



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

António David Martins Calhau

Ferramenta para identificação de recursos no lado da Procura para o fornecimento de Serviços de Sistema

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores,
Área de Especialização em Energia

Setembro/2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Ferramenta para identificação de recursos no lado da Procura para o fornecimento de Serviços de Sistema

António David Martins Calhau

Orientador

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Presidente do Júri

Professora Doutora Lúcia Maria dos Reis Albuquerque Martins

Vogal

Professor Doutor Tony Richard de Oliveira de Almeida

Coimbra, 2016



Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Especialização em Energia

Ferramenta para identificação de recursos no lado da Procura
para o fornecimento de Serviços de Sistema

António David Martins Calhau

Orientador: Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

*A mente que se abre a uma nova ideia,
jamais voltará ao seu tamanho original.*
- Albert Einstein

Agradecimentos

A presente dissertação marca o culminar de uma das etapas mais importantes da minha vida.

Em primeiro lugar, tenho que agradecer o apoio incondicional e o enorme esforço feito pelos meus pais para que este momento pudesse ser possível. Obrigado por todos os valores que me transmitiram e por fazerem de mim a pessoa que sou.

Não poderia também deixar de agradecer à pessoa mais importante da minha vida, por todo o apoio que me deu e pela paciência que teve neste período da nossa vida, obrigado Catarina.

Gostava de expressar a minha profunda gratidão e admiração ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes. A realização deste trabalho só foi possível graças à sua constante orientação, apoio, incentivo e confiança depositada.

Não poderia deixar passar a oportunidade de agradecer a todos os Professores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores por todo o conhecimento que me transmitiram ao longo destes seis anos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus colegas e amigos pelo seu apoio, companheirismo e amizade. Não posso também deixar de agradecer ao Hugo Ribeiro e à Liliana Ribeiro por todo o apoio que me deram ao longo do curso e queria deixar um especial obrigado à Ana Soares, ao Roham Torabi, e ao Professor Afonso Brito pelos conhecimentos transmitidos e pela sua disponibilidade.

A todos, o meu muito obrigado.

António David Calhau

Resumo

O setor elétrico foi desde a sua génese um setor em constante mutação. Nas últimas décadas do século XX assistiu-se à desverticalização das atividades e à liberalização do sector.

Com esta reestruturação, surgiram novos agentes, regras e comportamentos mas, as suas premissas mais básicas mantiveram-se. O bom funcionamento dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), que pressupõe um equilíbrio constante entre a geração e a procura, é uma dessas premissas. Para que tal ocorra, era comumente pedido aos grupos geradores que adequassem os seus níveis de produção à procura, porém, devido aos elevados encargos relativos a estas formas de geração de Energia Elétrica (EE), é necessário procurar formas menos dispendiosas de manter fiabilidade e estabilidade dos SEE.

A Gestão da Procura (GP) (*Demand Response* na terminologia anglo saxónica) tem ganho uma especial relevância neste plano, onde com a introdução de novas tecnologias e novas regras de mercado se abriu caminho à possibilidade da procura participar de forma mais ativa na operação dos sistemas através do fornecimento de serviços essenciais ao seu bom funcionamento como programas de emergência, económicos e de Serviços de Sistema (SS).

Os SS são serviços essenciais para manter o bom funcionamento dos SEE. Estes serviços, que no passado eram prestados apenas pela geração, podem agora ser fornecidos pela procura devido à evolução das regras de mercado e das *Smart Grids*. Abre-se assim caminho a que cargas, como por exemplo as cargas termostáticas, forneçam também estes serviços à rede com a participação em programas de gestão da procura. Devido à complexidade das ações necessárias para o fornecimento destes serviços, é muito importante serem alvo de estudo prévio criterioso.

A presente dissertação foi desenvolvida com o objetivo de identificar recursos do lado da procura para fornecimento de Serviços de Sistema. Para tal, foi desenvolvida uma ferramenta em *MATLAB* que permitiu simular o funcionamento de grupos de cargas de Frio Alimentar Doméstico (FAD), tais como Frigorífico Combinado (FrC) e Arca Refrigeradora (AR), recorrendo a Modelos Fisicamente Baseados Simplificados (MFBS) Simples e com Redes Neurais Artificiais (RNA).

Esta ferramenta foi desenvolvida com o intuito de criar um algoritmo suficien-

temente rápido para poder simular ações de gestão da procura em tempo real, de forma a que o Operador de Sistema Independente (ISO) possa incluir a procura no fornecimento de SS. A ferramenta permite o estudo do impacto de diferentes ações de gestão da procura no consumo de grupos de cargas FAD, ou seja, em termos de potência pedida à rede (diagramas de carga), possibilitando a identificação de ações que permitam disponibilizar uma dada quantidade de potência/energia para ser transacionada no mercado de SS. Neste trabalho são também alvo de estudo os tempos de simulação destas ferramenta e é feita uma análise comparativa com a performance de outros modelos anteriormente desenvolvidos.

Assim, este trabalho permite concluir qual o impacto que as diferentes ações de gestão da procura podem ter em termos de potência pedida à rede por grupo de cargas residenciais, e permite aferir a possibilidade de fornecimento de SS por parte de cargas de FAD.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, lecionada no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, no ano letivo 2015/2016.

Palavras-chave: Serviços de Sistema, Gestão da Procura, Redes Neurais Artificiais, Modelos Fisicamente Baseados, Modelos Fisicamente Baseados Simplificados, Mercados de Energia.

Abstract

Since the very beginning, the electricity sector has been a constantly changing sector. In the last decades of the twentieth century there was a deverticalization of its activities and a liberalization in the sector.

This restructuring brought along new agents, rules and behaviors but its basic assumptions have been preserved. One of these basic assumptions is that the normal functioning of the electric power systems requires a constant balance between generation and demand. In order to get this it was commonly asked the producer groups to adapt their production levels to the demand. However, due to the high costs associated with these ways of producing electricity, it is necessary to find less expensive methods of keeping the reliability and the stability of the electrical power systems.

The Demand Response has gained a special relevance at this level, since the introduction of new technologies and new market rules paved the way for the demand to actively participate in the systems operation, through the provision of essential services to its proper functioning, such as emergency, economic and ancillary services.

Ancillary services are essential services to keep the proper functioning of electrical power systems. These services, in the past only provided by the generation side, can now also be provided by the demand side, due to the evolution of market rules and the smart grids. We thus open a way to some charges, like thermostatic charges, to also provide these services to the electrical network, by participating in demand response programs. Given the complexity of the actions required to provide these services, it is essential they are subject to a prior accurate study.

The main goal of this thesis is therefore to identify some resources on the demand side, in order to provide ancillary services. To achieve that goal a MATLAB tool was developed to simulate the functioning of Domestic Cold Storage charges groups, such as combined refrigerators and freezers, using Simplified Physically Based Models and Artificial Neural Networks.

This tool was developed in order to create algorithms fast enough to simulate demand response actions in real time, so that the independent system operator can include the demand on the ancillary services provision. This tool also allows the study of the impact of the different demand response actions in the supply

of the domestic cold food charges groups, in terms of power requested to the electrical network (load profiles), making it possible to identify the actions that allow the supply of a given quantity of potency/power to be transacted at the system services market. In this study we also sought to study the simulation times of these tools and it is made a comparative analysis with the performance of other models developed in the past.

This thesis allows us therefore to understand the impact the different demand response actions can have in terms of potency required to the electrical network by residential load groups and assess the possibility of system services to supply domestic cold food charges.

This study was made in the context of my Integrated Master's Thesis in Electrical and Computer Engineering, taught at the Electrical and Computer Engineering Department- Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra, in the academic year 2015/2016.

Keywords:: Domestic Cold Storage; Ancillary Services ; Demand Response; Artificial Neural Networks; Physically Based Models; Simplified Physically Based Models; Power Markets.

Conteúdo

Abreviaturas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 Mercados de Eletricidade	3
2.1 O Setor Elétrico	3
2.2 Modelos de Mercado de Eletricidade	5
2.3 Exemplos de Mercados de Eletricidade	6
2.3.1 Mercado Ibérico de Eletricidade, MIBEL	6
2.3.2 <i>Australian National Electricity Market, NEM</i>	7
2.3.3 <i>New Zealand Electricity Market, NZEM</i>	7
2.3.4 <i>Electric Reliability Council of Texas, ERCOT</i>	8
3 Gestão da Procura e Serviços de Sistema	9
3.1 Gestão da Procura	9
3.2 Serviços de Sistema	11
3.2.1 Participação das Cargas em Serviços de Sistema	16
4 Modelos Para Simulação de Cargas FAD	21
4.1 Fenómenos Físicos Subjacentes às Cargas de Frio Alimentar Doméstico	21
4.2 Modelos Fisicamente Baseados de Cargas de Frio Alimentar Doméstico	23
4.2.1 Modelos Fisicamente Baseados de Frio Alimentar Doméstico Detalhados	24
4.3 Modelo Fisicamente Baseado Simplificado de Cargas de Frio Ali- mentar Doméstico	26
4.4 Modelo Fisicamente Baseado Simplificado de Cargas de Frio Ali- mentar Doméstico com Redes Neurais	28
4.4.1 Redes Neurais Artificiais	29
4.4.2 Modelo Desenvolvido	31
4.5 Simulação de Conjuntos de Cargas	34
4.6 Análise dos Tempos de Simulação	37

5	Validação dos Modelos e Caracterização dos Impactos das Ações de Gestão da Procura	39
5.1	Validação dos Modelos Desenvolvidos	39
5.1.1	Análise Comparativa em Funcionamento Normal de Frigoríficos Combinados	40
5.1.2	Análise do Funcionamento dos Modelos de Frigoríficos Combinados com Cortes e reparametrizações de termostato	42
5.1.3	Análise em Funcionamento Normal de Arcas Frigoríficas	43
5.1.4	Análise funcionamento dos modelos de Arcas Frigoríficas com cortes e reparametrizações de termostato	44
5.2	Caracterização do Impacto de Ações de Gestão da Procura	45
5.2.1	Caracterização do Impacto de Ações de Controlo Direto de Cargas	46
5.2.2	Manipulação do Limite Superior e Inferior de Temperatura do Termóstato	48
6	Caso de Estudo	51
7	Conclusões e Trabalho Futuro	55
	Bibliografia	57
A	Harmonização do Mercado Europeu	1
B	Participação de cargas em Serviços de Sistema nos Estados Membros da União Europeia	5
C	Relatório de aprendizagem das Redes Neurais	9
D	Dados de parametrização de 30 grupos de equipamentos em funcionamento normal	23
E	Gráficos dos modelos em funcionamento normal e com ações de Gestão da Procura	27
E.1	Gráficos do funcionamento normal de Frigorífico Combinados	27
E.2	Corte de 15 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados	28
E.3	Corte de 30 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados	29
E.4	Corte de 60 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados	30
E.5	Reparametrização do termostato de Frigoríficos Combinados	31

E.6	Gráficos do funcionamento normal de Arcas Frigoríficas	32
E.7	Corte de 15 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas	33
E.8	Cortes de 30 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas	34
E.9	Cortes de 60 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas	35
E.10	Reparametrização do termostato de Arcas Frigoríficas	36

Lista de Figuras

2.1	Cronologia da reestruturação do setor elétrico [2].	4
2.2	Modelo desagregado do sector elétrico [2].	4
3.1	Alterações ao diagrama de cargas promovidas pela Gestão da Procura [14]. . .	10
3.2	Programas de Gestão da Procura [15].	11
3.3	Ativação das reservas após uma perturbação [21].	14
3.4	Comparação dos sistemas europeu e americano e o tempo de resposta [23]. . .	16
3.5	Desagregação dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais (2002) [24].	16
4.1	Ciclo de Carnot [32]	22
4.2	Ciclo Frigorífico [33]	22
4.3	Esquema da parede do equipamento de FAD [13].	26
4.4	Variação da temperatura dentro de equipamento FAD.	27
4.5	Estrutura de um neurónio artificial [36].	29
4.6	Função a degrau (a), Função linear (b), Função Tangente Hiperbólica (c) e Função Logística (d) [36].	29
4.7	Esquemas de Redes <i>Feedforward</i> de uma só camada (a) e de Redes <i>Feedforward</i> MultiCamada (b) [36].	30
4.8	Arquitetura das Redes Neurais utilizadas.	33
4.9	Diagrama do fluxo de dados da ferramenta de simulação desenvolvida. . . .	36
5.1	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com Modelos Fisicamente Baseados (MFB)	41
5.2	Diagrama diários de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples.	41
5.3	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFBS com RNA . . .	41
5.4	Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas simulado com MFB . .	43
5.5	Diagrama de carga de 30 grupos de Arca Frigorífica (AF) simulados com MFBS simples.	43
5.6	Diagramas de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas, usando MFBS com RNA	44
5.7	Diagramas de carga médios de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA(à direita) com um corte de alimentação de 60 minutos.	46

5.8	Diagramas de carga médios de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA(à direita) com um corte de alimentação de 60 minutos.	46
5.9	Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA(à direita) com manipulações dos limites da Banda Morta (BM) do termostato.	48
5.10	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA (à direita) com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.	49
6.1	Diagrama de carga previsto para o dia 21 de Agosto de 2016 e promenor do período de ponta de potência pedida à rede	51
6.2	Diagrama de carga com ações aplicadas simuladas com MFBS simples . . .	53
6.3	Diagrama de carga com ações aplicadas simuladas com MFBS com RNA . .	53
A.1	Desenvolvimento da Gestão da Procura em cada estado europeu (2015) [26]. .	2
A.2	Participação da Procura e da Agregação em cada estado europeu (2015) [26].	2
A.3	Mapa do <i>Price Coupling Regions(PCR)</i> [38].	3
C.1	Dados de aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	11
C.2	Indicadores do treino da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	12
C.3	Histograma da aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	12
C.4	Dados de aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	13
C.5	Indicadores do treino da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	14
C.6	Histograma da aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	14
C.7	Dados de aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	15
C.8	Indicadores do treino da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	16
C.9	Histograma da aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.	16
C.10	Dados de aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	17
C.11	Indicadores do treino da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	18
C.12	Histograma da aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.	18
C.13	Dados de aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'. . . .	19
C.14	Indicadores do treino da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'.	20
C.15	Histograma da aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'. .	20

C.16	Dados de aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'	21
C.17	Indicadores do treino da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'	22
C.18	Histograma da aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'	22
E.1	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB	27
E.2	Diagrama diários de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples.	27
E.3	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFBS com RNA	28
E.4	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB com corte de alimentação de 15 minutos	28
E.5	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 15 minutos.	28
E.6	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 15 minutos.	29
E.7	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 30 minutos.	29
E.8	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 30 minutos.	29
E.9	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 60 minutos.	30
E.10	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 60 minutos.	30
E.11	Gráfico da variação da temperatura diária do refrigerador (à esquerda) e do congelador (à direita) de um FrC na qual é aplicado um corte de alimentação às 10h durante 60 minutos.	30
E.12	Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato	31
E.13	Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.	31
E.14	Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.	31
E.15	Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas simulado com MFB	32
E.16	Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples.	32
E.17	Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas, usando MFBS com redes neuronais	32
E.18	Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulado com MFB com corte de alimentação de 15 minutos	33
E.19	Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 15 minutos.	33
E.20	Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 15 minutos.	34
E.21	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 30 minutos.	34
E.22	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com com RNA com um corte de alimentação de 30 minutos.	34

E.23	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 60 minutos.	35
E.24	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados om MFBS com RNA com um corte de alimentação de 60 minutos.	35
E.25	Gráfico da variação da temperatura diária de uma AF na qual é aplicado um corte de alimentação às 10h durante 60 minutos.	36
E.26	Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulado com MFB com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato	36
E.27	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.	37
E.28	Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS com RNA com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.	37

Lista de Tabelas

3.1	Participação de Cargas na Reserva Primária em alguns Estados Membros da União Europeia (UE) [26] [27] [28].	19
3.2	Participação de Cargas na Reserva Secundária em alguns Estados Membros da UE [26] [27] [28].	19
3.3	Participação de Cargas na Reserva Terciária em alguns Estados Membros da UE [26] [27] [28].	20
3.4	Requisitos para a participação de Cargas em Serviços de Regulação [29] . . .	20
3.5	Requisitos para a participação de Cargas em Reserva Girante [29]	20
4.1	Gama de valores das entradas(<i>inputs</i>) usadas na aprendizagem das Redes Neurais.	32
4.2	Gama de valores das entradas de potência, e valores de Mcp e Resistência Térmica usadas na aprendizagem das Redes Neurais.	32
4.3	Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 1000020 cargas FrC.	37
4.4	Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 1000020 cargas AF.	37
4.5	Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 105000 cargas FrC.	38
4.6	Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 105000 cargas AF.	38
5.1	Dados das simulações de MFBS simples em funcionamento normal e com cortes de 15, 30 e 60 minutos	47
5.2	Dados das simulações de MFBS com RNA em funcionamento normal e com cortes de 15, 30 e 60 minutos	47
5.3	Dados dos diagramas das simulações de MFBS simples em funcionamento normal e quando sujeito à manipulação de termostato	49
5.4	Dados dos diagramas das simulações de MFBS com RNA em funcionamento normal e quando sujeito à manipulação de termostato	50
6.1	Alteração das Temperaturas Máxima e Mínima de Referência do Termóstato	52
6.2	Aplicação de cortes distintos a três grupos que contêm 4 grupos de cargas cada (em que 1 simboliza a aplicação de corte, e 0 simboliza o funcionamento normal dos grupos).	53

6.3	Valores de Potência obtidos em cada instante simulados com MFBS simples e com RNA aquando da aplicação de ações de GP	54
D.1	Tabela com dados de parametrização de cada grupos de AF . . .	24
D.2	Tabela com dados de parametrização de cada grupos de FrC (1) .	25
D.3	Tabela com dados de parametrização de cada grupos de FrC (2) .	26

Abreviaturas

AC	Ar Condicionado
AEMC	<i>Australian Energy Market Commission</i>
AEMO	<i>Australian Energy Market Operator</i>
AF	Arca Frigorífica
AR	Arca Refrigeradora
ASU	<i>Ancillary Services Unbundling</i>
AT	Alta Tensão
BM	Banda Morta
CAISO	<i>California Independent System Operator</i>
CDC	Controlo Direto de Cargas
CE	Consumidores Elegíveis
COP	Coefficiente de Performance
DRM	<i>Demand Response Mechanism</i>
DSO	Operador de Sistema de Distribuição
EE	Energia Eléctrica
ERCOT	<i>Electric Reliability Council of Texas</i>
FAD	Frio Alimentar Doméstico
FCAS	<i>Frequency Control Ancillary Services</i>
FrC	Frigorífico Combinado
GP	Gestão da Procura
ISO	Operador de Sistema Independente
MAT	Muito Alta Tensão
MFB	Modelos Fisicamente Baseados

MFBS	Modelos Fisicamente Baseados Simplificados
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
MISO	<i>Midwest Independent System Operator</i>
MO	Operador de Mercado
MT	Média Tensão
NCAS	<i>Network Control Ancillary Services</i>
NEM	<i>Australian National Electricity Market</i>
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation</i>
NYISO	<i>New York Independent System Operator</i>
NZEM	<i>New Zealand Electricity Market</i>
OMEL	<i>Operador del Mercado Ibérico de Energia</i>
OMI	Operador de Mercado Ibérico
OMIP	Operador de Mercado Ibérico Português
PCE	Período Contínuo de Energia
PJM	<i>Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection</i>
PUC	<i>Public Utility Commission of Texas</i>
REE	<i>Red Eléctrica de España, S.A.</i>
REN	Rede Elétrica Nacional, S.A.
RNA	Redes Neurais Artificiais
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
SO	Operador de Sistema
SRAS	<i>System Restart Ancillary Services</i>
SS	Serviços de Sistema
TA	Termoacumuladores
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TIS	Texas Interconnected System
TSO	Operador do Sistema de Transmissão
UE	União Europeia

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O setor elétrico era, até aos fins do século XX, um setor monopolista fechado à livre concorrência, onde os estados ou uma entidade reguladora definiam as regras do setor e as taxas de remuneração das várias atividades. Neste setor, o equilíbrio entre geração e procura é um princípio fundamental para que se mantenha a estabilidade e fiabilidade dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), comumente mantido através de ações adequadas no lado da geração, que ajusta a sua produção ao consumo.

Com a liberalização do setor elétrico e a oportunidade de competição nos domínios da produção e comercialização, passou a ser economicamente necessário estudar novas formas de garantir o bom funcionamento dos sistemas de energia e, com o advento das energias renováveis, passou a ser necessário dotar as redes energéticas de novas tecnologias que consigam lidar com os desafios criados por estas formas de geração.

Os *Smart Meters*, *Smart Thermostats*, o desenvolvimento de novas Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), como a Internet com o IPv6, as novas regras de mercado, entre outros, possibilitaram que o conceito de *Smart Grid* seja hoje uma realidade e criam condições para que a procura possa ter um papel mais ativo nos SEE. Tais tecnologias abriram a possibilidade de haver ações de controlo automático sobre as cargas termostáticas no setor residencial, como por exemplo, as cargas de Frio Alimentar doméstico (FAD).

Neste contexto, surgem os programas de Gestão da Procura (GP), onde a redução da procura é usada para resolver situações críticas e fornecer serviços necessários ao bom funcionamento dos SEE, como programas económicos, de emergência e Serviços de Sistema (SS) a preços mais competitivos do que se ajustássemos a geração a estes eventos. Desta forma, é muito importante para o Operador de Sistema (SO) ter ferramentas de simulação em tempo real que lhe permitam

avaliar o impacto de ações de GP em cargas de uso doméstico para que fornecimento de SS possa ser parcialmente fornecido pelo lado da procura e não apenas pela geração. No sector residencial, as cargas são geralmente de pequena potência, o que obriga à sua agregação para participação em ações com impacto no SEE. Boa parte dos modelos que permitem simular o seu funcionamento são computacionalmente muito exigentes, o que impede a entidade interessada na utilização desses recursos de os identificar em tempo útil. É assim essencial o desenvolvimento de ferramentas adequadas à identificação e quantificação destes recursos em tempo útil para a sua participação mais ativa nos SEE.

O objetivo principal deste trabalho reside na construção de uma ferramenta de avaliação do impacto de ações de GP, que permita ao ISO ter, em tempo real, a possibilidade de saber a capacidade de recursos disponíveis do lado da procura. Esta ferramenta em *MATLAB* que permitirá simular o funcionamento de grupos de cargas de FAD, tais como Frigoríficos Combinados (FrC) e Arcas Frigoríficas (AR), recorrendo a Modelos Fisicamente Baseados Simplificados (MFBS) Simples e com Redes Neurais Artificiais (RNA) com o intuito de substituir os Modelos Fisicamente Baseados (MFB) detalhados, que se tornam muito lentos devido ao facto de serem modelos iterativos onde são efetuados um grande número de cálculos por iteração. Assim pretende-se reduzir o tempo de cálculo destes modelos recorrendo a simplificações de cálculo e à flexibilidade e poder de aprendizagem das RNA, sem contudo, comprometer a qualidade dos resultados simulados.

É de grande importância compreender o comportamento da procura quando implementadas ações de GP para estudar a possibilidade de participação mais ativa da procura no funcionamento dos SEE no fornecimento de SS.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em diferentes capítulos. No Capítulo 2 é feita uma breve introdução ao setor elétrico e são analisados ao pormenor os Mercados de EE, com exemplos ilustrativos.

No Capítulo 3 é apresentada uma caracterização da GP e de SS. São também analisados neste capítulo os SS existentes nos diferentes mercados energéticos. No Capítulo 4 são apresentados e analisados criteriosamente os MFB de cargas FAD e os MFBS simples e com RNA desenvolvidos ao longo deste trabalho, bem como as vantagens destes modelos.

O Capítulo 5 trata a validação dos modelos desenvolvidos e é feita uma caracterização dos impactos da aplicação de ações de GP em cargas FAD com base nestes modelos, enquanto que no Capítulo 6 é analisado um caso de estudo. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões que este trabalho permitiu obter e são apresentadas algumas propostas de trabalho para o futuro.

Capítulo 2

Mercados de Eletricidade

2.1 O Setor Elétrico

Desde a sua gênese, os SEE têm vindo a crescer a nível mundial mas não de forma uniforme, no que diz respeito à sua estrutura, que difere de país para país. Após a segunda guerra mundial, os sistemas de energia elétrica a nível europeu foram nacionalizados como forma de procurar recuperar e expandir a área geográfica eletrificada [1].

Em 1975, após a implantação de um regime democrático em Portugal, foram nacionalizadas todas as empresas regionais do setor elétrico e, em 1976, ocorre a integração vertical do setor com a criação da empresa Eletricidade de Portugal (EDP). Entenda-se por empresa com estrutura verticalmente integrada do setor energético aquela que é responsável pela produção, transporte e distribuição de energia elétrica [1].

Na década de 1980, devido à grave crise petrolífera de 1973, o consumo de energia elétrica começou a apresentar um comportamento mais errático, dificultando a previsão dos consumos e os planeamentos de expansão do próprio setor elétrico, levando a que as suas várias atividades económicas começassem a ser desreguladas ou liberalizadas. O setor elétrico resistiu a esta tendência e só começou a sua reestruturação verdadeiramente em força, a partir dos anos 90 [1], como podemos verificar através da figura 2.1.

Com a liberalização apareceram diversos novos agentes no setor, aumentando a concorrência e transformando o próprio cliente num elemento mais ativo, tendo a possibilidade de escolher a entidade fornecedora do serviço. Do modelo verticalmente estruturado (uma empresa detinha em regime de monopólio a produção, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica) passou-se para um modelo em que existem dois monopólios naturais (transporte e distribuição) e diversas entidades competindo entre si na geração e na comercialização de energia [1].

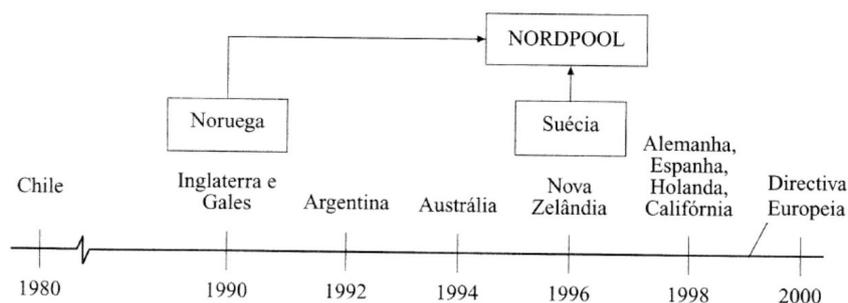


Figura 2.1: Cronologia da reestruturação do setor elétrico [2].

O equilíbrio entre geração e procura é um requisito para o bom funcionamento dos SEE e no modelo verticalmente integrado era usualmente prestado pelos geradores. No novo modelo do setor este é um serviço, entre um conjunto de serviços essenciais, que é necessário continuar a garantir [3].

Com a liberalização do mercado energético, a referência ao termo SS, ou seja serviços essenciais ao bom funcionamento dos SEE, passou a ser recorrente. Estes serviços que eram intrínsecos ao funcionamento dos sistemas no modelo verticalmente integrado, passaram a ser contratualizados e passíveis de serem fornecidos não só pela entidade geradora, mas também por outras vias, como por exemplo, com recurso à gestão da procura [3].

Da liberalização do mercado elétrico nasceram também diversas entidades que executam tarefas essenciais ao bom funcionamento dos SEE que até aí faziam parte das tarefas normais da empresa verticalmente estruturada. Algumas dessas entidades são, por exemplo, o ISO, que é responsável pela coordenação técnica do sistema; o Operador de Mercado (MO), responsável pela administração dos mercados, ou seja, por fazer o encontro entre as ofertas de compra e venda de energia elétrica; o Operador do Sistema de Transmissão (TSO), que é responsável pela agregação das atividades de transporte e os Consumidores Elegíveis (CE), ou seja, consumidores que podem escolher a entidade fornecedora de energia elétrica [1] [4].

A figura 2.2 mostra a atual estrutura do mercado elétrico.

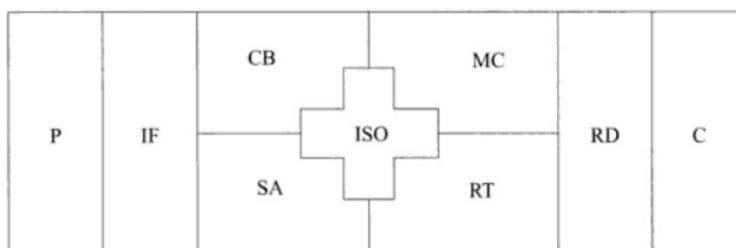


Figura 2.2: Modelo desagregado do sector elétrico [2].

Neste novo modelo desagregado do setor elétrico a produção (P), a Intermediação Financeira (IF) e a comercialização (C), atividades fortemente competitivas, encontram-se nas extremidades da figura onde encontramos também a Rede de distribuição (RD) que funciona em regime de monopólio regulado. É de referir que a Rede de Transporte (RT) que se encontra esquematizada na zona central deste esquema também funciona em regime de monopólio regulado. As restantes atividades da zona central do esquema são os Contratos bilaterais (CB), os Mercados Centralizados (MC), o ISO e os Serviços Auxiliares, também conhecidos por SS [5] [3].

2.2 Modelos de Mercado de Eletricidade

Após as alterações introduzidas com a reestruturação do setor, quase tudo passou a ser transacionável nos mercados, tanto a energia elétrica, como alguns serviços essenciais ao bom funcionamento dos SEE. Existem diversos modelos de mercados, porém as principais formas de transação são os contratos bilaterais e os mercados centralizados, habitualmente conhecidos como mercados em *Pool* [3].

Os contratos bilaterais pressupõem um contacto direto entre as entidades produtoras e comercializadores ou consumidores elegíveis, onde se estabelecem acordos contratuais relativos ao preço e à quantidade de energia a produzir ou a fornecer [6].

Os mercados tipo *Pool*, administram mecanismos a curto prazo nos quais se pretende equilibrar a produção e o consumo através de propostas comunicadas pelas entidades produtoras, por um lado e, pelos comercializados e consumidores elegíveis, por outro. Para determinar o ponto de encontro destas propostas o operador de mercados recorre a um despacho puramente económico para cada intervalo do dia seguinte. Este mercado tipo leilão funciona normalmente no regime *Day-Ahead*, ou seja, os resultados das propostas de compra e venda de energia que foram aceites são implementados no dia seguinte [6].

Dentro dos mercados tipo *pool* podemos destacar os modelos simétricos, onde há possibilidade de transmitir ofertas de compra e venda e, os modelos assimétricos, onde apenas é permitida a apresentação de propostas de venda de energia elétrica. Existem também dentro do mercado tipo *pool* os modelos obrigatórios, onde é obrigatório que todos os agentes apresentem ofertas de compra e venda de energia ao *pool* e os modelos voluntários, onde os agentes podem apresentar as suas propostas ao *pool* e/ou negociar diretamente entre produtor e consumidor através de mecanismos denominados por Contratos Bilaterais [6]. Um modelo de mercado tipo *Pool* (também conhecido como Centralizados ou *Spot*) em que é possível existirem Contratos Bilaterais em simultâneo designa-se por Modelo Misto [3].

2.3 Exemplos de Mercados de Eletricidade

2.3.1 Mercado Ibérico de Eletricidade, MIBEL

O Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) é constituído por Portugal e Espanha e foi criado em 2001. O primeiro passo dado por Portugal para a liberalização do setor elétrico é dado em 1994 com a criação da Rede Elétrica Nacional, S.A. (REN) com o intuito de começar a separação das atividades no setor elétrico. Em Espanha, com a aprovação da *Ley del Sector Eléctrico*, em Novembro de 1997, começou a reestruturação do setor elétrico Espanhol [6].

Com a entrada em vigor do Acordo Internacional assinado em Santiago de Compostela a 1 de Outubro de 2004, são estabelecidas as regras gerais de funcionamento deste mesmo mercado e as entidades autorizadas, em Portugal e em Espanha, a atuar neste mercado. Com o MIBEL passa a ser possível a qualquer consumidor, na Península Ibérica, adquirir energia elétrica a qualquer produtor ou comercializador, num regime de livre concorrência [7].

Os dois pólos responsáveis pela gestão dos mercados são o *Operador del Mercado Ibérico de Energia* (OMEL), responsável pela gestão dos Mercados Diário e Intradiário, e o Operador de Mercado Ibérico Português (OMIP), responsável pela gestão dos mercados de derivados. A junção dos operadores de mercado dos dois pólos, OMEL e OMIP, denomina-se Operador de Mercado Ibérico (OMI) [7].

O MIBEL apresenta um modelo de mercado misto. No que respeita ao mercado diário, este permite a realização de transações de energia a ser disponibilizada no dia seguinte ao da negociação. O mercado diário é um mercado do tipo *Pool*, simétrico e voluntário. De forma a complementar este mercado, surge o Mercado Intradiário, o qual permitirá ajustar o previsto pelo mercado diário às necessidades atuais. Ambos estão sujeitos a ofertas de compra e venda, indicando a cada dia e hora o preço e a quantidade de energia correspondentes [8]. Por seu lado, o mercado de serviços de sistema permite assegurar a fiabilidade e segurança da operação do sistema elétrico [8].

No contexto nacional, com a liberalização do mercado elétrico, a produção e a comercialização de eletricidade são objeto de concorrência, ao invés das redes que são um monopólio natural. A produção, por sua vez, está associada a um mercado grossista, enquanto que a comercialização associa-se a um Mercado Retalhista [8].

Resumidamente o MIBEL é constituído por um Mercado Grossista, onde se englobam o Mercado de Serviços de Sistema, o Mercado a Prazo e o Mercado Diário, e por um Mercado Retalhista onde se vende a parcela que pode ser livremente negociada entre o consumidor e o respetivo fornecedor [9].

No que diz respeito aos SS, em Portugal, a entidade responsável por esta vertente é a REN e, em Espanha, é a *Red Eléctrica de España*, S.A. (REE) sendo que

ambas são responsáveis pelo transporte de energia, tendo o papel de MO no respectivo país [9].

2.3.2 *Australian National Electricity Market, NEM*

O *Australian National Electricity Market (NEM)*, começou a sua operação em finais de 1998 e conecta atualmente Nova Gales do Sul, Victoria, Queensland, Austrália do Sul e Tasmânia, abastecendo cerca de 75% dos consumidores australianos. Devido às longas distâncias entre o NEM e outros sistemas, não existem conexões elétricas com outros mercados [10].

As transações de energia são realizadas num mercado centralizado (tipo *Pool*), onde as propostas de toda a geração são agregadas em intervalos de 5 minutos para atender à procura (*real-time market*) [10]. O mercado inclui meios físicos e financeiros sendo que o *Australian Energy Market Operator (AEMO)* gere este conjunto de procedimentos em conformidade com a Lei Nacional da Energia Elétrica. Comparativamente com outros mercados de energia, o NEM tem algumas restrições quanto aos preços que podem ser cobrados, pois estes estão limitados por um preço de controlo imposto pelos reguladores de cada estado (exceto Victoria, que removeu os seus limites de venda a retalho em 2009) [11].

O AEMO é simultaneamente o SO e MO do NEM. O *Demand Response Mechanism (DRM)* e o *Ancillary Services Unbundling (ASU)* são duas recomendações do *Australian Energy Market Commission (AEMC)* [10]. Estes pacotes de reformas destinam-se a fornecer às famílias, empresas e indústrias, mais oportunidades de fazer escolhas informadas sobre a forma como usar a eletricidade e gerenciar despesas. No que se refere a Serviços de Sistema, o AEMO opera oito mercados distintos para a prestação de *Frequency Control Ancillary Services (FCAS)*, *Network Control Ancillary Services (NCAS)* e *System Restart Ancillary Services (SRAS)* no âmbito de acordos com prestadores de serviços [10].

2.3.3 *New Zealand Electricity Market, NZEM*

O *New Zealand Electricity Market (NZEM)*, operado por uma empresa privada, a *M-co*, é um mercado voluntário e de auto-regulação [7].

O NZEM entrou em operação em Outubro de 1996 e todas as suas atividades começaram a desenvolver-se através de contratos multilaterais entre os diversos agentes sendo as transações de compra/venda realizadas através do mercado em tempo real. No mercado em tempo real do NZEM os participantes submetem as suas ofertas de compra/venda com um dia de antecedência em relação ao dia de operação, podendo ser alteradas até 2 horas antes do tempo da operação [7]. A *Transpower* é uma empresa estatal responsável pela programação e despacho que é também detentora da rede de transmissão da Nova Zelândia, ocupando assim as de ISO e TSO na estrutura vertical do novo mercado elétrico [7].

Desta forma, a *Transpower* é a entidade responsável pela coordenação em tempo real da transmissão de energia elétrica e pelo equilíbrio entre o consumo e a produção. A *Transpower* tem em conta os agentes produtores e consumidores que atuam no NZEM, bem como os que não participam nesse mercado e que utilizam a rede de transmissão nacional [7].

O mercado de SS permite assegurar a operação do sistema elétrico com boas condições de fiabilidade e segurança. Deste modo, os serviços auxiliares são contratados tanto a geradores (por exemplo, os serviços de controlo de frequência, de tensão e de re-start) como a algumas cargas que admitem reduções do seu consumo ou mesmo uma paragem no seu funcionamento durante certos intervalos de tempo [7].

Os SS na Nova Zelândia são pagos a quem os fornece consoante a sua disponibilidade e utilização. Os custos associados aos SS são pagos pelos agentes consumidores e pelas empresas distribuidoras [7].

2.3.4 *Electric Reliability Council of Texas, ERCOT*

Com 24 milhões de consumidores, o *Electric Reliability Council of Texas* (ERCOT) é o maior ISO do estado do Texas, representando cerca de 90% da procura desse estado [12]. Fundado em 1970 para cumprir as regras do *North American Electric Reliability Corporation* (NERC), foi substituindo as funções do Texas Interconnected System (TIS) e em Setembro de 1996 torna-se o primeiro ISO sem fins lucrativos dos EUA [12].

Em 2010, após pedidos do *Public Utility Commission of Texas* (PUC) (entidade reguladora) para melhorar o mercado e a eficiência da sua operação, entrou em funcionamento o sistema de gestão de mercado Nodal para substituir o sistema existente, onde a rede estava dividida em cinco zonas de gestão de congestionamentos. Por sua vez, o novo sistema está dividido em 8.000 nós. Isto permite realizar a programação de carga, licitação de geração e implementação do despacho para cada nó [12].

Mais de 95% da eletricidade é comprada e vendida no ERCOT através de contratos bilaterais [7].

O mercado Nodal tem um mercado em Tempo Real (intervalos de 15 minutos), cujo despacho é feito pelo ERCOT. Além deste tem também um *day-ahead market* e um mercado de SS [12].

No ERCOT a carga é vista como um elemento fundamental e pode participar como fornecedora de SS, como reservas girante, não girante e de regulação [7].

Capítulo 3

Gestão da Procura e Serviços de Sistema

3.1 Gestão da Procura

O crescimento do consumo de energia elétrica a nível mundial tem sido uma das maiores preocupações das últimas décadas. Aliado ao crescimento do consumo, também o aumento do preço dos combustíveis, usados nas mais convencionais formas de geração de energia elétrica, faz com que seja necessário repensar as políticas de gestão tanto no lado da geração como no da procura de energia. De uma forma geral pode dizer-se que as atividades envolvidas nos sistemas de energia apresentam um objetivo comum que é a redução de custos em todas as suas fases [13].

A geração tem a capacidade de aumentar ou reduzir a produção seja para satisfazer a procura ou para manter a estabilidade dos SEE, porém, este é um método que requer elevados investimentos, tanto ao nível das infraestruturas, como devido aos elevados preços das matérias-primas, levando à necessidade de procurar outras formas de manter a fiabilidade e a qualidade de serviço na rede.

A introdução das energias renováveis, a crescente evolução das regras de mercado e o aparecimento de novas tecnologias nos SEE proporcionou múltiplas oportunidades para as cargas participarem em programas de emergência, económicos e SS. Apesar disto as renováveis impõem também novos desafios no que diz respeito ao seu controlo e à estabilidade das redes.

Nos utilizadores domésticos, além da disseminação das tecnologias mais eficientes e de um nível adequado na utilização dos serviços de energia, a possibilidade de gerir quando se consome energia para obter esses serviços está já em muito países, de alguma forma, a contribuir para a alteração de paradigma nos SEE [13].

Assim surge a GP, que tem como principais objetivos a eficiência energética e a alteração de consumo de EE.

Inicialmente as cargas eram usadas para temporariamente serem desviadas de forma a reduzir o pico em horas de ponta. Atualmente algumas cargas são vistas como podendo ter uma utilização mais dinâmica e flexível, podendo mesmo participar diretamente em atividades até aqui reservadas à geração, como o fornecimento de SS [3]. As atividades realizadas no âmbito do condicionamento da procura são a gestão de cargas, ou seja, corte de pontas, enchimento de vales, desvio de consumos e diagrama de carga flexível, a conservação estratégica e o crescimento estratégico. Estas alterações ao diagrama de cargas promovidas pela Gestão da Procura estão representadas na figura 3.1.

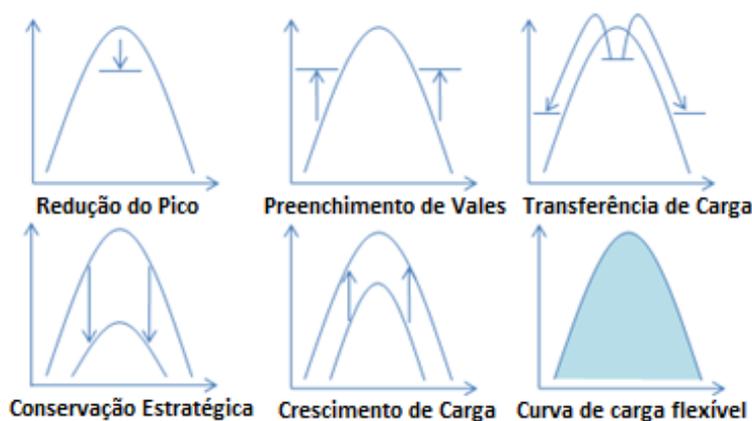


Figura 3.1: Alterações ao diagrama de cargas promovidas pela Gestão da Procura [14].

Os programas de GP podem ser caracterizados como ferramentas que podem ser usadas num curto espaço de tempo de forma a resolver situações críticas em que é necessário reduzir a procura. Estes programas podem ser divididos em duas categorias principais: *Time-based Program*, ou seja, programas baseados no período horário e *Incentive-based Program*, conhecidos como programas baseados em incentivos [3].

Nos programas baseados em incentivos, o utilizador recebe incentivos para modificar o seu padrão de consumo quando solicitado, sendo entre programas contratualizados. O Controlo Direto de Cargas (CDC) aplica-se a cargas onde existe alguma capacidade de armazenamento e que podem ser interrompidas, por breves instantes, sem degradar a qualidade do serviço de energia fornecido, como por exemplo, cargas de FAD. os Ar Condicionado (AC), ou os Termoacumuladores (TA).

Os programas baseados no período horário são caracterizados por o preço da eletricidade variar nos diferentes períodos de tempo, de acordo com o custo da geração de eletricidade. O desvio de consumos pode aplicar-se a cargas que não tenham um funcionamento contínuo e possam fornecer o seu serviço a qualquer hora do dia sem causar desconforto ou inconveniência ao consumidor. As máquinas de lavar e os veículos elétricos são bons exemplos de cargas que podem ser alvo deste programa.

A figura 3.2 representa esquematicamente a estrutura dos Programas de Gestão da Procura.

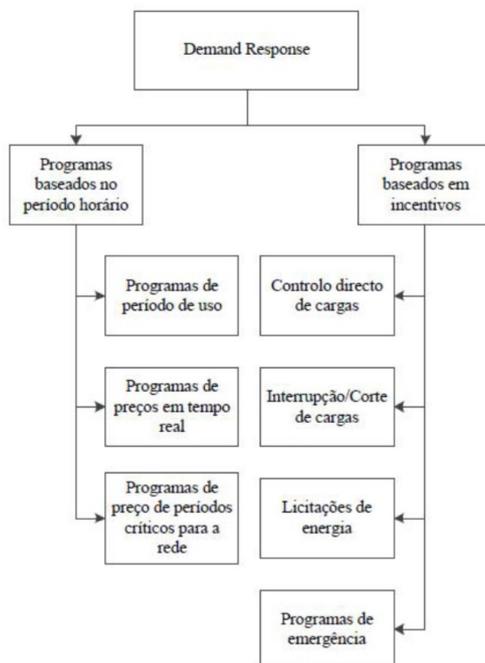


Figura 3.2: Programas de Gestão da Procura [15].

Existem algumas barreiras que condicionam a aplicação de medidas de gestão da procura, por exemplo, a falta de informação e conhecimento por parte do consumidor sobre a eficiência energética, a falta de fontes de financiamento para fazer frente aos relativamente elevados investimentos iniciais, a falta de incentivos, e a falta de experiência e infraestruturas para oferecer programas de gestão da procura por parte dos geradores.

3.2 Serviços de Sistema

É importante distinguir, na atual conjuntura, os mercados onde se negocia energia eléctrica dos mercados onde são transacionados serviços para a manutenção da segurança, estabilidade e fiabilidade do sistema. Os mercados de electricidade dividem-se, no que confere à aquisição de energia e serviços eléctricos em três géneros fundamentais: o mercado de contratos bilaterais onde se concretizam os contratos a longo prazo e o mercado diário onde há negociações a curto prazo, normalmente realizado no dia anterior sendo que estes dois mercados são coordenados pelo MO; por último temos o Mercado de Serviços de Sistema com um horizonte temporal mais alargado, sendo este coordenado pelo ISO, onde apenas são transacionados serviços que possibilitam o bom funcionamento dos SEE [16].

A liberalização do setor elétrico veio introduzir novas estruturas, agentes e mudanças nos papéis e atividades de alguns dos participantes já anteriormente existentes. Também a introdução das energias renováveis, que acrescentou variabilidade à geração, passou a ser necessário repensar a segurança, estabilidade e fiabilidade no fornecimento de eletricidade.

Em países como a Austrália e a Nova Zelândia foi criado um mercado em tempo real designado por *Real-time Balancing Market*. Este mercado atua até uma hora antes da operação, permitindo executar ajustes mais previsíveis. Neste mercado todos os geradores e cargas podem oferecer propostas ao ISO para aumentar ou diminuir a produção ou consumo.

O funcionamento adequado dos SEE requer um equilíbrio constante entre geração e procura de acordo com as limitações individuais das instalações de transmissão. No passado, esta condição era assegurada pelos geradores, porém, devido aos elevados encargos relativos a infraestruturas e também devido à possibilidade de estes não conseguirem assegurar sempre estes serviços, foi necessário repensar as políticas energéticas, procurando formas menos dispendiosas de manter a segurança, fiabilidade e estabilidade dos SEE [5].

De forma a poder lidar com a grande diversidade de formas de geração e graças ao grande desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, tem sido introduzida nos SEE uma panóplia de novas tecnologias (*Smart Meters*, os *Smart Thermostats*, a Internet com o IPv6, etc) que tem possibilitado a introdução e desenvolvimento das *Smart Grids*. Com tudo isto, e aliado à evolução das regras de mercado, surge a oportunidade das cargas participarem também em programas de emergência, económicos e de serviços de sistema [6].

Os SS são serviços essenciais para manter o bom funcionamento dos SEE, permitindo manter a frequência dos sistemas dentro dos limites definidos, controlar as tensões na rede, manter a estabilidade do sistema elétrico, prevenir congestionamentos na rede de transmissão, bem como restaurar o sistema ou parte dele caso ocorra uma falha [1] [17].

A definição de SS não é consensual e é difícil de uniformizar uma vez que pode variar de um sistema para outro, dependendo da estrutura do mercado e dos seus requisitos técnicos [5]. Existem mercados onde os SS são definidos como um conjunto de serviços, separados da produção de energia, que permitem a manutenção da segurança e fiabilidade do SEE [18] e, noutros são definidos como serviços necessários à transmissão de energia elétrica do vendedor até ao consumidor e que asseguram a qualidade da energia fornecida [5].

A classificação dos SS é distinta de mercado para mercado. No Mercado Australiano (NEM) os serviços de sistema estão divididos em três categorias [11]:

- *Frequency control ancillary services* (FCAS) Serviços de controlo de frequência - podem ser fornecidos pelos geradores e por grupos de cargas e são vendidos no mercado de FCAS.

- Serviços de regulação - Serviços fornecidos pelo controlo automático do gerador quando há pequenos desvios na frequência do sistema.
- Serviços de contingência - Serviços usados quando existem grandes desvios na frequência:
 - * 6 segundos - resposta imediata a desvio de frequência - fornecido por geradores de rápida resposta.
 - * 60 segundos - resposta para manter a frequência dentro da banda de contingência - fornecido por cargas ou geradores
 - * 5 minutos - resposta que coloca a frequência na banda de normal funcionamento - fornecido por cargas ou geradores
- *Network control ancillary services* (NCAS) - Serviços que permitem ao operador de sistema manter e aumentar a eficiência e a capacidade da rede, dentro dos limites de operação. Entre eles destacam-se: O Controlo de Tensão - Serviço fornecido por geradores com controlo automático; Os Controlos de Estabilidade e de carga - Garantido pelos geradores. Estes serviços são adquiridos no mercado numa base bienal em mercados de NCAS.
- *System restart ancillary services* (SRAS) - serviço de recuperação após uma falha grave no sistema, que levou ao desligar do sistema ou de grande parte dele. Apenas geradores podem fornecer este serviço.

Na Nova Zelândia, no New Zealand Electricity Market NZEM existe a seguinte organização de serviços de sistema [19]:

- *Frequency Keeping* - Serviços de manutenção da estabilidade da frequência fornecidos por geradores.
- *Instantaneous Reserve* - Reserva instantânea que aumenta a geração de energia ou suprime a carga em caso de falha no sistema (interruptibilidade). Pode ser fornecido por gerador e por grupos de cargas.
- *Over-frequency Reserve* - Reserva fornecida pelas unidades de geração quando existe um desvio dos valores normais de frequência.
- *Voltage Support* - É uma reserva instantânea que pode ser fornecida pela geração convencional ou por cargas interruptíveis para responder a uma súbita alteração dos valores de tensão por falha na geração.
- *Black Start* - Serviço de recuperação após uma falha grave no sistema, que levou ao desligar do mesmo ou de grande parte dele, sendo este fornecido por geradores com capacidade de reiniciar o sistema.

A nível Europeu, os Serviços de Sistema estão divididos em três grupos: serviços relativos a energia ativa, destinados a assegurar o equilíbrio entre produção e carga onde se incluem reservas primária, secundária e terciária, serviços relativos a potência reativa, como o controlo de tensão e serviços de Reposição

de Serviço/*black start* [18]. Esta classificação é usada nos mercados Espanhol, Português, dos Países Nórdicos, de França, de Inglaterra, da Alemanha entre outros.

De uma forma geral, a nível Europeu, podemos classificar os SS europeus referidos em [16]:

- Controlo de frequência - Estes SS, relacionados com as reservas de potência ativa, encontram-se divididos de acordo com o tempo ao fim do qual se encontram disponíveis em controlo da reserva primária, secundária e terciária. A regulação primária visa corrigir automaticamente os pequenos desvios entre a produção e o consumo que dão origem a desequilíbrios [20]. Estes serviços são ativados em segundos para repor os níveis de frequência e são prestados pelos geradores de forma mandatária. A regulação secundária permite corrigir desvios mais acentuados de frequência, que a reserva primária não consegue resolver. Estes são serviços prestados pelos geradores com capacidade de injetar energia na rede num curto espaço de tempo (geradores com ao *Automatic Generation Control, AGC*) e entram em ação cerca de 30 segundos após a falha. É um serviço voluntário e remunerado e a sua contratação é feita no mercado de SS através da apresentação de ofertas de venda por parte das unidades de produção ou através de contratos bilaterais. Já a regulação terciária tem como objetivo principal a reposição da reserva secundária. Este é um ajuste manual, podendo implicar a ativação de grupos de geradores que estejam desligados ou em *standby* [17].

Na figura 3.3 está representado o tempo de ativação das reservas após uma perturbação.

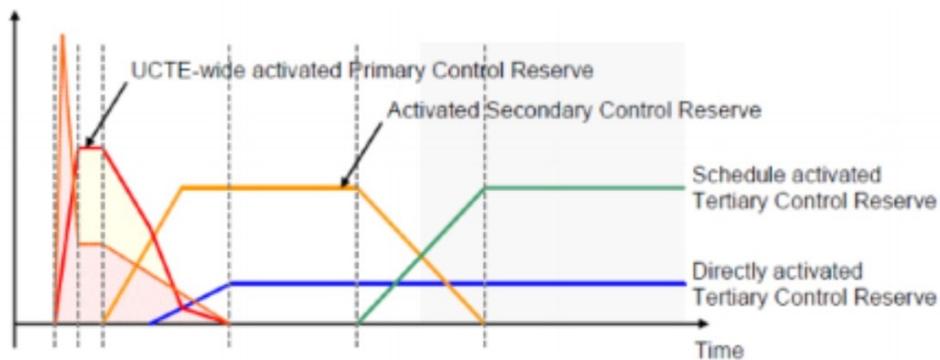


Figura 3.3: Ativação das reservas após uma perturbação [21].

- Controlo de Tensão - O controlo de tensão num sistema de energia em corrente alternada é realizado através da atuação na produção e absorção de energia reativa. É um serviço obrigatório e não remunerado, fornecido pelos geradores que possuam um sistema automático de controlo de tensão;
- Reposição de Serviço/*Black Start* - A reposição de serviço, também denominado de *Black Start* consiste na capacidade de uma unidade produtora

passar de uma condição de não operacionalidade para uma condição de operacionalidade sem recorrer à rede elétrica ou qualquer outra fonte de energia externa. Este serviço é obrigatório e, normalmente, não remunerado.

Nos Estados Unidos da América, em mercados como o *Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection* (PJM), *California Independent System Operator* (CAISO), ERCOT, *Midwest Independent System Operator* (MISO), *New York Independent System Operator* (NYISO), entre outros, os seus SS são divididos em [22] [3]:

- Reserva de Resposta em Frequência (*frequency response reserve*) - providencia uma resposta inicial de frequência a grandes distúrbios; também designada por controlo primário ou resposta do regulador, atuando em segundos;
- Reserva Regulatória (*regulating reserve*) - para manter o erro da área de controlo dentro de limites em resposta a movimentos aleatórios num espaço de tempo menor do que aquele que seria se fosse o mercado a atuar; também conhecida por controlo secundário, atuando em segundos;
- Reserva de Modulação de Carga (*load following reserve*) - para manter dentro de limites a frequência e o erro da área de controlo, devido a movimentos não aleatórios; também chamado de reserva terciária, atuando em vários minutos;
- Reserva Girante (*spinning reserve*) - fontes sincronizadas com a rede que podem ser colocadas em serviço de forma imediata em resposta a uma solicitação;
- Reserva Não Girante (*non-spinning reserve*) - neste caso, não se encontram sincronizadas com a rede, sendo necessário fazer a sincronização quando solicitada. São fontes com uma resposta mais lenta que a reserva girante;
- Reserva Suplementar (*supplemental reserve*) - para substituir a reserva rápida para restauro de um pré-evento; também chamada de reserva terciária ou reserva de substituição, atuando em minutos a horas.
- Controlo de tensão;
- Reposição de Serviço/*Black Start*.

As reservas regulatória e de modulação de carga são usadas durante o funcionamento normal do sistema. Por sua vez, as reservas girante, não girante e suplementares são usadas em situações de contingência [22] [5].

Na figura 3.4 é possível ver o tempo de resposta que cada um dos serviços exige, nos sistemas europeu e americano.

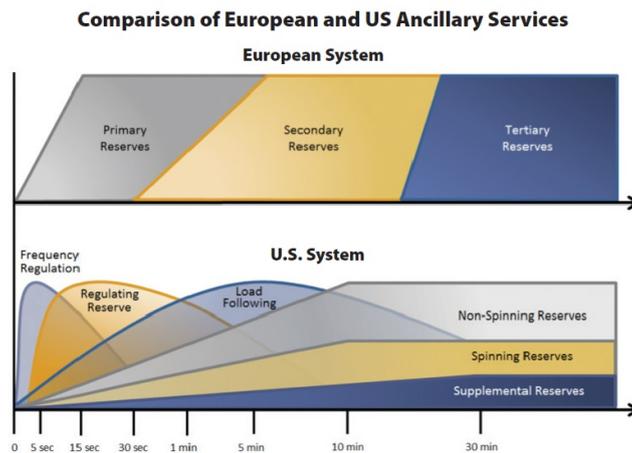


Figura 3.4: Comparação dos sistemas europeu e americano e o tempo de resposta [23].

3.2.1 Participação das Cargas em Serviços de Sistema

Nas últimas décadas temos vindo a assistir a um aumento da taxa de posse de equipamentos elétricos e o consumo doméstico já representa mais de 20 por cento do consumo de energia nacional. Os equipamentos de utilização final que podem ser alvo de gestão da procura perfazem cerca de 64 por cento do consumo residencial (Figura 3.5). A sua flexibilidade de controlo e as elevadas taxas de posse destes equipamentos, dão-nos uma ideia do grande potencial da GP para conseqüente fornecimento de SS que existe neste setor.

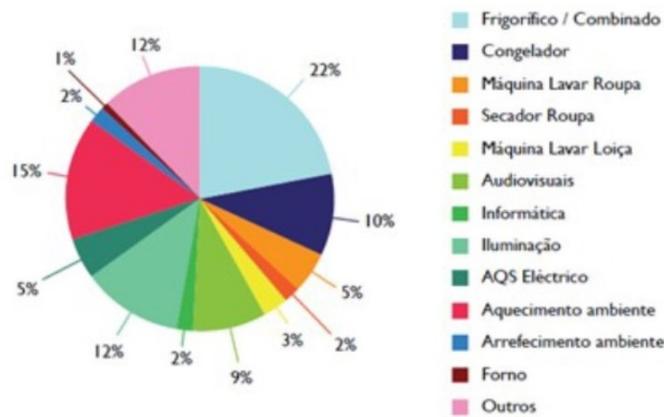


Figura 3.5: Desagregação dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais (2002) [24].

A nova configuração dos mercados de energia elétrica, após a sua reestruturação, permite que a procura tenha um papel muito mais ativo nos SEE, nomeadamente no fornecimento de serviços de sistema. Os serviços de sistema deixaram de ser exclusivamente disponibilizados pela geração e passaram gradualmente a ser, em parte, fornecidos por algumas cargas, como já foi referido.

Com o aparecimento das *Smart Grids* e de novas tecnologias passou a ser pos-

sível controlar a procura de forma inteligente, contribuindo para a Utilização Racional de Energia, para a redução da fatura energética e para a manutenção da estabilidade, segurança, e fiabilidade do sistema de energia elétrica.

Para que o utilizador se interesse mais em participar nestes programas, existem incentivos que pode obter como vantagem direta por fornecer estes serviços com a disponibilização das suas cargas para fornecimento de SS.

Contudo, existem barreiras à participação de cargas em SS. Na sua génese, os SEE foram concebidos de forma a que apenas geradores providenciassem energia, capacidade ou serviços à rede para a manutenção do seu bom funcionamento. A mudança tem sido gradual mas, por vezes, adiada quer por razões técnicas, económicas ou mesmo culturais. De um modo geral, as principais categorias de barreiras ao uso de carga para fornecimento de SS são [3]:

- Barreiras Técnicas - Entendam-se por barreiras técnicas os entraves que se colocam na possibilidade de agregação e na disponibilidade das cargas. A reparametrização ou corte destas cargas não pode comprometer a sua qualidade de serviço uma vez que, estamos a falar de cargas domésticas o que torna difícil agregar cargas e prever num curto espaço de tempo a possibilidade desse grupo de fornecer ou não SS. A própria capacidade necessária para rapidamente identificar um conjunto de cargas que possam fornecer a capacidade necessária para manter a fiabilidade e estabilidade do SEE é também uma barreira técnica. É necessária a criação de mecanismos que permitam esta identificação;
- Barreiras Regulatórias/Legislativas - Nos dias de hoje, alguns mercados permitem a introdução de cargas para o fornecimento de SS, no entanto, existem Barreiras Regulatórias/Legislativas noutros mercados que o impedem. Muitas das legislações existentes ainda referem os geradores como única fonte para o fornecimento destes serviços, havendo mesmo alguma resistência por parte das entidades responsáveis no uso de cargas. Também os próprios requisitos que se verificam em alguns SS dificultam o uso de cargas, nomeadamente a capacidade sob controlo, o tempo de resposta e a disponibilidade.
- Quantificação e disponibilização de incentivos - Os incentivos dados aos consumidores por disponibilizarem as suas cargas para fornecerem SS podem passar pela redução do preço da fatura ou por um incentivo diretamente dado ao utilizador. No entanto é difícil definir quem irá dar este incentivo, que meios serão usados para o seu fornecimento e como avaliar e quantificar ao nível individual.
- Participação do utilizador final - Muitas vezes por falta de informação, o consumidor não quer participar nestes programas e questiona se com a sua participação não vai colocar em causa a qualidade do serviço de energia fornecido pelas suas cargas. É importante informar e sensibilizar o utilizador final e mostrar-lhe como pode ser útil a disponibilização das suas

cargas e como pode, eventualmente, beneficiar, direta e indiretamente, por poder participar no fornecimento de tais serviços.

Apesar destas barreiras, os mercados estão, na sua generalidade mais abertos à participação de cargas em serviços de sistema.

As *Smart Grids*, com o crescente recurso às TIC tornam possível a comunicação entre os diferentes intervenientes dos SEE, incluindo consumidores, fornecedores e produtores e todas as entidades que regulam o sistema. Estas viabilizam também o controlo de cargas criando a possibilidade de gerir a rede não só do lado da geração mas também da procura. Desta forma, torna-se muito importante conhecer os diferentes tipos de cargas, classificando-as em diferentes categorias, para as poder enquadrar nos programas de GP corretos. Assim sendo podemos classificar os diferentes tipos de cargas a nível residencial da seguinte forma [25] [3]:

- Cargas Não Controláveis - cargas que, quando controladas, podem levar ao desconforto do utilizador ou perturbação de atividades (iluminação, equipamento de escritório e de entretenimento, entre outras);
- Cargas Parametrizáveis - cargas que são termostaticamente controláveis e permitem um ajuste das definições do termostato sem causar desconforto para o utilizador (equipamentos de ar condicionado, termoacumuladores, equipamentos de frio alimentar doméstico);
- Cargas Interrompíveis - cargas que podem ser interrompidas durante um curto período de tempo sem diminuir a qualidade de energia do serviço prestado (equipamentos de ar condicionado, termoacumuladores, equipamentos de frio alimentar doméstico);
- Cargas Desviáveis - cargas cuja função pode ser adiada ou antecipada, de acordo com preferências do utilizador.

Tendo em conta esta caracterização, é muito importante estudar as cargas residenciais e a sua capacidade de fornecerem SS. Estas têm que respeitar diferentes requisitos de cada serviço relativamente ao tempo de resposta, Período Contínuo de Energia (PCE) e tamanho mínimo a disponibilizar. Por PCE, entenda-se o tempo durante o qual uma quantidade de potência pode ser disponibilizada continuamente, devido à aplicação de um ação de GP.

A nível doméstico, a potência que cada utilizador pode disponibilizar para fornecer SS é relativamente baixa, tornando-se assim muito importante falar de agregação de cargas, ou seja, da possibilidade de juntar um grupo de utilizadores que possa unir a sua disponibilidade de reduzir ou aumentar a capacidade a solicitar à rede para fornecer serviços à mesma. Existem mercados em que a agregação não é permitida, o que não significa que a procura não possa fornecer SS, como são exemplo as cargas industriais que atingem os valores mínimos de capacidade a fornecer. O agregador pode ser um comercializador ou outra entidade que respeite todas as regras para o fornecimento de SS e que consiga

reunir clientes para fornecer a capacidade mínima de agregação permitida em cada mercado.

Para que a GP possa desempenhar o seu papel, no que diz respeito à aplicação de ações para fornecimento de SS é necessário que o utilizador possua as tecnologias adequadas de conexão com a rede, que o ISO utilize algoritmos eficazes para prever a disponibilidade das cargas fornecerem estes serviços e que a regulamentação permita a participação das cargas nestas tarefas.

Com a necessidade a nível mundial de reduzir os custos associados à manutenção do bom funcionamento dos SEE, muitos mercados têm introduzido os meios necessários para a participação de cargas em programas de GP e conseqüentemente, ao fornecimento de SS. A nível europeu tem-se trabalhado de forma a haver uma harmonização das regras de mercado (Anexo A). Em geral, os mercados a nível europeu têm vindo introduzir as cargas como fornecedoras de serviços nos últimos anos, apesar das barreiras regulatórias e tecnológicas ainda existentes. As tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 e resumem os requisitos para a participação de Cargas nas Reservas Primária, Secundária e Terciária em alguns Estados Membros da UE (mais informações no Anexo B). De referir que os requisitos mais importantes para este estudo são o valor mínimo de potência que se pode disponibilizar, o tempo durante o qual uma quantidade de potência pode ser disponibilizada continuamente (PCE) e o facto de a agregação de cargas ser ou não permitida.

Tabela 3.1: Participação de Cargas na Reserva Primária em alguns Estados Membros da UE [26] [27] [28].

País	Tamanho Mínimo (MW)	Agregação Permitida	Período Contínuo de Energia
Austria	1	Não	30 minutos
Bélgica	1	Sim	15 minutos
França	1	Sim	Não disponível
Dinamarca	0,3	Sim	15 minutos
Itália	Não disponível	Não	Não disponível
Portugal	Não disponível	Não	Não disponível

Tabela 3.2: Participação de Cargas na Reserva Secundária em alguns Estados Membros da UE [26] [27] [28].

País	Tamanho Mínimo (MW)	Agregação Permitida	Período Contínuo de Energia
Austria	5	Sim	4 horas
Bélgica	Não disponível	Não	Não disponível
França	1	Sim	Não disponível
Dinamarca	1	Sim	30 minutos
Itália	Não disponível	Não	Não disponível
Portugal	Não disponível	Não	Não disponível

Tabela 3.3: Participação de Cargas na Reserva Terciária em alguns Estados Membros da UE [26] [27] [28].

País	Tamanho Mínimo (MW)	Agregação Permitida	Período Contínuo de Energia
Austria	1	Sim	4 horas
Bélgica	1	Sim	2 horas
França	10	Sim	Não disponível
Dinamarca	10	Sim	Não disponível
Itália	Não disponível	Não	Não disponível
Portugal	Não disponível	Não	Não disponível

Os SS em Portugal, de acordo com a legislação em vigor, são assegurados na sua generalidade pela geração, podendo os consumidores em MAT, AT ou MT fornecer serviços de interruptibilidade com uma potência máxima interruptível, não inferior a 4 MW, para todos os tipos de interruptibilidade. [20].

No que diz respeito aos SS em mercado como CAISO, ERCOT, MISO, PJM, NYISO e Independent System Operator-New England (ISO-NE), há a possibilidade de cargas participarem no fornecimento de SS, mediante o cumprimento de determinados requisitos que se encontram resumidos nas tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4: Requisitos para a participação de Cargas em Serviços de Regulação [29]

Mercado	Tamanho Mínimo (MW)	Agregação Permitida	Período Contínuo de Energia
CAISO	0,5	Não	60 minutos
ERCOT	0,1	Não	Não disponível
MISO	1	Não	60 minutos
PJM	0,1	Sim, mediante aprovação	Não disponível
NYISO	1	Não	Não disponível
ISO-NE	Não disponível	Não disponível	Não disponível

Tabela 3.5: Requisitos para a participação de Cargas em Reserva Girante [29]

Mercado	Tamanho Mínimo (MW)	Agregação Permitida	Período Contínuo de Energia
CAISO	0,5	Não	30 minutos
ERCOT	0,1	Não	Não disponível
MISO	1	Sim	60 minutos
PJM	0,1	Sim, mediante aprovação	Não disponível
NYISO	1	Não	60 minutos
ISO-NE	1	Sim	Não disponível

Capítulo 4

Modelos Para Simulação de Cargas FAD

4.1 Fenómenos Físicos Subjacentes às Cargas de Frio Alimentar Doméstico

A humanidade desde muito cedo sentiu necessidade de conservar os seus alimentos, recorrendo ao sal e outras formas de conservação que se revelaram ineficazes. Com o evoluir da ciência e das tecnologias subjacentes, concluiu-se que a melhor forma de conservar alimentos era através do frio. Quando se fala em equipamentos capazes de produzir frio mecanicamente, ou seja, manter um fluido a uma determinada temperatura, dentro de uma banda de valores, referem-se conceitos e aplicações que envolvem transferência de calor. As cargas FAD podem ser descritas como equipamentos com capacidade de transferir calor de um ambiente mais frio para outro mais quente, com o objectivo de preservar alimentos [13].

Da termodinâmica, sabe-se que a energia necessária para variar a temperatura de um fluido pode ser definida através da equação 4.1 [30]

$$Q = M.C_p.\Delta T \quad (4.1)$$

onde,

- Q representa a quantidade de energia transmitida ao fluido [J],
- M representa a massa do fluido [kg],
- C_p representa o calor específico do fluido [J/(kg.°C)],
- ΔT representa a variação de temperatura desejada [°C].

Quatro processos permitem a transferência de energia térmica de um corpo para o outro: a condução, a convecção, a radiação e a evaporação. A condução é um fenómeno onde se verifica a transferência de calor devido a uma diferença de

temperatura entre duas regiões que são separadas por um corpo sólido. Relativamente à convecção, a transferência de calor ocorre em consequência dos movimentos de fluidos que se verificam em virtude das diferenças de temperatura. Por seu lado, a radiação resulta do deslocamento de fótons de uma superfície para a outra. Por fim, na evaporação há fluxo de energia devido à mudança de fase de uma substância [31].

Os equipamentos FAD foram idealizados com base na máquina de Carnot, que estabelece o Ciclo de Carnot como ciclo de rendimento máximo e o seu funcionamento pode ser explicado pela alternância de duas transformações isotérmicas com duas adiabáticas (figura 4.1).

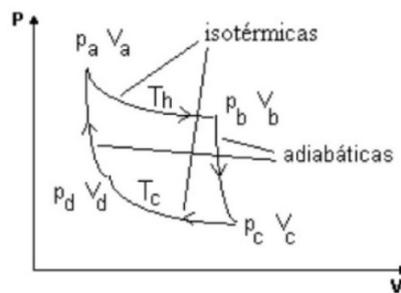


Figura 4.1: Ciclo de Carnot [32]

O funcionamento dos equipamentos estudados ao longo deste trabalho baseia-se como referido no ciclo de *Carnot* que compreende quatro fases: evaporação, compressão, conservação e expansão.

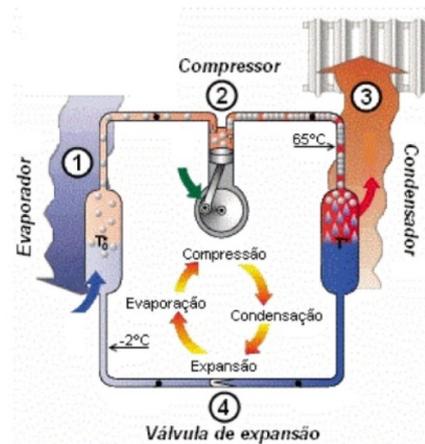


Figura 4.2: Ciclo Frigorífico [33]

Como é perceptível pela figura 4.2, os equipamentos possuem, no seu interior, um evaporador onde circula o gás a uma temperatura baixa. Este gás é aquecido por transferência do calor do interior do equipamento e, para que este calor seja

transferido para o exterior, usa-se um compressor. O compressor, ao aumentar a pressão ao gás, aumenta a sua temperatura. O gás aquecido segue o percurso pelo sistema de refrigeração, chegando ao condensador, onde ocorrem as trocas de calor com o ar exterior. Assim, o gás é arrefecido e condensado. O líquido refrigerante, de seguida, passa por uma válvula de expansão, onde há uma redução de pressão, sofrendo evaporação e arrefecimento imediato. Por fim, este gás frio entra no evaporador, terminando o seu ciclo.

Nos equipamentos FAD estudados neste trabalho, mais vulgarmente conhecidos por Frigorífico Combinado e Arca Frigorífica, o ciclo de transformação é realizado em sentido contrário ao de uma máquina térmica, sendo que absorve de uma pequena quantidade de calor a baixa temperatura e cede calor a um fluido a uma temperatura mais elevada, sendo para isso necessário aplicar uma certa quantidade de trabalho sobre o sistema [13].

Os modelos concebidos neste trabalho simulam o fornecimento de energia ao fluido de forma a aumentar/diminuir a quantidade de energia térmica armazenada no fluido. Consoante o equipamento em questão, devem ser tidos cuidados na estimação das perdas, tendo em conta a constituição dos próprios equipamentos, zonas de contacto do fluido com o equipamento, entre outras [31].

4.2 Modelos Fisicamente Baseados de Cargas de Frio Alimentar Doméstico

A possibilidade de executar diversas ações de GP em cargas termostáticas, levou ao estudo e desenvolvimento de modelos que permitem analisar antecipadamente os impactos destas ações, quer no serviço fornecido, quer no comportamento das cargas em termos de potência solicitada à rede. A duração da interrupção, a temperatura ambiente, a estabilização após uma ação ou interrupção, entre outros parâmetros influenciam as cargas a serem usadas nas ações de GP. É assim crucial recorrer aos chamados Modelos Fisicamente Baseados (MFB), que mais não são do que modelos que procuram reproduzir fielmente o funcionamento (fenómenos físicos, como trocas de calor) deste tipo de cargas.

É de realçar que os frigoríficos e as arcas congeladoras são equipamentos que estão ligados durante todo o dia e que têm elevadas taxas de posse, pelo que são de grande interesse para este estudo. Nestas cargas embora o serviço de energia esteja continuamente a ser fornecido, o equipamento nem sempre está a consumir energia [31]. Tal situação, leva à ponderação do uso deste tipo de cargas para o fornecimento de SS.

Os MFB de simulação de cargas individuais são precisos, robustos e têm boa performance. Porém, quando usados na simulação de grandes grupos de cargas, da ordem dos milhares ou milhões de cargas, a sua performance degrada-se imenso o que impossibilita o seu uso para analisar, num curto período de tempo,

o impacto das ações. Tal facto impossibilita que o TSO, Operador de Sistema de Distribuição (DSO) ou agregador responsável pela gestão de grupos de cargas possa usar estas ferramentas em tempo real para simular a capacidade de fornecimento de SS por parte da procura. Tudo isto atribui uma especial importância à melhoria das ferramentas existentes e à implementação de novos métodos que possibilitem simular os consumos destas cargas em tempo útil e prever a capacidade que a procura tem de fornecer SS, ao permitir antever o impacto das ações que são necessárias para fornecer SS.

Com a evolução das tecnologias surgiram novas oportunidades na área da computação, tanto pela evolução do hardware como de algumas ferramentas de software que permitem melhorar a performance dos algoritmos.

A simplificação de algoritmos de MFBs e as Redes Neurais, com a sua capacidade de adaptação a um treino específico, podem responder aos desafios identificados, nomeadamente com acréscimos de performance em relação aos MFB.

Neste trabalho foram implementados Modelos Fisicamente Baseados Simplificados, com e sem Redes Neurais e modelos de grupos de cargas que recorrem a ferramentas avançadas, como o processamento paralelo do *MATLAB*, para melhorar sua a performance comparativamente com os modelos anteriormente implementados.

Nos modelos de grupos de cargas que permitem a agregação de cargas, e também a possibilidade de variar alguns parâmetros, foi criada de uma amostra representativa, bastante diversificada, com o intuito de aproximar, quanto possível, à variedade de equipamentos que encontramos entre residências. Foram usados modelos individuais já implementados e validados anteriormente de forma a fazer uma análise comparativa entre as novas ferramentas desenvolvidas e as ferramentas existentes.

4.2.1 Modelos Fisicamente Baseados de Frio Alimentar Doméstico Detalhados

Os MFB de cargas FAD permitem saber em cada instante, o valor de cada variável de interesse que caracteriza o fenómeno físico que ocorre nas cargas. Assim, com recurso a estes modelos, é possível simular o funcionamento de equipamentos e avaliar o impacto de ações de gestão da procura [31].

As cargas FAD funcionam em regime de ON/OFF, ou seja, programa-se o seu termostato à temperatura desejada e o sistema de controlo liga ou desliga o equipamento consoante a temperatura atinja o valor superior ou inferior de uma banda de temperaturas bem definida, a Banda Morta (BM). No ciclo ON, diminuiu-se a temperatura até esta atingir o valor mínimo da BM e no ciclo OFF, a temperatura sobe até atingir o limite superior da referida banda. De referir que, tipicamente, o FAD se encontra a consumir energia da rede no ciclo ON e não

consome energia no ciclo OFF.

Assim, podemos dividir o modelo em duas equações fundamentais, uma que se refere ao estado ON e outra referente ao estado OFF. O ciclo OFF é modelado através da seguinte equação:

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + \frac{Q_p}{M.C_p}.\Delta t \quad (4.2)$$

onde,

- $T_{interior}(t)$ representa a temperatura no instante atual [$^{\circ}\text{C}$],
- $T_{interior}(t + \Delta t)$ representa a temperatura no instante seguinte [$^{\circ}\text{C}$],
- Q_p representa a potência de perdas do frigorífico [W],
- M representa a massa do corpo [kg],
- C_p representa o calor específico do corpo [J/(kg. $^{\circ}\text{C}$)],
- Δt representa o intervalo de tempo de discretização [s].

Quando em ciclo ON, a temperatura no interior varia de acordo com a equação:

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + \frac{-P.COP + Q_p}{M.C_p}.\Delta t \quad (4.3)$$

onde,

- P representa a potência do compressor [W],
- COP representa o coeficiente de desempenho.

Caso existisse um perfeito isolamento destes equipamentos e não houvesse abertura da porta ou, se não se introduzissem alimentos/bebidas no interior, não precisaríamos de lhes fornecer energia para manter constante a temperatura no seu interior, porém, este é um fator muito importante a ter em conta. Neste modelo as perdas foram modeladas pela equação 4.4:

$$Q_p = \frac{\Delta T'}{R} \quad (4.4)$$

onde,

- $\Delta T'$ representa a diferença de temperatura interior e a temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$],
- R representa a resistência térmica total [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

A resistência térmica total deve em conta os diferentes tipos de fenômenos envolvidos na transferência de calor pela envolvente que ocorrem, bem como a organização dos diversos compartimentos e as diferentes áreas efetivas envolvidas [3].

Para calcular o produto $M.C_p$, é necessário ter em conta a composição da parede. Observe-se a figura 4.3.

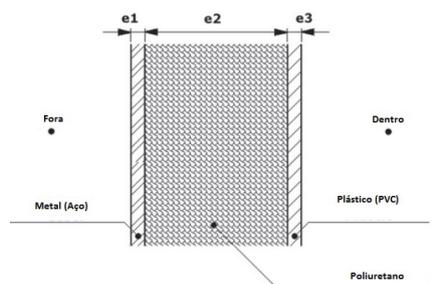


Figura 4.3: Esquema da parede do equipamento de FAD [13].

Assim, este produto é obtido através da equação 4.5 [3] [13]:

$$M.C_p = M_{e1}.C_{pe1} + M_{e2}.C_{pe2} + M_{e3}.C_{pe3} + M_{ar}.C_{par} \quad (4.5)$$

onde,

- M_{e1} representa a massa de metal (aço) [kg],
- C_{pe1} representa o calor específico do metal (aço) [J/(kg.°C)],
- M_{e2} representa a massa de poliuretano [kg],
- C_{pe2} representa o calor específico do poliuretano [J/(kg.°C)],
- M_{e3} representa a massa de plástico (PVC) [kg],
- C_{pe3} representa o calor específico do plástico (PVC) [J/(kg.°C)],
- M_{ar} representa a massa de ar [kg],
- C_{par} representa o calor específico do ar [J/(kg.°C)],

4.3 Modelo Fisicamente Baseado Simplificado de Cargas de Frio Alimentar Doméstico

Com o intuito de melhorar o funcionamento das ferramentas existentes, nomeadamente a sua performance, foram criados MFBS, baseados nos MFB existentes. Os MFBS usados no presente trabalho têm como objectivo simular cargas

FAD para a identificação de recursos do lado da procura para fornecimento de SS. Estes modelos deverão apresentar resultados com precisão adequada quando comparados com os resultados dos modelos existentes já validados, no que respeita ao seu normal funcionamento e aquando da aplicação de ações de gestão da procura, tendo como valor acrescentado a sua rapidez de processamento o que permitirá a sua execução em tempo real por exemplo, por parte de um TSO, DSO ou mesmo de um agregador responsável pela gestão de cargas. Para isso é necessário conseguir ter um tempo de cálculo suficientemente baixo mas com precisão adequada.

Como vimos nas equações 4.2 e 4.3, que regem o comportamento das cargas FAD, existe a componente Q_p associada às perdas das cargas devido à diferença de temperaturas entre o interior e exterior dos equipamentos e que está também dependente da resistência térmica dos materiais que o compõem. Esta componente é diferente em cada instante uma vez que todos os seus parâmetros podem variar com o tempo.

Uma forma de poupar tempo de simulação e simplificar os modelos FAD é calcular à priori as perdas Q_p , partindo do pressuposto que a temperatura interior se mantém constante neste processo e que a diferença de temperaturas pode ser calculada através da diferença entre a temperatura ambiente e o valor médio da BM.

A Figura 4.4 ilustra graficamente a evolução temporal da temperatura e a simplificação feita que nos permite assumir um ΔT constante ao longo da simulação de cada carga.

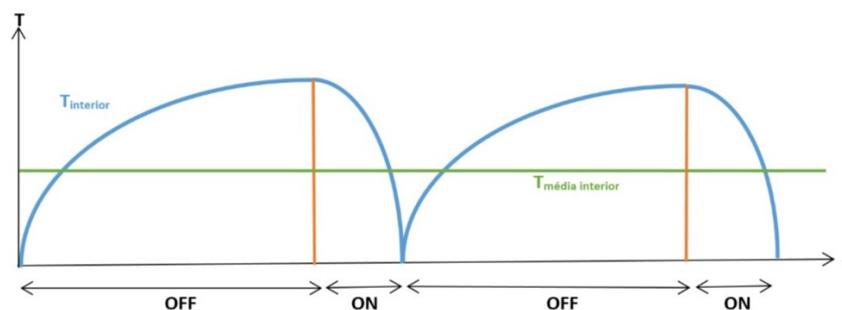


Figura 4.4: Variação da temperatura dentro de equipamento FAD.

O cálculo simplificado das perdas é dado pela equação 4.6.

$$SQ_p(t) = \frac{T_{amb}(t) - \frac{T_{Max}(t) + T_{Min}(t)}{2}}{R} \quad (4.6)$$

onde,

- $SQ_p(t)$ representa o cálculo das perdas simplificado [$^{\circ}\text{C}$],

- $T_{amb}(t)$ representa a temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$],
- $T_{Max}(t)$ e $T_{Min}(t)$ representam os valores de temperatura máxima e mínima, respetivamente [$^{\circ}\text{C}$],

Como o cálculo das perdas é feito à priori e de um só vez para todo tempo de simulação, ao invés do que era realizado no modelo detalhado, onde as perdas eram calculadas a cada instante, existe um decréscimo no tempo de execução da ferramenta.

Tal como nos modelos FAD comuns podemos modelar os ciclos ON/OFF em duas equações. Os ciclos ON/OFF são modelados pelas equações 4.7 e 4.8, respectivamente.

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + \frac{SQ_p(t)}{M.C_p} \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + \frac{-P.COP + SQ_p(t)}{M.C_p} \cdot \Delta t \quad (4.8)$$

4.4 Modelo Fisicamente Baseado Simplificado de Cargas de Frio Alimentar Doméstico com Redes Neurais

Os MFB detalhados têm como principal inconveniente o facto de serem modelos iterativos que calculam o valor das perdas em cada instante. Assim, quando falamos de grupos de cargas que simulam um elevado número de equipamentos sabemos, à partida, que este modelo vai ter um longo período de simulação devido ao grande volume de cálculos efetuados, algo que impede o seu uso por parte de um TSO, por exemplo, para averiguar em tempo real, a possibilidade de essas cargas entrarem no fornecimento de serviços de sistema.

Na última década o interesse na utilização das redes neuronais artificiais para múltiplos propósitos tem vindo a aumentar. Esse interesse deve-se, principalmente, à sua capacidade de aprendizagem adquirida a partir de treino específico, onde conseguem estabelecer uma relação entre varáveis de entrada e saída de um processo.

Assim, a capacidade de assimilar grandes quantidades de informação permite-lhes executar cálculos complexos num curto espaço de tempo é de grande interesse para estudo da simplificação dos MFB desenvolvidos neste trabalho.

4.4.1 Redes Neurais Artificiais

As RNA são estruturas que foram idealizadas com base numa analogia biológica, ou seja no neurónio humano [34].

A primeira versão de um neurónio artificial foi proposta por *McCulloch e por Pitts* em 1943 [35]. Nesta, existe um conjunto de entradas ou *inputs* (que simulam as dendrites) com pesos associados (que simulam a intensidade e o carácter de excitação ou de inibição) e é calculada a soma pesada das entradas que, se ultrapassarem o valor limiar de referência da sua função de ativação, fazem com que o neurónio produza um sinal à sua saída [35]. Na figura 4.5 está esquematizada a estrutura de um neurónio artificial.

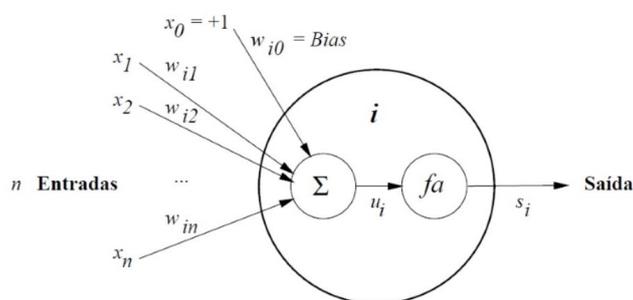


Figura 4.5: Estrutura de um neurónio artificial [36].

Existem diversos tipos de funções de ativação. Entre elas podemos destacar a função a degrau (4.6(a)), a linear (4.6(b)), a tangente hiperbólica (4.6(c)) e a logística (4.6(d)). Esta última também conhecida por função sigmóide, é de longe a mais utilizada no funcionamento de RNA devido ao facto de ser uma função não linear crescente que possui um balanceamento gracioso entre o comportamento linear e não linear [34].

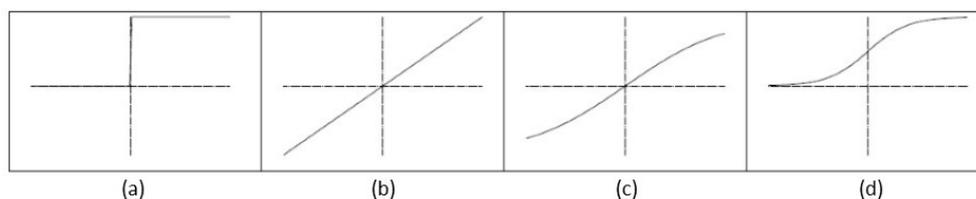


Figura 4.6: Função a degrau (a), Função linear (b), Função Tangente Hiperbólica (c) e Função Logística (d) [36].

Do ponto de vista da arquitetura das RNA, existem também inúmeros tipos de topologias, dos quais podemos destacar [36]:

- Redes *Feedforward* de uma só camada - Esta é uma rede unidirecional (sentido das entradas para as saídas), composta por uma camada de entrada e uma camada de saída. De referir que a camada de entrada não é contabilizada, uma vez que nesta não são efetuados quaisquer cálculos.
- Redes *Feedforward* MultiCamada - Este tipo de redes possui uma ou mais camadas intermédias (também conhecidas por camadas escondidas). A sua função é aumentar a capacidade da rede em modelar funções de maior complexidade ou com grande número de entradas
- Redes Recorrentes - A recorrência existe em sistemas dinâmicos quando a saída de um elemento influencia de algum modo a entrada nesse instante.

Na figura 4.7 estão esquematizadas as Redes *Feedforward* de uma só camada e as Redes *Feedforward* MultiCamada.

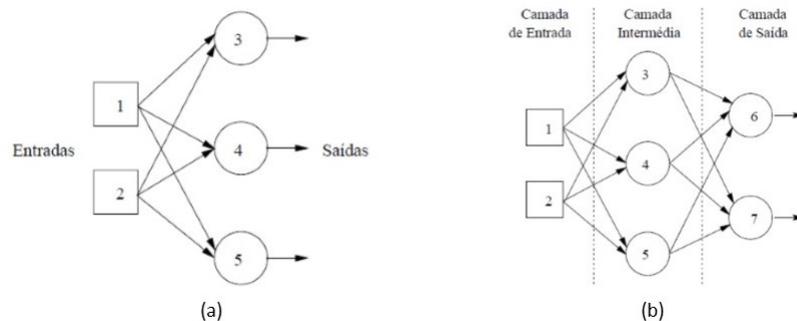


Figura 4.7: Esquemas de Redes *Feedforward* de uma só camada (a) e de Redes *Feedforward* MultiCamada (b) [36].

O treino das redes é feito através dos chamados Algoritmos de Aprendizagem ou Treino. Os três principais paradigmas de aprendizagem são [36]:

- Aprendizagem Supervisionada - Neste processo são fornecidas às redes as suas entradas (*inputs*) e os valores que pretendemos obter a partir dessas mesmas entradas (*targets*). A aprendizagem é um processo iterativo onde é efetuada a comparação entre o valor desejado (*targets*) e o valor de saída da rede (*output*). A cada iteração é feito o ajuste dos pesos associados às entradas. A aprendizagem é, então, conseguida quando, após várias iterações, o erro é reduzido para valores aceitáveis.
- Aprendizagem de Reforço - Neste tipo de aprendizagem também são fornecidos os parâmetros de entrada à rede que calcula as possíveis saídas sendo-lhe indicado se os valores são corretos ou não, tendo a rede de usar esta informação para melhorar a sua eficácia. Para tal é comum dar-se um reforço aos pesos que dão uma resposta correta e uma penalização no caso dos pesos que dão uma resposta incorreta.

- Aprendizagem Não Supervisionada - Nesta abordagem a rede não recebe qualquer informação sobre os valores de saída pretendidos. A aprendizagem é feita através da descoberta de características nos dados de entrada, adaptando-se a regularidades estatísticas ou agrupamento de padrões de treino.

4.4.2 Modelo Desenvolvido

O funcionamento dos equipamentos FAD convencionais, baseia-se em dois ciclos (ON/OFF). Idealmente, as RNA que desejamos implementar têm que ser capazes de modelar a variação de temperatura interior devido às perdas ou outras alterações que levem a mudanças no valor da carga térmica no equipamento, em cada instante. Para tal é necessário treinar duas redes por cada compressor do equipamento para modelar a variação de temperatura quando este está ligado e desligado. Os Frigoríficos Combinados fazem uso de dois compressores, um para o seu congelador e outro para o refrigerador, enquanto que as arcas frigoríficas fazem uso de apenas um compressor.

Primeiramente foi criado um programa que gerou todas as combinações possíveis de dados de entrada (*inputs*) e respetivos dados de saída (*targets*) para cada rede. Para obter os *targets* de cada rede recorreremos às expressões criadas para os modelos simplificados que adaptámos de forma a que a rede aprenda e nos forneça a variação total de temperatura em cada instante, ou seja, não apenas as perdas em cada instante, mas também a componente da variação de temperatura gerada pelo funcionamento do equipamento em cada estado. Assim, para calcular os *targets* de cada rede e conseqüentemente modelar cada ciclo de funcionamento OFF e ON de cada tipo de carga foram usadas as equações 4.9 e 4.10, respetivamente:

$$RN_{OFF}(t) = \frac{T_{amb}(t) - \frac{T_{Max}(t) + T_{Min}(t)}{2}}{M.C_p} \Delta t \quad (4.9)$$

onde,

- $RN_{OFF}(t)$ representa uma rede neuronal genérica que modela a variação da temperatura no ciclo OFF [°C],

$$RN_{ON}(t) = \frac{-P.COP + \frac{T_{amb}(t) - \frac{T_{Max}(t) + T_{Min}(t)}{2}}{M.C_p}}{M.C_p} \Delta t \quad (4.10)$$

onde,

- $RN_{ON}(t)$ representa uma rede neuronal genérica que modela a variação da temperatura no ciclo ON [°C],

Deste modo, foram gerados todos os *inputs* e *targets* para as quatro redes que modelam a variação de temperatura interior no FrC, em cada instante. Da mesma forma, foram gerados todos os dados necessários para aprendizagem das duas redes que modelam a variação temporal da temperatura da AF.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 encontra-se a gama de valores dos diversos parâmetros de entrada das redes.

Tabela 4.1: Gama de valores das entradas(*inputs*) usadas na aprendizagem das Redes Neurais.

	Inputs				
	Temperatura Máxima [°C]	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Ambiente [°C]	CDC	COP
Combinador (Congelador)	[-17,8;-24,9]	[-17,9;-25]	[12;30]	[0;1]	1,5
Combinado (Refrigerador)	[2;7,9]	[2;8,9]	[12;30]	[0;1]	1,5
Arca	[-17,8;-24,9]	[-1,9;-25]	[12;30]	[0;1]	1,5

De referir que os dados da tabela 4.1 são comuns às redes que modelam os ciclos ON e OFF de cada compressor.

Tabela 4.2: Gama de valores das entradas de potência, e valores de M_{cp} e Resistência Térmica usadas na aprendizagem das Redes Neurais.

	Potência	Inputs M_{cp}	Resistência Térmica
	[W]	[J/kg.°C]	[°C/W]
Combinador (Congelador(ON))	[90;120]	13973; 14302; 15492	16,104; 19,9329; 21,9809
Combinador (Congelador(OFF))	[90;120]	2096,0; 2145,3; 2323,8	16,104; 19,9329; 21,9809
Combinado (Refrigerador(ON))	[90;120]	43839; 45051; 49475	13,942; 16,3353; 18,6272
Combinado (Refrigerador(OFF))	[90;120]	17537; 18022; 19792	13,942; 16,3353; 18,6272
Arca (ON)	[90;120]	9071,7	13,8643
Arca (OFF)	[90;120]	2551,4	13,8643

Os valores de M_{cp} e de Resistência térmica usados, no caso do frigorífico combinado, foram previamente calculados para as espessuras de 4, 5 e 6 cm de isolamento, para os quais as redes foram treinadas.

As temperaturas ambiente, máximas e mínimas, têm um intervalo entre amostras geradas de 0,1 (°C), enquanto que o CDC apenas pode assumir os valores 0, ou 1. Os valores de potência podem assumir os valores de 90, 100, 110 e 120 [W].

Para o treinar as RNA foi usada a *Neural Network Tool* do *MATLAB* e a sua *Fitting App* que permite treinar as redes neuronais de forma supervisionada,

ou seja através da entrada e saídas pretendidas. Foi usada uma arquitetura de Rede *Feedforward* MultiCamada com 2 camadas (camada escondida e camada de saída) e como função de ativação foi utilizada a sigmóide por ser a função com maior capacidade de adaptação a cada problema [37]. Foram testadas outras arquiteturas (que não se mostraram apropriadas a este estudo) e diferentes números de neurónios na camada escondida de forma a ter a melhor performance (baixos valores de erro e elevadas velocidade de execução). As redes foram treinadas com o algoritmo de treino por retropropagação de *Levenberg-Marquardt*. Este método de Treino procura o mínimo local em uma função e converge para este rapidamente.

Na figura 4.8 está representada a estrutura de redes neuronais utilizada.

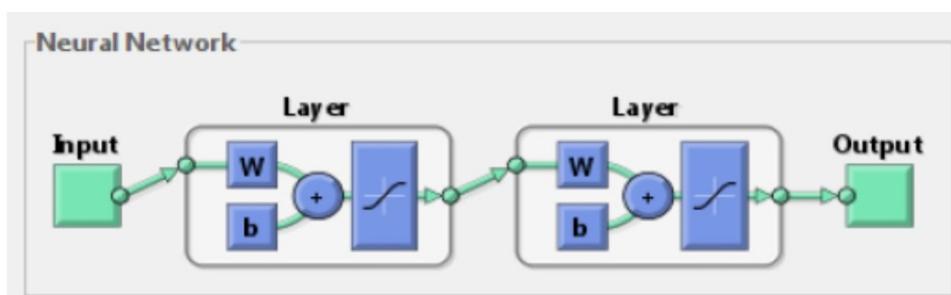


Figura 4.8: Arquitetura das Redes Neuronais utilizadas.

Os dados foram divididos aleatoriamente e 70 por cento deles foram usados nos treinos, 15 por cento na validação e os 15 por cento restantes como teste. Os relatórios de treino das RNA usadas nos modelos dos FrC e das AF podem ser consultados em detalhe no Anexo C.

Como o cálculo das perdas é feito à priori e de uma só vez para todo o intervalo de simulação assistimos a um acréscimo de performance da ferramenta contrariamente ao que acontecia no modelo detalhado, onde a cada instante eram calculadas as perdas.

Para a interpretação do MFB com RNA para poder simular o andamento temporal dos ciclos ON/OFF, usaram-se as equações 4.12 e 4.11 , respetivamente.

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + RN_{OFF}(t) \quad (4.11)$$

$$T_{interior}(t + \Delta t) = T_{interior}(t) + RN_{ON}(t) \quad (4.12)$$

Como referido, estes modelos baseiam-se em processos iterativos que calculam

estas equações (4.11 e 4.12) em função do estado em que se encontra o modelo (ON/OFF), durante o período temporal estabelecido. Nos MFB detalhados, devido a serem calculadas repetitivamente, a cada instante para cada carga e em cada carga de cada grupo, estas equações representam a maior fatia do tempo de simulação. Graças às simplificações realizadas e à introdução das redes neuronais o presente modelo apresenta menores exigências em termos de cálculo que os MFB detalhados, o que reduz largamente o seu tempo de simulação.

4.5 Simulação de Conjuntos de Cargas

A possibilidade de agregação de cargas para fornecerem SS dá uma especial importância ao estudo e análise da gestão de grupo de cargas. Para isso, recorre-se aos MFB para simular cada uma das cargas de cada grupo com a consequente exigência em termos de tempo de simulação.

O processamento paralelo é uma técnica de programação utilizada para aumentar o desempenho computacional em tarefas muito extensas ou independentes. A técnica de processamento paralelo exige domínio, não só das linguagens utilizadas, mas também um bom conhecimento dos limites computacionais, como o número de núcleos de processamento, a memória RAM, capacidade de processamento, disco rígido, etc. Atualmente, o processamento paralelo pode ser usado de diversas formas em computadores *multi-core*, ou seja, naqueles que possuem dois ou mais núcleos computacionais no interior de um mesmo processador.

Tendo isto em conta, recorreremos às possibilidades que o *MATLAB* nos oferece de usar o processamento paralelo para melhorar a performance do nosso modelo. O modelo de grupos de cargas foi desenvolvido de forma a que os vários grupos de cargas possam ser simulados em paralelo (estando os grupos a correr em paralelo e o seu número depende do número de núcleos de processamento do processador). O único computador usado no presente trabalho tem um *hexacore* (*Intel Core i7 -3930k CPU @ 3.20GHz*), com 32GB de *RAM*, o que nos permite simular 6 grupos de carga em paralelo.

Um dos objetivos da utilização de ferramentas de simulação é prever os consumos dos equipamentos, com e sem ações de gestão da procura, e averiguar a sua capacidade de fornecer SS. Diversos aspectos devem ser tidos em conta nestas simulações uma vez que existem parâmetros que caracterizam cada uma das cargas, que apresentam ligeiras variações de carga para carga.

A nível individual, há parâmetros que podem variar de carga para carga como, são exemplos, o valor da temperatura ambiente, o valor de temperatura interior no início de uma simulação ou mesmo os limites da BM que podem ser definidos

pelo utilizador. O produto $M.C_p$ e a potência do compressor variam de equipamento para equipamento mesmo que o seu processo de fabrico seja igual. A potência dos diferentes compressores pode variar até em função da tensão ou da frequência da rede.

Para criar diversidade entre as cargas simuladas recorreu-se à geração de números aleatórios, em que cada uma dos parâmetros variáveis é sujeito a uma variação percentual aleatória, parametrizável pelo utilizador. Nos modelos desenvolvidos a geração aleatória de números segue uma distribuição normal, sendo definida a semente à priori e variada na realização das simulações.

Cada grupo tem as suas próprias características que podem ser parametrizadas separadamente. A variação entre grupos tem em consideração critérios como localização geográfica e características técnicas das cargas.

Um dos problemas detetados na performance dos modelos anteriormente concebidos foi o facto da leitura e escrita em ficheiros de *excel* ser extremamente morosa. Para poder solucionar este problema foi criado um programa em *MATLAB* para transformar os ficheiros de pré-parametrização existentes, em folhas de *excel*, em ficheiros *.mat*. Este formato adequado ao ambiente *MATLAB* é muito mais rápido na leitura e escrita de dados. Esta transformação dos ficheiros de pré-parametrização permite poupar muito tempo de simulação no caso de existirem muitos grupos de cargas distintos, uma vez que é feita uma leitura de dados para cada grupo de cargas. Os ficheiros de pré-parametrização continuam disponíveis em *excel* para serem mais "*user friendly*", sendo depois introduzidos no conversor de ficheiros e transformados em ficheiros *.mat*.

As características das cargas ou grupos de cargas FAD que se encontram disponíveis para o utilizador reparametrizar são:

- a temperatura máxima e mínima de funcionamento do equipamento,
- o CDC, o qual assume dois valores, 0 e 1, consoante o equipamento em questão seja desligado ou não, por uma ação externa, respetivamente,
- a temperatura ambiente,
- a potência do ou dos compressores do equipamento em questão,
- o Coeficiente de Performance (COP),
- o produto $M.C_p$,
- a resistência térmica total que, no caso do combinado, possui uma resistência térmica total para o refrigerador e outra para o congelador.
- o número de cargas do grupo,
- a variação percentual dos parâmetros,
- o número de cargas/grupos a simular.

Neste modelo de simulação foram concebidos modelos de simulação de FrC e de AF, com modelos simplificados simples e com modelos simplificados com RNA. De referir que os modelos de FrC simulam um equipamento com 1,85m de altura, uma largura de 0,6m e um comprimento de 0,6m, tendo um COP de 1,5. Os valores típicos dos compressores destes equipamentos variam entre os 90W e os 120W, sendo esta a gama de valores escolhida para as simulações neste trabalho. A espessura do isolamento deste equipamento varia entre os 4 e os 6cm. No que diz respeito ao modelo de AF este simula um equipamento com 0,9m de altura, uma largura de 0,54m e um comprimento de 0,584m, sendo a potência deste equipamento 90W e o seu COP de 1,3.

De forma a dar validade estatística aos resultados obtidos, cada grupo foi simulado 30 vezes (embora por falta de espaço os resultados dessa validação não sejam apresentados), sendo os resultados apresentados nesta dissertação a média das 30 simulações. Nesta análise, é de referir também que não foram consideradas aberturas ou carregamentos no FAD, sendo o termo consumo médio uma reflexão das perdas de energia, ou seja, não é considerada a utilização que é feita do serviço.

A figura 4.9 é o fluxograma da ferramenta desenvolvida e representa de forma esquemática o seu fluxo de dados. De referir que, apesar de serem modelos distintos, a nível individual e de grupo, tanto os MFBS simples como os MFBS com RNA partilham desta arquitetura.

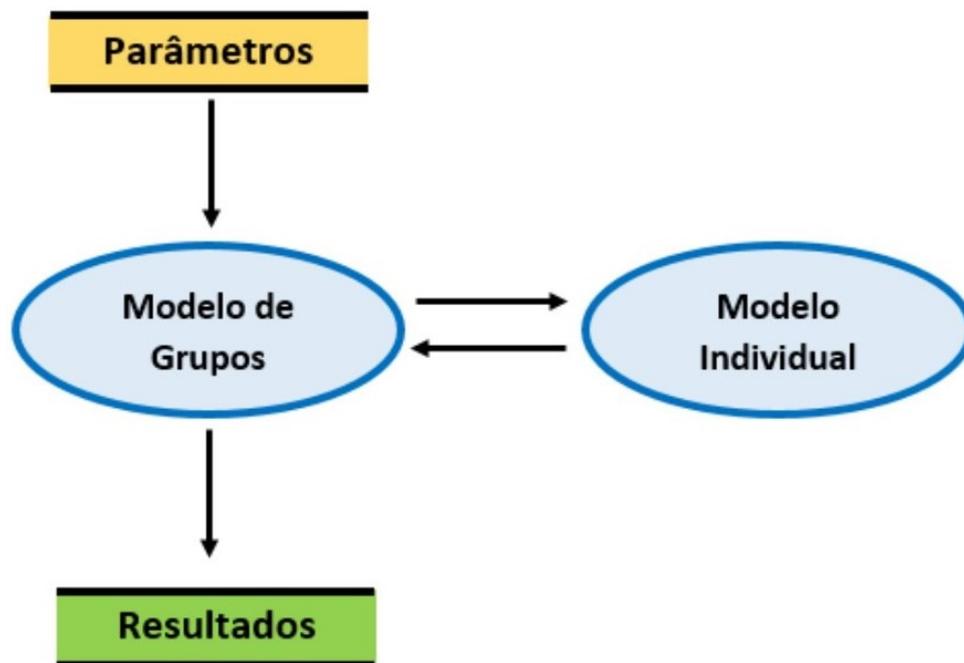


Figura 4.9: Diagrama do fluxo de dados da ferramenta de simulação desenvolvida.

4.6 Análise dos Tempos de Simulação

Podemos destacar como grande vantagem dos MFBS simples e dos MFBS com RNA os seus reduzidos tempos de simulação em comparação com o tempo de simulação dos MFB detalhados.

Primeiramente foi estudado o comportamento dos modelos referidos relativamente à sua performance, simulando de grandes grupos de cargas. Na tabela 4.3 encontram-se os tempos que cada modelo demorou a simular os 30 grupos de FrC de 33334 cargas, num total de 1000020 cargas.

Tabela 4.3: Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 1000020 cargas FrC.

Modelo	Tempo de Simulação (s)
MFB	270,629
MFBS simples	53,416
MFBS com RNA	40,353

Tal como acontece nos modelos de FrC, os tempos de simulação dos modelos MFBS simples e dos MFBS com RNA de AF são muito reduzidos em comparação com os dos MFB detalhados de AF.

Na tabela 4.4 encontram-se os tempos que cada modelo demorou a simular os 30 grupos de AF de 33334 cargas, num total de 1000020 cargas.

Tabela 4.4: Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 1000020 cargas AF.

Modelo	Tempo de Simulação (s)
MFB	139,871
MFBS simples	25,642
MFBS com RNA	23,159

Foi também feita uma análise aos tempos de simulação de 30 grupos de cargas, tanto de FrC como de AF, mas na qual cada grupo de cargas contem apenas 3500 cargas, num total de 105000 cargas. Este estudo pretende avaliar se os MFBS simples e com RNA mantêm, ou melhoram, a boa performance demonstrada em simulações de grandes grupos de cargas.

Nas tabelas 4.5 e 4.6 encontram-se os tempos de simulação referidos para a simulação dos grupos de FrC e AF, respectivamente.

Tabela 4.5: Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 105000 cargas FrC.

Modelo	Tempo de Simulação (s)
MFB	51,723
MFBS simples	5,300
MFBS com RNA	4,411

Tabela 4.6: Tempos de Simulação de 30 grupos de cargas com um total de 105000 cargas AF.

Modelo	Tempo de Simulação (s)
MFB	33,449
MFBS simples	2,828
MFBS com RNA	2,481

Com base nos resultados obtidos nas simulações podemos afirmar que os modelos que usam RNA são os mais rápidos, apesar de os MFBS simples em simulações de grupos de cargas mais pequenos serem uma opção muito mais viável que os MFB detalhados. Estas diferenças de performance devem-se não só às simplificações efetuadas e ao uso das RNA nos modelos desenvolvidos, mas também devido ao uso do processamento paralelo e à ferramenta de pré-parametrização de ficheiros que evita a leitura em ficheiros *excel*.

Capítulo 5

Validação dos Modelos e Caracterização dos Impactos das Ações de Gestão da Procura

5.1 Validação dos Modelos Desenvolvidos

O desenvolvimento dos MFBS levanta algumas questões acerca da sua capacidade de reproduzir os mesmos resultados dos modelos detalhados.

Com o desenvolvimento de modelos de grupos de cargas termostáticas torna-se relevante avaliar o comportamento do modelo comparativamente com outros modelos e abordagens anteriormente estudadas, de forma a podermos validá-los.

É também de grande importância avaliar a capacidade destes modelos reproduzirem com precisão a aplicação de ações de GP, como por exemplo, a aplicação de cortes de alimentação do equipamento durante curtos períodos de tempo ou reparametrizações de termostato.

Esta análise é feita do ponto de vista do funcionamento agregado, avaliando o seu funcionamento regular e o seu comportamento com a aplicação de diferentes tipos de ações de GP. Para tal, foi feita uma análise comparativa recorrendo à ferramenta desenvolvida em L. Ribeiro [3], que simula MFB de FrC e de AF.

De realçar que esta análise se foca apenas na validação da ferramenta, ou seja, na capacidade dos modelos desenvolvidos reproduzirem, aproximadamente, os mesmos resultados a nível agregado que os modelos já existentes. A caracterização dos impactos das ações de GP a nível agregado será estudada na secção seguinte.

Para que tal seja possível, foram criados ficheiros de parametrização adequados às duas ferramentas contendo os mesmos dados de pré-parametrização em ambos os casos. Os dados destes ficheiros são relativos ao funcionamento normal

dos equipamentos e encontram-se disponíveis no Anexo D e, qualquer alteração referida ao longo desta análise é baseada nestes dados.

Nesta análise foram simulados 30 grupos de FrC e 30 grupos de AF, onde cada um deles agrega 33334 cargas, prefazendo um total de 1000020 cargas de cada equipamento. A escolha deste número elevado de cargas deve-se ao facto de ser mais fácil analisar e comparar diagramas de grandes grupos de cargas, onde os tempos de estabilização, por exemplo, são mais perceptíveis. Para além disso, numa perspectiva deste tipo de cargas vir a ser usado no fornecimento de SS pressupõe-se uma utilização maciça, pelo que convém simular e analisar as saídas dos modelos quando em simulação de um grande número de cargas.

Neste estudo foram efetuadas 30 simulações do conjunto total das cargas, e os resultados são o valor médio dessas simulações. A variação percentual de parâmetros entre cargas do mesmo grupo foi estipulada em 10 %, tanto nos FrC como nas AF. De referir que quanto maior for o nível de agregação, mais rápida é a estabilização da simulação da potência pedida à rede uma vez que, para grandes grupos de cargas, é menos visível o impacto da diversidade nos diagramas de carga.

Nesta validação foram feitas análises comparativas aos diagramas de carga das diferentes ferramentas, relativas ao seu funcionamento normal, aos cortes de alimentação (CDC) e a reparametrizações de termostato. Relativamente à aplicação de ações de CDC, foi aplicado um corte com duração de 15 minutos, com início para todos os grupos de cargas às 10h, devido a nesta hora já haver estabilidade da potência pedida à rede pelos grupos e porque assim podemos ver todo o impacto das ações aplicadas no resto do dia.

Quanto à manipulação do limite superior e inferior de temperatura dos termostatos, foi também realizada às 10h, sendo que as temperaturas dos termostatos presentes nas tabelas D.2 e D.1 do Anexo D foram manipuladas de forma a, durante 30 minutos, se reduzirem os limites da BM do refrigerador do FrC em 2°C e em 1°C no caso dos limites da BM do congelador dos FrC e das AF. Após estes 30 minutos, foi aplicada uma nova ação onde se aumentaram as temperaturas de BM agora vigentes em 4°C no refrigerador dos FrC e em 2°C nos congeladores dos FrC e das AF. Após 30 minutos volvidos, foram restabelecidas as condições iniciais dos equipamentos.

5.1.1 Análise Comparativa em Funcionamento Normal de Frigoríficos Combinados

A figura 5.1 é o diagrama diário de carga médio agregado de 30 grupos de FrC em funcionamento normal simulado com a ferramenta descrita em L.Ribeiro [3].

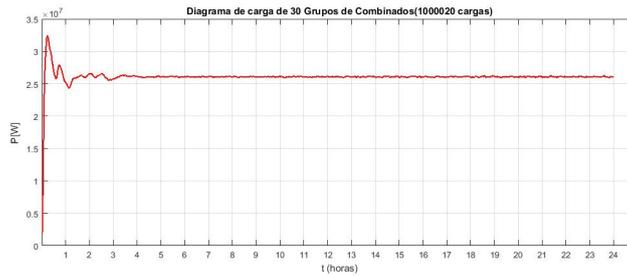


Figura 5.1: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB

Para esta simulação importa referir que o valor de potência pedida à rede estabiliza após 240 minutos com um valor de 26,14 MW de potência.

Nas figura 5.2 e 5.3 podemos observar os diagramas diários de carga de 30 grupos de FrC em funcionamento normal simulados com MFBS simples e com MFBS com RNA, respectivamente.

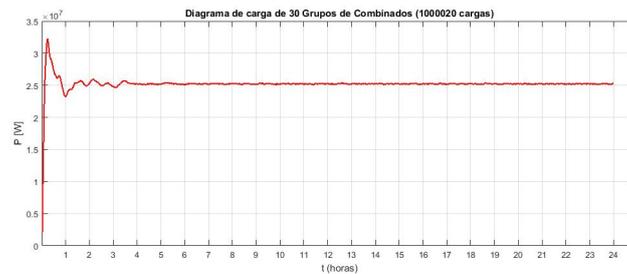


Figura 5.2: Diagrama diários de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples.



Figura 5.3: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFBS com RNA

Analisando a figura, no que diz respeito à simulação com MFBS simples, podemos observar que a potência também estabiliza após 240 minutos, aproximadamente, com um valor de 25,22 MW. Já na simulação de MFBS com RNA podemos observar que a potência estabiliza no valor de 25,99 MW mas, apenas após 300 minutos, aproximadamente. Esta simulação apresenta um valor de potência muito próximo do valor simulado por MFB mas um tempo de estabilização da potência à rede superior.

Podemos, portanto, afirmar que os modelos desenvolvidos em funcionamento normal são bastante precisos, apesar das simplificações efetuadas, uma vez que a diferença percentual do valor médio de potência entre a simulação de MFB e a simulação de MFBS é de 3,52%. Se compararmos a simulação de MFB com a simulação que recorre a MFBS com RNA a diferença percentual é de apenas 0,57%.

5.1.2 Análise do Funcionamento dos Modelos de Frigoríficos Combinados com Cortes e reparametrizações de termostato

É muito importante que os modelos desenvolvidos possam simular ações de GP de forma a poder avaliar, previamente, a capacidade de se fornecerem SS com estas cargas.

Para avaliar o seu comportamento nestas condições foram simuladas as ações de CDC e de reparametrização dos termostatos nos MFB e MFBS simples e com RNA para se poder fazer uma validação destes modelos baseada na análise comparativa dos seus resultados. Os diagramas relativos aos resultados das simulações realizadas com CDC encontram-se no Anexo E.2.

No diagrama da figura E.4 podemos observar um pico de potência de 105MW, 16 minutos após o restabelecimento da alimentação e, não se verifica uma estabilização total da potência pedida à rede após esta ação. Analisando os diagramas da figura E.5, verificamos que os picos de potência solicitada à rede foram de 98.9MW, na simulação com MFBS simples e 105.6MW na simulação com MFBS com RNA e que este ocorre logo após o restabelecimento da alimentação. Em nenhuma destas simulações ocorre estabilização da potência pedida à rede após a aplicação da ação.

Após esta ação foram manipulados os limites inferior e superior dos termostatos, como referido anteriormente. Os resultados relativos às simulações da ação de manipulação do termostato de FrC encontram-se no Anexo E.5.

Podemos inferir da observação dos diagramas que ocorre um aumento semelhante da potência pedida à rede nas três simulações, sendo este instantâneo após a manipulação do termostato. O valor máximo de potência na simulação de MFB é de 167.3 MW, sendo de 168.2 MW na simulação de MFBS simples e de 155.6 MW na simulação de MFBS com RNA. Após o restabelecimento das condições existe um pico de potência pedida à rede semelhante nas três simulações e, em nenhuma delas se dá a estabilização de potência após a aplicação da ação. Podemos dizer, com base na análise dos diagramas, que as simulações dos três modelos têm um comportamento idêntico após a aplicação de ações de manipulação do termostato. As pequenas diferenças nos diagramas destas simulações podem ser explicadas pela diversidade de funcionamento entre cargas. De referir que em nenhuma das

simulações voltou a haver estabilização dos níveis de potência pedidos à rede após a aplicação das ações.

Tendo em conta as análises anteriormente descritas, podemos considerar válidos os MFBS simples e com RNA de FrC desenvolvidos.

5.1.3 Análise em Funcionamento Normal de Arcas Frigoríficas

Na figura 5.4 está representado o diagrama diário de carga médio agregado de 30 grupos de AF em funcionamento normal simulado com a ferramenta descrita em L.Ribeiro [3].

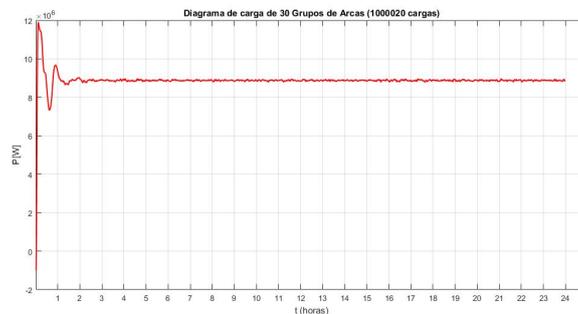


Figura 5.4: Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas simulado com MFB

Após analisar esta figura podemos referir que o valor de potência pedida à rede estabiliza após 180 minutos e mantém um valor de potência de aproximadamente 8,91 MW.

Nas figuras 5.5 e 5.6 podemos observar os diagramas diários de carga médios de 30 grupos de AF em funcionamento normal simulados MFBS simples e com MFBS com RNA, respectivamente.

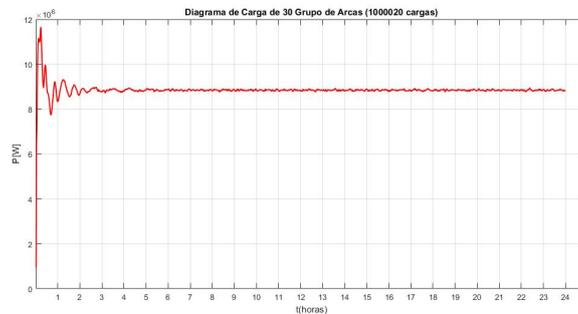


Figura 5.5: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples.

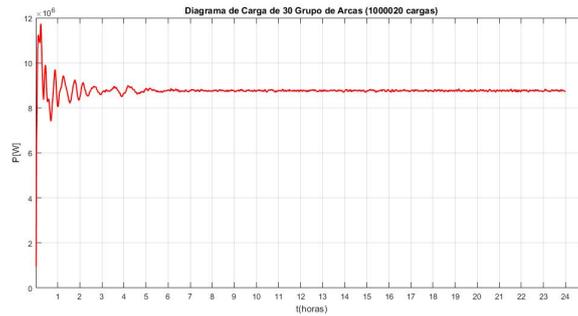


Figura 5.6: Diagramas de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas, usando MFBS com RNA

Da análise da figura, no que diz respeito à simulação com MFBS simples, podemos observar que a potência estabiliza num valor de 8,883 MW após cerca de 360 minutos, apresentando ligeiras variações até aos 540 minutos. Na simulação de MFBS com RNA a potência estabiliza apenas após 360 minutos aproximadamente. Esta simulação apresenta um valor de potência de 8,794 MW após a estabilização.

Após esta análise podemos referir que modelos de AF desenvolvidos, quando simulados em funcionamento normal, são bastante precisos apesar das simplificações efetuadas embora o tempo de estabilização da potência pedida à rede seja um pouco elevado. A diferença percentual da potência média entre a simulação de MFB e a simulação de MFBS é de 0,30% enquanto que, comparando a simulação de MFB com a simulação que recorre a MFBS com RNA, a diferença percentual é de apenas 1.30%.

5.1.4 Análise funcionamento dos modelos de Arcas Frigoríficas com cortes e reparametrizações de termostato

À semelhança da análise feita aos modelos de FrC, foram simuladas as ações de CDC e de reparametrização dos termostatos nos MFB e MFBS simples e com RNA de AF para se fazer uma validação baseada na análise comparativa dos seus resultados. Os diagramas relativos aos resultados das simulações realizadas encontram-se no Anexo E.7.

No diagrama da figura E.18 podemos observar um pico de potência de 56MW, 16 minutos após o restabelecimento da alimentação e não se verifica uma estabilização total da potência pedida à rede após esta ação. Nos diagramas da figura E.19 verificamos que os picos de potência solicitada à rede foram de 54,2MW, na simulação com MFBS simples, e 57,1MW na simulação com MFBS com RNA que este ocorre logo após o restabelecimento da alimentação. Em nenhuma destas simulações ocorre estabilização da potência pedida à rede após a ação.

Foi em seguida aplicada uma ação de manipulação dos limites superior e inferior de temperatura dos termostatos. Os resultados das simulações destas ações encontram-se no Anexo E.10. Analisando os diagramas, podemos observar dois picos de potência semelhantes nas três simulações, surgindo o primeiro logo após a manipulação do termostato e, o segundo, logo após o restabelecimento da temperatura. O pico de potência pedida à rede que surge após a primeira ação é de 55,8 MW na simulação de MFB, sendo de 57,79 MW na simulação de MFBS simples e de 57,11MW na simulação de MFBS com RNA. Após o restabelecimento das condições existe um pico de potência pedida com uma amplitude de 62,13 MW na simulação de MFB, sendo de 48,25 MW na simulação de MFBS simples e de 55,13MW na simulação de MFBS com RNA.

Após a análise dos diagramas podemos referir que as simulações dos três modelos têm um comportamento idêntico na sua generalidade, embora após a reposição da temperatura inicial do termostato, haja uma discrepância no valor dos picos de potência pedida à rede devido, sobretudo, à diversidade de funcionamento entre cargas. De referir que em nenhuma das simulações voltou a haver estabilização dos níveis de potência pedidos à rede após a aplicação das ações.

Após as análises anteriormente descritas, podemos considerar válidos os MFBS simples e com RNA de AF desenvolvidos.

5.2 Caracterização do Impacto de Ações de Gestão da Procura

É muito importante caracterizar e avaliar o impacto das ações de gestão da procura ao nível agregado de cargas para que o TSO ou DSO responsável possa aferir a possibilidade de utilizar estas ações para o fornecimento de SS.

Para a caracterizar do impacto das ações, foram simulados de dois tipos de ações de GP, recorrendo aos MFBS simples e com RNA, desenvolvidos no âmbito deste trabalho. Primeiramente, foram aplicados cortes de alimentação e numa segunda fase foram aplicadas duas alterações do valor de referência do termostato diferentes, em dois períodos de 30 minutos consecutivos, sendo feita uma análise separada para cada tipo de ação de GP. Foram efetuadas 30 simulações do conjunto total das cargas, e o resultado é o valor médio dessas simulações.

Esta análise foca-se na interpretação do impacto das ações de GP no que respeita ao tempo de estabilização, variação da energia, potência disponibilizada pelas ações, variação da amplitude da potência pedida à rede após ação e no período contínuo de energia. Todos diagramas extraídos a partir destas simulações encontram-se no Anexo E, onde se podem ver em pormenor e em maior escala.

O presente estudo tem como principal objectivo averiguar a capacidade de se utilizarem equipamentos FAD para fornecimento SS num dado intervalo de tempo.

5.2.1 Caracterização do Impacto de Ações de Controlo Direto de Cargas

Neste estudo foram aplicadas ações de CDC com duração de 15,30 e 60 minutos, com início para todos os grupos de cargas às 10h, hora a que existe estabilidade da potência pedida à rede pelos grupos.

Não serão estudadas ações de controlo direto de cargas com cortes superiores a uma hora, devido à existência da possibilidade de degradação da qualidade de serviço, algo que não é alvo deste estudo e não faz parte dos objetivos do presente trabalho.

Nas figuras 5.7 e 5.8 encontram-se os diagramas dos cortes de 60 minutos simulados com os MFBS com e sem RNA de FrC e AF.

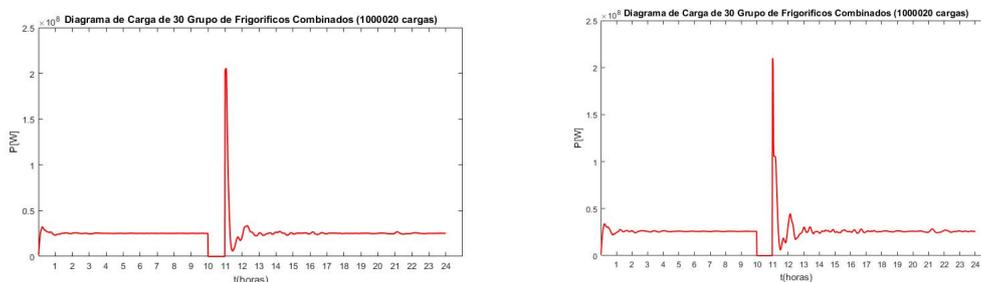


Figura 5.7: Diagramas de carga médios de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA (à direita) com um corte de alimentação de 60 minutos.

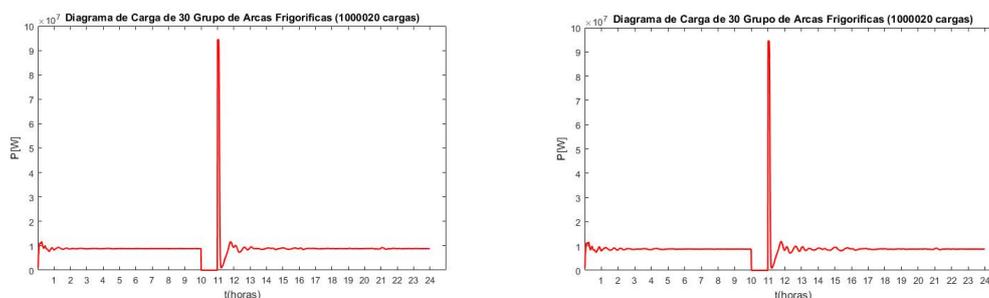


Figura 5.8: Diagramas de carga médios de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA (à direita) com um corte de alimentação de 60 minutos.

Após uma análise cuidada dos diagramas das simulações, conclui-se que o valor do tempo de estabilização após a aplicação de ações de GP deve ser alvo de estudo. Apesar dos diagramas sugerirem uma estabilização, após a aplicação da medida, é possível denotar pequenas oscilações posteriormente, algo que se justifica pela existência de cargas com diferentes frequências de funcionamento que estabilizam em tempos diferentes.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 estão compilados os dados extraídos da análise dos diagrama de cargas que permitem identificar os impactos deste tipo de ações de GP.

Tabela 5.1: Dados das simulações de MFBS simples em funcionamento normal e com cortes de 15, 30 e 60 minutos

MFBS simples de FrC	Func. normal	15 min.	30 min.	60 min.
Energia [GWh]	37,536	36,338	36,334	36,338
Ponta [MW]	25,220	98,930	162,700	203,700
Potência disponibilizada [MW]	0	25,220	25,220	25,220
PCE [min]	0	15	30	60
MFBS simples de AF	Func. normal	15 min.	30 min.	60 min.
Energia [GWh]	12,784	12,746	12,747	12,747
Ponta [MW]	8,884	54,200	83,060	94,440
Potência disponibilizada [MW]	0	8,884	8,884	8,884
PCE [min]	0	15	30	60

Tabela 5.2: Dados das simulações de MFBS com RNA em funcionamento normal e com cortes de 15, 30 e 60 minutos

MFBS com RNA de FrC	Func. normal	15 min.	30 min.	60 min.
Energia [GWh]	37,224	37,225	37,228	37,223
Ponta [MW]	25,820	105,600	172,900	206,000
Potência disponibilizada [MW]	0	25,820	25,820	25,820
PCE [min]	0	15	30	60
MFBS com RNA de AF	Func. normal	15 min.	30 min.	60 min.
Energia [GWh]	12,632	12,632	12,632	12,633
Ponta [MW]	8,794	57,150	85,810	94,490
Potência disponibilizada [MW]	0	8,794	8,794	8,794
PCE [min]	0	15	30	60

Em ambos os equipamentos, toda a potência média pedida pelos grupos fica imediatamente disponível, isto é, o consumo por parte dos equipamentos de FAD passou de imediato a zero e, tal facto, verifica-se durante todo o tempo de vigência da ação, ou seja, o período do corte vai ser igual ao PCE. Os valores de potência disponibilizada pelas ações de corte e o PCE são elementos muito importantes nesta análise devido ao facto de serem requisitos fundamentais em qualquer mercado para o fornecimento de SS, tal como analisado no Capítulo 2.

Após a restituição da alimentação, verificou-se a existência de um pico de consumo, pico este que é comumente denominado de efeito de *payback* ou de efeito restituição de alimentação. Assim, quando é retirado o corte, o grupo necessita de pedir à rede mais potência para repor a temperatura interior do equipamento

dentro da gama estabelecida por cada utilizador. Este pico é praticamente instantâneo após a reposição da alimentação em todas as simulações. Nos anexos E.3 e E.9 é possível ver a variação da temperatura interior em caso de corte de FrC e AF, respectivamente. O pequeno atraso que existe entre a reposição da alimentação e o efeito de *payback* pode ser justificado pelos diferentes impactos que os cortes têm em cada carga, podendo nem todas as cargas ter sido afetadas pelos cortes por estes ocorrerem durante o seu período OFF. Quanto maior é o período do corte aplicado, maior é a ponta originada pela restituição da alimentação.

Em termos de variação de energia podemos destacar que, apesar de serem aplicadas as diferentes ações de corte, existe uma conservação da energia. Os níveis de energia em funcionamento normal ou aquando da aplicação de corte são idênticos.

Após esta análise, podemos referir que as ações de corte estudadas, podem ser utilizadas em diversos mercados onde há participação de cargas no controlo de frequência, pois cumprem os requisitos para fornecimento de SS. Com recurso aos modelos de FrC e AF podemos prever os impactos dos cortes e assim fornecer, a nível europeu, Reservas Primárias na Bélgica, França e Dinamarca, e Reservas Secundária e Terciária na Dinamarca, países onde é permitida a agregação e deste modo a oportunidade de participação de cargas domésticas no fornecimento de SS.

5.2.2 Manipulação do Limite Superior e Inferior de Temperatura do Termóstato

A manipulação dos limites da BM dos termostatos foi realizada às 10h, sendo que as temperaturas dos termostatos presentes na tabela D.2 do Anexo D foram manipuladas de forma a, durante 30 minutos, reduzirem os limites da BM do refrigerador do combinado em 2°C em 1°C no caso dos limites da BM do congelador do combinado. Após estes 30 minutos, foi aplicada uma nova ação onde se aumentaram as temperaturas de BM agora vigentes em 4°C no refrigerador do combinado e em 2°C nos congeladores dos combinados. Passados 30 minutos, foram restabelecidas as condições iniciais dos equipamentos. Nas figuras 5.9 e 5.10 encontram-se os diagramas das manipulações dos limites da BM do termostato simulados com os MFBS com e sem RNA de FrC e AF.

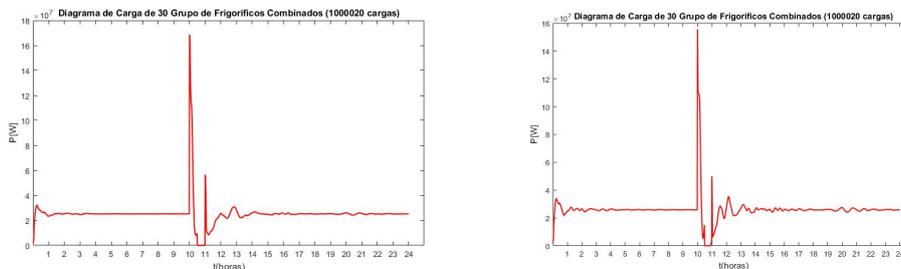


Figura 5.9: Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA (à direita) com manipulações dos limites da BM do termostato.

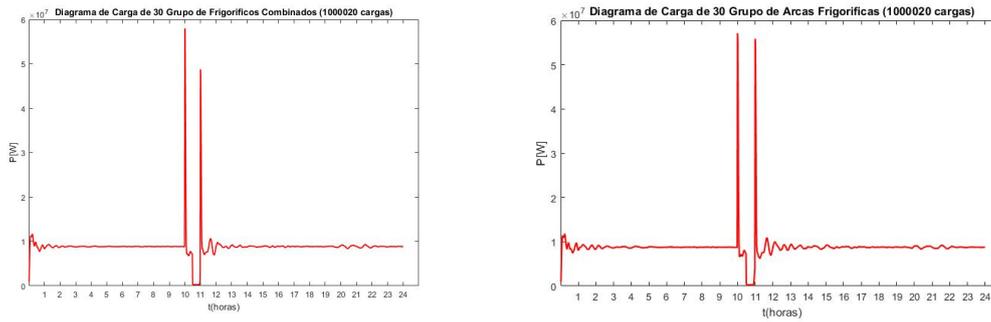


Figura 5.10: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples (à esquerda) e com MFBS com RNA (à direita) com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.

Tal como referido na análise de CDC, não é possível analisar o tempo de estabilização da potência após aplicação da ação devido à sua incerteza, pelo que não foram tiradas conclusões sobre a sua evolução.

Nas tabelas 5.3 e 5.4 estão compilados os dados extraídos da análise dos diagramas de cargas que permitem identificar os impactos deste tipo de ações de GP.

Tabela 5.3: Dados dos diagramas das simulações de MFBS simples em funcionamento normal e quando sujeito à manipulação de termostato

MFBS simples de FrC	Func. normal	Manipulação
Energia [GWh]	37,540	36,280
Ponta [MW]	25,220	168,200
Potência disponibilizada [MW]	0	25,220
PCE [min]	0	21
MFBS simples de AF	Func. normal	Manipulação
Energia [GWh]	12,780	12,750
1ª Ponta [MW]	8,834	57,970
2ª Ponta [MW]	0	48,780
Potência disponibilizada [MW]	0	8,670
PCE [min]	0	22

Tabela 5.4: Dados dos diagramas das simulações de MFBS com RNA em funcionamento normal e quando sujeito à manipulação de termostato

MFBS com RNA de FrC	Func. normal	Manipulação
Energia [GWh]	37,540	37,160
Ponta [MW]	25,820	155,600
Potência disponibilizada [MW]	0	25,820
PCE [min]	0	20
MFBS com RNA de AF	Func. normal	Manipulação
Energia [GWh]	12,630	12,630
1ªPonta [MW]	8,794	57,110
2ªPonta [MW]	0	55,860
Potência disponibilizada [MW]	0	8,538
PCE [min]	0	21

Da análise das simulações realizadas podemos reter que após a aplicação da primeira ação, ou seja, após a redução dos limites da BM, ocorreu um pico de potência pedida à rede, pois após esta reparametrização muitos dos equipamentos ligaram instantaneamente.

Nas simulações de FrC, parte da potência média pedida pelos grupos fica disponível apenas após a aplicação da segunda ação, ou seja, após se aumentar a temperatura dos limites do termostato ficando disponível durante 20 minutos. Nas simulações de AF não se verifica uma disponibilidade total da potência pedida à rede devido ao facto da diferença de temperaturas entre a temperatura do interior do equipamento e a temperatura exterior ser muito superior, no caso das arcas, à diferença de temperaturas nos frigoríficos, o que leva a uma variação mais rápida da temperatura interior e desta forma atinge mais rapidamente o novo limite do termostato e volta a ligar antes do término da ação. O PCE da ação com AF é de 21 minutos.

Após a reposição dos valores iniciais dos limites da BM, verificou-se a existência de um pico de consumo, sendo este devido à reposição do valor da temperatura dentro da gama estabelecida por cada utilizador. Este pico é praticamente instantâneo após a reposição dos valores de temperatura em todas as simulações.

Ao nível da variação da energia é de destacar que não existe uma variação significativa desta grandeza com a aplicação desta ação de GP, existindo conservação da energia. Os níveis de energia em funcionamento normal ou aquando da aplicação de corte são idênticos.

A partir da análise feita à manipulação dos limites da BM, podemos referir que, recorrendo a esta ação, é possível fornecer SS, nomeadamente Reserva Primária em países como a Bélgica e a Dinamarca, no panorama europeu.

Capítulo 6

Caso de Estudo

A nível mundial, discute-se a possibilidade do uso de cargas domésticas para o fornecimento de SS, como são exemplo as cargas de FAD.

Um grande comercializador de energia que avaliar a sua capacidade de, através do uso de cargas dos seus consumidores, poder fornecer SS à rede eléctrica no período de pico entre as 20h e 30 minutos e as 21h do dia 21 de Agosto de 2016. A figura 6.1 é o Diagrama de Carga do consumo previsto dos consumidores pelos quais é responsável o comercializador em questão no dia referido.

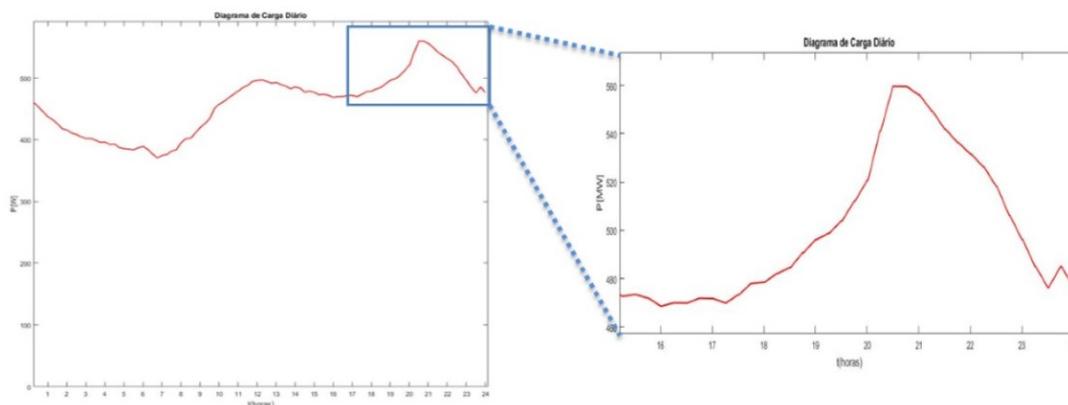


Figura 6.1: Diagrama de carga previsto para o dia 21 de Agosto de 2016 e promenor do período de ponta de potência pedida à rede

Deste modo, decidiu-se avaliar o impacto de ações de GP na situação descrita, recorrendo a este diagrama de carga, que representa o consumo de um total de 530843 consumidores domésticos. Decidiu-se estudar o comportamento destas ações em cargas de FAD, ou seja, em FrC e AF. Para tal, o número total de cargas de FAD foi estimado usando as taxas de posse [24]. A uma taxa de posse dos FrC é de de 1,05 pelo que se pode estimar um número de 557400

equipamentos, aproximadamente. A taxa de posse de AF é de 0,5 pelo que se estimaram 265440 equipamentos. O número total de equipamentos de cada género foi dividido por 30 grupos, onde cada grupo de FrC e AF tem 18580 e 8848 equipamentos, respetivamente.

Os dados de parametrização base dos grupos de cargas referidos estão disponíveis no Anexo D e serão posteriormente alterados. A variação percentual de parâmetros entre cargas do mesmo grupo foi estipulada em 10 por cento, tanto nos FrC como nas AF. Além da variação nas variáveis visíveis, também a temperatura inicial de funcionamento foi variada dentro dos limites da temperatura máxima e mínima, ou seja, dentro da BM.

Foram simuladas ações de GP de manipulação conjunta das temperaturas mínima e máxima de referência do termostato dos equipamentos e, foram aplicados cortes de 15 minutos com o objetivo de fornecer um SS à rede entre as 20h e 30 minutos e as 21h, tal como foi solicitado pelo TSO.

Quanto à manipulação do limite superior e inferior de temperatura dos termostatos, as temperaturas presentes nas tabelas D.2 e D.1 do Anexo D foram manipuladas de forma a, durante 30 minutos, se reduzirem os limites da BM dos FrC e das acaf em 1°C. Após estes 30 minutos, foi aplicada uma nova ação onde se aumentaram as temperaturas de BM agora vigentes em 1°C para os FrC e AF. Após 30 minutos, foram restabelecidas as condições iniciais dos equipamentos. Esta parametrização foi realizada em 16 dos 30 grupos de cargas desfasadamente no tempo, enquanto que nos 12 restantes foram divididos em três grupos de 4 grupos de cargas aos quais foram aplicados cortes com duração de 15 minutos desfasados temporalmente.

Na tabelas 6.1 e 6.2 pode-se ter uma percepção gráfica das manipulações e dos cortes realizados, respetivamente.

Tabela 6.1: Alteração das Temperaturas Máxima e Mínima de Referência do Termóstato

Horas	Grupo																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
19:45	-1				-1	-1			-1	-1	-1			-1	-1			-1
20:00	-1	-1			-1	-1			-1	-1	-1			-1	-1			-1
20:15	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
20:30	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
20:45		+1	+1	+1			+1	+1				+1	+1			+1	+1	
21:00			+1	+1			+1	+1				+1	+1			+1	+1	

Tabela 6.2: Aplicação de cortes distintos a três grupos que contêm 4 grupos de cargas cada (em que 1 simboliza a aplicação de corte, e 0 simboliza o funcionamento normal dos grupos).

Horas	Conjunto de Grupos		
	1	2	3
19:45	1	0	1
20:00	0	1	0
20:15	0	0	0
20:30	1	0	0
20:45	1	1	0
21:00	0	0	1

As ações anteriormente descritas foram simuladas com recursos aos modelos (MFBS simples e MFBS com RNA) desenvolvidos no presente trabalho.

As figuras 6.2 e 6.3 são os Diagramas de Carga obtidos a partir das simulações do consumo com ações aplicadas simuladas com MFBS simples e com MFBS com RNA.

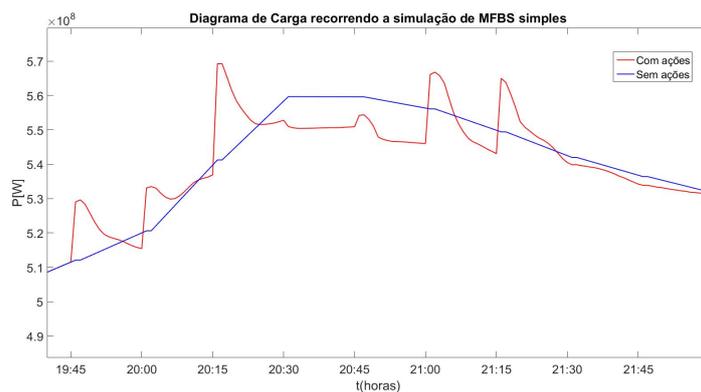


Figura 6.2: Diagrama de carga com ações aplicadas simuladas com MFBS simples

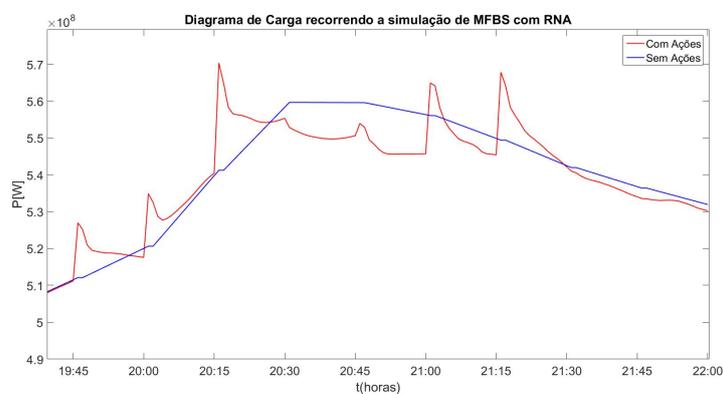


Figura 6.3: Diagrama de carga com ações aplicadas simuladas com MFBS com RNA

Podemos verificar graficamente pela observação das figuras 6.2 e 6.3 simuladas com os modelos desenvolvidos, que a implementação das ações de gestão da procura descritas permitiram baixar o consumo da ponta, das 20h30 às 21h. Podemos também notar que existem picos de potência pedida à rede de 15 em 15 minutos causados pelas ações de GP aplicadas. Na tabela 6.3 estão os dados relativos às alterações do diagrama de carga no intervalo de tempo em que se forneceu um SS à rede.

Tabela 6.3: Valores de Potência obtidos em cada instante simulados com MFBS simples e com RNA aquando da aplicação de ações de GP

Horas	20:30	20:45	21:00
Potência Prevista sem ações de GP[MW]	558,3	559,6	556,3
Potência Simulada com MFBS simples com ações de GP [MW]	552,8	550,9	546,0
Redução da potência pedida à rede [MW]	5,5	8,7	10,3
Potência Simulada com MFBS com RNA com ações de GP [MW]	555,3	553,9	545,7
Redução da potência pedida à rede [MW]	5,0	5,7	10,6

Devido aos picos de potência existentes às 20h e 47 de 554,3 MW, na simulação com MFBS simples, e às 20h e 30 de 555,3 MW, na simulação MFBS com RNA, causados pelo efeito de *payback* gerado pelas ações de gestão da procura aplicadas, e tendo em conta que para esses instantes se previa um consumo total de 558,3 e 559,6 MW, respectivamente, apenas se pode fornecer continuamente durante o período compreendido entre as 20h e 30 minutos e as 21h, 4 MW, simulando com MFBS simples e 4,3 MW, simulando com MFBS com RNA. Caso estes picos não existissem poderíamos ver disponibilizada mais potência durante o período pretendido. Assim podemos concluir com estas simulações que as ações de gestão da procura a implementar têm que ser criteriosamente estudadas, para que se possa tirar o máximo partido das mesmas, o que implica reduzir os efeitos de *payback* criados pelas ações.

De acordo com os requisitos mínimos para fornecimentos de SS as ações de GP implementadas poderiam fornecer, no panorama europeu Reserva Primária na Bélgica, França e Dinamarca e Reserva Secundária na Dinamarca (tabelas 3.1 e 3.1). Ao nível dos mercados Norte Americanos esta ação permitiria o fornecimento de SS em mercados como o PJM, onde, mediante aprovação, é permitida a agregação de cargas para fornecimento de Serviços de Regulação e de Reserva Girante (tabelas 3.4 e 3.5).

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação teve como objetivo construir uma ferramenta que permita identificar e caracterizar recursos do lado da procura para fornecimento de SS. A ferramenta foi em *MATLAB* e permitiu simular o funcionamento de grupos de cargas de FAD, tais como FrC e AR, recorrendo a MFBS simples e com RNA.

Esta ferramenta foi desenvolvida com o intuito de criar um algoritmo suficientemente rápido para poder simular ações de gestão da procura sobre cargas FAD em tempo real, de forma a que o ISO possa incluir a procura no fornecimento de SS. A ferramenta permitiu o estudo do impacto de diferentes ações de gestão da procura no consumo de grupos de cargas FAD, ou seja, em termos de potência pedida à rede (diagramas de carga), possibilitando a identificação de ações que permitam disponibilizar uma dada quantidade de potência/energia para ser transacionada no mercado de SS.

As ações de GP estudadas no presente trabalho foram o CDC e a manipulação dos limites da BM de termostatos de equipamentos FAD. No estudo de cortes, ou seja de CDC, foi possível inferir que a potência média pedida à rede pelos grupos de cargas fica imediatamente disponível após a aplicação de um corte, isto é, o consumo por parte dos equipamentos de FAD passou de imediato a zero e, tal facto, verifica-se durante todo o tempo de vigência da ação. É de realçar que quando maior é o período da ação aplicada, maior é o pico de potência pedida à rede após a reposição da alimentação e maior é a possibilidade de haver uma degradação do serviço prestado. No que diz respeito à manipulação dos limites da BM do termostato, existe uma disponibilidade total da potência pedida à rede após a aplicação da ação de aumento dos valores dos limites da BM no caso das cargas FrC, enquanto que no caso da aplicação dessa ação em AF não é disponibilizada toda a potência pedida do equipamento à rede, o que significa que nem todos os equipamentos se chegam a desligar com a aplicação da ação. Nestas ações o PCE é menor que o período da ação aplicada.

A partir da análise e caracterização ações de GP podemos afirmar que com a

aplicação destas ações, é possível fornecer SS, nomeadamente Reserva Primária, Secundária e Terciária, dependendo dos requisitos mínimos de cada país no panorama europeu, enquanto que ao nível dos mercados norte americanos, se pode fornecer, mediante aprovação prévia, Serviços de Regulação e Reserva Girante.

Com base nos resultados obtidos nas simulações podemos afirmar que os modelos que usam RNA são os mais rápidos, apesar de os MFBS simples também exibirem baixos tempos de simulação quando comparados com os MFB detalhados. Em simulações de grupos de cargas mais pequenos os MFBS simples e com RNA apresentam tempos de simulação muito reduzidos e semelhantes, com vantagem para os MFBS com RNA. Os ganhos de performance dos modelos implementados nesta ferramenta devem-se não só às simplificações efetuadas e ao uso das RNA num dos modelos desenvolvidos, mas também devido ao uso do processamento paralelo e à ferramenta de pré-parametrização de ficheiros que evita a leitura em ficheiros *excel*.

Para dar continuidade ao trabalho desenvolvido sugere-se a simplificação de outros MFB de cargas termostáticas, como são exemplo modelos de equipamentos de Condicionamento Ambiente e os modelos de Termoacumuladores. Estes modelos iterativos são caracterizados pelos seus longos períodos de simulação em virtude de realizarem uma grande quantidade de cálculos em cada instante para obter as componentes associadas às perdas. O uso de ferramentas como redes neuronais artificiais poderá ser muito importante na construção de algoritmos de optimização.

Com um conjunto alargado de modelos fisicamente baseados simplificados de cargas termostáticas de uso doméstico que permitam simular ações de gestão da procura com tempos de simulação reduzidos, capazes de acompanharem os tempos dos mercados em tempo real, podem-se também desenvolver ferramentas de simulação de grupos controladas por algoritmos genéticos para estudar as melhores soluções para o fornecimento de SS por parte da procura.

Bibliografia

- [1] J. Sousa and J. Saraiva, “Os serviços de sistema no mibel - regras de fornecimento e de contratação e resultados obtidos de 2010 a 2012,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [2] J. P. T. Saraiva, M. T. C. P. da Silva, and P. de Leão, *Mercados de Electricidade-Regulação e Tarifação de Uso das Redes*. FEUP Edições, 2002.
- [3] L. I. F. Ribeiro, “Identificação de recursos do lado da procura para fornecimento de serviços de sistema,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2015.
- [4] P. Soares and J. Saraiva, “Análise numérica dos resultados do mercado de electricidade em portugal, inserido no mercado ibérico de electricidade (mibel) do ano de 2008,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [5] G. Heffner, “Loads providing ancillary services: Review of international experience,” *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2008.
- [6] P. J. M. Gonçalves, *Análise Estatística dos Resultados do Mercado Ibérico de Eletricidade no ano de 2011*. PhD thesis, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, 2012.
- [7] M. H. R. Gomes, *Novos Mecanismos de Mercado de Energia Elétrica e de Serviços Auxiliares em Sistema Electrónicos*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [8] ERSE, “<http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/paginas/default.aspx>.” 21 de Julho de 2016.
- [9] MIBEL, “<http://www.mibel.com>.” visitado a 20 de Julho de 2016.
- [10] AEMO, “<http://www.aemo.com.au>.” visitado a 20 de Julho de 2016.
- [11] J. Riesz, J. Gilmore, and I. MacGill, “Frequency control ancillary service market design: Insights from the australian national electricity market,” *The Electricity Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 86–99, 2015.
- [12] ERCOT, “<http://www.ercot.com>.” visitado a 27 de Julho de 2016.

- [13] C. Oliveira, A. Gomes, and A. Figueiredo, “Modelos para simulação de cargas de frio alimentar doméstico para avaliação do potencial de demand response,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2013.
- [14] C. W. Gellings, “The concept of demand-side management into utility planning,” *IEEE*, 1985.
- [15] R. Levy, R. Abbott, and S. Hadden, “New principles for demand response planning,” *Electric Power Research Institute (EPRI) Technical Report, Report*, no. 1006015, 2002.
- [16] L. Toma, L. Urluescu, M. Eremia, and J.-M. Revaz, “Trading ancillary services for frequency regulation in competitive electricity markets,” in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*.
- [17] R. Araújo and J. Saraiva, “Análise dos serviços de sistema em portugal e espanha,” Master’s thesis.
- [18] E. L. Miguélez, I. E. Cortés, L. R. Rodríguez, and G. L. Camino, “An overview of ancillary services in spain,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 3, pp. 515–523, 2008.
- [19] NZEM, “<https://www.systemoperator.co.nz/market/ancillary-services/>: Review of international experience.” visitado a 20 de Julho de 2016.
- [20] ERSE, *Manual de Procedimentos da Gestão Global do Sistema do Setor Elétrico*. Abril de 2016.
- [21] U. O. Handbook, “Policy 1. load-frequency control and performance,” tech. rep., Technical Report UCTE OH.
- [22] I. J. Pérez-Arriaga, *Regulation of the power sector*. Springer, 2013.
- [23] D. Hurley, P. Peterson, and M. Whited, “Demand response as a power system resource: Program designs, performance, and lessons learned in the united states,” *Synapse Energy Economics*, vol. 11, 2013.
- [24] A. De Almeida, P. Fonseca, R. Bandeirinha, T. Fernandes, R. Araújo, N. Urbano, M. Dupret, J. Zimmermann, B. Schlomann, E. Gruber, *et al.*, “Remo-dece: Residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in europe,” *Final report*, vol. 96, 2008.
- [25] A. G. A. Soares and C. H. Antunes, “Domestic load characterization for demand-responsive energy management systems,” in *2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, pp. 1–6, IEEE, 2012.
- [26] S. E. D. Coalition, “Mapping demand response in europe today (2015),” *Url: [58](http://www.smartenergydemand.eu/wp-</i>

</div>
<div data-bbox=)*

content/uploads/2015/09/Mapping-Demand-Response-in-Europe-Today-2015.pdf, 2016.

- [27] P. Bertoldi, P. Zancanella, and B. Boza-Kiss, “Demand response status in eu member states,” 2016.
- [28] A. P. G. (APG), “<https://www.apg.at>.” visitado a 11 de Agosto de 2016.
- [29] J. MacDonald, P. Cappers, D. S. Callaway, and S. Kiliccote, “Demand Response Providing Ancillary Services a Comparison of Opportunities and Challenges in the U.S. Wholesale Markets,” in *Grid-Interop 2012*, (Irving, TX), Dezembro 2012.
- [30] A. Marques, A. Gomes, and A. Figueiredo, “Modelos para simulação de cargas e avaliação do potencial de demand response,,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 2012.
- [31] A. Gomes, “Simulação de cargas eléctricas no contexto do condicionamento da procura de energia eléctrica,,” Master’s thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 1995.
- [32] N. Mesquita, “*Resumo da teoria de refrigeração.*” FEUP, Julho 2009.
- [33] <http://www.climaconforto.pt/>, “Princípio de funcionamento da bomba de calor.” visitado a 28 de Agosto de 2016.
- [34] R. Rojas, *Neural Networks: A Systematic Introduction*.
- [35] E. Costa and A. Simões, *Inteligência Artificial, Fundamentos e Aplicações*. 3ª Edição, FCA-Editora de Informática, 2008.
- [36] P. Cortez and J. Neves, *Redes Neurais Artificiais*.
- [37] M. H. Beale, M. T. Hagan, and H. B. Demuth, *Neural Network Toolbox User’s Guid*.
- [38] OMIE, “<https://www.omie.es>.” visitado a 2 de Agosto 2016.
- [39] E. Catroga, “Reflexão sobre a evolução e redesenho do mercado interno de electricidade,,” 2014.

Anexo A

Harmonização do Mercado Europeu

A construção do mercado interno da eletricidade na UE, inicia-se em meados da década de noventa, com o objetivo de informar os cidadãos e as empresas dos benefícios da liberalização do setor da eletricidade para fornecer o melhor preço e serviço [38].

Pequenos mercados começam a surgir em todas as regiões da Europa. O OMEL gere o mercado à vista na Península Ibérica, da mesma forma que o *Nord Pool Spot* gere o mercado nos países nórdicos. Já o *EPEX Spot*, gere os mercados na França, Alemanha e outros países da Europa Central, enquanto o *GME* gere o mercado na Itália [38].

Ao longo da última década têm sido dados passos muito importantes para a harmonização do Mercado europeu de eletricidade [38].

O setor elétrico continua sofrer profundas transformações e, a Europa está a tentar reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e as emissões oriundas da produção de energia com estas matérias-primas. O crescimento das renováveis nas últimas décadas tem sido um fator importante para tal mas, há outras soluções tecnicamente desafiantes a emergir num mundo dominado pelas novas tecnologias. Uma das mudanças que se tenta implementar no setor elétrico está relacionada com a implementação da GP (Figura A.1), onde o consumidor passa a ter um papel fundamental nos SEE, à semelhança do que aconteceu nos mercados americanos à quase duas décadas. A uniformização desta ferramenta nos estados membros não é fácil devido à regulamentação existente em cada país, que impede uma harmonização rápida na área.

Para que seja possível a integração de cargas na prestação de SS é muito importante que todos os estados membros abram os seus mercados à agregação. Existem mercados em que a agregação não é permitida, o que não significa que a procura não possa fornecer SS, como são exemplo as cargas industriais que atingem os valores mínimos de capacidade a fornecer. O agregador pode ser um

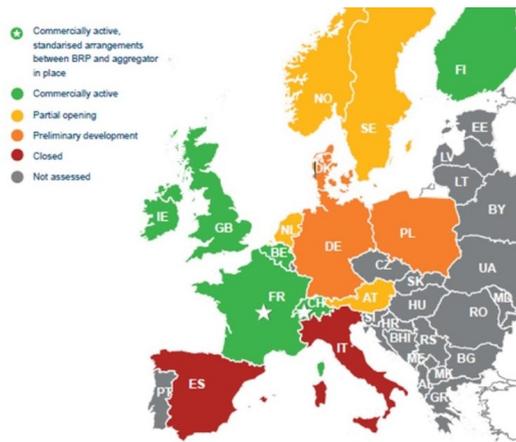


Figura A.1: Desenvolvimento da Gestão da Procura em cada estado europeu (2015) [26].

comercializador ou outra entidade que respeite todas as regras para fornecimento de SS e que consiga reunir clientes para fornecer a capacidade mínima de agregação permitida em cada mercado. Na figura A.2 é possível ver a nível europeu como se encontra a participação do consumidor e da agregação de cargas em cada estado.

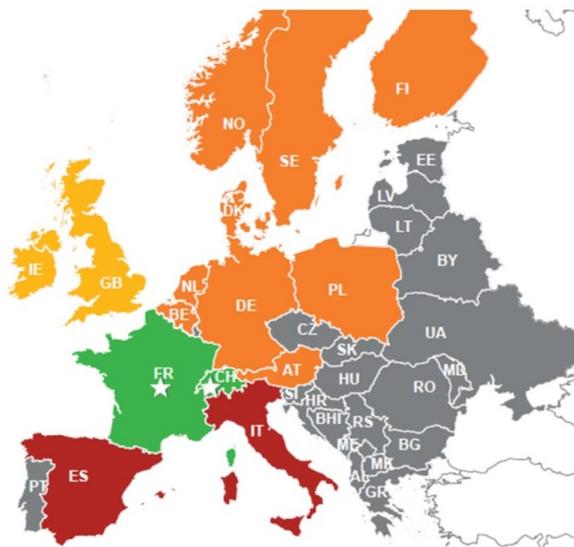


Figura A.2: Participação da Procura e da Agregação em cada estado europeu (2015) [26].

Têm sido denotadas algumas barreiras a essa harmonização como as ainda baixas capacidades de interligação e a realidade estrutural, estas evidenciam que os preços grossistas por países não são iguais também porque existem estruturas de custo diferenciadas, explicadas por vários fatores estruturais: seja pela existência de impostos sobre a produção (como é exemplo recente o caso de Espanha); seja por divergência no *mix* dos aparelhos produtivos; seja porque a natureza os potenciou com mais ou menos produção hídrica (caso marcante da Noruega);

seja porque desenvolveram opções tecnológicas em graus de intensidade diferentes (como é o caso do parque nuclear em França já altamente amortizado ou o elevado volume de renováveis na Alemanha) [39].

Apesar das barreiras em 2012 foi dado um passo firme para a harmonização dos preços de energia elétrica com a iniciativa de sete mercados europeus de eletricidade (entre eles o *EPEX SPOT*, o *GME* (também conhecido como mercado Italiano de Eletricidade) *Nord Pool* (mercado Escandinavo) e *OMIE*) com a criação do *Price Coupling Regions (PCR)* (Figura A.3) [38].

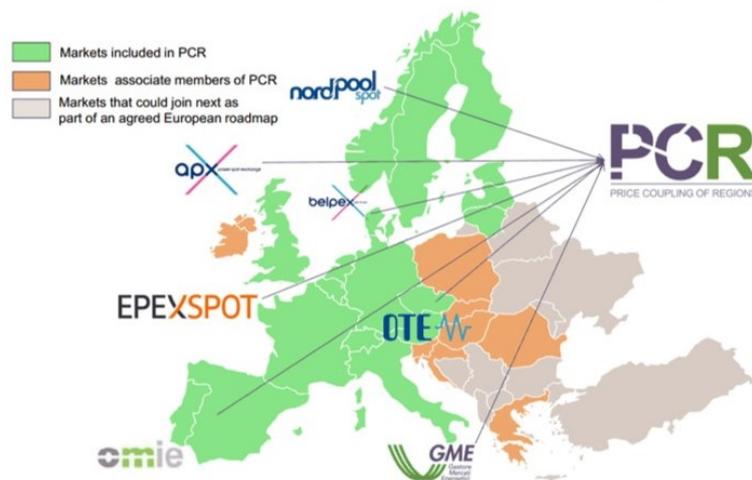


Figura A.3: Mapa do *Price Coupling Regions(PCR)* [38].

Esta iniciativa abrange os seguintes países: Áustria, Bélgica, República Checa, Dinamarca, Estónia, Finlândia, França, Alemanha, Hungria, Itália, Letónia, Lituânia, Luxemburgo, Países Baixos, Noruega, Polónia, Portugal, Roménia, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Suécia e Reino Unido [38].

Anexo B

Participação de cargas em Serviços de Sistema nos Estados Membros da União Europeia

Em todos os Estados Membros Europeus os Mercados Grossistas são os mercados onde se negocia um maior volume de energia e serviços.

Estes incluem os mercados intradiários e tipo *Spot*, onde a energia é comprada em *slots*, poucos minutos antes do seu consumo. A partir do encerramento de cada *slot* de energia no mercado cabe ao TSO de cada região manter o equilíbrio do sistema e, por isso, existem também os mercados de balanceamento e de serviços de sistema. Em 2015 nenhum dos estados membros tinha uma integração total da gestão da procura nos seus mercados de eletricidade. A GP e os SS devem ser analisados a nível de cada estado membro, uma vez que cada país tem a sua legislação destinada aos mercados de eletricidade.

A Áustria cujo TSO é o *Austrian Power Grid (APG)*, passou a ter disponível a agregação de cargas em 2013. Neste país não há contratos de interrupção de cargas. A Gestão da procura participa no *EPEX Day-ahead market*, mas não pode participar do *EPEX Spot market* e a agregação e a GP participam no mercado de balanceamento e serviços de sistema.

A reserva primária tem como valor mínimo de agregação permitida 1MW durante um período contínuo de pelo menos 30 minutos, mas não é comumente fornecida por cargas uma vez que é necessário as ofertas serem simétricas, o que afasta as cargas comuns da possibilidade de fornecerem este serviço e a agregação não é permitida neste [27] [28].

Nas reservas secundária e terciária é permitida a agregação de cargas e é exigido um tempo mínimo de funcionamento de 4 horas e uma capacidade mínima de agregação de 5MW e 1MW, respetivamente.

A GP é legal, mas o comércio destes serviços é fraco e os agregadores só conseguem atrair consumidores com consumos elevados como consumidores industriais.

A *ELIA* é o TSO Belga que controla os SS na Bélgica. A GP participa nas reserva primárias e terciárias, onde é permitida a participação de cargas e a sua agregação. A reserva secundária ainda não está aberta à participação de cargas para prestação de SS.

A participação das cargas no *Belpex (Spot market)* ainda é limitada, sendo mais frequente a sua participação no *Day ahead market* e no mercado intradiário.

A reserva primária tem uma agregação mínima permitida de 1MW, tendo que estar disponível pelo menos durante 15 minutos, enquanto que, a reserva terciária tem também uma agregação mínima permitida de 1MW e este serviço tem que estar disponível durante 2 horas.

A França é o único estado membro europeu que abriu todos os seus mercados no último ano aos SS e à GP [27].

Em 2014 os primeiros consumidores industriais começaram a fornecer reserva primária e a reserva secundária passou a poder ser fornecida por cargas residenciais.

A agregação de cargas é permitida para o fornecimento de todas as reserva de frequência e serviços de sistema.

O NEBEF (*Notification d'Écharge de Blocs d'Effacement*) foi também lançado em 2014 e permite o corte de cargas residenciais. Este serviço pode ser vendido diretamente no mercado grossista e o valor mínimo permitido de agregação de cargas é de 0,1MW [27].

A reserva primária tem como valor mínimo de agregação permitida 1MW, mas não é comumente fornecida por cargas uma vez que é necessário as ofertas serem simétricas, o que afasta as cargas comuns da possibilidade de fornecerem este serviço. [27]

As reserva secundária e terciária têm como valores mínimos de agregação permitida 1MW e 10MW respetivamente.

O TSO francês é a *Réseau de Transport d'Électricité (RTE)*.

Na Dinamarca, em teoria, os consumidores podem participar em SS, mas existem muitas barreiras que o impossibilitam, o que faz com que a reserva terciária seja a mais acessível ao GP.

A agregação de cargas é permitida para fornecimento de serviços de sistema.

Como barreiras podemos referir a necessidade de blocos de grande capacidade, o facto dos agregadores terem que contratar bilateralmente e de alguns SS requererem ofertas simétricas e outros requisitos orientados à geração.

A reserva primária tem como valor mínimo de agregação permitida 0.3MW, a reserva secundária permite agregar 1 MW e a reserva terciária permite agregar 5 MW.

O TSO dinamarquês, *Energinet.dk*, está a tentar reduzir as barreiras à participação de cargas em SS.

A Itália é um dos países que ainda não permite a participação de cargas para prestação de serviços de manutenção do bom funcionamento dos SEE.

Este país não permite a agregação e a GP não pode participar nos mercados.

Os consumidores industriais podem fornecer serviços de interruptibilidade com uma potência máxima interruptível, não inferior a 1MW [27].

Portugal continua a ser um dos poucos estados membros europeus que ainda não abriu os seus mercados de electricidade aos SS e à GP. Apesar dos esforços do seu TSO, a REN, a legislação e os meios técnicos ainda não permitem que as cargas prestem SS.

Os SS em Portugal, de acordo com a legislação em vigor, são assegurados na sua generalidade pela geração, podendo os consumidores em Muito Alta Tensão (MAT), Alta Tensão (AT) ou Média Tensão (MT) (consumidores industriais) fornecer serviços de interruptibilidade com uma potência máxima interruptível, não inferior a 4 MW, para todos os tipos de interruptibilidade. [20].

Anexo C

Relatório de aprendizagem das Redes Neurais

Neste trabalho desenvolvemos as redes neurais recorrendo à *Neural Network Toolbox* do *MATLAB*.

Foi usada uma arquitectura *Feedforward* com 2 camadas (camada escondida e camada de saída) e a função de transferência utilizada foi a sigmoid. Foram testadas outras arquitecturas (que não se mostraram apropriadas a este estudo) e diferentes números de neurónios na camada escondida de forma a ter a melhor performance (baixos valores de erro e elevadas velocidade de execução). As redes foram treinadas com o algoritmo de retropropagação Levenberg-Marquardt, que utiliza aprendizagem supervisionada.

Seguidamente, são apresentados os relatórios relativos à aprendizagem das 6 RNA usadas neste trabalho, extraídos a partir da *Neural Network Toolbox* do *MATLAB*.

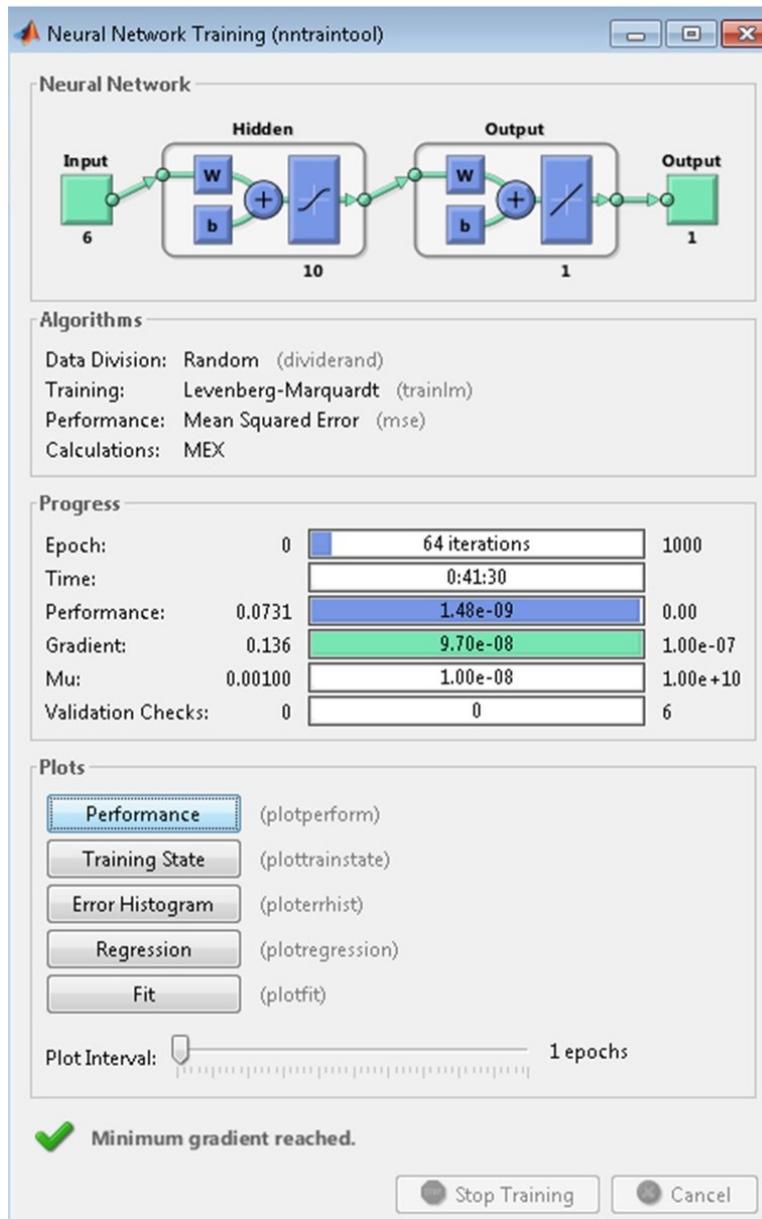


Figura C.1: Dados de aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

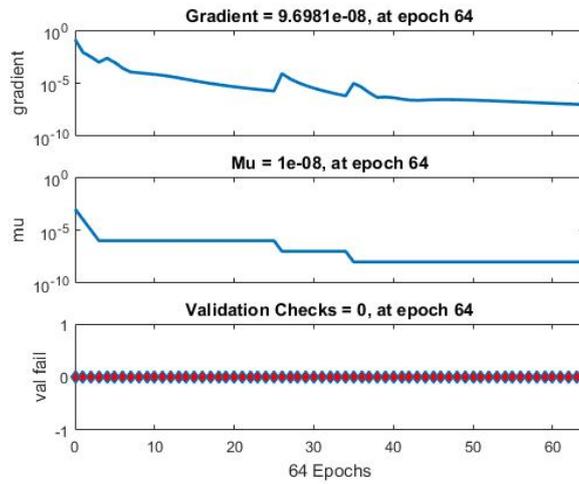


Figura C.2: Indicadores do treino da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

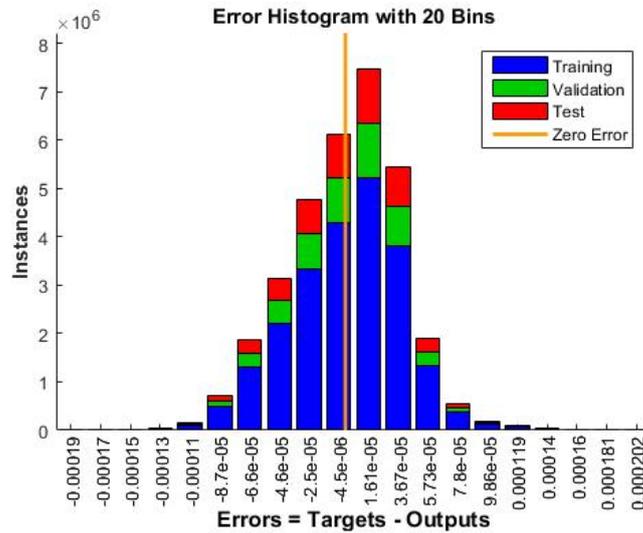


Figura C.3: Histograma da aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

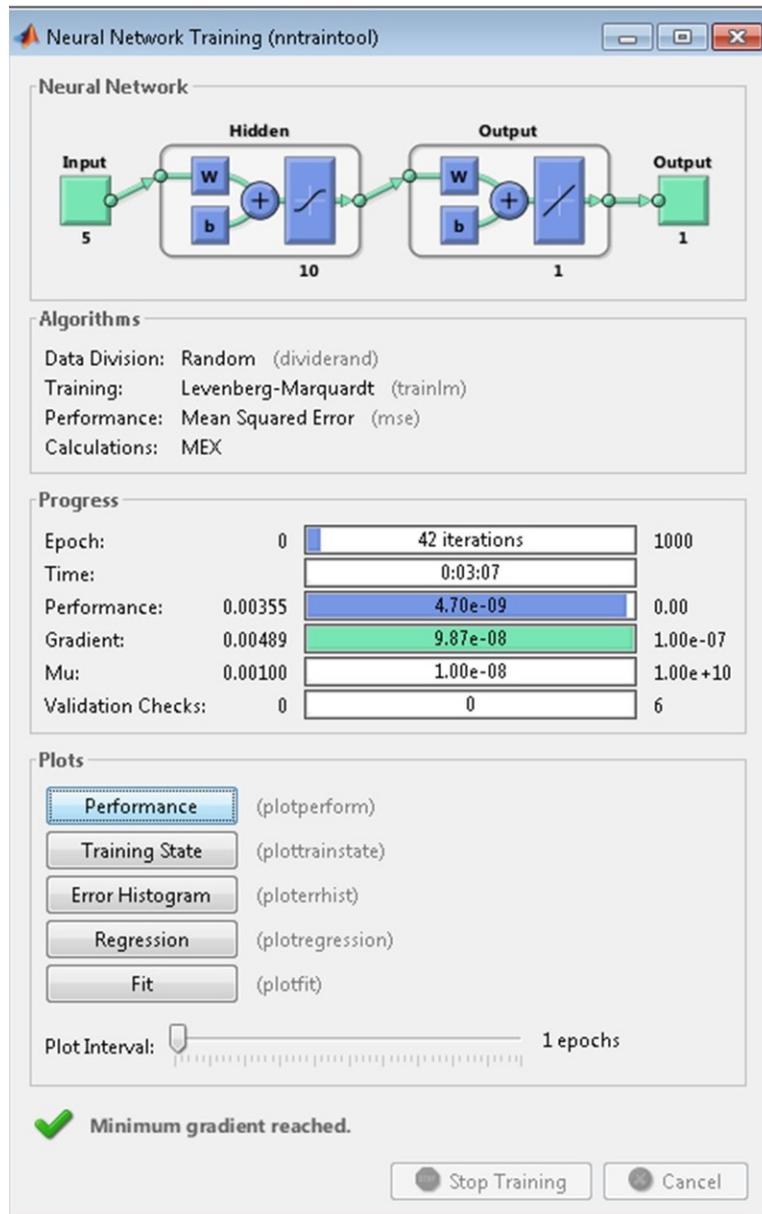


Figura C.4: Dados de aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

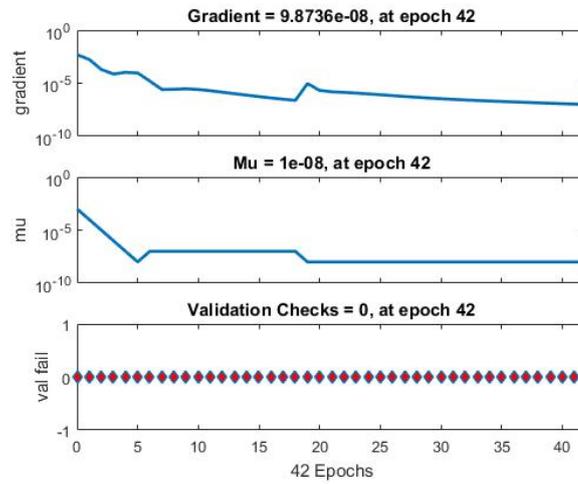


Figura C.5: Indicadores do treino da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

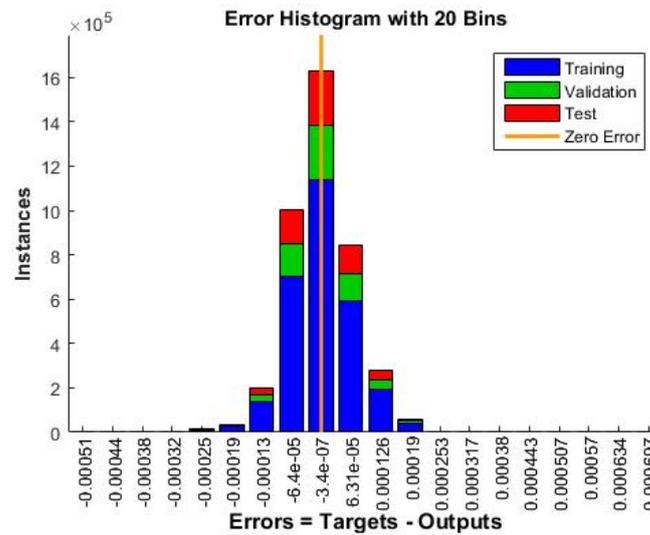


Figura C.6: Histograma da aprendizagem da rede do refrigerador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

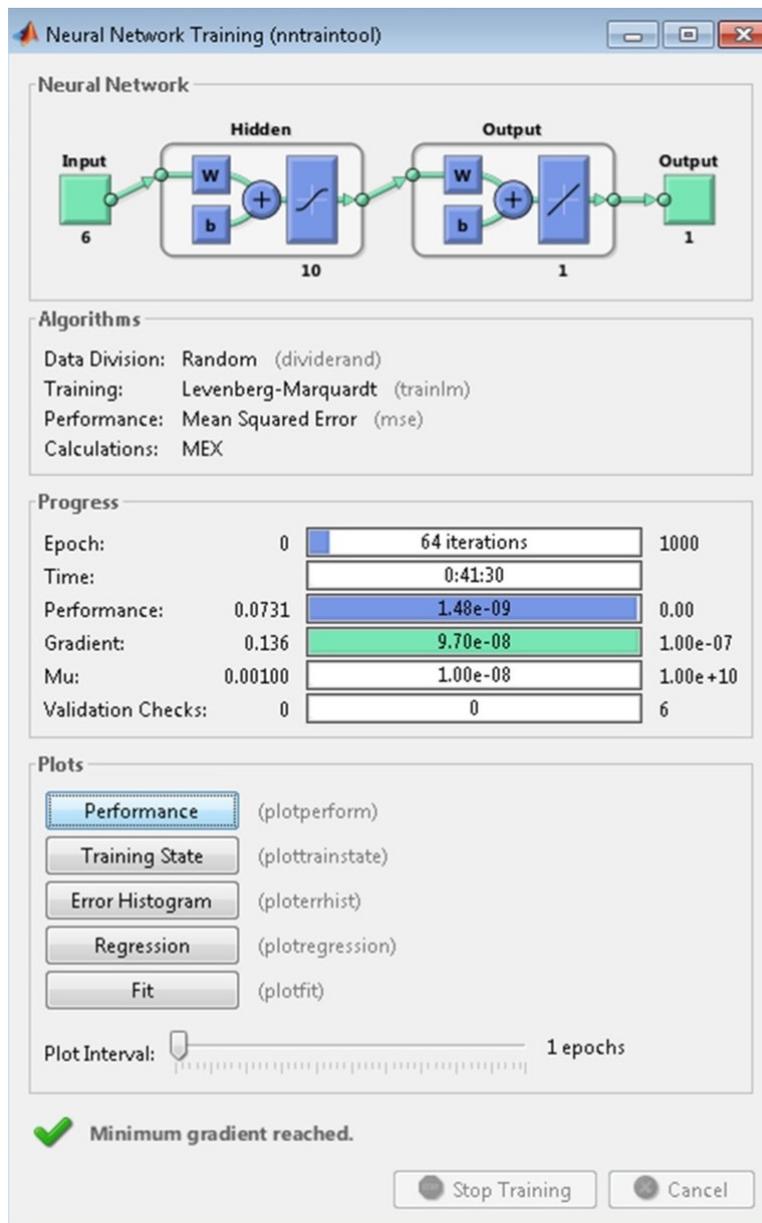


Figura C.7: Dados de aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

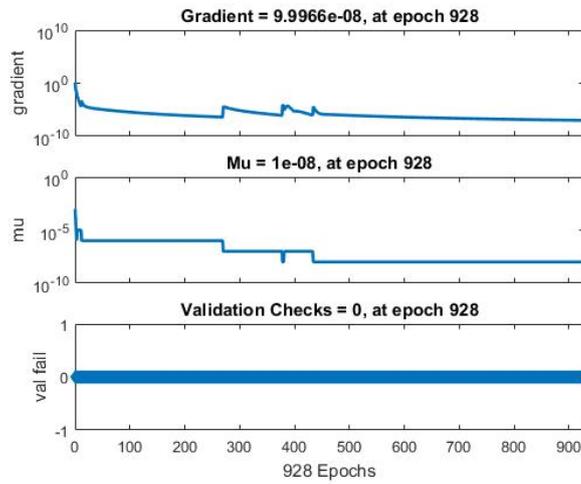


Figura C.8: Indicadores do treino da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

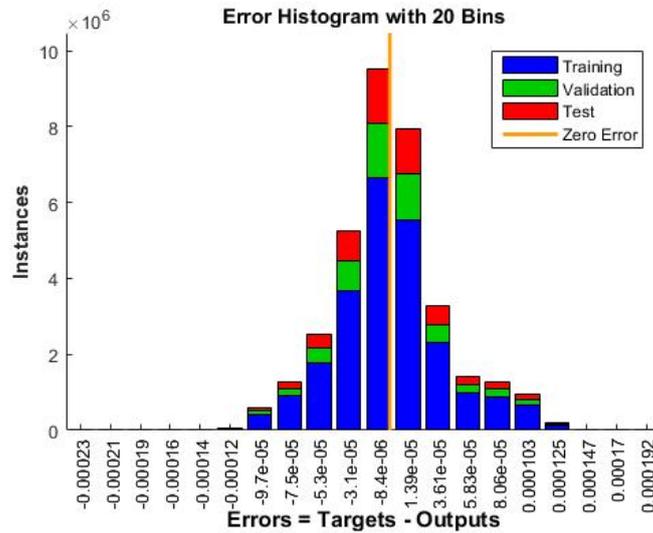


Figura C.9: Histograma da aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'ON'.

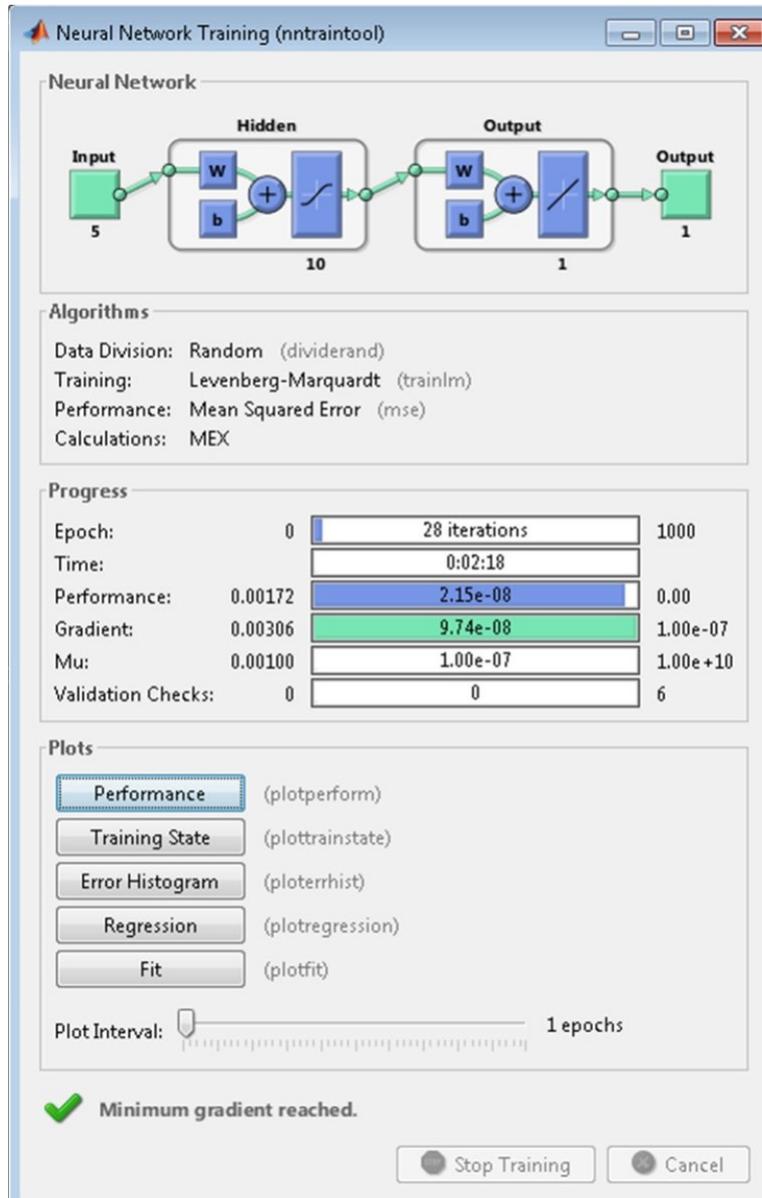


Figura C.10: Dados de aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

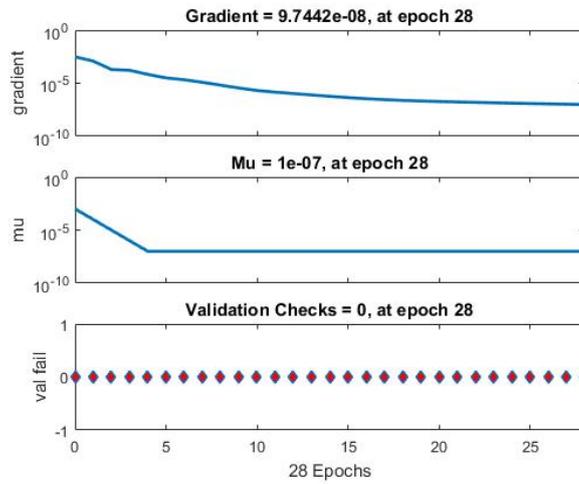


Figura C.11: Indicadores do treino da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

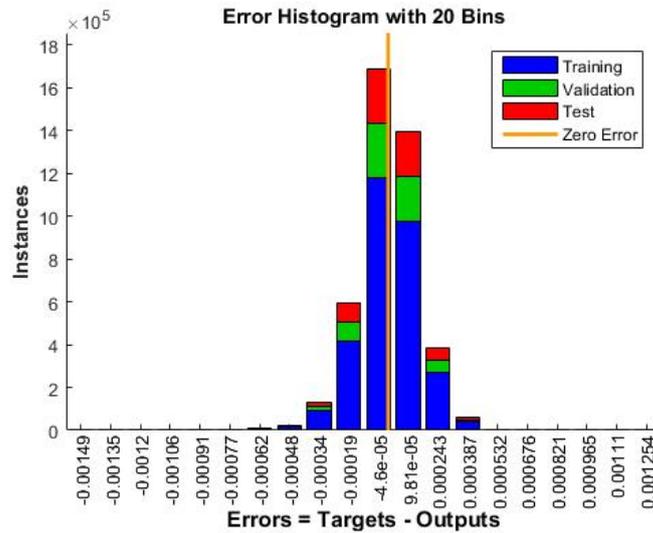


Figura C.12: Histograma da aprendizagem da rede do congelador do Frigorífico Combinado no Estado 'OFF'.

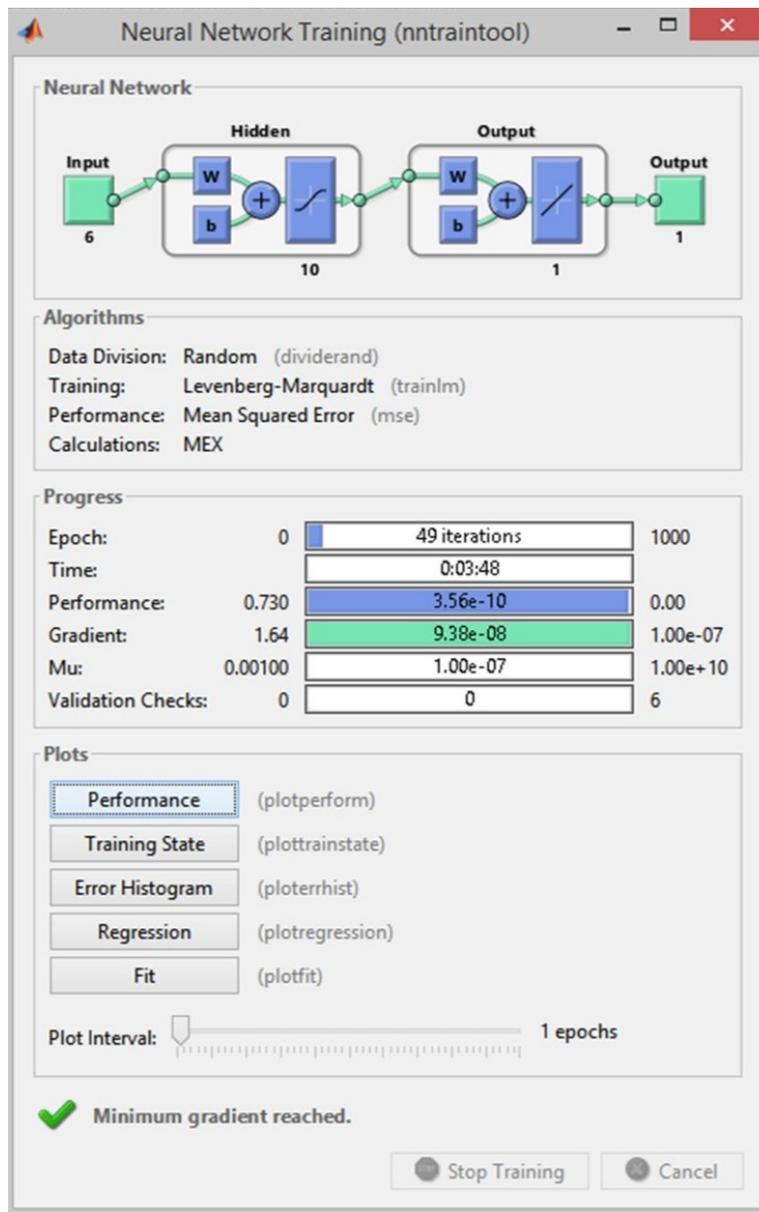


Figura C.13: Dados de aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'.

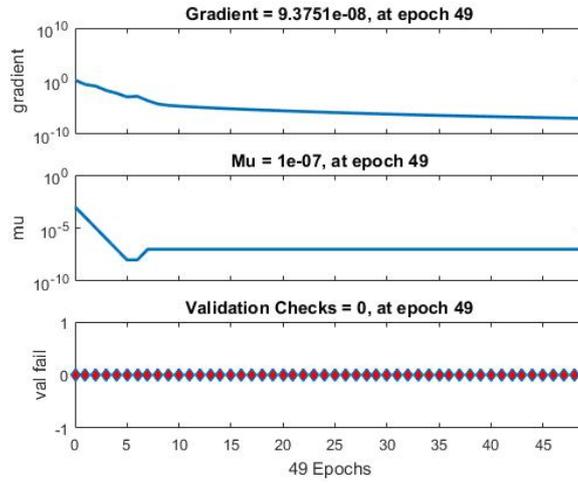


Figura C.14: Indicadores do treino da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'.

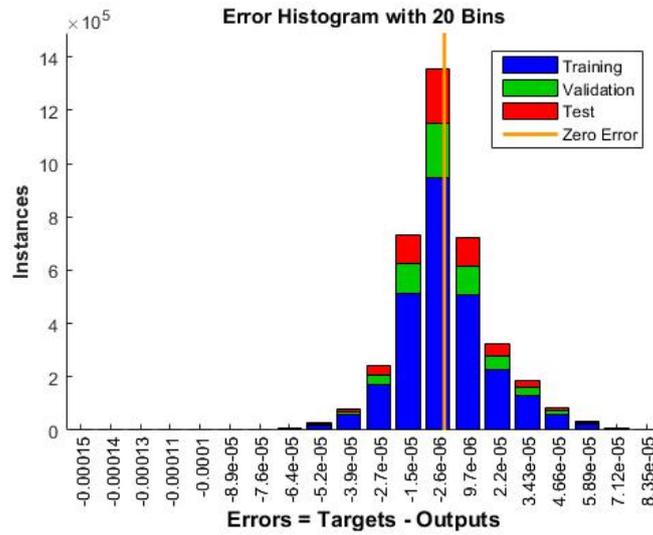


Figura C.15: Histograma da aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'ON'.

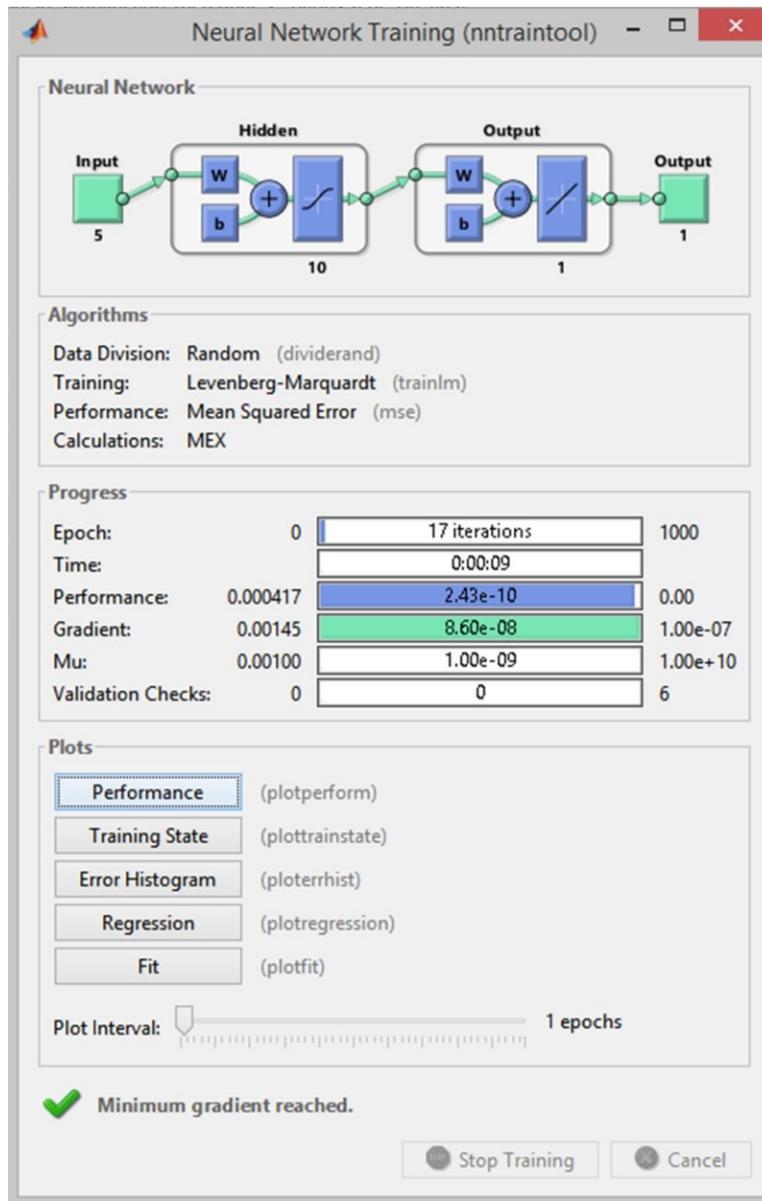


Figura C.16: Dados de aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'.

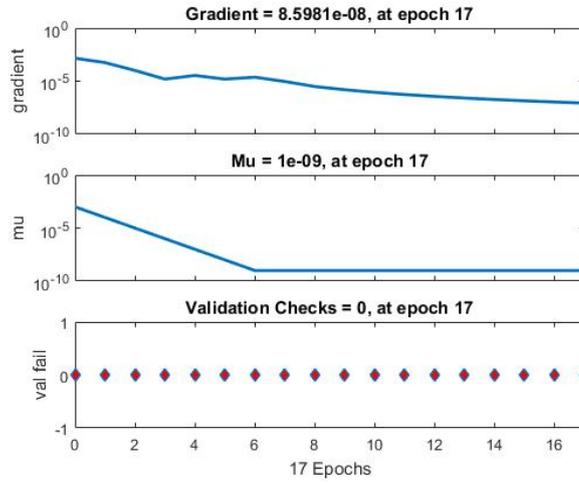


Figura C.17: Indicadores do treino da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'.

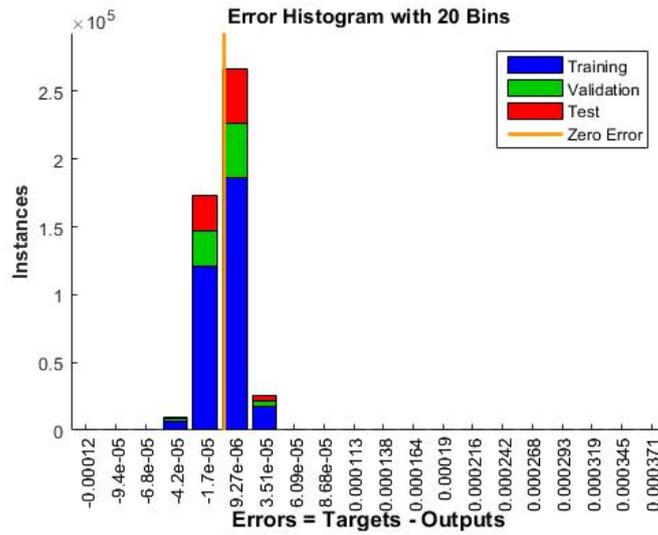


Figura C.18: Histograma da aprendizagem da rede da Arca Congeladora no Estado 'OFF'.

Anexo D

Dados de parametrização de 30 grupos de equipamentos em funcionamento normal

Tabela D.1: Tabela com dados de parametrização de cada grupos de AF

Grupo	Tmin_fz	Tmax_fz	Tamb	P_fz	COP_fr	MCP_fr	Rterm_fr
1	-21	-19	18	90	1,3	28349	13,8643
2	-22	-20	18	90	1,3	28349	13,8643
3	-19	-18	18	90	1,3	28349	13,8643
4	-19	-18	18	90	1,3	28349	13,8643
5	-22	-20	18	90	1,3	28349	13,8643
6	-21	-19	18	90	1,3	28349	13,8643
7	-19	-18	18	90	1,3	28349	13,8643
8	-22	-20	18	90	1,3	28349	13,8643
9	-21	-19	18	90	1,3	28349	13,8643
10	-19	-18	18	90	1,3	28349	13,8643
11	-22	-20	18	90	1,3	28349	13,8643
12	-21	-19	18	90	1,3	28349	13,8643
13	-19	-18	22	90	1,3	28349	13,8643
14	-22	-20	22	90	1,3	28349	13,8643
15	-21	-19	22	90	1,3	28349	13,8643
16	-19	-18	22	90	1,3	28349	13,8643
17	-22	-20	22	90	1,3	28349	13,8643
18	-21	-19	22	90	1,3	28349	13,8643
19	-19	-18	22	90	1,3	28349	13,8643
20	-22	-20	22	90	1,3	28349	13,8643
21	-21	-19	26	90	1,3	28349	13,8643
22	-19	-18	26	90	1,3	28349	13,8643
23	-22	-20	26	90	1,3	28349	13,8643
24	-21	-19	26	90	1,3	28349	13,8643
25	-19	-18	26	90	1,3	28349	13,8643
26	-22	-20	26	90	1,3	28349	13,8643
27	-21	-19	26	90	1,3	28349	13,8643
28	-19	-18	26	90	1,3	28349	13,8643
29	-22	-20	26	90	1,3	28349	13,8643
30	-21	-19	26	90	1,3	28349	13,8643

Tabela D.2: Tabela com dados de parametrização de cada grupos de FrC (1)

Grupo	Tmin_fr	Tmax_fr	Tmin_fz	Tmax_fz	Tamb	P_fz	P_fr
1	4	6	-21	-19	18	100	100
2	4	6	-22	-20	18	100	100
3	4	6	-19	-18	18	100	100
4	5	7	-18	-19	18	100	100
5	5	7	-22	-20	18	100	100
6	5	7	-21	-19	18	100	100
7	4	5	-19	-18	18	90	90
8	4	5	-22	-20	18	90	90
9	4	5	-21	-19	18	90	90
10	4	6	-19	-18	18	90	90
11	4	6	-22	-20	18	90	90
12	4	6	-21	-19	18	90	90
13	5	7	-19	-18	22	120	120
14	5	7	-22	-20	22	120	120
15	5	7	-21	-19	22	120	120
16	4	5	-19	-18	22	120	120
17	4	5	-22	-20	22	120	120
18	4	5	-21	-19	22	120	120
19	4	6	-19	-18	22	90	90
20	4	6	-22	-20	22	90	90
21	4	6	-21	-19	26	90	90
22	5	7	-19	-18	26	90	90
23	5	7	-22	-20	26	90	90
24	5	7	-21	-19	26	90	90
25	4	5	-19	-18	26	100	100
26	4	5	-22	-20	26	100	100
27	4	5	-21	-19	26	100	100
28	4	6	-19	-18	26	100	100
29	4	6	-22	-20	26	100	100
30	4	6	-21	-19	26	100	100

Tabela D.3: Tabela com dados de parametrização de cada grupos de FrC (2)

Grupo	COP_fz	COP_fr	MCP_fz	MCP_fr	Rterm_fz	Rterm_fr
1	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
2	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
3	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
4	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
5	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
6	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
7	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
8	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
9	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
10	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
11	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
12	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
13	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
14	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
15	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
16	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
17	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
18	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
19	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
20	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
21	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
22	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
23	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
24	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
25	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
26	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
27	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
28	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
29	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942
30	1,5	1,5	23289	43843	16,104	13,942

Anexo E

Gráficos dos modelos em funcionamento normal e com ações de Gestão da Procura

E.1 Gráficos do funcionamento normal de Frigorífico Combinados

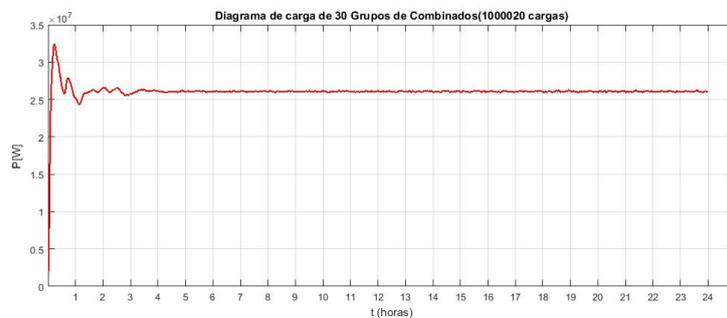


Figura E.1: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB



Figura E.2: Diagrama diários de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples.



Figura E.3: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFBS com RNA

E.2 Corte de 15 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados

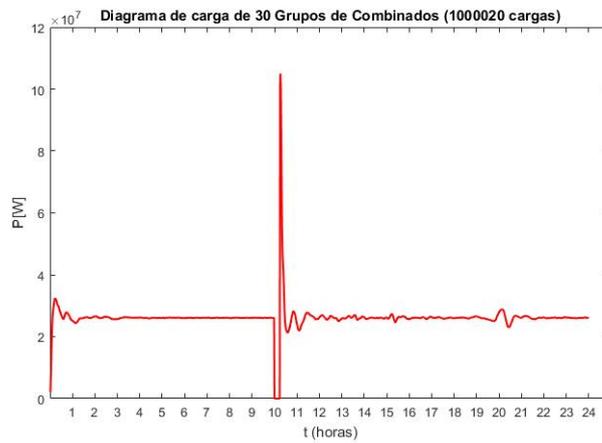


Figura E.4: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB com corte de alimentação de 15 minutos

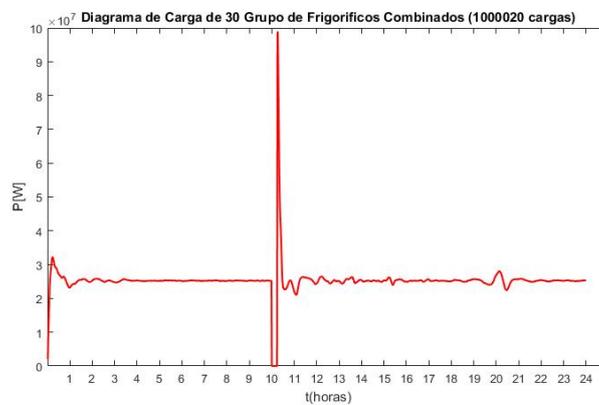


Figura E.5: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 15 minutos.

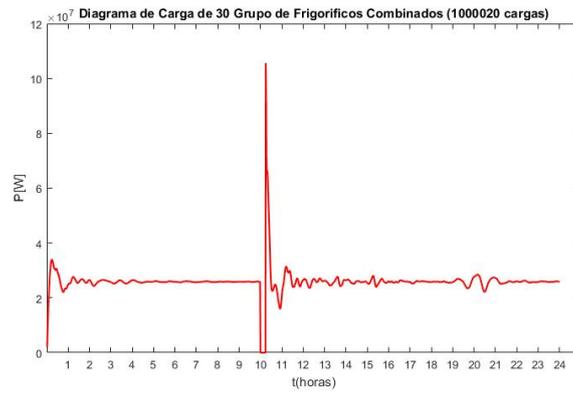


Figura E.6: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 15 minutos.

E.3 Corte de 30 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados

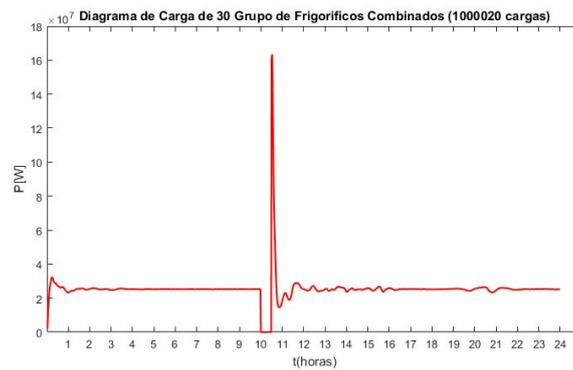


Figura E.7: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 30 minutos.

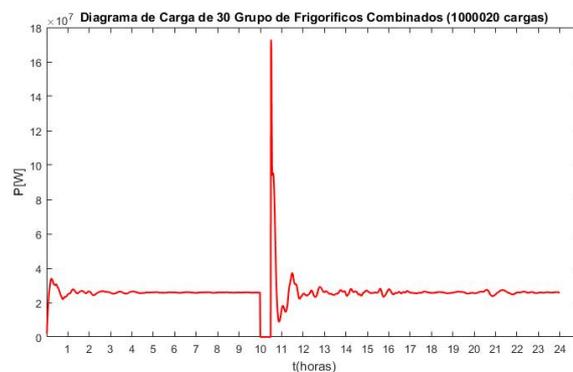


Figura E.8: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 30 minutos.

E.4 Corte de 60 minutos da alimentação de Frigorífico Combinados

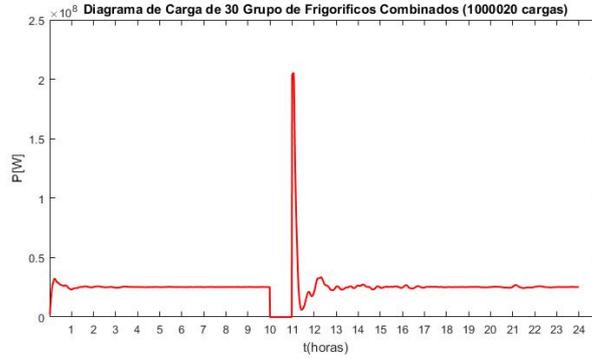


Figura E.9: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 60 minutos.

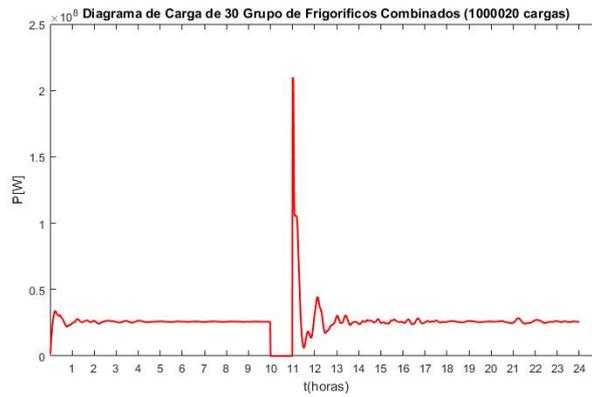


Figura E.10: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 60 minutos.

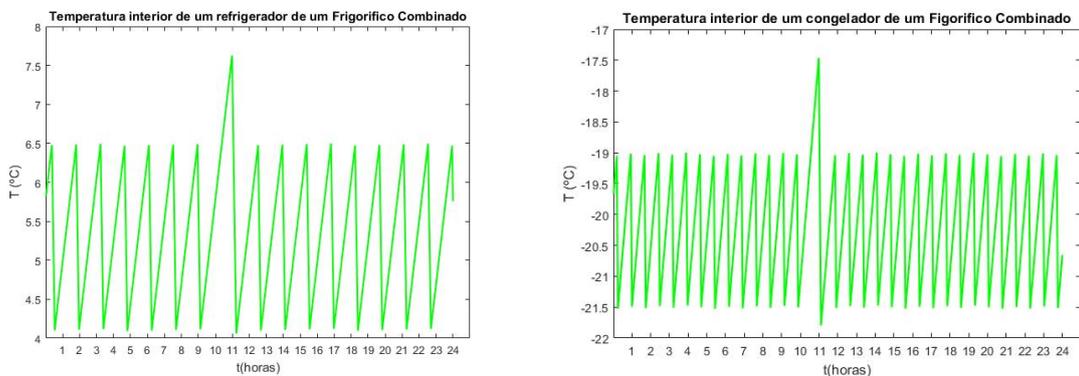


Figura E.11: Gráfico da variação da temperatura diária do refrigerador (à esquerda) e do congelador (à direita) de um FrC na qual é aplicado um corte de alimentação às 10h durante 60 minutos.

E.5 Reparametrização do termostato de Frigoríficos Combinados

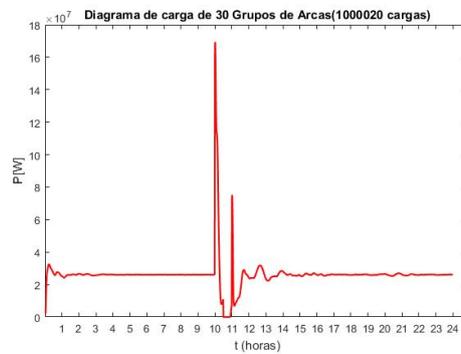


Figura E.12: Diagrama de carga de 30 grupos de FrC simulado com MFB com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato

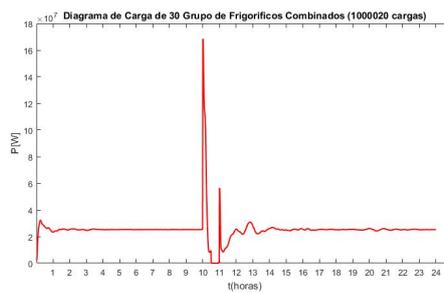


Figura E.13: Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS simples com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.

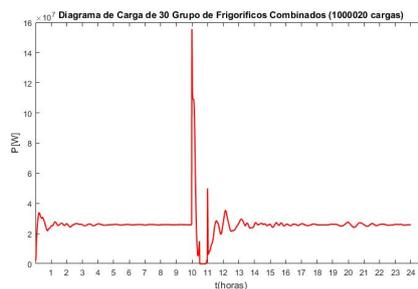


Figura E.14: Diagramas de carga de 30 grupos de FrC simulados com MFBS com RNA com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.

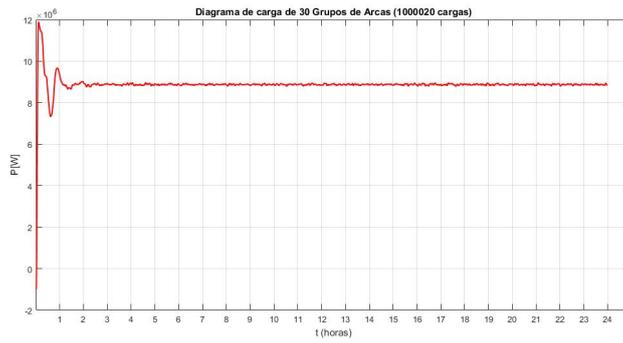


Figura E.15: Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas simulado com MFB

E.6 Gráficos do funcionamento normal de Arcas Frigoríficas

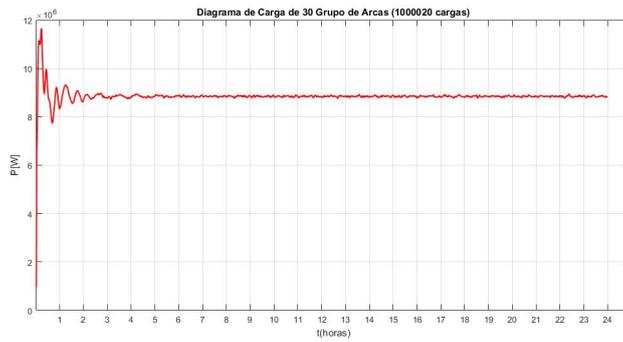


Figura E.16: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples.

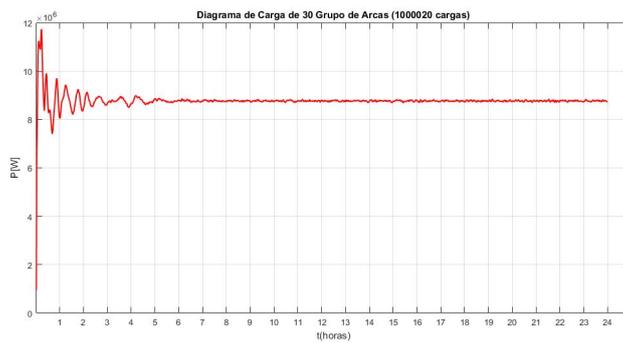


Figura E.17: Diagrama de carga de 30 grupos de Arcas Frigoríficas, usando MFBS com redes neurais

E.7 Corte de 15 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas

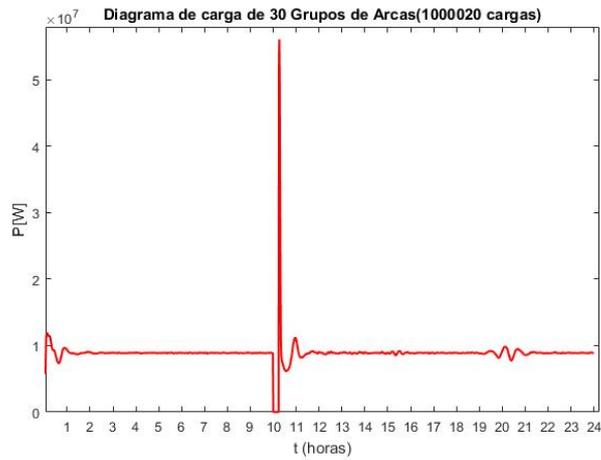


Figura E.18: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulado com MFB com corte de alimentação de 15 minutos

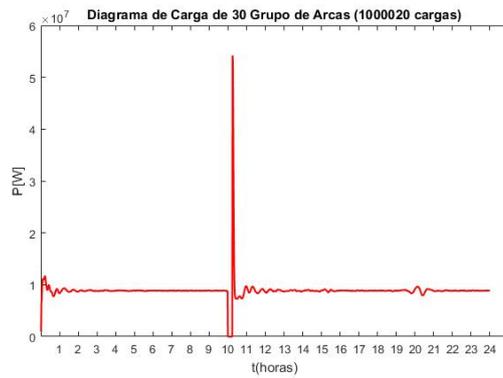


Figura E.19: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 15 minutos.

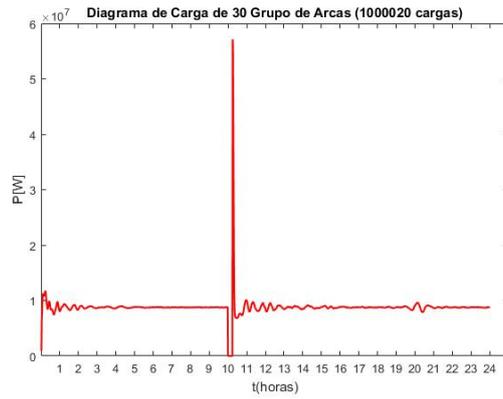


Figura E.20: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 15 minutos.

E.8 Cortes de 30 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas

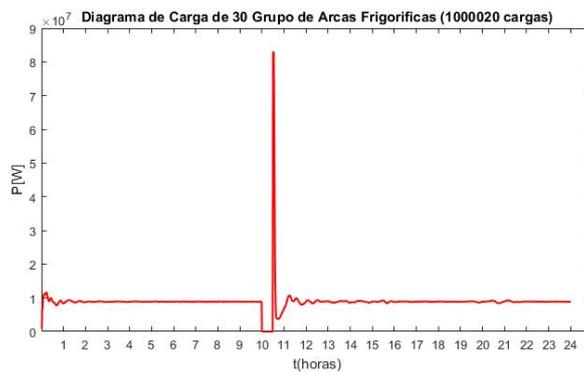


Figura E.21: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 30 minutos.

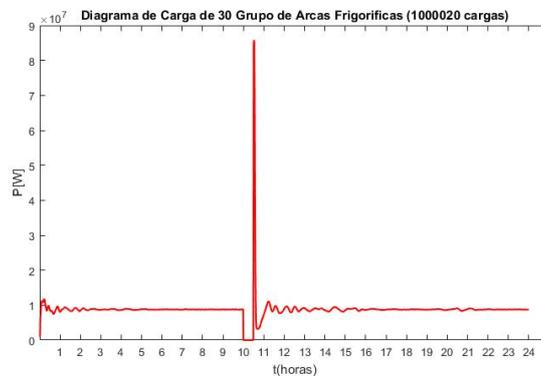


Figura E.22: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com com RNA com um corte de alimentação de 30 minutos.

E.9 Cortes de 60 minutos da alimentação de Arcas Frigoríficas

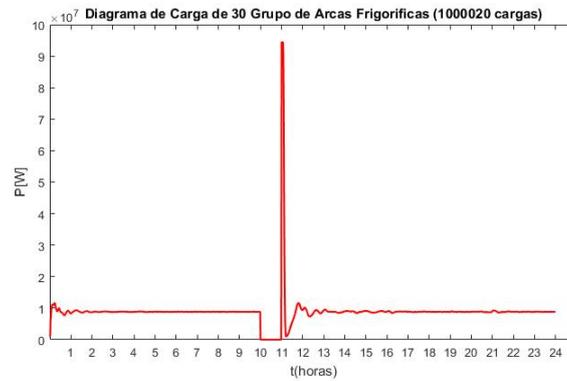


Figura E.23: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com um corte de alimentação de 60 minutos.

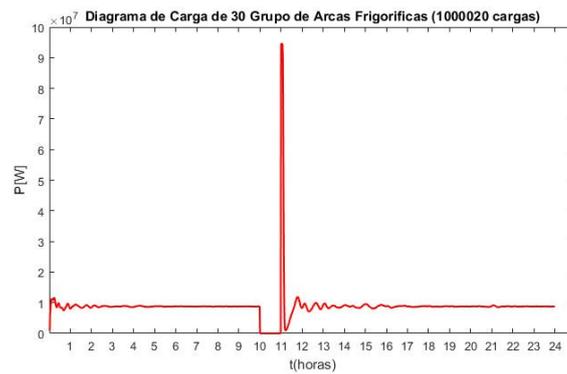


Figura E.24: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS com RNA com um corte de alimentação de 60 minutos.

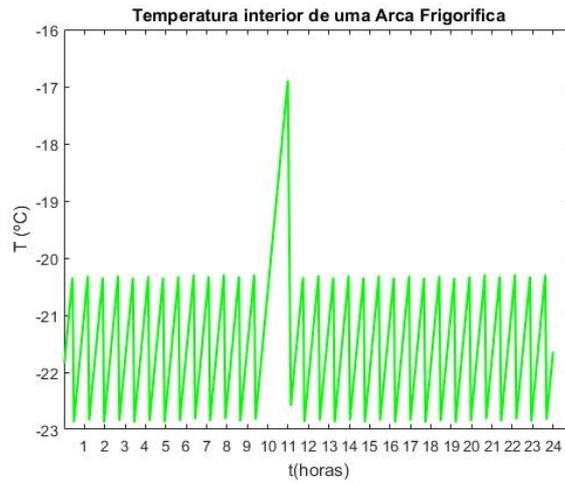


Figura E.25: Gráfico da variação da temperatura diária de uma AF na qual é aplicado um corte de alimentação às 10h durante 60 minutos.

E.10 Reparametrização do termostato de Arcas Frigoríficas

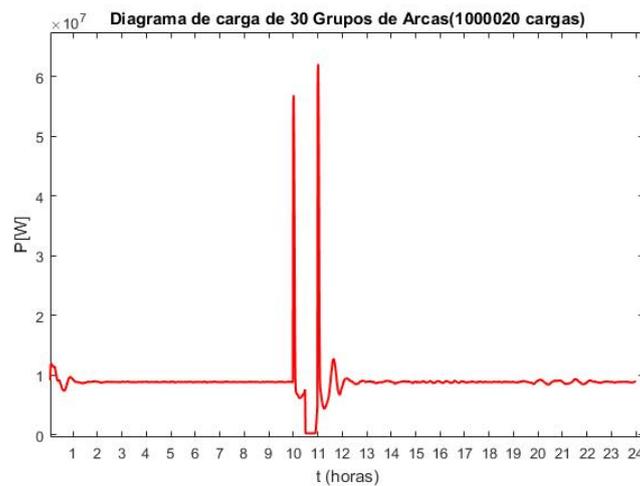


Figura E.26: Diagrama de carga de 30 grupos de AF simulado com MFB com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato

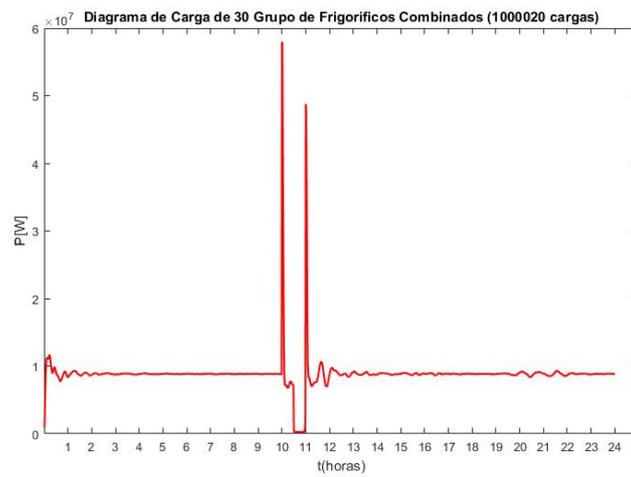


Figura E.27: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS simples com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.

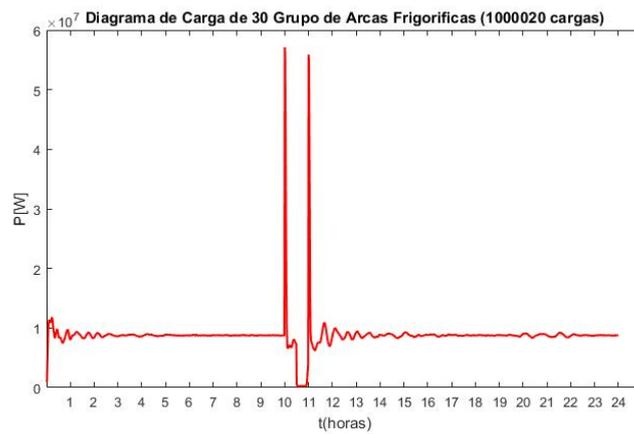


Figura E.28: Diagramas de carga de 30 grupos de AF simulados com MFBS com RNA com manipulações dos limites superior e inferior de temperatura do termostato.

