que a carga elétrica em última instância o resultado da mudança de estado ON-OFF dos aparelhos elétricos ao longo do tempo.

Abstract

This work intended to use elements of discrete events dynamical systems theory for the simulation of load control by usage of demand response controls, based on the fact that electrical load is the result of change of ON-OFF states of electrical appliances.

Sumário

| | |
|---|---------------------|
| Lista de Figuras..... | ii |
| Lista de Tabelas..... | iii |
| Lista de Siglas..... | iv |
| Introdução..... | 1 |
| 1.1 Visão Conceitual do Sistema de Potência..... | 1 |
| Controle de Demanda..... | 4 |
| 2.1 Gerenciamento da Demanda e Tarifação em Tempo Real..... | 4 |
| 2.2 Visão Geral do Simulador..... | 6 |
| Resultados de Simulação..... | 13 |
| 3.1 Curva de Carga Típica..... | 13 |
| 3.2 Ganho de Potência..... | 14 |
| 3.2.1 Apenas controle de set-point..... | 14 |
| 3.2.2 Apenas Controle de Preço (brando)..... | 15 |
| 3.2.3 Apenas Controle de Preço (Rígido)..... | 16 |
| 3.3 Repique de Carga..... | 19 |
| Conclusão..... | 20 |
| Referências Bibliográficas..... | 21 |
| Apêndice..... | 21 |

Lista de Figuras

Figuras

| | |
|---|----|
| Sistema de Potência..... | 2 |
| Curva de Carga Típica para um Consumidor Residencial..... | 3 |
| Arquitetura de um sistema de gestão de demanda..... | 5 |
| Fluxograma Tarefa de Controle..... | 7 |
| Oscilação temperatura sistema termostático..... | 9 |
| Fluxograma da Casa..... | 11 |
| Fluxograma da Casa-2..... | 12 |

Lista de Tabelas

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Dados de Consumo de Equipamentos..... | 21 |
|---|----|

Lista de Siglas

| | |
|------|--|
| EMCS | Energy Management and Control System. |
| HVAC | Heating, Ventilating and Air Conditioning – neste estudo inclui-se aqui a carga de refrigeração. |
| PCT | Programmable Controlled Thermostat. |

Capítulo 1

Introdução

Este trabalho mostra resultados de simulação do controle da demanda de energia elétrica em um sistema de potência usando técnicas da teoria de sistemas dinâmicos a eventos discretos.

Particularmente procurou-se familiarizar com o uso dos modelos citados na literatura e que se adaptam aos métodos de simulação a eventos discretos, bem como fazer uma análise preliminar dos problemas para simular o fenômeno do controle de demanda de energia.

Para tanto no Capítulo 2 é apresentado o modelo adotado bem como a estrutura do programa usado para a simulação e no capítulo 3 são apresentados os resultados de simulação obtidos. No capítulo 4 é feita uma breve conclusão.

1.1 Visão Conceitual do Sistema de Potência

Sistemas de potência são tido como a mais complexa obra de engenharia feita pelo homem, influenciando em vários aspectos as sociedades humanas, desta forma é importante apresentar conceitualmente este sistema com seus principais elementos, o que é feito na Fig. 1: Sistema de Potência.

Os sistemas de energia são constituídos por macro-elementos, que por sua vez são constituídos de elementos básicos a saber:

- Centrais Elétricas
- Sistemas de transmissão
- Subestações
- Sistema de Distribuição
- Consumidores finais
- Centros de Gerenciamento e Controle do Sistema

Particularmente este trabalho focou na simulação da carga do consumidor secundário do tipo residencial, bem como no controle de demanda para este tipo de consumidor, cujo exemplo de curva de carga é mostrada

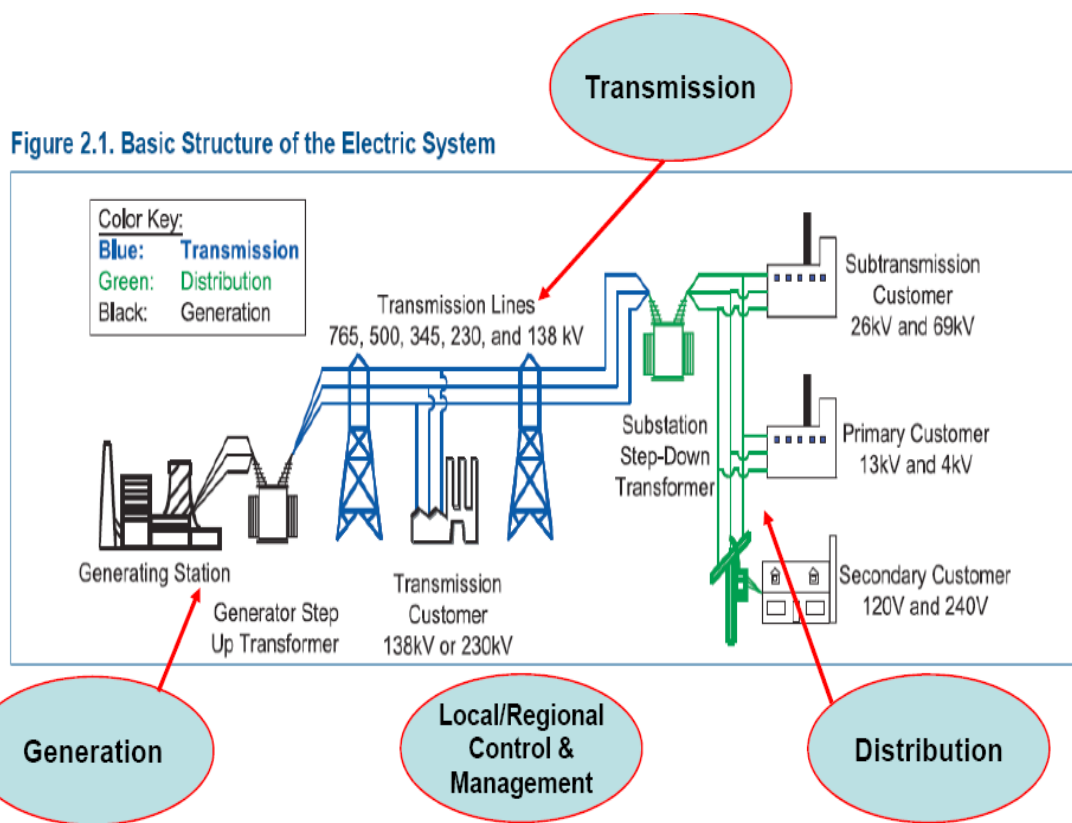


Fig. 1: Sistema de Potência

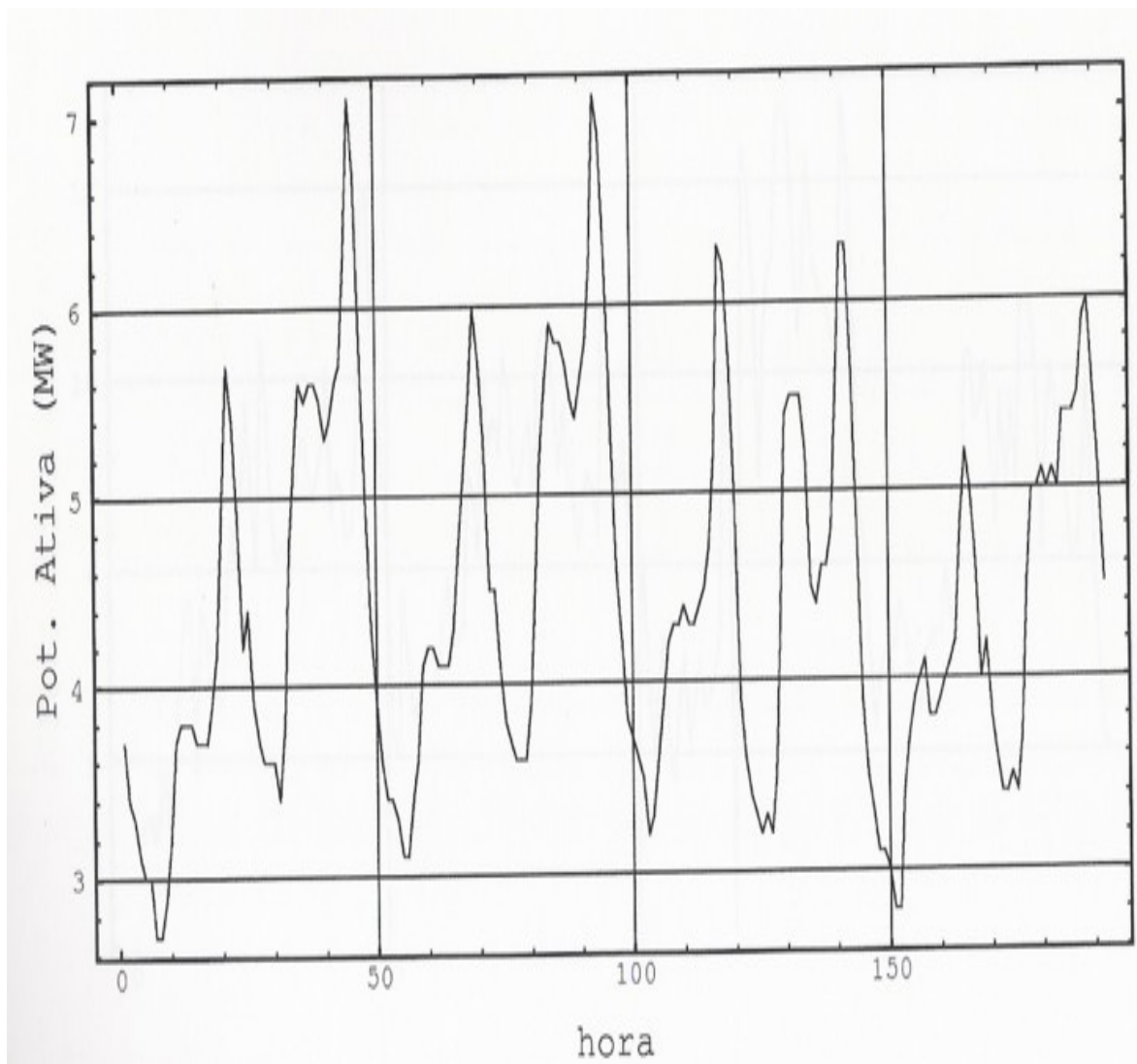


Fig. 2: Curva de Carga Típica para um Consumidor Residencial

Capítulo 2

Controle de Demanda

2.1 Gerenciamento da Demanda e Tarifação em Tempo Real

O Gerenciamento da demanda corresponde à empresa concessionária de energia ou usuário disponibilizar uma informação de controle que permita reduzir a carga consumida por uma determinada unidade residencial, comercial ou industrial, sendo os dois últimos casos os mais comuns. Essa gerência pode ser manual, quando o usuário recebe alguma mensagem da concessionária de energia para reduzir carga e ele desliga o equipamento, semi-automático, situação em que o usuário apenas permite ou não que a carga seja reduzida, a forma pela qual este usuário realiza essa interação pode ou não envolver computação móvel. Sendo que os passos seguintes para redução de carga são feitos de forma automática sem qualquer intervenção humana, a menos de algum contrato prévio, consistindo assim em um sistema pervasivo (tradicional) de tarifação. A arquitetura [PIE07] de um tal sistema é exemplificada a seguir Fig. 3: Arquitetura de um sistema de gestão de demanda. Nela pode-se notar que o usuário necessita ter algum tipo de sistema de gerência de energia EMCS, bem como acesso a internet e seu funcionamento ocorre da seguinte forma.

1. Operadora define evento de controle de carga e preço.
2. Evento de controle e preço fica disponibilizado no servidor.
3. Cliente faz um request ao servidor e obtém novo nível de preço.
4. Software no cliente executa estratégia pré-programada de acordo com preço recebido.
5. Equipamentos são operados de acordo com o programa executado.

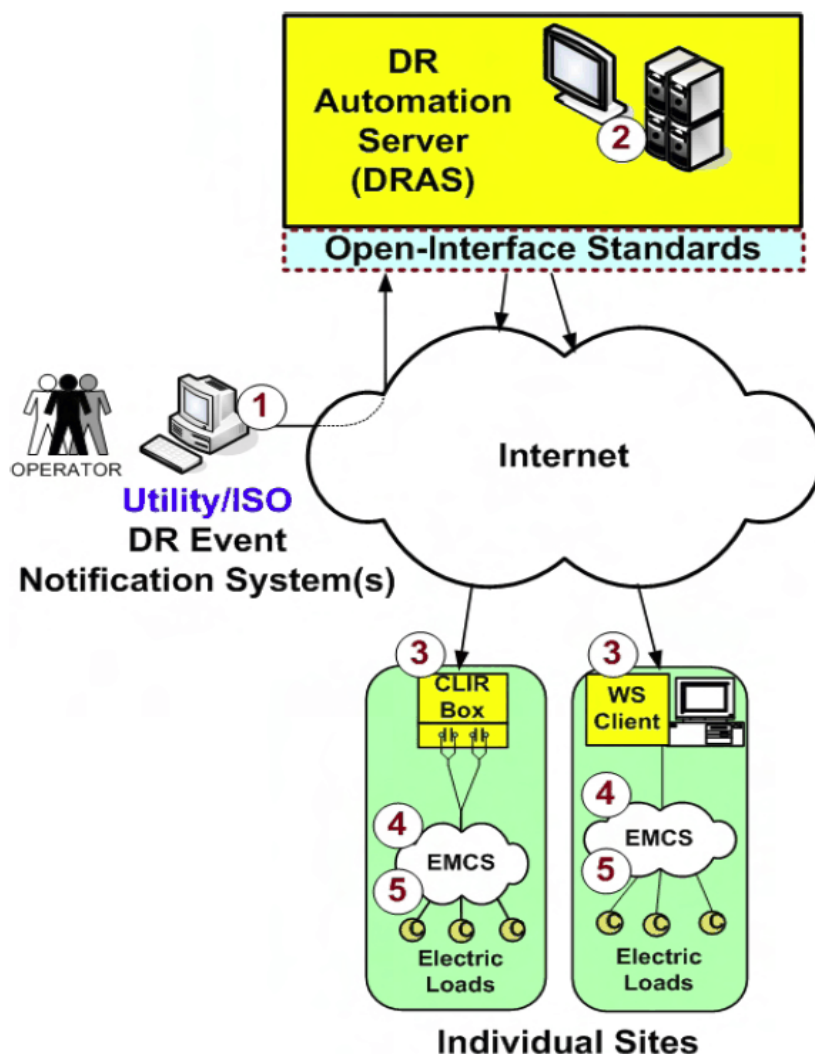


Fig. 3: Arquitetura de um sistema de gestão de demanda

Em geral os equipamentos a serem operados são os responsáveis pela iluminação e/ou condicionamento de ar e aquecimento. Para o caso da arquitetura apresentada foi observada uma redução de energia de até 14%.

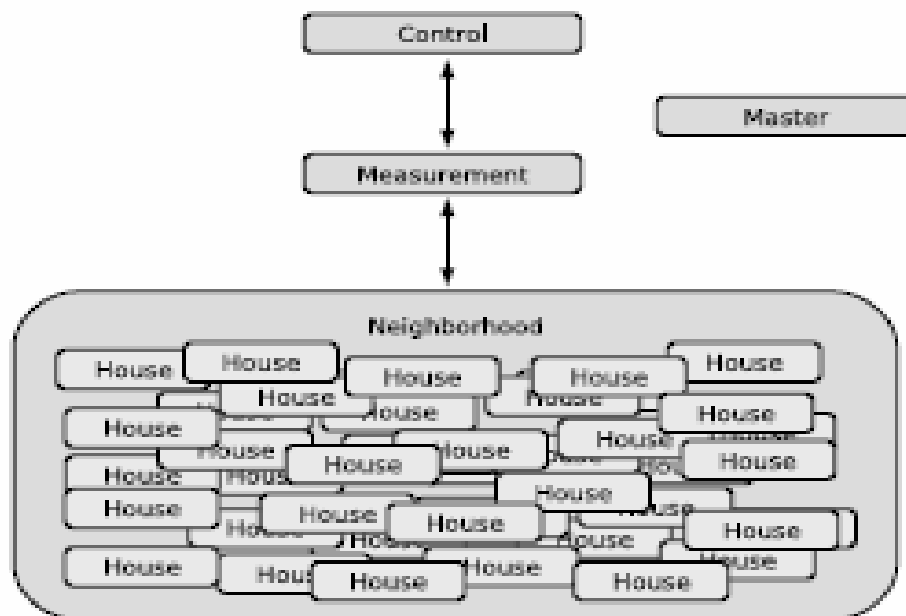
As estratégias de preço citadas na literatura [GOO04,PIE07] se referem em geral ao preço de pico da energia ou à precificação em tempo real, que usualmente ocorrem em mercados desregulados. Preços de Pico ocorrem em épocas de alta demanda de energia, na qual o preço de venda pelas unidades geradoras é mais elevado. Precificação em tempo real, ocorre ao longo de um dia, uma vez que a demanda de energia elétrica varia ao longo deste segundo uma curva de demanda e portanto a tarifação é maior nos máximos da curva. Em ambas estratégias, o consumidor final é corresponsável pelo preço da energia elétrica distribuída. Assim em períodos de preço caro ele paga mais caro e em períodos de preço barato ele paga mais barato. Comparada com a estratégia de precificação em tempo real, que seria uma cobrança do preço na forma de energia consumida por hora ao longo do dia, a estratégia de preço de pico é bem mais simples, pois só existem dois tipos de preço: preço no pico e fora deste, os quais ocorrem com menor frequência e seu

acontecimento é conhecido. Ela pode, assim, ser implementada por qualquer consumidor, chegando a representar uma economia de até 2% do custo anual com eletricidade. Pelo fato da ocorrência do preço de pico ser conhecida, é possível notificar o consumidor com antecedência no caso de se usar gerência da carga manual o semi-automática.

2.2 Visão Geral do Simulador

O simulador é composto de uma tarefa de controle [AUS07, AUS97], responsável pelo carregamento inicial de dados e por executar as tarefas básicas do sistema que são as casas, uma vez que elas é que geram a demanda de potência a ser controlada.

Simulation Task Diagram



Tarefa de Controle

Assim cabe a tarefa de controle (representa o DRAS - Fig. 3: Arquitetura de um sistema de gestão de demanda) não só gerar o próprio evento de controle de demanda, como também executar cada casa, uma por vez, bem como integralizar a potência de cada casa, formando assim a curva de demanda. A potência de cada casa pode ser vista como a soma de todos os estados ON, ponderada pela potência de cada equipamento.

O fluxograma básico da tarefa de controle é mostrado a seguir:

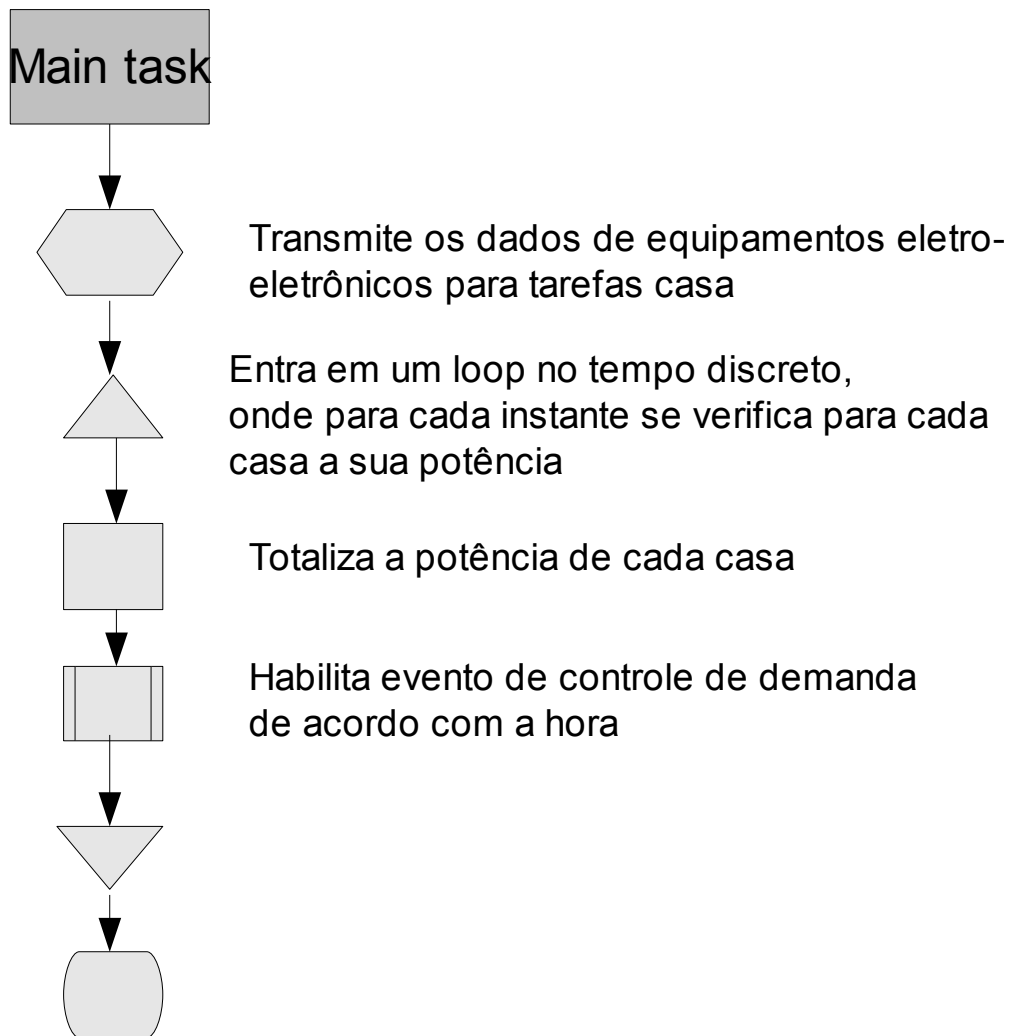
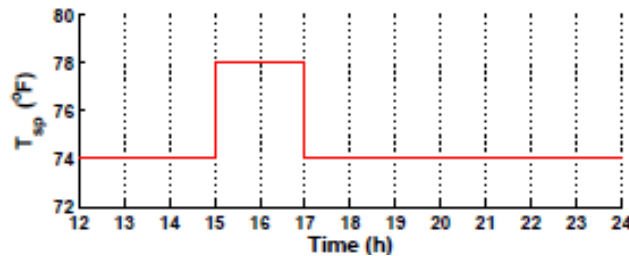


Fig. 4: Fluxograma Tarefa de Controle

O evento de controle consiste na emulação de uma mensagem que ou ajusta o set-point de cargas termostáticas (conforme a figura a seguir) ou limita o número de equipamentos em estado ON que a casa pode ter, este limitador denominado “preço”.



As cargas termostáticas são basicamente o sistema de refrigeração controlado por termostatos programáveis (PCT). O sistema todo será chamado de PCT-HVAC (Ar condicionado, refrigeradores e aquecimento), o qual está inserido em uma residência. Assim, as residências são basicamente elementos constituídos por sistemas PCT-HVAC, além de um sistema denominado LIGHT que básica representará o sistema de iluminação e demais cargas de uma casa. Neste caso assume-se que todas as outras cargas de uma casa serão puramente resistivas, que serão controladas pelo evento “preço”

Tarefa Casa

A tarefa casa conforme já mencionado é o elemento básico deste sistema, funcionando como um automato. Seu estado para efeito de sistema de energia refere-se aos estados dos aparelhos ON. Os aparelhos de uma casa mudam de estado (no caso real), segundo eventos distintos.

No caso de aparelhos termostáticos PCT-(HVAC,REFRI), esses estados mudam aleatoriamente segundo a troca de calor dos mesmos com a temperatura ambiente, conforme exemplificado na Fig. 5: Oscilação temperatura sistema termostático

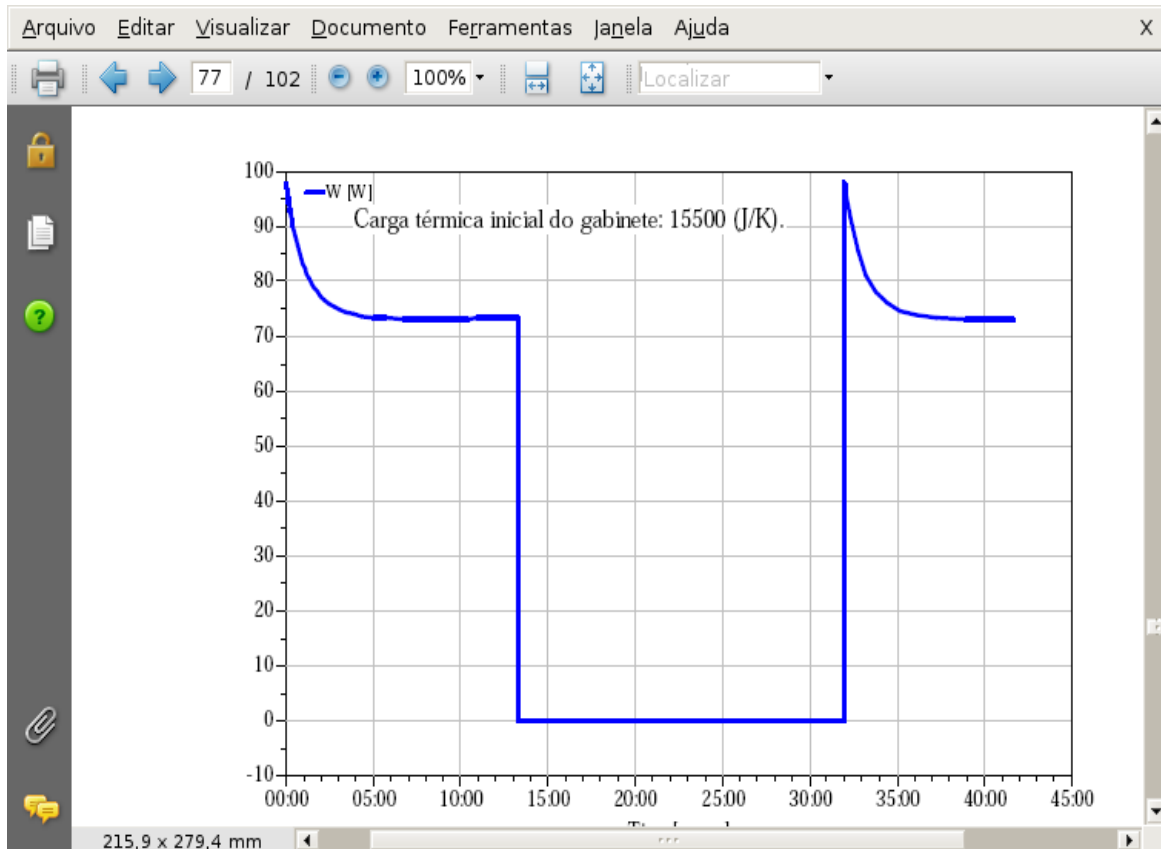


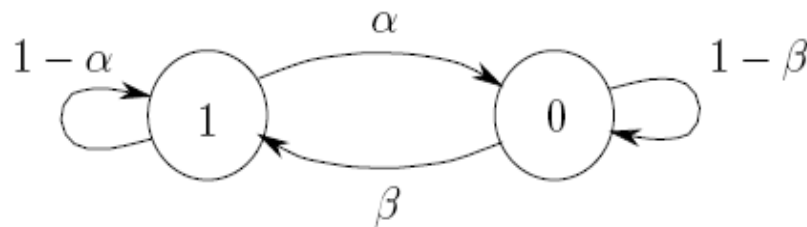
Fig. 5: Oscilação temperatura sistema termostático

Segundo [MOR88] este tipo de sistema pode ser emulado por uma cadeia de markov representado pela seguinte sequência de estados: 1-3-4-7(estados ON)- -8-6-4-2-(estados OFF)- 1-...., e cuja matriz de transição de estados é mostrada abaixo, para o caso da simulação adotada (8 estados). As probabilidades p_o e p_e emulariam as transições de temperatura e portanto o ciclo do termostato. A grande dúvida a relação destas probabilidades com um determinado modelo de equipamento.

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 1-p_o & & & p_o & & & & \\ p_e & 1-p_e & & & & & & \\ & & 1-p_o & & p_o & & & \\ & p_e & & 1-p_e & & & & \\ & & & & 1-p_o & & p_o & \\ & & & p_e & & 1-p_e & & \\ & & & & & & 1-p_o & p_o \\ & & & & & p_e & & 1-p_e \end{bmatrix}$$

Para os demais aparelhos da casa, sistema LIGHT, seu estado é modificado segundo eventos aleatórios no tempo, p ex., ligar chuveiro, acender a luz do quarto, ligar televisão ou computador, cada atividade das descritas acima, ocorrendo, gera um estado ON em uma aparelho.

A evolução de estados destes aparelhos foi modelada segundo uma cadeia de markov ON-OFF (1-0). Assim ligar uma aparelho na casa foi modelado como um processo de poisson, No sentido de que ligar o aparelho 1 vez, corresponde a contar 1, sendo essa a probabilidade Beta. 1-Beta a probabilidade de ficar em OFF. O aparelho fica em ON por um tempo distribuído de forma gaussiana com média 60 minutos.



A estrutura básica de atividades na casa é mostrada a seguir:

Inicializa a casa – cria uma casa com determinado número de lâmpadas, aparelhos eletrônicos, eletrodomésticos, etc.

Só pode haver 1 geladeira e um carga HVAC (para simplificar), mas os modelos podem ser diferentes (para gerar potências diferentes).

Cria estado inicial para o modelo PCT.

Calcula potência – baseado no número de estados ON é calculada a potência

Verifica se há alguma nova atividade na casa – de acordo com um parâmetro as atividades começam as 16, 18 e ou 10 hs (neste último caso às 18 hs é reinicializada as atividades)

As atividades consistem para cada aparelho LIGHT, verificar qual a probabilidade de ocorrer um evento ON, se o ON ocorre é temporizado o instante para OFF, incrementa-se contador de ON, senão incrementa-se o estado de tempo em OFF. Quer dizer a probabilidade de ocorrer ON é emulada segundo um processo de poisson.

Já para carga PCT verifica-se qual novo estado o sistema está segundo sua matriz de probabilidade, a partir daí se deriva o estado ON-OFF do aparelho.

Envia-se a potência da casa para a tarefa de controle e termina a tarefa casa

Essa sequência de atividades é realizada por meio do seguinte fluxograma:

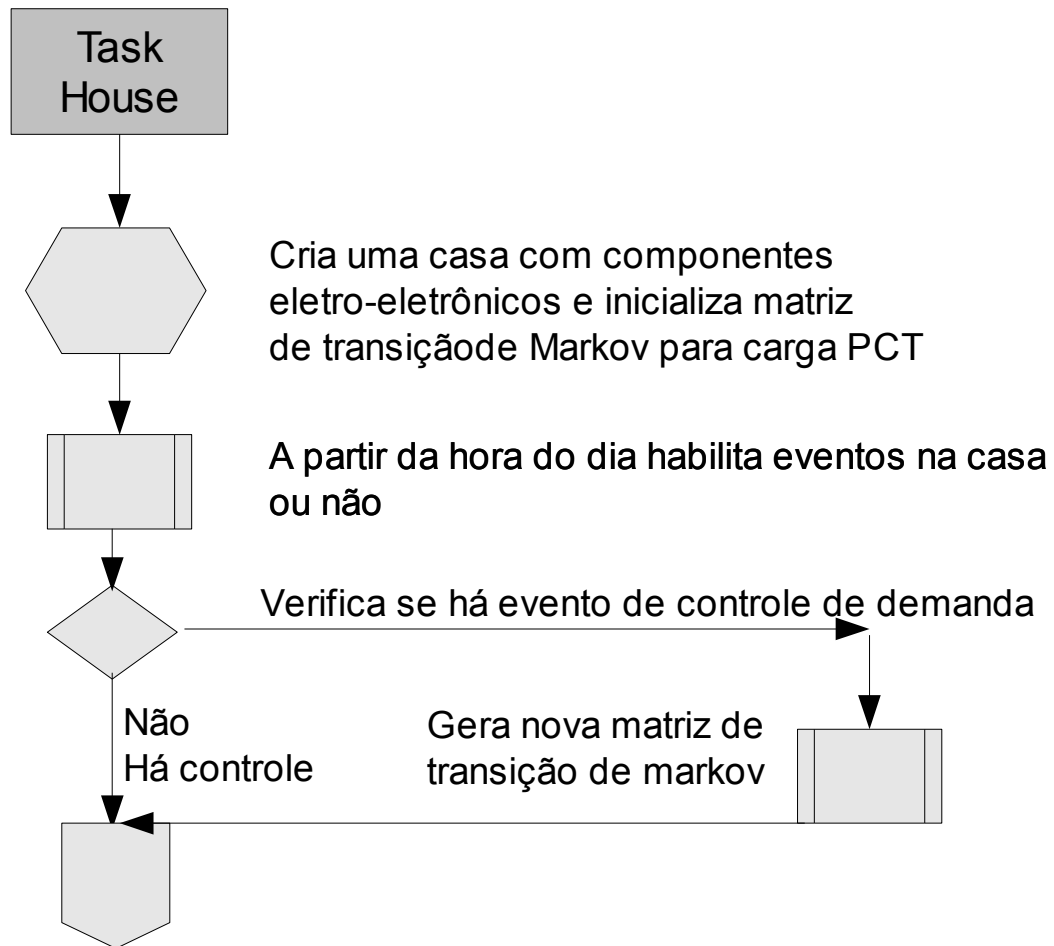


Fig. 6: Fluxograma da Casa

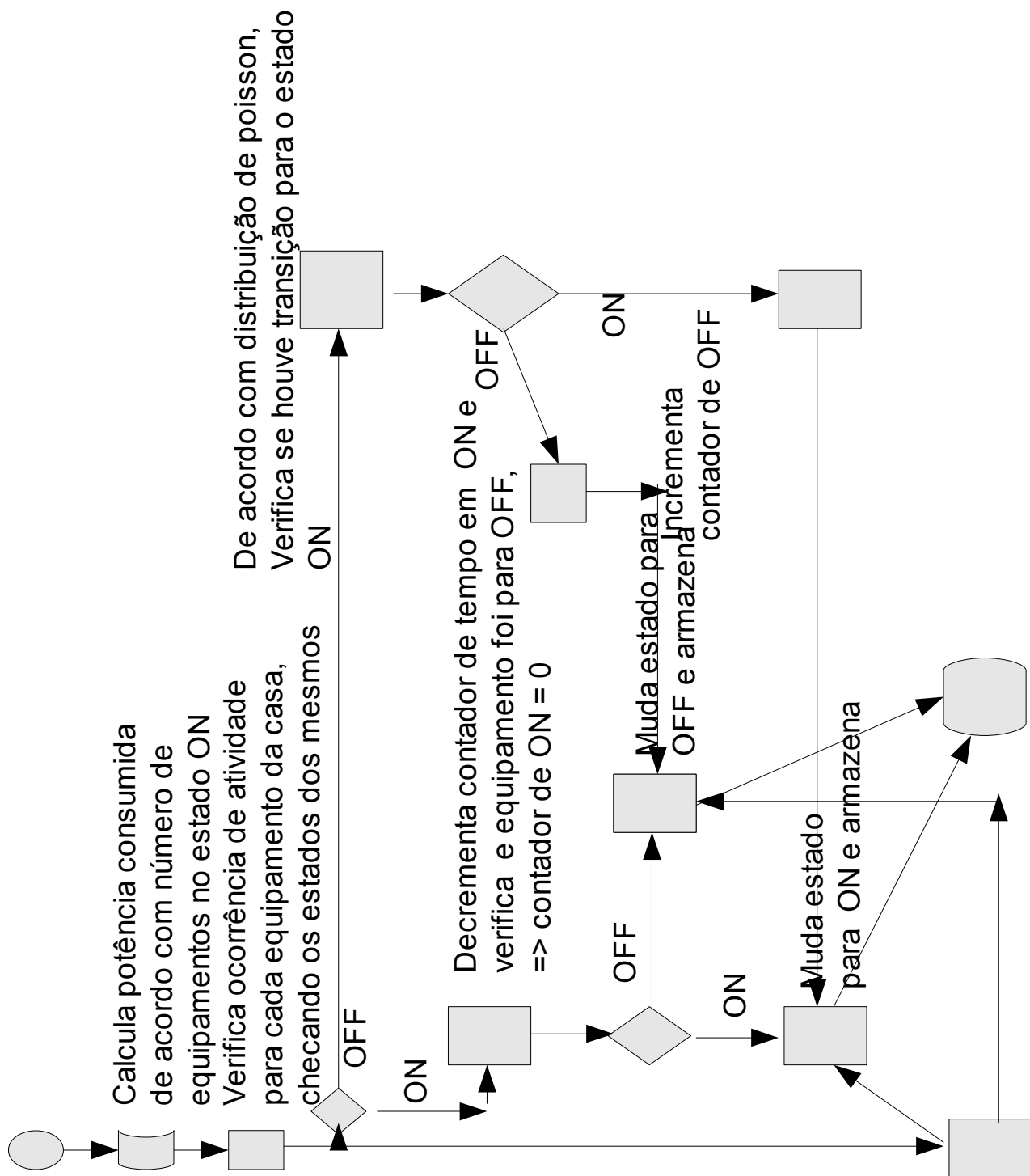


Fig. 7: Fluxograma da Casa-2

Capítulo 3

Resultados de Simulação

3.1 Curva de Carga Típica

Nesta figura mostra-se uma curva de carga típica obtida com a simulação. Visualmente, nota-se certa semelhança com algumas das curvas mostradas na Fig. 2: Curva de Carga Típica para um Consumidor Residencial. Apesar de a figura mostrar duas curvas com e sem controle de demanda (o controle neste caso foi feito em relação ao set-point), nota-se que o controle adotado quase não tem efeito sobre a carga.

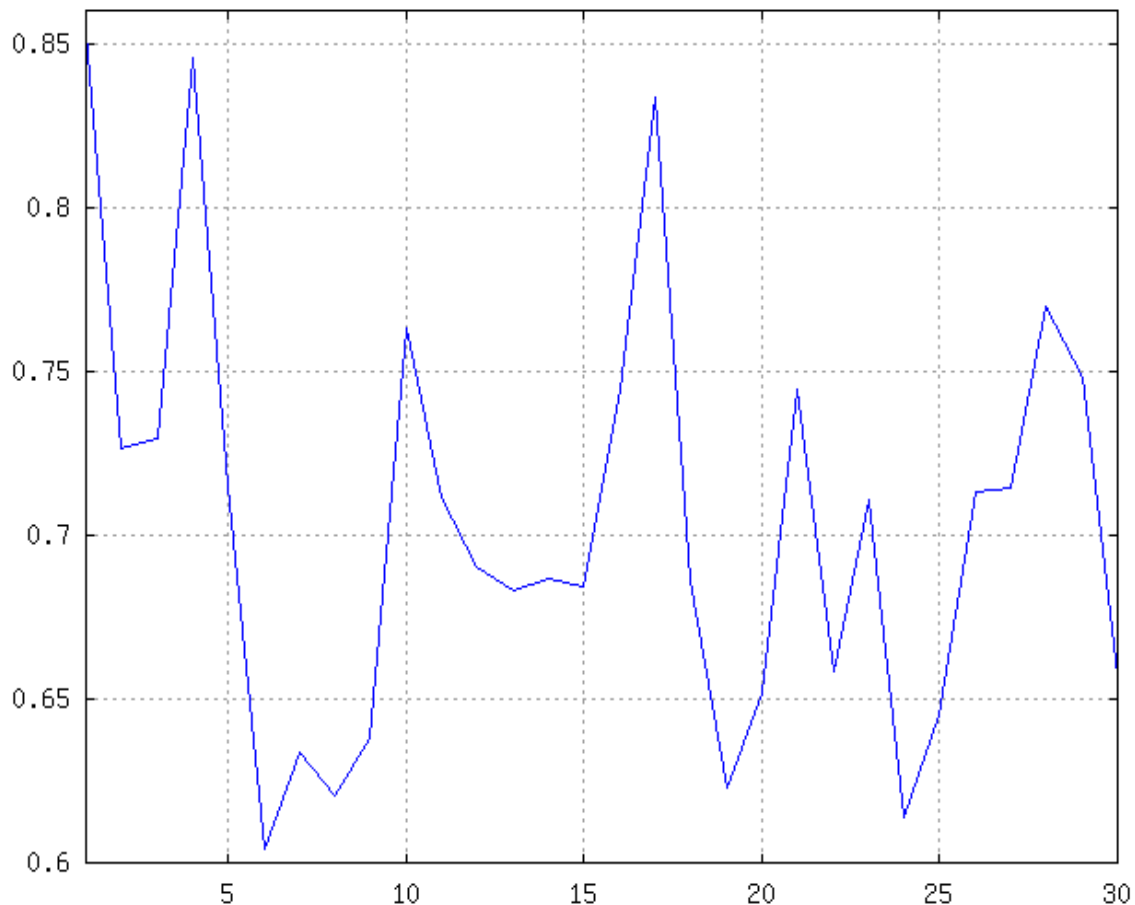


3.2 Ganho de Potência

3.2.1 Apenas controle de set-point

Nota-se que o ganho é muito pequeno. Se analisarmos a Fig. 5: Oscilação temperatura sistema termostático, podemos perceber que se o aparelho ficasse totalmente desligado durante o intervalo de controle, o ganho poderia ser de até 25% da carga total (basta comparar o valor médio da carga HVAC em relação ao da carga total), contudo com os valores de probabilidade usados na matriz de transição, obteve-se um ganho muito reduzido, que se contabilizado ao longo de um mês pode resultar em uma carga elevada, até 1.75 MW para uma cidade do tamanho de Campinas, porém não exatamente justifica o controle de demanda.

Para isso teria que ser feita uma simulação considerando-se uma política bastante restritiva, para poder verificar se o ganho no controle deste tipo de equipamento é realmente possível.



3.2.2 Apenas Controle de Preço (brando)

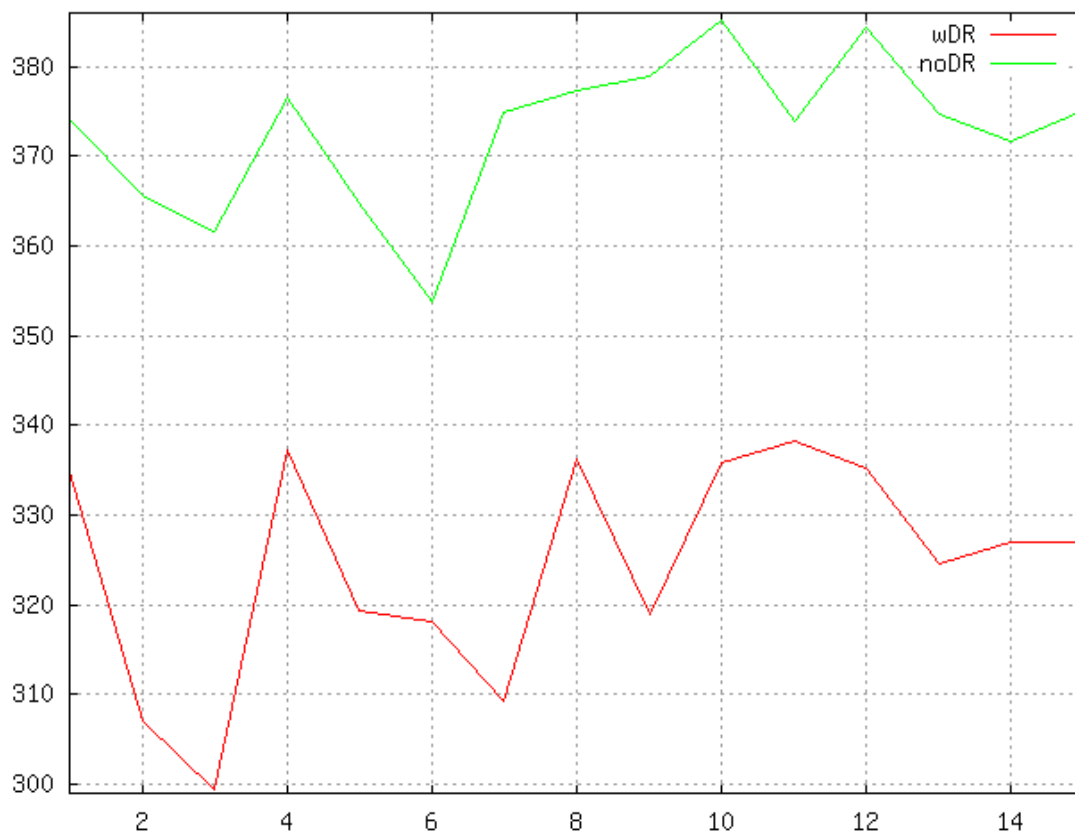
Para essa simulação percebe-se que o controle de preço tem um efeito maior em redução de carga do que o controle de set-point. No caso, permitiu-se que até 60% dos equipamentos da casa ficassem ligados, independente do equipamento, obtendo-se um ganho médio de 2,5KW por dia, ainda assim não se verificou redução de carga a ponta de ser diminuir o pico de carga.

Nota-se ainda no dia 12, em que a carga média já foi baixa, ocorreu o curioso fenômeno de que o controle de demanda, ao represar a carga, acabou por manter a carga média em um valor acima do que ocorreu normalmente.

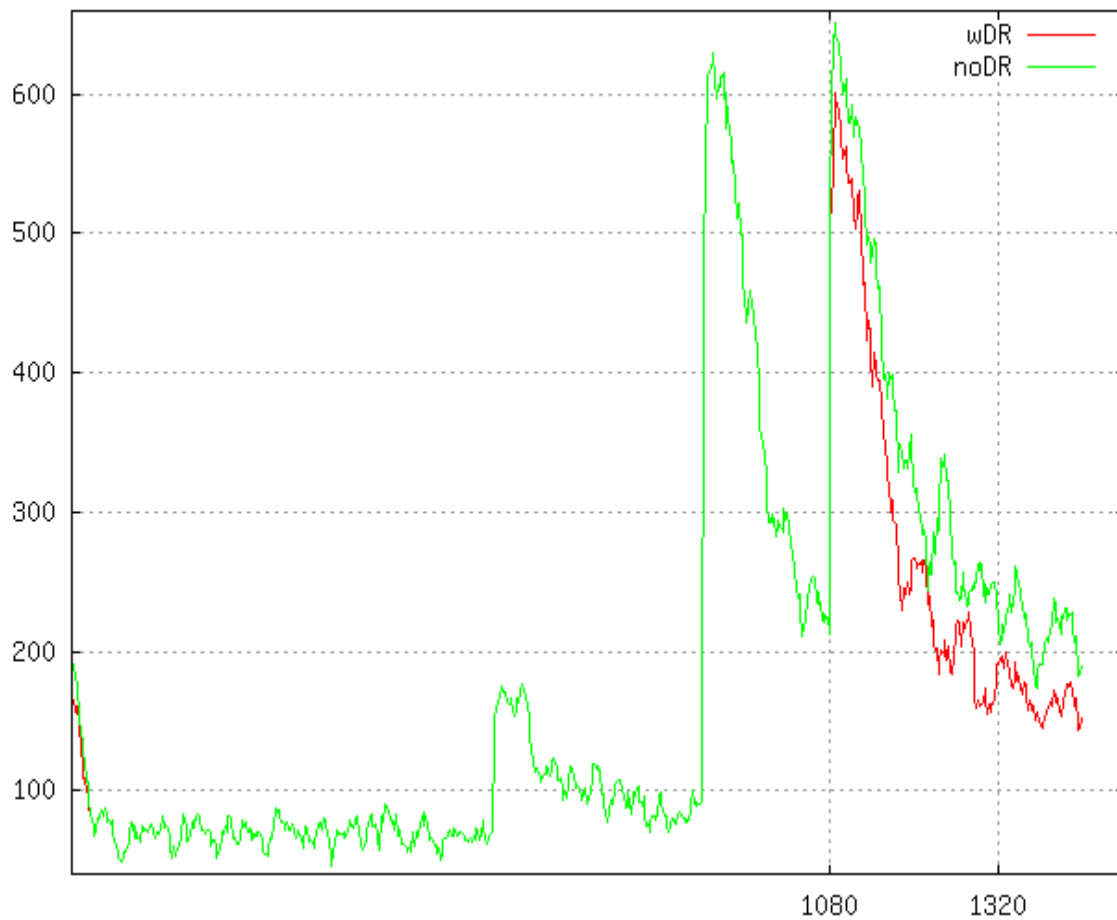


3.2.3 Apenas Controle de Preço (Rígido)

Só nessa simulação foi possível perceber-que o controle de preço teve o efeito desejado de reduzir o pico de carga. Neste caso permitiu-se que apenas 30% dos aparelhos da casa ficassem ligadas, obtendo-se um ganho médio por dia de 48KW durante o pico de carga.

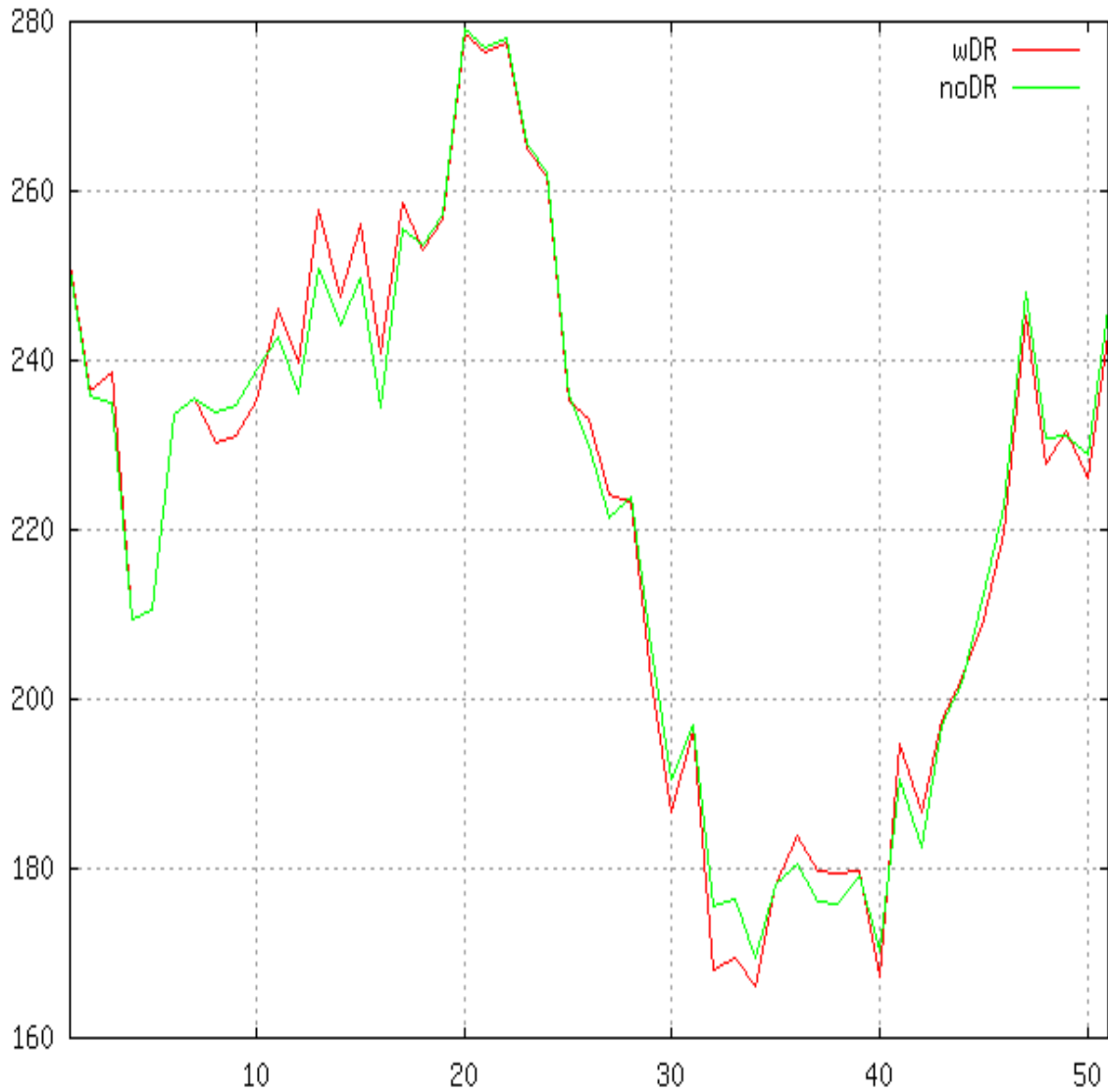


N figura observa-se o “Shaping” da curva de carga. Nota-se que a restrição é tão forte que a carga fica reduzida mesmo depois do fim do controle, no instante 1320. O que terá que ser verificado em outras simulações. Uma possível explicação está no simulador ter sido capaz de captar a “inércia” da carga em voltar ao normal.



3.3 Repique de Carga

O simulador foi capaz de captar o fenômeno de repique de carga, quer dizer, após o fim do controle de demanda, teoricamente a carga que foi reprimida deveria aparecer no sistema de potência, fazendo com que a demanda seja um pouco maior do que esperada.



Capítulo 4

Conclusão

Neste trabalho elementos da teoria de sistema dinâmicos a eventos discretos foi utilizada, notadamente o uso de cadeias de markov, verificando ser possível reproduzir uma curva de carga utilizando esta metodologia, apesar das hipóteses bastante simplificadoras que foram adotadas.

Eliminou-se também a simulação no tempo discreto do sistema termodinâmico constituinte das cargas denominadas HVAC. O problema da técnica utilizada é que a falta de uma equivalência melhor documentada ou tabelada entra o sistema termodinâmico e o modelo de markov, torna difícil o uso deste último, uma vez que se desconhece qual modelo paramétrico de equipamento e sistemas físicos real a cadeia de markov está emulando. Sendo este um assunto de potencial interesse para o futuro.

O uso de simulação por estados, ao invés de atividades, também é outra área a ser pesquisada devido ao seu potencial de diminuir o tempo de simulação elevado encontrado neste trabalho.

Referências Bibliográficas

Nota:

Todas as referências bibliográficas foram encontradas na internet, sendo a maioria obtida nos seguintes sites:

<http://www.epri.com>

<http://ieeexplore.ieee.org>

<http://www.gridwisearc.org>

- [AUS97] D.M. Auslander, J.R. Ridgely, J.D. Ringgenberg F. Goodman. Design and Implementation of Real Time Software for Control of Mechanical Ssystems, DME, UCLA, 1997.
- [AUS08] D.M. Auslander, W.J. Burke. Modular and Extensible Systemic Simulation of Demand Response Networks, Cigre Canada, Conference on Power Systems, 2008.
- [GOO04] F. Goodman. Technical and System Requirements for Advanced Distribution Automation, EPRI Technical Report, *June, 2004*.
- [MOR88] R.E Mortensen and K.P. Haggerty. A Stochastic Computer Model for Heating and Cooling Load , *IEEE Transactions on Power Systems, 1998*.
- [MOT04] L.T.M. Mota, A.A. Mota and A.L.M. França. Modelagem e Simulação de Cargas Residenciais Termostáticas para Recomposição do Sistema Elétrico a Partir de uma Abordagem Orientada a Objetos, *Revista Controle e Automação, Vol 15, Abril, 2004*.
- [PIE07] M. Ann Piette. Design and Implementation of An Open, Interoperable Demand Response Infrastructure. *Grid Interoperability Forum November, 2007*.
- [RAN07] S.C. Rangel. Simulação Transiente de um Ssistema de Refrigeração Doméstico. Tese de Mestrado, USP-São Carlos, 2007.

Apêndice

Dados de aparelhos eletrodomésticos usados na simulação (retirados do PROCEL).

| Nome | Sub-cat | categoria | item | Pot |
|---------------------------------------|---------|-----------|------|------|
| APARELHO DE SOM 3 EM 1 | 1 | eletron | 1 | 80 |
| APARELHO DE SOM PEQUENO | 1 | eletron | 2 | 20 |
| COMPUTADOR/ IMPRESSORA/ ESTABILIZADOR | 2 | eletron | 3 | 180 |
| COMPUTADOR | 2 | eletron | 4 | 120 |
| TV EM CORES - 14" | 3 | eletron | 5 | 60 |
| TV EM CORES - 18" | 3 | eletron | 6 | 70 |
| TV EM CORES - 20" | 3 | eletron | 7 | 90 |
| TV EM CORES - 29" | 3 | eletron | 8 | 110 |
| VÍDEOCASSETTE | 4 | eletron | 9 | 10 |
| VÍDEOGAME | 5 | eletron | 10 | 15 |
| BOILER 50 e 60 L | 1 | hvac | 7 | 1500 |
| BOILER 100 L | 1 | hvac | 8 | 2030 |
| BOILER 200 a 500 L | 1 | hvac | 9 | 3000 |
| AQUECEDOR DE AMBIETE | 2 | hvac | 1 | 1550 |
| AR-CONDICIONADO 7.500 BTU | 3 | hvac | 2 | 1000 |
| AR-CONDICIONADO 10.000 BTU | 3 | hvac | 3 | 1350 |
| AR-CONDICIONADO 12.000 BTU | 3 | hvac | 4 | 1450 |
| AR-CONDICIONADO 15.000 BTU | 3 | hvac | 5 | 2000 |
| AR-CONDICIONADO 18.000 BTU | 3 | hvac | 6 | 2100 |
| ASPIRADOR DE PÓ | 1 | eletd | 1 | 100 |
| TORRADEIRA | 2 | eletd | 10 | 800 |
| BATEDEIRA | 3 | eletd | 2 | 120 |
| CIRCULADOR AR GRADE | 4 | eletd | 3 | 200 |
| CIRCULADOR AR PEQUEO/MÉDIO | 4 | eletd | 4 | 90 |
| ECERADEIRA | 5 | eletd | 5 | 500 |
| FERRO ELÉTRICO AUTOMÁTICO | 6 | eletd | 6 | 1000 |
| FOGÃO COMUM | 7 | eletd | 7 | 60 |
| MICROCROODAS | 8 | eletd | 8 | 1200 |
| GRILL | 2 | eletd | 9 | 900 |
| VETILADOR DE TETO | 25 | eletd | 11 | 120 |
| VETILADOR PEQUEO | 25 | eletd | 12 | 65 |
| LÂMPADA FLUORESCETE COMPACTA - 11 W | 1 | lamp | 1 | 11 |
| LÂMPADA FLUORESCETE COMPACTA - 15 W | 2 | lamp | 2 | 15 |
| LÂMPADA FLUORESCETE COMPACTA - 23 W | 3 | lamp | 3 | 23 |
| LÂMPADA ICADESCETE - 40 W | 4 | lamp | 4 | 40 |
| LÂMPADA ICADESCETE - 60 W | 5 | lamp | 5 | 60 |
| LÂMPADA ICADESCETE -100 W | 6 | lamp | 6 | 100 |
| LAVADORA DE LOUÇAS | 9 | eletd | 13 | 1500 |
| LAVADORA DE ROUPAS | 10 | eletd | 14 | 500 |
| LIQUIDIFICADOR | 11 | eletd | 15 | 300 |
| BARBEADOR/DEPILADOR/MASSAGEADOR | 1 | hig | 1 | 10 |
| SECADOR DE CABELO GRADE | 2 | hig | 2 | 1400 |
| SECADOR DE CABELOS PEQUEO | 3 | hig | 3 | 600 |
| CHUVEIRO ELÉTRICO | 1 | chuv | 1 | 3500 |
| GELADEIRA 1 PORTA | 1 | refri | 1 | 90 |
| GELADEIRA 2 PORTAS | 2 | refri | 2 | 130 |

Tabela 1: Dados de Conumo de Equipamentos