

**CONSUMOS ENERGÉTICO E HÍDRICO NO INSTITUTO
SUPERIOR TÉCNICO**

**UMA ANÁLISE EXPLORATÓRIA NO PAVILHÃO CENTRAL,
PAVILHÃO DE CIVIL E TORRE NORTE**

LUÍS FRANCISCO ABREU FREITAS

DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADORES

Professora Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Professor Doutor Vítor Faria e Sousa

JÚRI

PRESIDENTE: Professor Doutor Jorge Manuel Calição Lopes de Brito

ORIENTADOR: Professor Doutor Vítor Faria e Sousa

VOGAL: Professora Doutora Ana Fonseca Galvão

NOVEMBRO DE 2019

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores a disponibilidade, motivação e entusiasmo que demonstraram ao longo do processo. Da Professora Doutora Cristina Matos Silva fica um lado quase maternal com que se dirige aos alunos e a elegância na escrita e apresentação gráfica. Do Professor Doutor Vítor Faria Sousa fica a alegria com que viu os resultados e o gosto pelos algoritmos computacionais e a análise estatística.

Ao Engenheiro Mário Matos agradeço os dados facultados, os esclarecimentos sobre os consumos de eletricidade diários e os relatórios das auditorias energéticas ao Pavilhão Central, ao Pavilhão de Civil e à Torre Norte. Ao Senhor Luís Rosa, agradeço os dados relativos aos contadores de eletricidade e água dos edifícios do IST. À Senhora Delfina Graça, agradeço as plantas dos edifícios.

À Bárbara, à Beatriz e à Patrícia, minhas companheiras de casa e essenciais neste processo.

Aos meus pais, que são a razão por estar a terminar esta etapa.

RESUMO

Os recursos energéticos e hídricos devem ser geridos com o foco na sustentabilidade. Para além da poupança financeira, deve ser encontrada uma relação mais equilibrada entre as atividades humanas e a natureza.

Os principais objetivos do presente estudo foram: (1) efetuar um levantamento das medidas de racionalização energética e medidas de racionalização hídrica aplicadas a edifícios universitários e (2) modelar os consumos de eletricidade do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte do IST, em função de variáveis meteorológicas e de ocupação. Com recurso ao SPSS 25 foram desenvolvidos modelos de regressão linear múltipla, redes neuronais artificiais e modelos de regressão com erros ARMA.

As medidas de racionalização energética mais estudadas em edifícios universitários foram a melhoria das características térmicas da envolvente, seguidas do aumento da eficiência dos equipamentos de AVAC. As medidas de racionalização hídrica incidiram, principalmente, na redução dos consumos de água através de equipamentos mais eficientes.

Os modelos de regressão permitiram concluir que as variáveis meteorológicas têm um efeito semelhante nos consumos dos edifícios em análise. Contudo, nas variáveis de ocupação, o momento letivo teve um impacto mais elevado nos edifícios com mais áreas dedicadas aos alunos. O melhor ajustamento das redes neuronais face aos modelos de regressão permitiu concluir que existem relações não lineares entre as variáveis explicativas e os consumos energéticos, e interações entre as variáveis meteorológicas e de ocupação. Os modelos de regressão com erros ARMA permitiram prever os consumos de eletricidade para horizontes temporais reduzidos, mas não são amigos do utilizador.

Palavras-chave: energia, água, regressão, redes neuronais, ARIMA

ABSTRACT

Energy and water resources must be managed with a focus on sustainability. Beyond the financial economy, a balanced relationship should be found between human activities and nature.

The main aims of this study were: (1) to explore the energy retrofit measures and water-saving retrofit measures applied to universities buildings and to modelling electricity consumption of 'Pavilhão Central', 'Pavilhão de Civil' and 'Torre Norte', according to meteorological and occupation variables. Multiple linear regression, artificial neural network and regression with ARMA errors were performed in SPSS 25.

The most studied energy retrofit measures were the improvement of the thermal characteristics of the building's envelope, followed by the increase of efficiency of the HVAC equipment. The water-saving retrofit measures focused mainly on the reduction of water consumption through more efficient equipment.

Regression analysis led us to conclude that meteorological variables had a similar effect on the energy consumption of 'Pavilhão Central', 'Pavilhão de Civil' and 'Torre Norte'. However, in occupation variables, scholarship period had a higher effect on buildings with more student areas. The better fit of the neural networks, in comparison with linear regression models, can express some nonlinear relationships between explanatory variables and energy consumption, as well as interactions between meteorological and occupational variables. Regression with ARMA errors predicted energy consumption for a short time period but are not friendly to the user.

Keywords: energy, water, regression, neural network, ARIMA

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização	3
2	Consumos Energético e Hídrico em Edifícios Universitários	5
2.1	Considerações Iniciais.....	5
2.2	Racionalização Energética em Edifícios Universitários	5
2.2.1	Variáveis Explicativas	5
2.2.2	Estudos de Racionalização Energética	8
2.2.2.1	Descrição dos Edifícios em Análise	8
2.2.3	Estudos de Racionalização Energética no IST	18
2.2.4	Comparação de Abordagens e Discussão	24
2.3	Racionalização Hídrica em Edifícios Universitários.....	26
2.3.1	Variáveis Explicativas	26
2.3.2	Medidas de Racionalização Hídrica em Edifícios Universitários, Incluindo o IST.....	26
2.3.3	Comparação de Abordagens e Discussão	29
3	Caso de Estudo	31
3.1	<i>Campi</i> do Instituto Superior Técnico	31
3.2	Descrição dos Edifícios em Análise	32
3.2.1	Pavilhão Central	32
3.2.2	Pavilhão de Civil	36
3.2.3	Torre Norte	42
3.3	Comparação dos Edifícios em Análise	45
4	Metodologia	49
4.1	Recolha e Análise Preliminar dos Dados.....	49
4.2	Análise Estatística	51
4.2.1	Regressão Linear Múltipla	51
4.2.2	Redes Neurais Artificiais	51
4.2.3	Modelos de Regressão com Erros ARMA.....	52
5	Resultados e Discussão	55
5.1	Análise Gráfica dos Consumos Energéticos e Hídricos do IST	55
5.1.1	Considerações Iniciais	55
5.1.2	Evolução dos Consumos Energéticos e Hídricos Anuais dos Edifícios em Análise	55
5.1.3	Comparação dos Consumos Energéticos e Hídricos Anuais dos Edifícios em Análise	56
5.1.4	Custos com os Recursos Energéticos e Hídricos Anuais dos Edifícios em Análise	58
5.1.5	Frequências Relativas Acumuladas dos Consumos de Eletricidade Diários dos Edifícios em Análise.....	59

5.1.6	Consumos Horários de Eletricidade e Hídricos dos Edifícios em Análise.....	60
5.1.7	Comparação dos Consumos Energéticos e Hídricos dos Edifícios em Análise com Outros Estudos Revistos	62
5.1.8	Comparação de Abordagens e Discussão	64
5.2	Modelação do Consumo Energético dos Edifícios em Análise	65
5.2.1	Estatística Descritiva e Comparação de Médias	65
5.2.2	Regressão Linear Múltipla	66
5.2.3	Redes Neurais Artificiais	69
5.2.4	Regressão com Erros ARMA.....	71
5.2.5	Interpretação do Efeito dos Preditores no Consumo de Eletricidade dos Edifícios em Análise .	73
6	Considerações Finais	77
6.1	Conclusões.....	77
6.2	Desenvolvimentos Futuros	78
	Referências Bibliográficas	81
	ANEXO A.....	A
	ANEXO B.....	B
	ANEXO C.....	C
	ANEXO D.....	D

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Número de ocorrências e número de ocorrências com significado estatístico das variáveis explicativas do consumo energético em edifícios universitários.....	8
Figura 2.2	Distribuição dos estudos por país (Europa).....	9
Figura 2.3	Medidas de racionalização energética, em função da envolvente, AVAC e outros.....	25
Figura 2.4	Medidas de racionalização energética no interior da envolvente, AVAC e outros.....	25
Figura 2.5	Medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários, incluindo o IST.	26
Figura 3.1	Edifícios do Campus Alameda, IST.	31
Figura 3.2	Pavilhão Central.	33
Figura 3.3	Pavilhão de Civil.	37
Figura 3.4	Torre Norte.	42
Figura 3.5	Repartição das áreas do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.....	45
Figura 3.6	Repartição das potências instaladas por categoria dos consumidores e edifícios em análise. ..	46
Figura 4.1	Relação entre os consumos de eletricidade para AVAC e a temperatura média diária no Pavilhão Central (a), Pavilhão de Civil (b) e Torre Norte (c), excluindo os fins de semana, os feriados e o encerramento do IST.....	50
Figura 4.2	Relação entre os consumos de eletricidade para AVAC e a temperatura média diária transformada no Pavilhão Central (a) e Pavilhão de Civil (b), excluindo os fins de semana, os feriados e o encerramento do IST.....	52
Figura 5.1	Evolução dos consumos de eletricidade anuais, no período 2007-2017.....	55
Figura 5.2	Evolução dos consumos hídricos anuais dos edifícios em análise, no período 2007-2017.	56
Figura 5.3	Consumos de eletricidade, gás, AVAC comum e energia primária (eletricidade e gás) dos edifícios em análise.....	57
Figura 5.4	Emissões de dióxido de carbono e consumos de água dos edifícios em análise.....	58
Figura 5.5	Repartição dos custos energéticos e hídricos no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.....	58
Figura 5.6	Frequências relativas acumuladas dos consumos de eletricidade diários totais e de AVAC, no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.	59
Figura 5.7	Consumos horários de eletricidade e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, na sexta-feira, 23 de junho de 2017.	61
Figura 5.8	Consumos horários de eletricidade e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, no sábado, 24 de junho de 2017 e domingo, 25 de junho de 2017.	62
Figura 5.9	Consumos de energia anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos.	63
Figura 5.10	Consumos de energia primária anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos.....	63
Figura 5.11	Consumos hídricos anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos. .	64
Figura 5.12	Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA no Pavilhão Central.....	71
Figura 5.13	Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA no Pavilhão de Civil.	72

Figura 5.14	Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA na Torre Norte.	73
Figura 5.15	Coeficientes de regressão (β 's) para a estação de aquecimento, nos edifícios em análise.	75
Figura 5.16	Coeficientes de regressão (β 's) para a estação de arrefecimento, nos edifícios em análise.....	76
Anexos		
Figura 3.1.A	Plantas do Pavilhão de Civil.	B
Figura 4.1A	Metodologia utilizada na definição dos modelos de regressão linear múltipla: preparação dos dados (vermelho), verificação dos pressupostos (verde) e melhoria da estimação dos coeficientes de regressão (amarelo).....	C
Figura 4.2A	Metodologia utilizada na definição dos modelos de regressão com erros ARMA: preparação dos dados (vermelho), estimação das ordens ARMA (amarelo), verificação dos pressupostos (verde) e previsão (azul).	C

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Variáveis explicativas dos consumos energéticos em edifícios universitários – abordagem com regressão.....	6
Tabela 2.2	Variáveis explicativas dos consumos energéticos em edifícios universitários – abordagem com estatísticas não paramétricas e análise de variância.....	7
Tabela 2.3	Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos.....	10
Tabela 2.4	Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos no IST.....	20
Tabela 2.5	Medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários, incluindo o IST.....	27
Tabela 3.1	Soluções da envolvente opaca do Pavilhão Central.....	34
Tabela 3.2	Soluções da envolvente translúcida do Pavilhão Central.....	35
Tabela 3.3	Sistema de iluminação do Pavilhão Central (Relatório Auditoria, 2017).....	36
Tabela 3.4	Soluções da envolvente opaca do Pavilhão de Civil.....	38
Tabela 3.5	Soluções da envolvente translúcida do Pavilhão de Civil.....	39
Tabela 3.6	Sistema de iluminação do Pavilhão de Civil (Campus Sustentável-IST, 2017).....	41
Tabela 3.7	Poluções da envolvente opaca da Torre Norte.....	43
Tabela 3.8	Soluções da envolvente translúcida da Torre Norte.....	44
Tabela 3.9	Sistema de iluminação da Torre Norte (adaptado do Relatório Auditoria, 2015b).....	45
Tabela 3.10	Características dos edifícios em análise.....	46
Tabela 3.11	Coeficientes de transmissão térmica e fatores solares dos edifícios em análise.....	47
Tabela 4.1	Dados, período de recolha e fonte.....	49
Tabela 4.2	Combinações ARMA e valores BIC, para os três edifícios.....	53
Tabela 5.1	Custos com recursos energéticos e hídricos anuais dos edifícios em análise.....	58
Tabela 5.2	Momento letivo, temperatura média e radiação média nos dias 23, 24 e 25 de junho de 2017.....	60
Tabela 5.3	Consumos de eletricidade diários no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento.....	66
Tabela 5.4	Valores médios, desvio padrão e intervalo (mínimo e máximo) para a temperatura média diária, vento médio diário, radiação média diária, humidade relativa e precipitação diária.....	66
Tabela 5.5	Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários no Pavilhão Central: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.....	67
Tabela 5.6	Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários no Pavilhão de Civil: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.....	68
Tabela 5.7	Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários na Torre Norte: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.....	69
Tabela 5.8	Importância dos preditores nas redes neuronais artificiais, no Pavilhão Central.....	69
Tabela 5.9	Importância dos preditores nas redes neuronais artificiais, no Pavilhão de Civil.....	70
Tabela 5.10	Importância dos preditores nas redes neuronais artificiais, na Torre Norte.....	70
Tabela 5.11	Sumário da análise de regressão com erros ARMA no Pavilhão Central.....	71
Tabela 5.12	Sumário da análise de regressão com erros ARMA no Pavilhão de Civil.....	72
Tabela 5.13	Sumário da análise de regressão com erros ARMA na Torre Norte.....	73

Anexos

Tabela 2.1A	Descrição dos edifícios revistos sobre medidas de racionalização energética.....	A
Tabela 2.2A	Descrição dos edifícios revistos sobre medidas de racionalização energética no IST.	A
Tabela 4.1A	Preçário da eletricidade em 2007, sem o Imposto sobre o valor acrescentado (IVA).....	C
Tabela 4.2A	Períodos horários de média tensão em Portugal continental.	C
Tabela 5.1A	País, ano de construção e clima dos edifícios em análise e estudos revistos.	D
Tabela 5.2A	País, ano de construção e clima dos edifícios em análise e estudos revistos.	D
Tabela 5.3A	Pesos sinápticos e desvios estimados para o Pavilhão Central, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).	D
Tabela 5.4A	Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para o Pavilhão Central, nas estações de aquecimento e arrefecimento.	D
Tabela 5.5A	Pesos sinápticos e desvios estimados para o Pavilhão de Civil, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).	D
Tabela 5.6A	Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para o Pavilhão de Civil, nas estações de aquecimento e arrefecimento.....	D
Tabela 5.7A	Pesos sinápticos e desvios estimados para a Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).	D
Tabela 5.8A	Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para a Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento.....	D

Siglas e Acrónimos

Instituições

ANQIP	Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
BPI	Banco Português de Investimento
CGD	Caixa Geral de Depósitos
IST	Instituto Superior Técnico

Unidades Monetárias

€	Euro
---	------

Outras

BIC	<i>Bayesian Information Criterion</i>
DSI	Direção de Serviços de Informática
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
nZEB	<i>Nearly Zero energy Building</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PMV	<i>Predicted Mean Value</i>
POSEUR	Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos
RCCTE	Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RPh	Renovações por horas
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
UTA	Unidades de Tratamento de Ar
UTAN's	Unidades de Tratamento de Ar Novo
VRV	Volume de Refrigerante Variável

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A sustentabilidade económica, social e ambiental é um desígnio à escala mundial. O desenvolvimento destas dimensões deve responder às necessidades atuais, sem comprometer as gerações futuras (Sustainable Development Goals, 2019). Neste contexto, a gestão dos recursos energéticos e hídricos deve ser efetuada com o foco na sustentabilidade. Mais do que a poupança financeira e de recursos, procura-se uma relação mais equilibrada entre as atividades humanas e a natureza (Velazquez et al., 2013).

Os consumos energéticos devem ser reduzidos de forma a diminuir a emissão de gases com efeito de estufa resultantes da sua produção (UNFCCC, 2008). Para além disso, na União Europeia (EU) também se ambiciona uma redução da dependência energética externa, cuja taxa foi de 55% em 2017 (Eurostat, 2019). O valor desta taxa, em Portugal foi de 79,7%, nesse mesmo ano. Para atingir aqueles objetivos, é importante atuar nos edifícios que representam 40 % do consumo energético da EU, para os quais também se pretende que sejam garantidas as condições de conforto aos utilizadores. Com base nestes objetivos foi desenvolvida e aprovada a Diretiva de 2002/91/CE, de 16 de dezembro, transposta para a legislação portuguesa através dos DL 78/2006 (SCE), DL 79/2006 (RSECE) e DL 80/2006 [Regulamento das Características de Conforto Térmico dos Edifícios (RCCTE)], de 4 de abril. Aquela diretiva europeia foi reformulada pela Diretiva 2010/31/EU, de 19 de maio, e transposta para o direito interno pelo DL 118/2013 [Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS)], de 20 de agosto.

A redução dos consumos hídricos é, também, fundamental, tratando-se de um recurso cada vez mais limitado num contexto de crescimento demográfico. A agricultura, o uso industrial e o uso doméstico consomem, respetivamente, 70%, 20% e 10% do consumo total de água (Worldometers, 2019). Em Portugal, aqueles valores são de: 79, 13 e 8% (AQUASTAT, 2019). Deste modo, a racionalização dos consumos hídricos em edifícios tem um impacto limitado na preservação deste recurso, mas constitui uma ferramenta importante para promover a sustentabilidade (Marinho et al., 2014). Em Portugal, está prevista a integração da certificação hídrica no sistema de certificação energético de edifícios até 2020 [Agência Portuguesa do Ambiente (APA), 2012]. Enquanto isso, há um sistema de certificação voluntário de equipamentos hídricos da autoria da Associação Nacional para a Qualidade, nas Instalações Prediais (ANQIP). Esta Associação desenvolveu, também, especificações técnicas no âmbito da reutilização e reciclagem de águas cinzentas e do aproveitamento das águas pluviais (Afonso, 2011). O LiderA, um sistema voluntário português para avaliar a construção sustentável, atribui à água e seus efluentes um peso máximo de 11% na avaliação final (Miranda, 2012). É, também, importante realçar que a redução dos consumos hídricos provoca uma redução dos consumos energéticos, na medida em que se poupa no sistema de abastecimento de água e no seu tratamento para consumo e dos efluentes para descarga (Zhang et al., 2016).

Neste estudo pretende-se abordar os consumos destes recursos no *Campus Alameda* do Instituto Superior Técnico (IST). O potencial de poupança energética em edifícios existentes é muito superior aos edifícios novos que foram sujeitos a regulamentos (Niemelä et al., 2016). Para além disso, os edifícios dedicados à lecionação

devem ser exemplo da procura da sustentabilidade (Sesana et al., 2016; Diretiva 31/2010 de 19 de maio), ao mesmo tempo que garantem as condições de conforto aos docentes, alunos, investigadores e funcionários (Irulegi et al., 2017; Mytafides et al., 2017). Em termos financeiros, o pagamento destes recursos é suportado pelo orçamento de estado e constitui a maior fatia da gestão dos *campi* (Allab et al., 2017). O estudo dos consumos energéticos e hídricos em edifícios universitários também se justifica pela elevada complexidade dos padrões de atividade e de ocupação (Chung et al., 2014).

Em 2011, foi criado o *Campus Sustentável*-IST com a missão de promover a sustentabilidade através do uso eficiente de recursos. Esta missão integrou, também, o plano estratégico do IST em 2015 (IST, 2019). O objetivo foi desenvolver o uso eficiente de energia e água. A comissão começou por realizar auditorias energéticas aos edifícios do IST e desenvolver uma plataforma digital de monitorização em tempo real dos consumos energéticos e hídricos denominada EnergiST. A plataforma EnergiST tem por objetivo, entre outros, apoiar alunos no desenvolvimento de estudos que contribuam para a procura da sustentabilidade do *Campus Alameda*. A presente dissertação integra o objetivo anterior, pelo que teve o apoio do *Campus Sustentável*.

1.2 OBJETIVOS

A bibliografia sobre medidas de racionalização energéticas e hídricas em edifícios universitários é escassa e está dispersa. No contexto internacional, não foram encontrados trabalhos sobre a modelação/simulação/otimização dos consumos de eletricidade medidos com frequência horária ou diária, em edifícios universitários. De igual modo, não foram localizados estudos sobre a modelação/simulação/otimização dos consumos de eletricidade reais, em função da estação climática de arrefecimento e aquecimento. No IST, os consumos de eletricidade começaram a ser registados em tempo real em 2014 sob alçada do *Campus Sustentável*. Os estudos revistos sobre a melhoria do desempenho energético do IST incidiram, na sua maioria, sobre os relatórios das auditorias e simulações energéticas dos edifícios do *Campus Alameda*. Estes estudos estão sujeitos a erro pelas aproximações efetuadas aos padrões de utilização e ocupação dos edifícios, para além de ignorarem, por vezes, as avarias nos equipamentos ou os desempenhos mais fracos devido à falta de manutenção ou degradação. A monitorização dos consumos hídricos é, também, recente e exclusiva ao Pavilhão de Civil.

O presente estudo incide sobre a análise dos consumos energéticos e hídricos do IST, mais especificamente, do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte. Os objetivos foram os seguintes:

- (1) Recolher informação sobre as medidas de racionalização energética e hídrica em edifícios universitários.
- (2) Comparar as medidas de eficiência energética e hídrica estudadas no IST com as medidas analisadas em outros edifícios universitários.
- (3) Descrever as características do comportamento térmico, equipamentos e horários de ocupação do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.
- (4) Quantificar e comparar graficamente os consumos energéticos e hídricos, via análise dos consumos reais, no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.

- (5) Investigar o efeito de variáveis meteorológicas e de ocupação no consumo de eletricidade real e explorar as diferenças entre os edifícios e estações climáticas.

1.3 ORGANIZAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos. O Capítulo 1 é a introdução. O Capítulo 2 refere-se ao estado da arte sobre os consumos energéticos e hídricos em edifícios universitários, incluindo o IST. O Capítulo 3 contém a descrição dos edifícios em análise. O Capítulo 4 descreve a metodologia de análise, mais especificamente, a recolha e análise preliminar dos dados e a análise estatística. O Capítulo 5 incide sobre os resultados e discussão. É feita uma análise gráfica dos consumos energéticos e hídricos do IST e é modelado o consumo energético do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e os desenvolvimentos futuros.

2 CONSUMOS ENERGÉTICO E HÍDRICO EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estado da arte sobre os consumos energéticos e hídricos em edifícios universitários é apresentado neste capítulo. Inicialmente são identificadas as variáveis explicativas dos consumos energéticos. O item seguinte descreve os edifícios e as medidas de racionalização energética. A descrição dos edifícios e as medidas de racionalização energética estudadas no IST são apresentadas no item 2.2.3. Os edifícios em análise são o Pavilhão Central, o Pavilhão de Civil e a Torre Norte. No item 2.2.4 são comparadas as abordagens e discutidos os resultados. O último item incide sobre a racionalização hídrica. São identificadas as variáveis explicativas e as medidas de racionalização hídrica. Em todos os itens é dada ênfase aos aspetos mais relevantes.

Os artigos foram identificados via biblioteca do conhecimento online (*b-on*) e *Google Scholar*. A biblioteca do IST (BIST), o Repositório Científico de Acesso Aberto de Portugal (RCAAP), o Repositório Institucional da Universidade de Lisboa (Repositório ULisboa) e o relatório das auditorias energéticas do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte do IST, disponibilizados pelo *Campus Sustentável*, foram, também, utilizados na identificação de artigos/dissertações e/ou medidas de racionalização energética. Paralelamente, foram consultados os sítios da *Stanford University*, *Boston University*, *University of Oxford*, *University of Colorado* e *University of California*. A lista de referências dos vários artigos foi igualmente analisada e identificados os artigos relacionados. As palavras-chave *energy conservation*, *energy consumption*, *energy performance*, *energy retrofit*, *energy simulations*, *retrofit measures*, *sustainable campus*, *university buildings*, *university campus*, *water consumption* e *water management* foram utilizadas, na forma isolada ou através do 'AND', na busca. As mesmas palavras-chave foram introduzidas em algumas revistas científicas como, por exemplo, a *Energy and Buildings*.

2.2 RACIONALIZAÇÃO ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS

2.2.1 VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

Um total de 5 artigos foi revisto e utilizado na identificação de variáveis explicativas dos consumos energéticos, em edifícios universitários (Tabelas 2.1 e 2.2). Para uma melhor compreensão, os artigos foram sumariados por país, amostra, descrição/tipo de variáveis e técnicas estatísticas de análise. Os trabalhos foram desenvolvidos na Austrália (Khoshbakht et al., 2018), França (Bordeau et al., 2018; Bonnet et al., 2002), Taiwan (Wang, 2016) e Ucrânia (Deshko & Shevchenko, 2013). As variáveis explicativas dos consumos energéticos foram agrupadas em 5 tipos: (1) soluções construtivas (por exemplo, ano/período de construção, isolamento térmico e legislação em vigor), (2) dimensão (por exemplo, volume e área do edifício), (3) clima (por exemplo, temperatura, zona climática e radiação solar), (4) ocupação (por exemplo, meses e horas de ocupação e momento letivo) e (5) atividade (por exemplo, edifício administrativo/edifício de Engenharia, ensino/investigação e número de docentes, investigadores, alunos e funcionários).

Os consumos energéticos anual ou anual/m² e o consumo energético horário são as variáveis dependentes. A atividade foi a variável mais utilizada na explicação dos consumos energéticos dos edifícios (n = 57; 62,6%),

seguida da dimensão (n = 13; 14,3,0%), ocupação (n = 10; 11,0%), clima (n = 9; 9,9%) e soluções construtivas (n = 2; 2,2%).

Tabela 2.1 Variáveis explicativas dos consumos energéticos em edifícios universitários – abordagem com regressão.

Autor	País	Amostra	Consumo energético [†]	Variável independente						
				Descrição	Atividade	Clima	Dimensão	Ocupação	Soluções construtivas	
Bonnet et al. (2002)	França	Administrativo (n=1)	Anual	Área			x			
		Bibliotecas (n=7)	Anual	Área			x			
		Lecionação (n=4)	Anual	Área			x			
		Residências de estudantes (n=7)	Anual	Área			x			
		Catering (n=7)	Anual	Área			x			
		Laboratórios (n=9)	Anual	Área			x			
Bourdeau et al. (2018)	França	Edifício Ciências e Tecnologias (1987)	Horário	Ocupação horária				x		
		Edifício Artes e Humanidades (1999)	Horário	Graus dias aquecimento	x					
				Ocupação horária				x		
Khoshbakht et al. (2018)	Austrália	80 Edifícios	Anual	Área laboratório	xxx					
				Área PC's	xxx					
				Área biblioteca	x					
				Área estúdio	x					
				Área clínica	xxx					
				Área leitura	x					
				Área retalho	xxx					
			Área pavimento			xxx				
			Idade edifício						x	
			Anual/m ²	Área laboratório	xxx					
				Área pc's	x					
				Área biblioteca	x					
				Área estúdio	x					
				Área clínica	x					
		Área leitura		x						
		Área retalho		x						
		Anual	Área pavimento					x		
			Idade edifício						x	
			Lecionação	xxx						
			Escritórios	x						
			Investigação	xxx						
			Administrativos	xxx						
			Bibliotecas	xxx						
			Artes e Letras	x						
			Gestão	x						
			Saúde	xxx						
			Aquecimento anual/m ²	Ciências	x					
Lecionação	x									
Escritórios	x									
Investigação	x									
Administrativos	x									
Bibliotecas	x									
Anual	Artes e Letras	x								
	Gestão	x								
	Saúde	x								
	Ciências	x								

[†]Variável dependente; x, omissa ou sem significado estatístico; xxx, efeito significativo do preditor na variável dependente.

Tabela 2.1 Variáveis explicativas dos consumos energéticos em edifícios universitários – abordagem com regressão (continuação).

Autor	País	Amostra	Consumo energético [†]	Variável independente					
				Descrição	Atividade	Clima	Dimensão	Ocupação	Soluções construtivas
Wang (2016)	Taiwan	51 Universidades	Anual/ m ²	Universidade pública (A); Universidade pública de ciências e tecnologias (B); Universidade privada (C); Universidade privada de ciências e tecnologias (D)	xxx				
			Anual/ m ²	Selecionada para fundos de investigação (1) ou não (2)	xxx				
		Anual/ m ²	Número de alunos					xxx	
		Anual/ m ²	Número de professores					x	
		Anual/ m ²	Área do terreno					x	
			Área de pavimento				x		
			Área de pavimento/pessoa					xxx	
			Área de implantação/terreno					x	
			Área de pavimento/terreno					x	
		Anual/ m ²	Número alunos de ciências naturais	xxx					
			Número alunos de ciências sociais	x					
			Número alunos de doutoramento	xxx					
			Número alunos de mestrado	x					
			Número alunos de licenciatura	x					
		Anual/ m ²	Medicina	xxx					
			Agricultura	x					
	Engenharia	xxx							
	Ciências	xxx							
	Design	x							
	Outras	x							

[†]Variável dependente; x, omissa ou sem significado estatístico; xxx, efeito significativo do preditor na variável dependente.

Tabela 2.2 Variáveis explicativas dos consumos energéticos em edifícios universitários – abordagem com estatísticas não paramétricas e análise de variância.

Autor	País	Amostra	Consumo energético [†]	Variável independente				
				Descrição	Atividade	Ocupação	Clima	Post Hoc
Deshko & Shevchenko (2013)	Ucrânia	114 Campi	Anual/m ²	4 Zonas climáticas do país			x	
			Anual/m ²	5 Intervalos de área/aluno definidos em norma ucraniana		x		
		Anual/m ²	Técnicos; económicos; humanitários	xxx				
		Aquecimento anual/m ²	4 Zonas climáticas do país				xxx	
		Aquecimento anual/m ²	5 Intervalos de área/aluno definidos em norma ucraniana			xxx		
Wang (2016)	Taiwan	51 Universidades	Anual/m ²	Selecionados para fundos de investigação; não selecionados	xxx			
			Anual/m ²	Universidade pública (A); Universidade pública de ciências e tecnologias (B); Universidade privada (C); Universidade privada de ciências e tecnologias (D)	xxx			A>D

[†]Variável dependente; x, omissa ou sem significado estatístico; xxx, diferenças com significado estatístico.

A representação gráfica do número de ocorrências e do número de ocorrências com significado estatístico é apresentada na Figura 2.1. A atividade foi a variável mais forte em termos de significância estatística, na análise dos consumos energéticos. O número de ocorrências com significado estatístico para a dimensão, clima e ocupação foi reduzido; as soluções construtivas não apresentaram qualquer significado estatístico. Os modelos de regressão explicaram entre 7% a 96% da variância nos consumos energéticos.

Os estudos revistos referem-se apenas à estação mais exigente, em termos de consumos energéticos. De forma similar, não foram efetuadas tentativas de predição. Torna-se, pois, pertinente, comparar os consumos energéticos, nas estações de aquecimento e arrefecimento, e prever os consumos energéticos em edifícios universitários introduzindo, se possível, algumas variáveis independentes ou explicativas nos modelos.

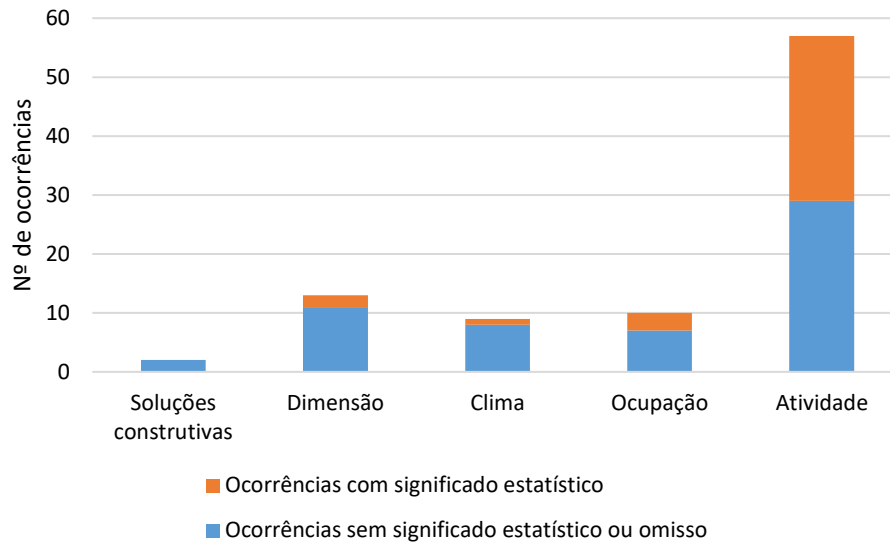


Figura 2.1 Número de ocorrências e número de ocorrências com significado estatístico das variáveis explicativas do consumo energético em edifícios universitários.

2.2.2 ESTUDOS DE RACIONALIZAÇÃO ENERGÉTICA

2.2.2.1 DESCRIÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A descrição dos edifícios casos de estudo revistos é apresentada no Anexo A, Tabela 2.1A. Os parâmetros selecionados são o clima, o ano de construção, o tipo/utilização, o piso, a dimensão, o coeficiente de transmissão térmica e os sistemas de climatização (AVAC). Os artigos estão ordenados em função da classificação climática de *Köppen-Geiger* descrita no Anexo A (Kottek et al., 2006). Os 14 artigos foram publicados entre 2002 e 2018 e realizaram-se na Coreia do Sul, Croácia, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Itália, Japão e Kuwait. A distribuição dos artigos por país é apresentada na Figura 2.2. Os artigos efetuados na Coreia do Sul, Japão e Kuwait foram excluídos da Figura 2.2 para uma menor dispersão gráfica. A maioria dos casos de estudo está localizada em Itália (35,7%) e Espanha (14,3%).

Ao nível do clima, os edifícios estão, maioritariamente, localizados em países com climas temperados (78,6%), seguidos dos climas frios (14,3%) e climas quentes (7,1%). Os edifícios universitários foram construídos entre 1927 (Itália) e 2010 (Coreia do Sul), sendo o maior número construído nos anos 60 e 90. Os edifícios universitários estão sobretudo vocacionados para a administração, ensino e investigação. Outros edifícios são, também, utilizados de forma mista ou para alojamento dos estudantes. Os edifícios para a engenharia/investigação (50,0%), ciências (25,0%) e residências para estudantes (12,5%) predominam sobre os restantes. Os edifícios apresentam um máximo de 3 pisos inferiores e 10 pisos superiores (Coreia do Sul). A área dos edifícios/campus está compreendida entre 863 m² e 30 932 m². Os coeficientes de transmissão térmica variam entre 0,3 e 8,7 W/(m²K) (paredes), 0,2 e 1,7 W/(m²K) (cobertura) e 1,3 e 5,9 W/(m²K) (envidraçados). Ao nível dos sistemas de

climatização, os equipamentos primários de aquecimento mais utilizados são as caldeiras tradicionais e os *chillers* a ar. Os equipamentos secundários são, maioritariamente, os radiadores e os ventiloconvetores.

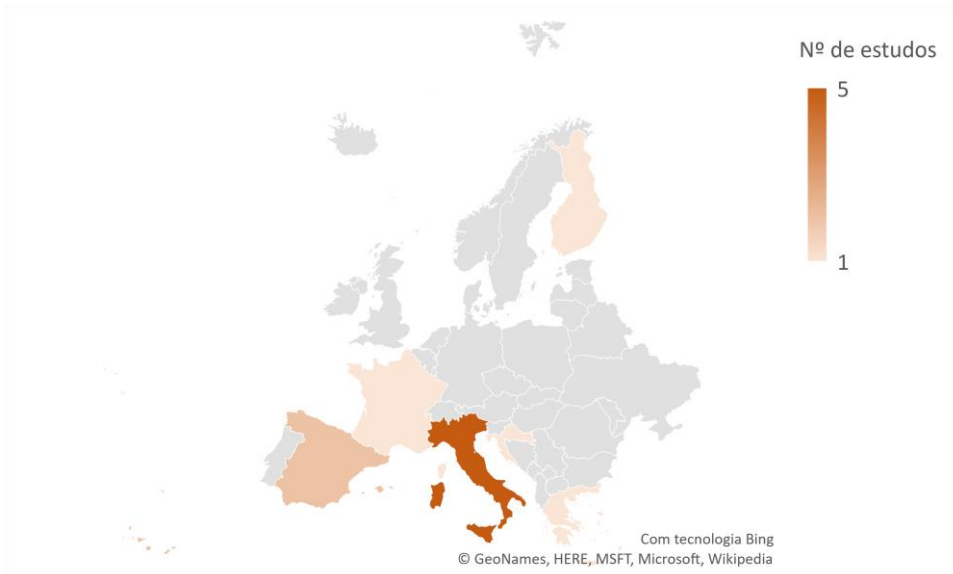


Figura 2.2 Distribuição dos estudos por país (Europa).

2.2.2.2 MEDIDAS DE RACIONALIZAÇÃO

As medidas de racionalização energética utilizadas nos casos de estudo descritos no item 2.2.2.1 são apresentadas na Tabela 2.3. A Tabela 2.3 está estruturada em termos de simulação/otimização energética, descrição das medidas utilizadas em cada edifício/*campus* universitário, tipo de medida (envolvente, AVAC, renováveis, iluminação e outros), redução energética (necessidades de aquecimento, necessidades de arrefecimento, necessidades de aquecimento e arrefecimento, AVAC, fuelóleo, gás, eletricidade e total), período de retorno do investimento (PRI) e observações.

Os softwares utilizados na modelação/simulação/otimização energética dos edifícios universitários foram vários: *Building Energy Signature (BES)*, *CENED +*, *EnergyPlus*, *eQuest*, *Green Building Studio (GBS)*, *LIDER*, *Sefaira*, *Toplinska zástita Novolit* e *TrnSys 17*. Sesana et al. (2016) utilizaram dois softwares (*CENED +* e *Sefaira*) na análise da performance energética de dois edifícios universitários italianos e referiram que a seleção de um software deve ter em atenção os objetivos da simulação. Entre os trabalhos revistos, apenas Yoshida et al. (2017) e Mata et al. (2014) reportaram os resultados reais da implementação das medidas de racionalização energética. As medidas de racionalização energética utilizadas nos edifícios, na sua forma isolada (por exemplo, medida 1), em combinação (por exemplo, as medidas 1 e 2) ou na totalidade (por exemplo, 1 a 10), distribuídas pela envolvente, AVAC, renováveis, iluminação e outros, culminaram na redução das necessidades energéticas de aquecimento (3% a 92%) e dos consumos de fuelóleo (22% a 100%), gás (43% a 100%) e eletricidade (2% a 53%). A redução do total dos consumos energéticos está compreendida entre 0% e 105%. O PRI das medidas de racionalização energética está compreendido entre 1 e 39 anos (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos (continuação).

Autor Modelação	Medidas		Tipos									Resultados							Observações					
			Envolvente				AVAC			Outros		Redução de energia [%]												
	Conj. avaliado	Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo	Gás	Electricidade		Total	PRI [anos]			
Mata et al. (2014)	1 AVAC desligado à noite e funcionamento reduzido ao fim-de-semana. 2 Carga de aquecimento adaptada às necessidades de cada zona térmica. 3 Utilização do edifício concentrada em menos salas. 4 Redução das temperaturas de conforto.	1-4	- ¹	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	43	11	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> – Operação do sistema de AVAC não otimizada gera elevados desperdícios energéticos. – O ciclo <i>Plan-Do-Check-Act</i> (PDCA) permite otimizar o pacote de medidas de racionalização energética. 		
Semprini et al. (2016) <i>Building Energy Signature</i>	1 Válvulas termostáticas nos radiadores.	1,2	-	-	-	-	x	-	-	-	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> – Intervenções na envolvente em edifícios com valor histórico estão reduzidas aos envidraçados. 	
	2 Substituição das bombas hidráulicas do circuito secundário.	1-3	-	-	-	-	x	x	-	-	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> – Intervenções no sistema de AVAC também têm limitações por razões estéticas. 	
	3 Substituição das caldeiras tradicionais por caldeiras de condensação.	1-4	-	-	-	x	x	x	-	-	-	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> – Cálculo do <i>Predicted Mean Vote</i> (PMV) revelou potencial de poupança energética e de melhoria do conforto térmico se existisse uma adaptação das cargas térmicas a cada zona térmica. 	
	4 Melhoria dos envidraçados.																							
Sesana et al. (2016) <i>CENED+ (Estático)</i>	1 Melhoria dos envidraçados.	1	-	-	-	x	-	-	-	-	-	25 [†]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> – Para obter a classificação energética A (<29[†] kWh/m².ano segundo a regulamentação da região de Lombardia, Itália) é necessário intervir na envolvente e no AVAC.
	2 Isolamento das paredes.																							
	3 Substituição das caldeiras tradicionais por caldeiras de condensação.	2	x	-	-	-	-	-	-	-	-	36 [†]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4 Ventilação mecânica com recuperação de calor.	3	-	-	-	-	x	-	-	-	-	24 [†]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		4	-	-	-	-	-	x	-	-	-	38 [†]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	1-4	x	-	-	x	x	x	-	-	-	x	92 [†]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

[†]Omissão ou inexistência da variável; [‡]energia primária; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário; Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento.

Tabela 2.3 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos (continuação).

Autor Modelação	Medidas	Conj. avaliado	Tipos									Resultados							Observações				
			Envolvente				AVAC			Outros		Redução de energia [%]											
			Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo	Gás		Eletricidade	Total	PRI [anos]	
Sesana et al. (2016) CENED+ e Sefaira	1 Isolamento das paredes.	1	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	<ul style="list-style-type: none"> - A redução de consumos energéticos é residual, a partir de um isolamento com 3 cm de espessura. - Em edifícios antigos a melhoria dos envidraçados e da cobertura tem elevado impacto no consumo de energia. - A garantia de condições de conforto é dependente de elevado consumo energético em edifícios antigos. - O erro médio dos <i>outputs</i> do CENED+ e Sefaira é de 4,40%. 		
	2 Melhoria dos envidraçados.																						
	3 Película de controlo solar refletiva.	2	-†	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-			
	4 Estores interiores.																						
	5 Isolamento da cobertura.	3	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-9	-			
	6 Sistema AVAC central.																						
	7 Iluminação LED.	4	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-13	-			
	8 Painéis fotovoltaicos.																						
		5	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49	-			
		6	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-71	-			
		7	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	3	-			
		8	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-			
		1,2 5-7	x	x	-	x	x	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	58	-			
Yoshida et al. (2017)	1 Isolamento das paredes.	1-10	x	-	-	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	53	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - A medida 1 deve ser aplicada pelo interior em edifícios históricos. - A transformação do edifício histórico num nZEB implicou uma intervenção na envolvente, equipamentos, gestão e energias renováveis. - A medida 7 evita a formação de camadas de temperatura. 		
	2 Melhoria de envidraçados.																						
	3 AVAC com recuperação de calor.																						
	4 Iluminação LED.																						
	5 Sensores de luminosidade e de ocupação para iluminação.																						
	6 Ajuste das Renovações Por hora (RPh), em função do número de ocupantes.																						
	7 Ventoinhas no teto.																						
	8 <i>Displacement ventilation</i> .																						
	9 <i>Chillers</i> mais eficientes.																						
	10 Painéis fotovoltaicos.																						

†Omissão ou inexistência da variável; ‡energia primária; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário; Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento.

Tabela 2.3 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos (continuação).

Autor	Modelação	Medidas	Conj. avaliado	Tipos									Resultados						Observações		
				Envolvente				AVAC			Outros		Redução de energia [%]								
				Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo		Gás	Eletricidade
Bella et al. (2018)	EnergyPlus	1 Isolamento das paredes.	1	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	– O conjunto das medidas 1 a 3 é financeiramente inviável (U's são baixos). – O conjunto das medidas 1 a 6 não é financeiramente benéfica. – O conjunto das medidas 4 a 6 compõe a solução custo-ótimo e exclui intervenções na envolvente.
		2 Isolamento da cobertura.	2	- [†]	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	
		3 Melhoria dos envidraçados.	3	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
		4 Válvulas termostáticas nos radiadores e sistema de controlo das UTA's.	3	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	
		5 Iluminação LED com sensores de ocupação e de luz natural.	1-3	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	
		6 Sistema de recuperação de calor nas UTA's.	5	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	13	-	
			6	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	14	-			
			1-6	x	x	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	42	-		
			4-6	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	33	-		
Irulegi et al. (2017)	LIDER	1 Ventilação noturna (4RPh) na estação de arrefecimento.	2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	– A medida 4 reduz os ganhos solares, aumentando as necessidades de aquecimento. – As medidas 6 e 7 têm impacto reduzido nos consumos energéticos (U's reduzidos). – A medida 2 tem elevado potencial de poupança energética. – A medida 1 aumenta as condições de conforto dos utilizadores sem investimento.
		2 Isolamento das pontes térmicas planas.	3	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		3 Ventilação mecânica com recuperação de calor.	4	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		4 Melhoria dos envidraçados.	6,7	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		5 Melhoria dos envidraçados a norte.	1-3	-	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	
		6 Isolamento das paredes.	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		7 Isolamento da cobertura.	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Allab et al. (2017)	TrnSys 17	1 Redução da curva de aquecimento dos equipamentos primários.	1	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	– A medida 1 tem impacto significativo nos consumos energéticos sem investimento. – As simulações energéticas são processos demorados que requerem muitos recursos: financeiros, humanos e materiais.
		2 Termostatos no piso radiante.	2	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	
			1,2	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	16	-	

[†]Omissão ou inexistência da variável; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário; Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento; UTA, Unidades de Tratamento de Ar.

Tabela 2.3 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos (continuação).

Autor	Modelação	Medidas	Conj. avaliado	Tipos									Resultados							Observações										
				Envolvente				AVAC			Outros		Redução de energia [%]																	
				Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo	Gás		Eletricidade	Total	PRI [anos]							
Ostojic et al. (2016) <i>Toplinska zaštitna Novolit</i>	1	Isolamento das paredes.	1	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34	-	-	-	-	-	-	-	3	- A medida 1 conduz a uma redução elevada das necessidades de aquecimento (U's elevados). - A medida 4 é financeiramente inviável apesar do U ser elevado.	
	2	Melhoria dos envidraçados.	2,3	- [†]	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	-	7		
	3	Portas com melhores propriedades térmicas.	4	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	39		
	4	Isolamento da cobertura.	1-5	x	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	6		
	5	Porta de proteção do vento.																												
Alajmi (2012) <i>EnergyPlus</i>	1	Iluminação desligada ao fim-de-semana e à noite.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	- A medida 3 reduz os consumos de energia em climas quentes devido ao aumento da eficiência do sistema de arrefecimento - Este edifício possui U's reduzido, mas é ineficiente devido à gestão do sistema de AVAC.
	2	Equipamentos <i>plug-in</i> desligados em períodos de não utilização.	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
	3	Estanqueidade ao ar.	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	
	4	Setpoint AVAC 24 °C.	4	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	
	5	Setpoint AVAC 28 °C nos períodos de não ocupação.	5	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	
	6	AVAC desligado ao fim-de-semana.	6	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	
	7	Iluminação eficiente.	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	
	8	Isolamento da cobertura.	7	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	
	9	Manutenção do sistema AVAC.	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	
8		8	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0		
9		9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1		
1-9		1-9	-	x	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	

[†]Omisso ou inexistência da variável; [‡]energia primária; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário; Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento.

Tabela 2.3 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos (continuação).

Autor	Modelação	Medidas	Conj. avaliado	Tipos									Resultados							Observações		
				Envolvente				AVAC			Outros		Redução de energia [%]									
				Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo	Gás		Eletricidade	Total
Niemiälä et al.	IDA-ICE	1 Bomba de calor geotérmica.	1-5	-	x	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	59 [†]	-	<ul style="list-style-type: none"> – É financeiramente benéfico implementar a medida 4 em vez de recorrer ao sistema de aquecimento distrital para atingir nZEB. – Na Finlândia, a referência para edifícios dedicado à lecionação nZEB é de 90 kWh/m².ano (energia primária). 	
		2 Painel solar.																				
		3 Melhoria dos envidraçados.	2-5	-	x	-	x	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	59 [†]	-		
		4 Isolamento da cobertura.																				
		5 Renovação da ventilação mecânica.																				
Chung et al. (2014)	eQuest	1 Tomadas automáticas dos computadores.	1-6	x	x	-	x	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	29	-	<ul style="list-style-type: none"> – As medidas de racionalização energética devem ser adequadas ao tipo de consumo do edifício alto/baixo e à sua data de construção (p. ex. antes/depois de regulamentação mais restritiva). – Em edifícios recentes com elevados consumos deve-se intervir na operação do AVAC e computadores pessoais e na eficiência da iluminação. – Em edifícios antigos com baixos consumos deve-se intervir na envolvente. – Em edifícios antigos com elevados consumos deve-se implementar os dois conjuntos de medidas acima referidos. 	
		2 Iluminação eficiente.																	15	-		
		3 <i>Setpoint</i> AVAC; aquecimento 18 °C e arrefecimento 28 °C.																	18	-		
		4 Isolamento da cobertura.																	18	-		
		5 Isolamento das paredes.	1-3	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	16		-
		6 Melhoria envidraçados.																		6		-
			4-6	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-			
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-			

[†]Omissão ou inexistência da variável; [‡]energia primária; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário; Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento.

O número de medidas de racionalização energética, em função do tipo (envolvente, AVAC e outros) é apresentado na Figura 2.3. As medidas mais estudadas são a melhoria da envolvente dos edifícios (42,1%), seguidas das medidas de racionalização energética do sistema de AVAC (33,7%) e outras (24,2%). A distribuição das medidas de racionalização energética inseridas na envolvente (cobertura, envidraçados, paredes e pavimentos), AVAC (equipamentos primários e secundários e operação) e outros (renováveis, iluminação e outros) é apresentada na Figura 2.4. Ao nível da envolvente, a medida de racionalização energética mais utilizada foi a melhoria dos envidraçados (35,7%), seguida do isolamento de paredes (31,0%), cobertura (28,6%) e pavimento (4,8%). A ordenação das medidas de racionalização energética para o sistema de AVAC é a seguinte: intervenção nos equipamentos secundários (40,6%), operação/gestão do sistema (34,4%) e equipamentos primários (25,0%). Por último, na categoria 'outros', a melhoria do sistema de iluminação (39,1%) e as energias renováveis (26,1%) foram as medidas mais utilizadas na modelação/simulação/otimização energética.

No âmbito dos resultados, as medidas de racionalização energética utilizadas por Ascione et al. (2017) culminaram na redução do consumo de energia primária, de um conjunto de dois edifícios universitários, até um valor de 12 kWh_{EP}/(m². ano). A instalação de uma bomba de calor a ar e a cobertura total do edifício com painéis fotovoltaicos foram as medidas de racionalização energética mais relevantes na otimização do consumo energético. Na Grécia, a modelação efetuada por Mytafides et al. (2017) resultou na redução do consumo energético via isolamento do edifício, de forma a prevenir as perdas térmicas. Para além disso, a instalação de painéis fotovoltaicos resultou no excesso de produção elétrica. Os autores concluíram que as melhorias energéticas do edifício resultaram em benefícios ambientais e económicos, bem como no aumento da produtividade e melhoria de saúde dos utilizadores. Ainda em Itália, Ferrari & Beccali (2017) mostraram que era possível reduzir as exigências energéticas primárias e emissões de gases com efeito de estufa associadas até 40% dos valores atuais, adotando soluções tecnológicas válidas e disponíveis no mercado, mais especificamente, o isolamento térmico das paredes e cobertura, a instalação de uma bomba de calor geotérmica e a instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura e fachadas do edifício. Em Espanha, um conjunto de medidas de gestão implementadas, no período compreendido entre novembro de 2006 e maio de 2007, reduziu o consumo de gás utilizado para aquecimento em 40%. O total de emissões de CO₂ reduziu, também, para 70,4%. O relacionamento entre os proprietários, os gestores e os utilizadores dos edifícios constituíram os fatores-chave para essa redução (Mata et al., 2009). Ainda em Itália, intervenções reduzidas e não invasivas em edifícios universitários históricos mostraram um potencial de poupança energética até 32% (Semprini et al., 2016). As intervenções incidiram sobre a alteração da temperatura interior, na estação de aquecimento, através da instalação de válvulas termostáticas nos radiadores, a substituição das caldeiras tradicionais por caldeiras de condensação e a substituição dos envidraçados (Semprini et al., 2016).

Em dois *campi* universitários italianos, Sesana et al. (2016) defenderam, também, medidas de racionalização energética que contemplavam a envolvente e a climatização. A reabilitação não invasiva foi a solução para a otimização energética em edifícios com valor histórico e patrimonial. No Japão, Yoshida et al. (2017) reportaram estratégias para alcançar um *campus* sustentável na *University of Osaka*. Em traços gerais, as estratégias levaram a uma redução do consumo energético total e a um decréscimo de 22% de energia por unidade de área. No Sul

de Itália, a simulação da instalação de dispositivos de recuperação de calor no sistema AVAC e a iluminação LED automática conduziram a uma poupança energética e à redução de emissões de gases com efeito estufa de 33% (Bellia et al., 2018).

Em *San Sebastian*, Espanha, Irulegi et al. (2017) propuseram um método para definir e avaliar estratégias para alcançar *nearly zero-energy building* (nZEB), baseado na análise das condições de conforto reais dos estudantes. No inverno, as medidas de racionalização energética consistiram no isolamento das pontes térmicas, dispositivos de recuperação de calor e na melhoria dos envidraçados. Os resultados mostraram uma poupança energética até 62% e uma redução de dois meses no período com necessidades de aquecimento. No verão, os problemas de desconforto térmico reportados pelos utilizadores foram resolvidos através de ventilação natural, evitando a instalação de sistemas de ar condicionado e impactes visuais associados. Os autores concluíram que a intervenção em edifícios existentes exige o conhecimento das necessidades de conforto dos utilizadores. De realçar, também, que o conforto no interior do edifício estava associado a um correto desenvolvimento educativo. Algo similar foi referido por Ostojić et al. (2016) na *University of Zagreb*, Croácia. O isolamento de paredes e cobertura, a substituição de envidraçados e portas degradadas e a instalação de portas corta vento conduziram a uma poupança energética, à redução de custos de manutenção, à melhoria da qualidade de vida e trabalho das pessoas e ao prolongamento do tempo de vida útil do edifício. A relação entre o conforto térmico, a qualidade do ar no interior do edifício e o consumo energético foi igualmente investigada por Allab et al. (2017) e Alajmi (2012) em França e no Kuwait, respetivamente. Os autores concluíram que é possível reduzir o consumo energético e aumentar o conforto das pessoas que trabalham/estudam nos edifícios universitários.

Na Finlândia, Niemelä et al. (2016) investigaram as medidas de racionalização energética de custo-ótimo para alcançar os requisitos nZEB. Os resultados revelaram que os requisitos energéticos exigidos para os novos edifícios [energia primária $\leq 170 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2 \cdot \text{ano})$] poderiam ser alcançados pelos edifícios já existentes, através de reformas profundas, entre elas, a renovação do sistema de ventilação, a instalação de bombas de calor geotérmicas, a melhoria dos envidraçados e a instalação de uma grande área de painéis fotovoltaicos. Neste estudo, a redução do consumo energético foi acompanhada por uma melhoria do conforto térmico e qualidade do ar. Na Coreia do Sul, uma redução de 10-22% no consumo energético foi conseguida através da melhoria dos envidraçados e do isolamento da envolvente do edifício. Uma redução de 18-29% foi igualmente conseguida via isolamento da envolvente e mudança no comportamento dos utilizadores dos edifícios (Chung et al., 2014).

Em suma, os estudos de modelação/simulação/otimização dos edifícios universitários revistos, procuraram, em simultâneo, reduzir o consumo de energia e aumentar o conforto dos seus utilizadores, em conformidade com a Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Entre as medidas de racionalização energética, a melhoria da envolvente, sobretudo dos envidraçados e paredes, a intervenção no sistema de AVAC e o uso de energia proveniente de fontes renováveis foram as mais relevantes. Dos estudos anteriores retirou-se, também, que é possível intervir em edifícios universitários já existentes e de valor arquitetónico ou histórico de forma não invasiva. De realçar, a necessidade de ajustar as medidas de racionalização energética às particularidades de cada edifício, às condições climáticas e locais e aos utilizadores. A mudança de comportamento dos utilizadores e o bom entendimento entre gestores e proprietários dos

edifícios, são igualmente sugeridos para alcançar um bom desempenho energético. O uso da ventilação natural foi tal-qualmente reforçado nos estudos de modelação/simulação/otimização de edifícios. A melhoria das condições térmicas dos edifícios e da qualidade do ar interior são potenciadores do conforto e da produtividade.

2.2.3 ESTUDOS DE RACIONALIZAÇÃO ENERGÉTICA NO IST

2.2.3.1 DESCRIÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A descrição dos edifícios casos de estudo do IST é apresentada no Anexo A, Tabela 2.2A. A estrutura da Tabela 2.2A é idêntica à Tabela 2.1A. A descrição incide sobre o Pavilhão Central, o Pavilhão de Civil e a Torre Norte. Por questões de similaridade construtiva, arquitetónica e de equipamentos, a Torre Sul foi incluída na presente descrição. Um total de dez dissertações de mestrado e três auditorias (uma ao Pavilhão Central, uma ao Pavilhão de Civil e uma à Torre Norte) é incluído na análise. Uma vez que os vários autores descrevem os mesmos edifícios, optou-se por uma única descrição (Tabela 2.2A). O *Campus* Alameda situa-se na Avenida Rovisco Pais, em Lisboa. O clima é temperado com verão seco e quente, de acordo com a classificação climática de *Köppen-Geiger* (Kottek et al., 2006). Os primeiros edifícios do *Campus* da Alameda, onde se inclui o Pavilhão Central, começaram a ser construídos em 1927 e terminaram em 1936/37 (IST, 2019). O Pavilhão de Civil e a Torre Norte foram construídos nos anos 90 (Plano de Inspeção e Manutenção, 2006; Relatório de Atividades do IST, 1994). A Torre Sul entrou em funcionamento em 2000 (Relatório de Atividades do IST, 2000).

Uma descrição detalhada do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte é apresentada no capítulo 3. O edifício da Torre Sul tem uma área de 10 100 m², com 3 pisos inferiores e 12 superiores, nos quais se incluem anfiteatros, bar, biblioteca, gabinetes, laboratórios e salas de aula. A Torre Sul é designada para atividades de Engenharia e Investigação. O edifício da Torre Sul está equipado com duas caldeiras a gás tradicionais, 2 *chillers* a ar e uma torre de arrefecimento, nos equipamentos primários. Relativamente aos equipamentos secundários, estão instalados ventiloconvetores, Unidades De Tratamento De Ar Novo (UTAN), Unidades De Tratamento De Ar (UTA) e sistema de expansão direta.

2.2.3.2 MEDIDAS DE RACIONALIZAÇÃO

As medidas de racionalização energética utilizadas no IST são apresentadas na Tabela 2.4. Os softwares utilizados na modelação energética do IST foram o *Autodesk Ecotect Analysis*, o *EnergyPlus* e o *TRACE 700*. As medidas, na sua forma isolada ou em combinação, ao nível da envolvente, AVAC e outros, resultaram no aumento das necessidades de aquecimento (6%) (Correia, 2012) e do sistema de AVAC (8%) (Marçal, 2015). Uma redução nas necessidades de arrefecimento (29%) (Correia, 2012), nas necessidades de aquecimento e arrefecimento (52%) (Faustino, 2012), no sistema de AVAC (12%) (Patrício, 2013) e na eletricidade (85%) (Pereira, 2015) foi observada nas medidas de racionalização energética desenvolvidas no IST. O total dos consumos energéticos dos edifícios reduziu entre 0 e 20%. O PRI está compreendido entre 1 e 91 anos (Tabela 2.4).

Na Figura 2.3 são apresentadas as medidas de racionalização energética, em função do tipo, no IST. A ordenação é a seguinte: melhoria da envolvente dos edifícios (48,3%), medidas de racionalização energética do sistema de AVAC (27,6%) e outras (24,1%). A distribuição das medidas de racionalização energética no interior da

envolvente, AVAC e outros é apresentada na Figura 2.4. Ao nível da envolvente, a medida de racionalização energética mais utilizada foi a melhoria dos envidraçados (94,1%), seguida do isolamento da cobertura (5,9%). No interior do sistema de AVAC, a intervenção nos equipamentos primários (44,4%) e a operação/gestão do sistema (44,4%) foram as medidas de racionalização energética mais utilizadas na modelação, seguida da intervenção nos equipamentos secundários (11,1%). Na categoria 'outros', a ordenação foi a seguinte: sistema de iluminação (40,0%), diversos (40,0%) e renováveis (20,0%).

A auditoria ao Pavilhão Central (2017) é relativa ao ano civil de 2016. Na Tabela 2.4, optou-se por incluir apenas as cinco medidas de racionalização energética mais relevantes, entre um total de 77. Na auditoria, as medidas de racionalização energética foram quantificadas em termos de investimento: reduzido (nível 1), baixo (nível 2), médio (nível 3), alto (nível 4), e elevado (nível 5). As medidas de nível 1 foram recomendadas de aplicação imediata, as medidas de nível 2 deveriam ser contempladas a curto prazo e as medidas de nível 5 deveriam entrar em futuros planos de investimento do edifício ou inseridas em programas de investimento especiais.

A auditoria ao Pavilhão de Civil (2015) teve como ano de referência o ano civil de 2012. O relatório apresenta um subconjunto de cinco medidas de racionalização energética (Tabela 2.4), entre um total de 61, para um estudo de viabilidade financeira. À semelhança da auditoria efetuada ao Pavilhão Central, são apresentadas medidas de níveis 1, 2 e 3, com implementação no imediato, a curto prazo e em planos futuros, respetivamente. A auditoria à Torre Norte (2015) teve como ano de referência o ano civil de 2013. Foi pré-selecionado um subconjunto de cinco medidas (Tabela 247), entre um total de 55. Em analogia às auditorias anteriormente descritas, as medidas de racionalização energética foram definidas em função da tipologia de utilização, grau de aplicabilidade e nível de investimento associado à sua implementação. O relatório recomenda a aplicação, no imediato, das medidas de nível 1 e a implementação a curto prazo das medidas de nível 2. As medidas de nível 3 devem ser analisadas na sua viabilidade técnico-económica.

Almeida (2017) propôs um aumento da eficiência energética através da automatização do sistema de estores, já instalado nos Pisos 2 e 3 do Pavilhão de Civil. O algoritmo desenvolvido baseou-se nas estações climáticas, na variação da ocupação e no nível de luminosidade exterior. Assim, foi alcançada uma redução do consumo anual de AVAC de 5,4% e um PRI de 33 anos. O impacto de diversas soluções de envidraçados no desempenho térmico de edifícios, com base num gabinete, na fachada Este do Pavilhão de Civil do Piso 2, foi estudado por Faustino (2012). O autor concluiu que um correto dimensionamento do vão envidraçado é fundamental para o desempenho térmico do edifício e que é necessário otimizar os consumos energéticos dos edifícios, recorrendo a estratégias passivas de eficiência energética. Marçal (2015) modelou o sistema de climatização do Pavilhão de Civil. Os resultados revelaram uma incapacidade do sistema de climatização em garantir as condições de conforto. Mobasher (2014) sugeriu uma cobertura verde extensiva para o Pavilhão de Civil, numa tentativa de reduzir os consumos de AVAC, aumentar as condições de conforto dos utilizadores e diminuir o efeito ilha de calor causado pelo edifício.

Tabela 2.4 Medidas de racionalização energética e impacto nos consumos no IST (continuação).

Autor	Modelação	Conj avaliado	Medidas						Tipos						Resultados						Observações				
			Espaço	Envolvente			AVAC			Outros			Redução de energia [%]												
				Parede	Cobertura	Pavimento	Envidraçado	E. primário	E. secundário	Operação	Renováveis	Iluminação	Diversos	Aquecimento	Arrefecimento	Aquec.+Arref.	AVAC	Fuelóleo	Gás	Eletricidade	Total	PRI [anos]			
Marçal (2015)	EnergyPLUS	1	1	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-8	-	-	-	-	-	-	– A medida 2 tem impacto reduzido nas temperaturas. – O modelo indica temperaturas >30 °C, mesmo com AVAC ligado nos gabinetes do Piso 3. Nos corredores, o modelo indicou temperaturas >50 °C sem AVAC e temperaturas >45 °C com AVAC.	
		2	2	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≈0	-	-	-	-	-	-		
		3	3	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-1	-	-	-	-	-		-
		2,3	2,3	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	≈0	-	-	-	-	-	-		-
Mobasheri (2014)	Autodesk Ecotect Analysis	1	1	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-	-	– O Pavilhão Central, a Torre Norte e a Torre Sul não possuem resistência estrutural para instalar cobertura verde extensiva, ao contrário do Pavilhão de Civil.	
Patrício (2013)	Desagregação de consumos	1	1,2	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	– As medidas 1 e 2 não implicam investimento e têm elevado potencial de poupança. – O financiamento da medida 4 está garantido pelo Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR).	
		2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	1		
		3	4	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	18		
		4	5	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	89		
		5	1-5	-	-	-	-	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	20	24		

Omisso ou inexistência da variável; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; Conj. avaliado, conjunto avaliado; E. primário, equipamento primário; E. secundário, equipamento secundário Aquec.+Arref., aquecimento mais arrefecimento; PRI, período de retorno do investimento.

Patrício (2013) desagregou os consumos energéticos no Pavilhão de Civil e propôs a eliminação de consumos desnecessários e alterações aos sistemas instalados, principalmente no sistema de AVAC e iluminação. Pereira (2015) analisou o impacto da colocação de películas de proteção solar no desempenho térmico de um gabinete, do Piso 3, do Pavilhão de Civil, na fachada Este. As películas proporcionaram uma redução elevada do fator solar da solução envidraçada. Uma campanha experimental neste gabinete revelou temperaturas acima e abaixo dos limites de conforto, na estação arrefecimento e aquecimento, respetivamente. Ainda no Pavilhão de Civil, Vilhena (2013) construiu um modelo de simulação dinâmica. O sistema de iluminação estava sobredimensionado e desatualizado, contribuindo para as elevadas necessidades de arrefecimento. O uso de películas de controlo solar foi sugerido face à elevada percentagem de envidraçados.

Silva (2008) analisou as implicações decorrentes da aplicação da regulamentação nos edifícios existentes e novos. A Torre Norte cumpriu com o DL 79/2006 de 4 de abril [Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)] quando considerados os fatores de correção climática do DL 80/2006 de 4 de abril [Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)]. Porém, o autor referiu que aqueles fatores estavam sobredimensionados e sugeriu medidas de racionalização energética, centradas nos sistemas de iluminação e de AVAC. Correia (2012) ao desagregar os consumos energéticos por equipamentos e piso, da Torre Sul, identificou consumos excessivos dos ventiladores e sugeriu a aplicação de películas de proteção solar. Uma campanha experimental num gabinete a Sul, após aplicação daquela película, revelou uma redução dos consumos de AVAC e da temperatura média (Silvério, 2011).

2.2.4 COMPARAÇÃO DE ABORDAGENS E DISCUSSÃO

A representação gráfica das medidas de racionalização energética, em função do tipo (envolvente, AVAC e outros) em edifícios universitários é apresentada na Figura 2.3. O conjunto ‘edifícios universitários’ inclui 14 artigos desenvolvidos na Europa e Ásia. Um subconjunto ‘edifícios universitários clima IST’ foi definido em função do clima, isto é, os estudos europeus, à exceção dos estudos desenvolvidos no IST, e asiáticos, com a classificação de Csa e Cfa, de acordo com a classificação climática de *Köppen-Geiger* (Kottek et al., 2006) (n = 7). Os estudos efetuados no IST são 13. Nas auditorias foram contabilizadas, apenas, as medidas pré-selecionadas (n = 5).

As medidas de racionalização energética relativas à envolvente predominam sobre as restantes (Figura. 2.4). É visível um maior número de ocorrências na envolvente, AVAC e outros, na totalidade dos edifícios universitários, comparativamente aos edifícios localizados em climas similares ao IST e ao próprio IST. Valores muito próximos são observados entre os edifícios universitários circunscritos a climas idênticos, na envolvente, AVAC e outros.

A distribuição das medidas de racionalização energética no interior da envolvente, AVAC e outros é apresentada na Figura 2.4. Um menor número de ocorrências é observado nas medidas de racionalização energética no pavimento, nos três grupos de edifícios. Realce para o número reduzido de medidas de racionalização energética ao nível das paredes, cobertura, pavimento, equipamentos secundários de AVAC, energias renováveis e outros, desenvolvido no IST, comparativamente à totalidade dos edifícios universitários (Figura 2.4). Ao nível da envolvente, mais precisamente nos envidraçados, o IST apresenta valores elevados e idênticos à totalidade dos edifícios universitários. Tal facto poderá justificar-se pela maior simplicidade de execução e custos mais baixos.

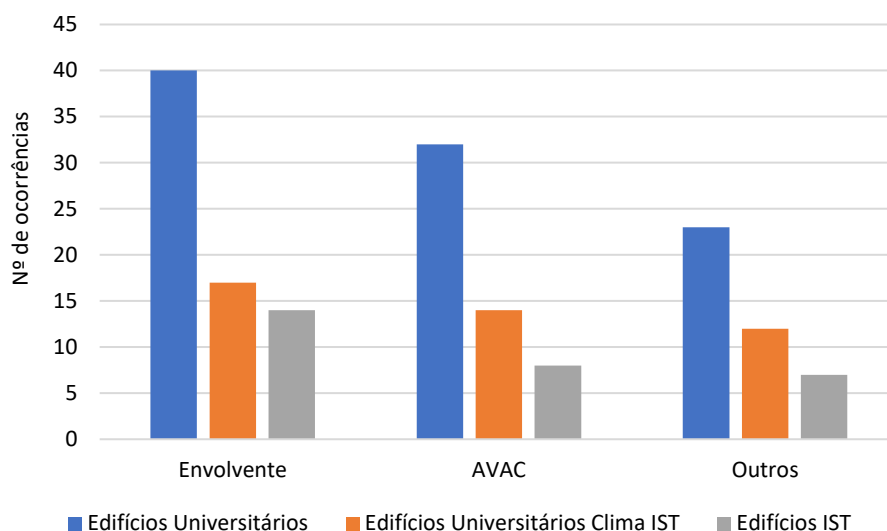


Figura 2.3 Medidas de racionalização energética, em função da envolvente, AVAC e outros.

As medidas de racionalização energética vão ao encontro da redução de energia e emissão de gases com efeito estufa. Os benefícios ambientais e económicos são significativos e melhoram as condições de conforto dos edifícios, com benefícios na saúde e produtividade dos utilizadores (Irulegi et al., 2017; Mytafides et al., 2017; Niemelä et al., 2016). De igual modo, as medidas de racionalização energética prolongam o período de vida útil do edifício (Ostojic et al., 2016). Neste contexto, a procura da solução ótima deve ter em consideração a minimização do custo global, a economia de energia, a redução de emissões poluentes e a melhoria do conforto interno (Bellia et al., 2018). Dada a especificidade de cada edifício, a definição de um conjunto de ações correspondentes à solução ótima é difícil. Nos estudos revistos, foi identificado um conjunto de medidas simples e práticas, sobretudo ao nível da gestão, que vão ao encontro das preocupações anteriores, como por exemplo, ativação/desativação dos dispositivos já disponíveis, diminuir a dispersão dos utilizadores no edifício e a presença de pessoal qualificado no edifício para consciencializar as pessoas da necessidade de mudança (Ferrari & Beccali, 2017).

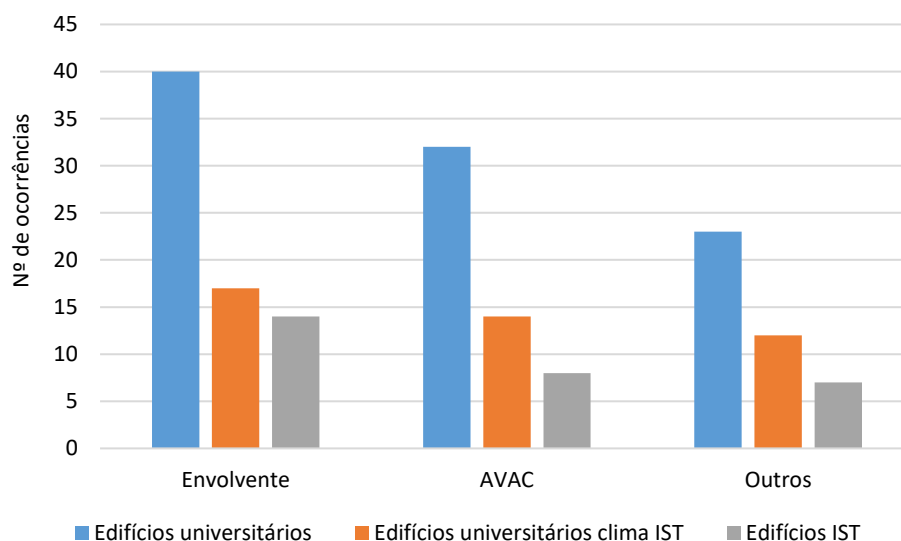


Figura 2.4 Medidas de racionalização energética no interior da envolvente, AVAC e outros.

2.3 RACIONALIZAÇÃO HÍDRICA EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS

2.3.1 VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

A literatura sobre a racionalização hídrica de edifícios universitários é escassa. Deshko & Shevchenko (2013) referiram que o tipo de atividade, o número de alunos/m² e o clima têm influência no consumo de água. A área e o tipo de utilização do edifício foram igualmente apresentados como preditores do consumo de água na *Université de Bordeaux* (Bonnet et al., 2002). Outros autores e instituições sugeriram o custo da água (Velazquez et al., 2013), a eficiência dos equipamentos hídricos (*University of California, Berkeley*, 2010) e os aspetos culturais (*University of Colorado Boulder*, 2006), como variáveis explicativas do consumo de água.

2.3.2 MEDIDAS DE RACIONALIZAÇÃO HÍDRICA EM EDIFÍCIOS UNIVERSITÁRIOS, INCLUINDO O IST

As medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários, incluindo o IST, são apresentadas na Tabela 2.5. A Tabela 2.5 está estruturada em termos de autor/relatório, País, descrição das medidas, tipos de medidas e PRI. O tipo de medidas foi ao encontro do princípio dos cinco R's: reduzir os consumos, reduzir as perdas e desperdícios, reutilizar a água, reciclar a água e recorrer a origens alternativas (Afonso, 2011). As restantes medidas foram enquadradas na tipologia 'outras'.

A maioria dos estudos foram realizados nos Estados Unidos da América (n = 4). Os restantes trabalhos repartiram-se unitariamente pelo Brasil, México, Portugal e Reino Unido. A representação gráfica das medidas de racionalização hídrica é apresentada na Figura 2.5. A maior percentagem de tipos de medidas de racionalização hídrica foi reduzir os consumos (53,8%), seguida de outras (19,2%), reduzir as perdas e desperdícios (15,4%), recorrer a origens alternativas (5,8%), reciclar a água (3,8%) e reutilizar a água (1,9%).

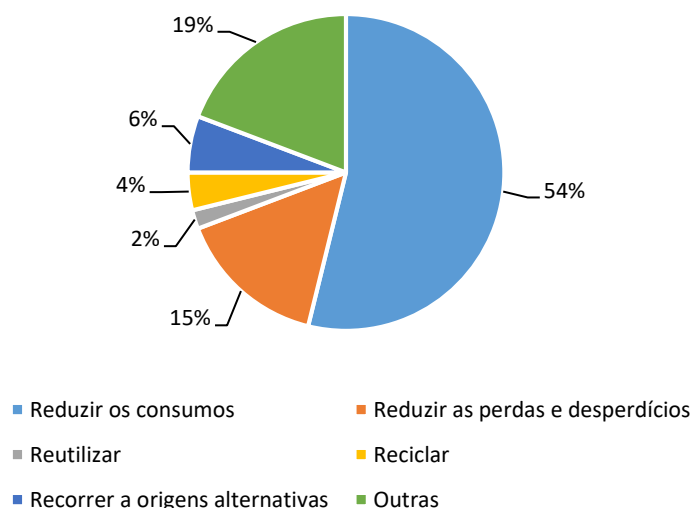


Figura 2.5 Medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários, incluindo o IST.

Tabela 2.5 Medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários, incluindo o IST.

Auto/relatório	País	Medidas	Tipos						PRI [anos]
			Reduzir os consumos	Reduzir as perdas e desperdícios	Reutilizar a água	Reciclar a água	Recorrer a origens alternativas	Outras	
Marinho et al. (2014)	Brasil	Sistema de monitorização diário.		x					
		Identificar e corrigir as fugas.		x					
		Bacias de retrete mais eficientes.	x						
		Incentivar e apoiar os alunos na investigação da eficiência hídrica.						x	
		Divulgar os resultados e obstáculos.						x	
Boston University (2019)	EUA	Capturar águas pluviais para rega.					x		
		Sistema de rega mais eficiente.	x						
		Servir as refeições das panelas eliminando as bandejas.	x						
		Bacias de retrete mais eficientes.	x						
		Urinóis mais eficientes.	x						
		Torneiras mais eficientes.	x						
Canal de comunicação para reportar fugas.		x							
Stanford University (2003)	EUA	Bacias de retrete mais eficientes.	x						
		Duches mais eficientes.	x						
		Máquinas de lavar roupa mais eficientes.	x						
		Urinóis mais eficientes.	x						
		Divulgar os resultados e obstáculos.						x	
		Reciclar a água de drenagem das torres de arrefecimento e das caldeiras de recuperação de calor para rega e descargas das bacias de retrete.					x		
		<i>Xeriscaping</i> .	x						
Sistema de rega mais eficiente.	x								
		Criar um lago artificial e utilizar para rega.					x		
University of California, Berkeley (2010)	EUA	Conscientizar os utilizadores a reduzir consumos.						x	
		Bacias de retrete mais eficientes.	x						4
		Instalar contadores em edifícios de larga escala.						x	
		Identificar e corrigir as fugas.		x					1
		Torneiras mais eficientes.	x						≈0
		Urinóis mais eficientes.	x						8
		Substituir os permutadores com fugas.		x				11	
University of Colorado Boulder (2006)	EUA	Equipamentos hídricos mais eficientes na residência de estudantes.	x						
		Adaptar o sistema AVAC e de equipamentos laboratoriais para <i>loop</i> fechado.	x						
		Programas de consciencialização dos utilizadores.						x	
		Contratar um perito para explorar medidas de racionalização hídrica.						x	
		<i>Xeriscaping</i> .	x						
		Sensores de evapotranspiração.	x						
Velazquez et al. (2013)	México	Equipa para detetar e corrigir os comportamentos de desperdício de água.	x						
		Equipa para detetar e corrigir as perdas de água com origem em falhas tecnológicas.		x					
Auditoria Pav. Central (2017)	Portugal	Instalar contador de água.						x	
		Sistema de monitorização em tempo real dos consumos de água.		x					
		Torneiras mais eficientes.	x						
		Urinóis mais eficientes.	x						
		Bacias de retrete mais eficientes.	x						
		Utilizar águas cinzentas nas descargas das bacias de retrete.			x				

PRI, período de retorno do investimento.

Tabela 2.5 Medidas de racionalização hídrica em edifícios universitários (continuação).

Auto/relatório	País	Medidas	Tipos					PRI [anos]
			Reduzir os consumos	Reduzir as perdas e desperdícios	Reutilizar a água	Reciclar a água	Recorrer a origens alternativas	
University of Oxford (2011)	Reino Unido	Instalar contadores nos sistemas de captação de chuva.					x	
		Reciclar águas cinzentas.				x		
		Bacias de retrete mais eficientes.	x					1
		Torneiras mais eficientes.	x					2
		Estudar soluções para reduzir o aparecimento de calcário nas torneiras.	x					
		Urínóis mais eficientes.	x					2
		Racionalizar a água purificada dos laboratórios.	x					
		Instalar contadores para identificar fugas, de meia em meia hora.		x				
Identificar uma medida-padrão de consumos de água/m ² para priorizar edifícios.						x		
Divulgar os resultados e obstáculos.						x		

PRI, período de retorno do investimento.

As medidas de racionalização hídrica estavam enquadradas em diferentes programas. Por exemplo, na Universidade Federal de Bahia, Marinho et al. (2014) reportaram uma poupança hídrica, per capita, de 42,6 % em 2011 face aos valores de 2000. Esta melhoria foi obtida através da implementação do projeto 'AGUAPURA' baseado na atividade voluntária de alunos, funcionários e docentes. Velasquez et al. (2013) analisaram o programa de racionalização hídrica integrado no sistema de gestão ambiental, com certificação ISO 14001, da *Universidad de Sonora*, no México. Os autores concluíram que os desperdícios de água ocorreram, em maior número, devido a comportamentos humanos incorretos, mas que as falhas tecnológicas originaram um maior volume de água desperdiçada. Foi também constatado, através da aplicação de questionários, o apoio da comunidade desta universidade no desenvolvimento de programas de conservação de água.

O programa de racionalização desenvolvido pela *Boston University* obteve uma redução de 24% dos consumos hídricos anuais por unidade de área, entre 2006 e 2018. O vice-presidente responsável pelas 'Operations & Services at Facilities Management & Planning' realçou a importância de definir um orçamento para o *staff* implementar medidas de eficiência hídrica sem necessitarem de autorização administrativa.

Em 2003, a *Stanford University* desenvolveu um plano diretor para a conservação, reutilização e reciclagem de água. A meta definida foi de reduzir em 16 % a projeção dos consumos para 2010. O aproveitamento de água de um lago artificial para rega e a instalação de máquinas de lavar roupa eficientes foram as medidas com melhor rácio benefício-custo. O *xeriscaping* e os controladores de evapotranspiração não foram viáveis. A divulgação de resultados e obstáculos foi a medida de racionalização hídrica que complementava todas as outras. De forma similar, a *University of California Berkeley*, em 2010, comissionou a uma empresa externa o desenvolvimento de um relatório acerca da utilização e potencial de conservação de consumos hídricos. Os resultados revelaram que o baixo custo da água tornou financeiramente inviável a implementação de muitas medidas de racionalização hídrica. Nesta linha de trabalhos, a *University of Colorado Boulder* (2006) reportou ser possível reduzir os consumos hídricos com custos reduzidos até um certo ponto, a partir do qual é necessário investir. A *University of Oxford* (2011) procurou reduzir em 11% os consumos em 2014/15 face aos registados em 2009/10. O relatório

realçou o facto de que a inexistência de um limite de consumo de água e a falta de incentivos fiscais tornaram a racionalização hídrica dependente do desejo dos utilizadores e dos órgãos administrativos. Não obstante, há um risco de perda de reputação da universidade devido a questões frequentemente colocadas pelos órgãos de comunicação acerca das políticas de sustentabilidade.

2.3.3 COMPARAÇÃO DE ABORDAGENS E DISCUSSÃO

A especificidade de cada edifício é limitativa das comparações. A isto acresce o número reduzido de trabalhos que exploraram o padrão do consumo hídrico em edifícios universitários (*University of California, Berkeley, 2010*).

O recurso a origens alternativas de água está sustentado na crescente implementação de sistemas de aproveitamento de águas pluviais (Marinho et al., 2014; *University of Oxford, 2011*). O uso de tecnologias inovadoras e mudanças no comportamento dos utilizadores são, também, sugeridos pela *Boston University* (2019). Entre um conjunto de estratégias para reduzir os consumos de água, destacam-se a captação de água pluvial para rega, instalação de sensores de chuva no sistema de rega, sistema de rega gota-a-gota nos jardins, sensores de proximidade nas torneiras, bacias de retrete com descarga dupla e eliminar o uso de bandejas nos refeitórios, servindo diretamente das panelas e tachos. Ainda neste contexto, Velasquez et al. (2013) reforçaram uma atitude pró-ativa face aos recursos hídricos, i.e., começar a racionalizar os recursos hídricos antes e não após um período de seca. A importância e o significado da conservação da água podem ser conseguidos através de programas públicos que incluam a divulgação em póster/cartaz, o uso de T-shirts alusivas ao consumo de água, comunicações orais e atividades demonstrativas e anúncios na rádio e televisão (*Stanford University, 2003*). A inserção de material educativo nas faturas de água e a informação do consumo diário atual comparando-o com o consumo diário do ano anterior foram igualmente sugeridas pela *Stanford University* (2003).

Em traços gerais, as medidas de racionalização hídrica mais comuns foram as de baixo custo, nomeadamente, a educação e divulgação, a deteção e reparo de derrames, a melhoria das práticas de irrigação e a instalação de equipamentos domésticos de baixo fluxo, como por exemplo, sanitas, torneiras e chuveiros (*University of California, Berkeley, 2010*). Velasquez et al. (2013) referiram que, na aplicação de medidas de racionalização hídrica, não se deve ter em conta o custo-benefício, mas sim o custo-eficiência. Os autores observaram que o montante a pagar pelos desperdícios de água acumulados entre janeiro de 2008 e maio de 2009 foi muito baixo, comparado com os custos relativos à aquisição de novos equipamentos hidráulicos ou ao investimento necessário para alterar o comportamento dos utilizadores da *Universidad de Sonora*.

3 CASO DE ESTUDO

3.1 CAMPI DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

O *Campi* do IST está localizado no distrito de Lisboa e é composto pelos *Campus* Alameda, *Campus* Taguspark e *Campus* Tecnológico e Nuclear. O *Campus* Alameda e o Tecnológico e Nuclear situam-se, respetivamente, nos concelhos de Lisboa e Loures, ambos com classificação climática Csa de *Köppen Geiger* (Kottek et al., 2006), isto é, um clima temperado com verão seco e quente. O *Campus* Taguspark, no concelho de Oeiras, é classificado de 'Csb' (clima temperado com verão seco e temperado), de acordo com a mesma classificação climática (Kottek et al., 2006).

O presente estudo foi realizado no *Campus* Alameda. O *Campus* é constituído por 26 edifícios, numa área total de 107 137 m² (Figura 3.1). A sua construção teve início em 1927, enquanto os edifícios mais novos entraram em funcionamento, no presente século. Assim, uma grande diversidade de soluções construtivas, técnicas e arquitetónicas é encontrada no conjunto dos seus edifícios. Em 2017, o IST tinha sob contrato 1 421 docentes e técnicos e, no ano letivo de 2016/2017, 11 566 alunos, 9 894 dos quais a frequentar o *Campus* da Alameda.

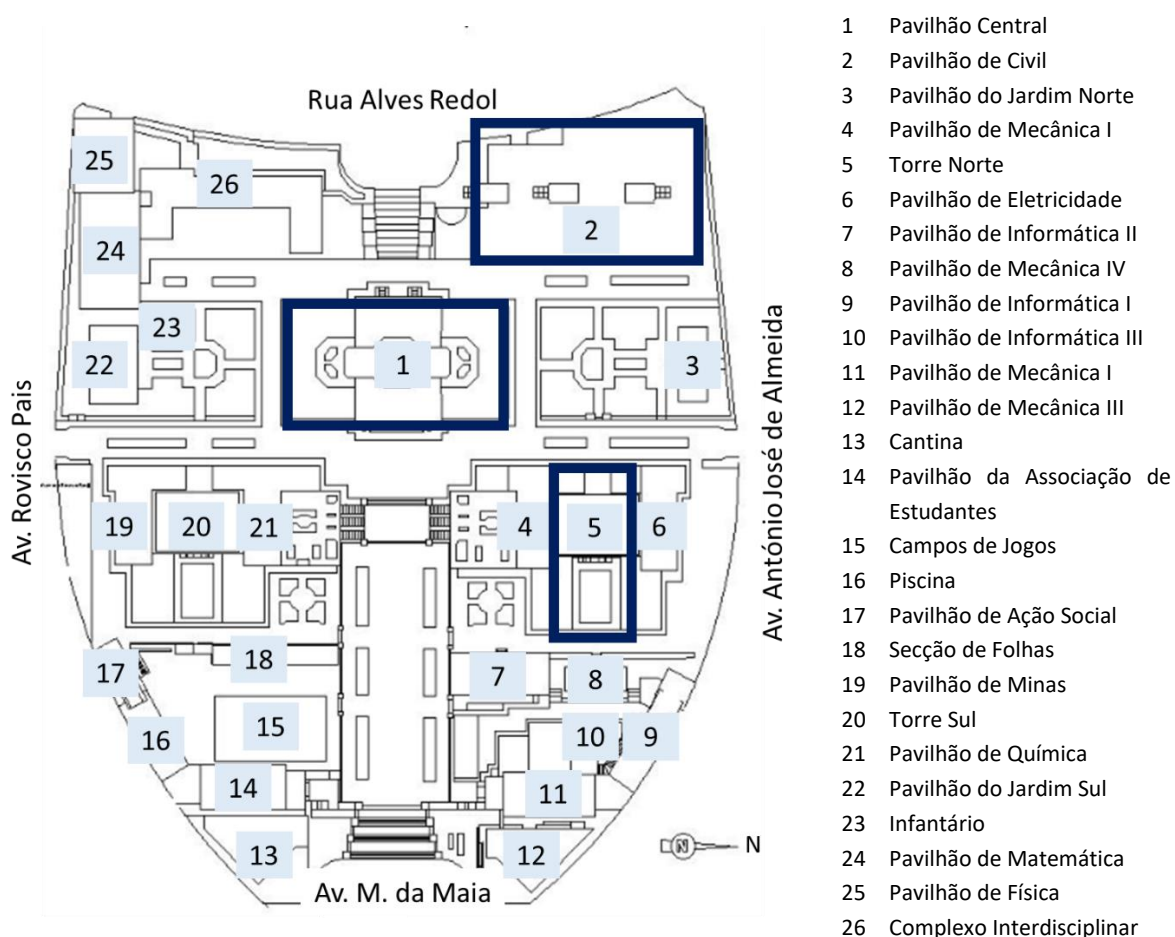


Figura 3.1 Edifícios do *Campus* Alameda, IST.

O abastecimento de energia elétrica aos edifícios do *Campus* Alameda é feito por um circuito anelar, em média tensão, ligado à rede pública por apenas um ponto de fornecimento. A eletricidade é faturada ao *Campus* e não

por edifício, sendo que a potência contratada, em 2018, foi de 3,3 MW. O circuito anelar fornece vários postos de transformação que convertem a eletricidade, em baixa tensão, para alimentar os edifícios.

O fornecimento de água é feito por três ramais: um para o Pavilhão de Civil, outro para o Complexo Interdisciplinar, Pavilhão de Matemática e Pavilhão de Física e outro para os restantes edifícios.

Existem quatro redes de gás no *Campus*, sendo que apenas duas são relevantes para o presente estudo. Destas, uma tem origem na Rua Alves Redol e abastece, em exclusivo, o Pavilhão de Civil; a outra tem origem na Avenida Rovisco Pais e fornece a Torre Sul, a Torre Norte, o Pavilhão de Matemática e o Pavilhão Central.

O Pavilhão Central, o Pavilhão de Civil e a Torre Norte, foram os edifícios selecionados para o estudo (Figura 3.1). Os três edifícios têm a particularidade de terem sido construídos em anos distintos, são exemplo da atividade humana no IST e constituem 43% da área total de infraestruturas. Neste sentido, reúnem as características necessárias para representar o *Campus* da Alameda, ao nível dos consumos energético e hídrico.

3.2 DESCRIÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A descrição detalhada dos tipos de utilização, as soluções construtivas e os equipamentos, para cada um dos edifícios, são efetuadas nos itens seguintes.

A ocupação média dos edifícios foi retirada das auditorias energéticas (Relatório Auditoria, 2015a; 2015b; 2017). O seu cálculo teve por base a ocupação máxima dos espaços e a taxa de ocupação média estimada para cada um deles. O sistema de AVAC comum inclui o conjunto de equipamentos cuja alimentação é feita a partir de um quadro elétrico parcial, ou de uma conduta de gás, passível de controlo central através de relógios. Os aquecedores a óleo, as ventoinhas e os dispositivos de ar condicionado portáteis não foram considerados no sistema de AVAC comum. As unidades *multisplit* ou *split* associadas a circuitos elétricos gerais do edifício também foram excluídas do sistema de AVAC comum. Estas unidades não permitem a imposição de um regime horário por parte da gestão do edifício, pelo que são consideradas de uso individual (Relatório Auditoria, 2015).

3.2.1 PAVILHÃO CENTRAL

O Pavilhão Central está localizado ao centro do *Campus* Alameda do IST (Figura 3.1). A configuração é retangular, com o eixo principal orientado Norte-Sul e é composto por quatro pisos, sendo o Piso 01 parcialmente enterrado (Figuras 3.2a e 3.2b). Os Pisos 0 e 1 têm elevado pé-direito, à exceção dos setores indicados nas Figuras 3.2c e 3.2d, onde se dividem por dois pisos. O Piso 2 não é extensível à totalidade do edifício, estando a sua área representada na Figura 3.2b, conjuntamente com os terraços interiores. As janelas de onde provém a luz natural, para os corredores do Piso 01 e para o *hall* principal do edifício, são sinalizadas na Figura 3.2e.

O Pavilhão Central entrou em funcionamento em 1932 e é utilizado, maioritariamente, para os serviços centrais do *Campus*. A área de pavimento interior é de 9 357 m², com uma ocupação média diária de 1 547 pessoas. O horário de funcionamento é das 7h00 às 22h30, de segunda a sexta-feira e das 7h00 às 15h30, aos sábados.

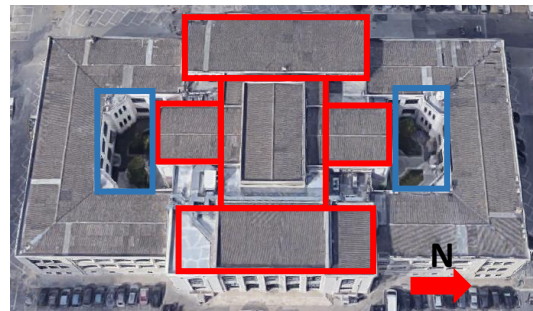
Os espaços do Pavilhão Central estão concessionados ao bar, FNAC, Banco Português do Investimento (BPI), Caixa Geral de Depósitos (CGD) e Santander. A distribuição dos espaços, por piso, é a seguinte:

- Piso 01: agências bancárias do BPI e CGD, laboratório de Termodinâmica, laboratório de Física e laboratório de Oscilações e Ondas, centro de informática do IST (CIIST), *Data Center* do *campus*, papelaria, refeitório para pessoal, bar, gabinetes, arrecadações, sala do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT), outras instalações técnicas e uma sala de aula.
- Piso 0: agência bancária do Santander, bar, FNAC, loja do Gabinete de Comunicação e Relações Públicas (GCRP), gabinetes, salas de aula/anfiteatros e um *hall* central com quintuplo pé direito.
- Piso 0 intermédio: gabinetes, bar e salas de reuniões.
- Piso 1: Laboratórios da Secção Autónoma de Engenharia Naval (SAEN) e de Física, sala multimédia da Direção de Serviços Informáticos (DSI), biblioteca, arrecadações, gabinetes, salas de aula/anfiteatros e o Salão Nobre com triplo pé-direito.
- Piso 1 intermédio: gabinetes e laboratório de Física.
- Piso 2: biblioteca central, arrecadações e gabinetes.

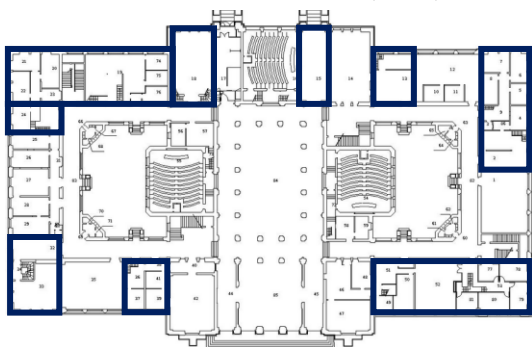
a Fachada principal (Este).



b Terraços interiores (azul) e zonas do Piso 2 (vermelho).



c Pisos intermédios (Piso 0).



d Pisos intermédios (Piso 1).

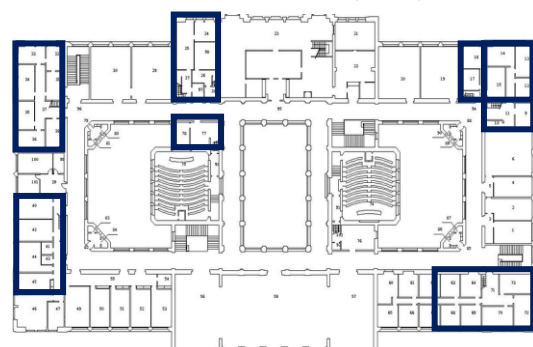
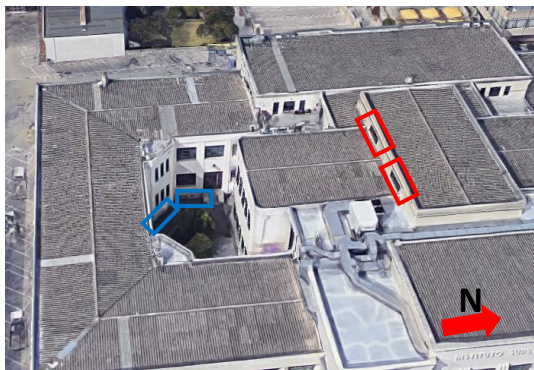


Figura 3.2 Pavilhão Central.

A estrutura do Pavilhão Central é composta por paredes exteriores de alvenaria de pedra calcária (Figura 3.2f), onde assentam lajes de betão armado. Em geral, as paredes interiores são de alvenaria de pedra calcária,

existindo algumas paredes de alvenaria de tijolo furado e de tijolo maciço. A envolvente opaca e translúcida é descrita nas Tabelas 3.1 e 3.2. Os dados foram retirados do relatório da Auditoria ao Pavilhão Central (2017).

e Iluminação natural dos corredores do Piso 01 (azul) e do *hall* central (vermelho).



f Alvenaria de pedra calcária.



Figura 3.2 Pavilhão Central (continuação).

A rede elétrica tem início no Piso 01, numa sala a Nordeste, onde se situa o QGBT. Daqui, divide-se no Circuito Normal e no Circuito de Emergência, ligado a um gerador a gásóleo. O circuito de emergência, alimenta a DSI, o *Data Center*, o BPI e a CGD. O posto de transformação localiza-se no jardim do Pavilhão de Mecânica I.

Tabela 3.1 Soluções da envolvente opaca do Pavilhão Central.

Solução	Local	Envolvente exterior	Descrição	U [†] [W/m ² .°C]
1	Piso 01	Vertical	Alvenaria de pedra calcária e argamassa de cal.	1,10-2,23
	Piso 0			-
	Piso 1			-
	Piso 2			-
2	Piso 2	Horizontal	Estuque, betão armado, betonilha, camada de betuminoso, desvão fortemente ventilado e telhas de fibrocimento.	1,67
3	Piso 2	Horizontal	Estuque, betão armado, betonilha, camada de betuminoso e mosaico hidráulico.	2,42

U[†], Coeficiente de transmissão térmica (*Campus Sustentável*, 2018).

A rede de água inicia-se na porta de entrada situada a nordeste, no Piso 01, adjacente à sala do QGBT, onde se localiza o contador geral. A rede dispõe de pressão suficiente para a distribuição de água aos diferentes pontos, não sendo necessário recurso a bombas hidráulicas, para abastecer o bar, a sala de refeições dos funcionários, os laboratórios de ensino e as instalações sanitárias.

Tabela 3.2 Soluções da envolvente translúcida do Pavilhão Central.

Solução	Local	Envolvente	Descrição			U [†] vidro	U vão	g [‡]
			M. translúcido ^{††}	Caixilharia	Proteção	[W/m ² .°C]	[W/m ² .°C]	
1	Piso 01	Vertical exterior	Vidro simples	Madeira	-	-	2,25-4,11	0,39-0,71
2	Piso 01 Piso 0 Piso 1	Vertical exterior	Vidro simples	Metálica	-	-	3,32-5,30	0,48-0,76
3	Piso 01 Piso 0 Piso 1 Piso 2	Vertical exterior	Vidro duplo (6+6+6) mm	Metálica	-	-	1,89-3,18	0,22-0,40

U[†], coeficiente de transmissão térmica; g[‡], fator solar; ^{††}M. translúcido, material translúcido (*Campus Sustentável*, 2018).

O Pavilhão Central dispõe de dois *chillers* ar/água, ambos com capacidade térmica de arrefecimento de 110,1 kW e potência elétrica nominal de 38,5 kW, que têm a finalidade de dissipar o calor dos servidores do *Data Center* do *Campus*. Os *chillers* funcionam de forma alternada entre si, estando o sistema preparado para a avaria de um deles. A água do sistema de dissipação de calor dos servidores é arrefecida através de permutadores de placa, onde se dão as trocas térmicas com a água proveniente dos *chillers*. Os ventiladores forçam a passagem de ar por esses permutadores. Para suporte deste circuito, estão instaladas duas bombas hidráulicas.

A climatização do Salão Nobre é feita por uma unidade *rooftop* de bomba de calor reversível. Esta unidade mistura o ar recirculado com ar novo, e possui uma capacidade térmica de aquecimento de 99,6 kW e de 111,1 kW de arrefecimento. As potências elétricas nominais são de 37,6 kW e 31,8 kW, respetivamente.

Os restantes espaços são climatizados por 15 unidades Volume de Refrigerante Variável (VRV's) exteriores e 161 interiores e por 52 sistemas *monosplit*. A ventilação é, essencialmente, natural, existindo 8 ventiladores de extração de baixa potência.

Os *chillers* referentes ao *Data Center* funcionam 24 horas, todos os dias. As unidades exteriores dos sistemas VRV têm um horário definido pelo gestor do edifício. A unidade *rooftop* entra em funcionamento quando existem eventos no Salão Nobre.

As soluções de iluminação adotadas no Pavilhão Central são apresentadas na Tabela 3.3. De momento, não existem horários definidos pela gestão do edifício para as áreas comuns, ficando à responsabilidade do segurança.

Tabela 3.3 Sistema de iluminação do Pavilhão Central (Relatório Auditoria, 2017).

Tipo	Localização	Luminárias/lâmpadas [n]	Potência nominal lâmpadas [W]
Bloco de emergência não autónomo (LED)	Dispersa	19/19	2
Bloco de emergência não autónomo (LED TL-Mini)	Dispersa	69/128	8
Descarga de vapor de mercúrio	Anfiteatros	58/58	250
Descarga de vapor de sódio	Exterior	6/6	150/250
Fluorescente compacta integrada	Corredor Norte (pisos elevados)	112/143	33
	Corredor Sul (pisos elevados)		33
	Exterior		33
Fluorescente compacta não integrada	Dispersa	200/371	
Fluorescente tubular T8	Hall de entrada Biblioteca Salas de aula Gabinetes	1 220/2 311	18/36/58
Fluorescente tubular T5	Dispersa	280/532	14/18/18
Halogéneo integrada	Pontual	6/6	75
Halogéneo integrada linear	Corredores Piso 0	33/33	150
Incandescente	Pontual	16/16	40/75/100
LED integrada	Instalações sanitárias	24/24	5
LED spot	Pontual	19/19	16
LED tubular	Corredores Piso 01	40/160	10

3.2.2 PAVILHÃO DE CIVIL

O Pavilhão de Civil está localizado a Noroeste do *Campus Alameda* (Figura 3.1). O edifício possui uma configuração retangular, com o seu maior eixo orientado Norte-Sul. O edifício e os blocos são apresentados nas Figuras 3.3a e 3.3b. O Pavilhão de Civil ficou operacional em 1992, destinando-se, principalmente, à lecionação e à investigação. A área de pavimento interior é de 25 152 m², com uma ocupação diária média de 2 953 pessoas. O horário de funcionamento, nos dias úteis, é das 7h00 às 21h00, enquanto ao sábado, o horário de funcionamento é das 7h00 às 17h00. As salas de estudo do Piso 0 estão abertas 24h00, os 7 dias da semana.

O Pavilhão de Civil é composto por 7 pisos, com o Piso 03 totalmente enterrado e os Pisos 02 e 01, parcialmente enterrados, devido à inclinação descendente SE-NW do terreno. A partir do Piso 0, o edifício divide-se no bloco nascente e no bloco poente (Figura 3.3 b), ambos com soluções construtivas idênticas e coberturas, em terraço, não acessível com claraboias. O pátio interior, entre os blocos, é coberto por uma claraboia assente numa estrutura metálica, ao nível da laje de cobertura do Piso 2, formando um espaço com triplo pé-direito (Figura 3.3b). Todos os gabinetes contíguos a este pátio possuem envidraçados, aproveitando a iluminação natural. A

circulação entre os blocos é feita através dos 3 núcleos de escadas indicados na Figura 3.3b, onde se apoiam os passadiços de circulação. O pátio interior é fechado a norte e a sul com envidraçados adjacentes aos respetivos núcleos de escadas (Figura 3.3a). No Piso 3, existem corredores interiores com luz natural, devido às claraboias, e a luz natural é aproveitada pelos gabinetes confinantes a este espaço, por envidraçados interiores (Anexo B, Figura 3.1A).

a Envidraçados adjacentes à Torre Sul (vermelho).



b Bloco Nascente (1), Bloco Poente (2), Torre Sul (3), Torre Centro (4), Torre Norte (5) e Pátios Interiores (A).



Figura 3.3 Pavilhão de Civil.

Este edifício tem concessionados o bar, a cantina e uma antena de telecomunicações. A distribuição dos espaços é a seguinte:

- Piso 03: garagem, arrecadações e armazéns, central térmica (duplo pé-direito), sala do QGBT, depósito rede de incêndios, depósito rede laboratório hidráulica e outras áreas técnicas.
- Piso 02: Laboratório de Estruturas e de Resistência de Materiais (LERM) (duplo pé-direito), Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambientais (LHRHA), Laboratório de Construção (LC) (em que parte se localiza na mesma zona do LERM, com duplo pé-direito), Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT), Laboratório de Geotecnia (LG), Grande Auditório do Centro de Congressos (duplo pé-direito), salas do Centro de Congressos, Editora Universitária do IST (IST Press), depósito de livros da biblioteca e arrecadações.
- Piso 01: salas de apoio ao LERM, LVCT e LC, laboratório de ambiente pertencente ao LHRHA, laboratório de arquitetura (ISTAR), laboratório de topografia, sala de videoconferência e *hall* do Centro de Congressos, biblioteca e salas de aula/anfiteatros.
- Piso 0: *hall* de entrada, pátio interior (triplo pé-direito), bar, cantina, salas de aula; salas de estudo, espaço 24 e o museu de engenharia civil e arquitetura.
- Piso 1: salas de aula, gabinetes e o Laboratório de Tecnologias e Informação (LTI);
- Piso 2 e 3: gabinetes e salas de reunião.

O edifício possui uma estrutura de betão armado com lajes fungiformes e pilares. As paredes interiores são de alvenaria de tijolo furado de 15 cm. Nas Tabelas 3.4 e 3.5 são apresentadas a descrição da envolvente opaca e translúcida, respetivamente. As plantas com as suas localizações são apresentadas no Anexo B, Figura 3.1A.

Tabela 3.4 Soluções da envolvente opaca do Pavilhão de Civil.

Solução	Local	Envolvente exterior	Descrição	U [†] [W/m ² .°C]
A	Piso 03 Piso 02 Piso 01 (enterrado)	Vertical	Betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m.	1,01
B	Piso 02 Piso 0	Vertical	Painel de betão com 0,08 m + caixa-de-ar + betão armado com 0,03m.	1,54
C	Piso 01 Piso 0	Vertical	Alvenaria de tijolo furado de 0,15 m.	1,61
D	Piso 01	Vertical	Betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m + painel contraplacado.	1,11
E	Piso 01	Vertical	Betão armado com 0,3 m + revestimento de madeira.	1,11
F	Piso 0 (abaixo das caixilharias)	Vertical	Alvenaria de tijolo furado de 0,20 m.	1,33
G	Piso 1 Piso 2	Vertical	Betão armado pré-fabricado com 0,08m + lâ de rocha + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,07 m.	1,47
H	Piso 2	Vertical	Betão armado com 0,1 m.	4,37
I	Piso 3	Vertical	Betão armado com 0,1 m + lâ de rocha + revestimento de gesso.	1,98
J	Piso 01 Piso 3	Horizontal	Betão armado com 0,1m + betão de argila expandida com 0,1 m + camada de impermeabilização de feltro com 0,01 m.	1,14

U[†], coeficiente de transmissão térmica (Vilhena, 2013).

A rede elétrica tem início no Piso 03, onde se localiza o posto de transformação e o QGBT, e divide-se em três circuitos: TR1, TR2 e TR3. O circuito TR1 alimenta todos os quadros de distribuição das Torres Norte e Sul que, por sua vez, abastecem o bloco nascente e o circuito de emergência.

O circuito de emergência encontra-se ligado a um gerador a gasóleo e engloba os quadros de emergência da central térmica e os quadros de emergência por piso dos blocos nascente e poente. A este circuito pertencem as UTAN's, o UTA do Centro de Congressos, os elevadores, as câmaras frigoríficas, o forno elétrico do LERM e os quadros de emergência de cada piso. O circuito TR2 alimenta os quadros de distribuição da Torre Central que abastece o bloco poente. O circuito TR3 fornece os quadros da central térmica, dos equipamentos terminais de climatização e do túnel de vento.

A rede de água tem origem no Piso 03, no lado poente, dividindo-se na rede de uso doméstico e na rede de incêndios. A rede de uso doméstico abastece o bar, o restaurante, os laboratórios e as instalações sanitárias. A rede não é suportada por bombas hidráulicas, à exceção do circuito do LHRHA.

Tabela 3.5 Soluções da envolvente translúcida do Pavilhão de Civil.

Solução	Local	Envolvente	Descrição			U [†] vidro	U vão	g [‡]
				Material translúcido	Caixilharia	Proteção	[W/m ² .°C]	[W/m ² .°C]
1	Piso 02	Vertical exterior	Vidro 6 mm	Metálica	Estore	5,68	6,01	0,57
	Piso 01			sem corte	metálico			
	Piso 0			térmico	interior			
2	Piso 02	Vertical exterior	Vidro 6 mm	Metálica	Estore	5,68	6,01	0,35
	Piso 01			sem corte	metálico			
	Piso 1			térmico	exterior			
	Piso 2							
	Piso 3							
3	Piso 01	Vertical exterior	Vidro 6 mm	Alumínio	-	5,68	6,01	0,85
	Piso 1			termolacado				
4	Piso 0	Vertical exterior	Vidro Simples 8 mm	Metálica	-	5,62	5,87	0,82
				sem corte				
				térmico				
5	Piso 0	Vertical exterior	Vidro Simples 8 mm	Metálica	Estore de	5,62	5,77	0,56
				sem corte	lâminas			
				térmico	interior			
6	Piso 3	Horizontal	Placas de policarbonato	-	-	-	3,02	0,8
		exterior		alveolar de 6 a 16 mm				
7	Piso 02	Vertical interior	Vidro simples 6 mm	Alumínio	Estore	3,76	-	-
	Piso 01			termolacado	metálico			
	Piso 0			com betão	interior			
	Piso 1			vibrado sem				
	Piso 2			cuta térmico				
	Piso 3							
8	Piso 01	Vertical interior	Vidro simples 8 mm	Alumínio	Estore	3,73	-	-
				metálico sem	metálico			
				cuta térmico	interior			

U[†], coeficiente de transmissão térmica; g[‡], fator solar nas condições de verão, assumindo uma ponderação de 30% do fator solar do vidro e 70% do fator solar do vidro e dispositivo de sombreamento ativado (Vilhena, 2013).

O sistema de AVAC comum dispõe de 2 *chillers* reversíveis a ar, localizados no topo da Torre Norte e da Torre Central, e alternam periodicamente, entre si, a produção de água quente e fria. Os *chillers* têm uma capacidade térmica unitária de arrefecimento de 393 kW, com potência elétrica nominal de 145 kW e uma capacidade térmica de aquecimento de 377 kW, com potência elétrica nominal de 126 kW. O sistema possui duas torres de arrefecimento no topo da Torre Sul.

No Piso 03 está a central térmica. Nela, encontram-se os 4 tanques de água quente de 7,5 m³, o tanque de água fria, com 3 m³, e os 2 tanques de inércia. Um destes tanques, com 100 m³, abastece o bloco nascente e o outro, com 15 m³, fornece o bloco poente. Os tanques de água quente abastecem as UTAN's, UTA's e termoventiladores, e aquecem o tanque de inércia, através de permutadores de placa, quando necessário. O tanque de água fria abastece as UTAN's e a UTA do grande auditório do Centro de Congressos. Os tanques de inércia suportam o circuito de condensação, para onde as unidades terminais do tipo bomba de calor reversível e os ciclos frigoríficos das UTA's rejeitam ou absorvem calor, com exceção da unidade do auditório do Centro de Congressos que possui bateria de arrefecimento. Para a operação das bombas de calor, o circuito de condensação deve-se encontrar com uma temperatura entre os 21 °C e os 27 °C. O circuito é refrigerado pelas torres de arrefecimento através de permutadores de placa nos tanques de inércia, quando necessário.

As 13 UTA's do sistema ficam na central térmica no Piso 03 e as 6 UTAN's dividem-se, em duas, por cada um dos 3 pisos: 0, 1 e 2. Em cada piso, uma UTAN pertence ao bloco nascente e a outra ao bloco poente.

No Piso 03, a garagem possui um sistema de ventilação adequado a elevadas concentrações de monóxido de carbono e é constituído por um ventilador de insuflação e 2 ventiladores de extração. A sala do grupo gerador e o posto de transformação possuem ventiladores de insuflação e extração natural, enquanto a central térmica dispõe de ventilador de insuflação e extração.

Os gabinetes de apoio aos laboratórios, no Piso 02, são condicionados por uma unidade terminal do tipo bomba de calor reversível, em conjunto com ventiladores de insuflação e de extração. As salas do piso do Centro de Congressos dispõem, apenas, de unidades terminais do tipo bomba de calor reversível. O grande auditório do Centro de Congressos é condicionado por uma UTA, com bateria de aquecimento e bateria de arrefecimento, única deste edifício e que arrefece o ar através de água fria, proveniente dos *chillers*. O depósito da biblioteca tem uma UTA que possui, somente, uma bateria de aquecimento e humidificador.

No Piso 01, a biblioteca e os anfiteatros VA 1 a VA 6 são condicionados por uma UTA, para cada um dos espaços, com bateria de aquecimento e ciclo frigorífico para arrefecimento. A extração é feita por ventiladores para a garagem. As salas do Centro de Congressos, deste piso, dispõem de UTA's com bateria de aquecimento e ciclo frigorífico, apenas com recirculação de ar. A exceção é a sala de conferências que possui unidades terminais do tipo bomba de calor reversível. Os laboratórios e as respetivas salas de apoio têm termoventiladores com baterias de aquecimento.

Relativamente aos Pisos 0, 1, 2 e 3, os gabinetes da envolvente do Piso 2, assim como alguns interiores e algumas salas dos Pisos 0 e 1, são condicionados por UTAN's com baterias de aquecimento e arrefecimento, conjuntamente com unidades terminais do tipo bomba de calor reversível em cada um deles. As salas de aula e as salas de estudo dos Pisos 0 e 1 são servidas pelas UTAN's e possuem termoventiladores com baterias de aquecimento controláveis pelos utilizadores. Os gabinetes do Piso 3 dispõem, apenas, de unidades terminais do tipo bomba de calor reversível, assim como o bar e a cantina do Piso 0; contudo, o bar possui ventilador de extração e, a cantina, um ventilador de insuflação e outro de extração. Os gabinetes são servidos, exclusivamente, por ventilação natural. As salas interiores do bloco nascente do Piso 0 têm termoventiladores

com baterias de água quente. Existem dois sistemas VRV no conjunto destes pisos, um para a sala de estudo '24 horas' e outra para o LTI; todavia, o LTI é, também, condicionado por uma UTAN com bateria de aquecimento e arrefecimento. Por fim, há vários sistemas *split*, nestes andares, ligados ao sistema de AVAC comum, que foram sendo adicionados de forma a melhorar as condições de conforto dos utilizadores.

Os *chillers* funcionam de forma alternada na produção de água quente e fria; contudo, se existir só necessidade de aquecimento ou arrefecimento, apenas um deles funciona. O horário de funcionamento está definido entre as 7h30 e as 20h30, de segunda a sexta-feira. Os *chillers* operam, apenas, se a temperatura dos tanques de água quente, ou de água fria, atingir determinado *setpoint*. As UTAN's e as UTA's operam no mesmo horário dos *chillers*. As UTA's atuam em função da temperatura dos espaços a climatizar, por recurso a termóstatos. As UTA's que condicionam os anfiteatros e algumas salas de aula funcionam, somente, em períodos de aulas e de exames. As unidades terminais do tipo bomba de calor reversível e os termoventiladores operam entre as 8h00 e as 20h00, durante a semana útil. O horário de funcionamento dos ventiladores é das 7h30 às 20h30, com exceção dos ventiladores de extração das instalações sanitárias e cozinha do bar e do ventilador de insuflação da cozinha da cantina, que funcionam permanentemente.

As soluções de iluminação adotadas no Pavilhão de Civil são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Sistema de iluminação do Pavilhão de Civil (Campus Sustentável-IST, 2017).

Tipo	Localização	Luminárias/lâmpadas	Potência nominal
		[n]	lâmpadas [W]
Descarga de vapor de mercúrio	Exterior	16/16	80
Descarga de vapor de sódio	LERM [†]	28/28	250
Emergência (fluorescente)	Dispersa	95/190	8
Fluorescente compacta integrada	Salas de aula (Piso 01) Corredores (Pisos 02, 01, 0 e 3)	387/396	9-26
Fluorescente compacta não integrada	Corredores (Pisos 2 e 3)	127/133	10/16/17
Fluorescente tubular T5	Dispersa	155/417	35-120
Fluorescente tubular T8	Zonas de circulação Salas de aula Anfiteatros Laboratórios de ensino Gabinetes Espaço 24 Salas de reunião Instalações sanitárias	3 864/3 870	18-100

LERM[†], Laboratório de Estruturas e Resistência de Materiais.

Nos corredores dos pisos superiores, a iluminação natural é boa e a iluminação artificial é controlada nos disjuntores e sob a responsabilidade dos seguranças. Existe um horário definido pela gestão do edifício, para as áreas comuns dos pisos enterrados e do Piso 0, nomeadamente, das 6h15 às 19h30, aos dias úteis da semana, e das 6h15 às 12h15, aos sábados.

3.2.3 TORRE NORTE

A Torre Norte está localizada a norte do *campus*, entre o Pavilhão de Mecânica I e o Pavilhão de Eletricidade e possui uma configuração quadrangular (Figura 3.1). A Torre Norte entrou em atividade em 1994 e é destinada, essencialmente, à investigação científica. O edifício está aberto de segunda a sexta-feira, das 7h00 às 20h00. A área de pavimento interior é de 11 312 m², com uma ocupação média diária de 1 199 pessoas (Figura 3.4a).

O edifício é composto por 14 pisos, divisível em dois corpos (Figura 3.4b), devido às diferentes soluções construtivas e arquitetónicas que se verificam. O corpo A é composto pelos Pisos 01 e 02, enterrados, e pelos Pisos 0, 1 e 2. O corpo B vai do Piso 4 ao 11. Os Pisos 2 e 3 são compostos, em exclusivo, pelo núcleo central de betão armado. Os corpos A e B têm cobertura em terraço, não acessível.

a Fachada principal.



b Corpos A e B.

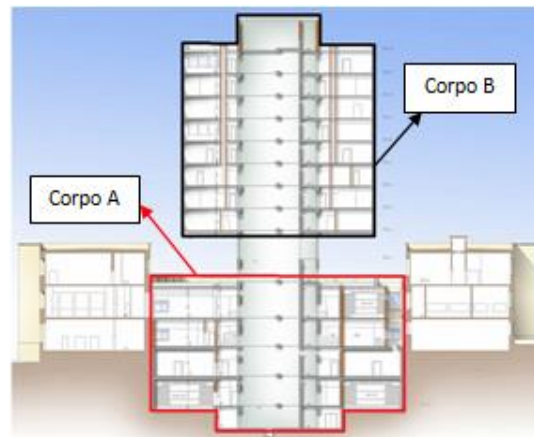


Figura 3.4 Torre Norte.

O edifício tem concessionado um bar. A distribuição dos espaços, por piso é a seguinte:

- Piso 02: depósitos de água, bombas hidráulicas e outras instalações técnicas.
- Piso 01: bar, salas de aula, laboratórios do Instituto de Telecomunicações (IT), laboratório do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (DEEC), central de frio, sala QGBT e outras instalações técnicas.
- Piso 0: *hall* com duplo pé-direito, anfiteatros, salas de estudo, sala de exposição, gabinetes e arrecadações.
- Piso 1: biblioteca e anfiteatros.
- Piso 1 Intermédio: Instalações técnicas.
- Piso 2: instalações técnicas e arrecadações.
- Piso 3: central térmica, arrecadações e outras instalações técnicas.
- Piso 4 e 5: laboratórios, gabinetes e salas de reunião do DEEC.
- Piso 6 e 7: laboratórios, gabinetes e salas de reunião do *Institute for Systems and Robotics* (ISR).

– Piso 8 ao 11: laboratórios, gabinetes e salas de reunião do IT.

O corpo A da Torre Norte contém uma estrutura em pórtico e um núcleo central, ambos de betão armado. As paredes divisórias são em alvenaria de tijolo furado simples. O corpo B possui uma estrutura mista, metálica e de betão armado, em que a estrutura metálica, ligada ao núcleo central de betão armado, sustenta os pisos em consola. A estrutura metálica caracteriza-se por estar reforçada ao nível dos Pisos 4 e 9, por forma a transmitir grande parte das cargas verticais dos pisos superiores para o núcleo central. As fachadas exteriores caracterizam-se por uma cortina de vidro, em toda a sua altura e largura. Metade da altura entre pisos é composta por envidraçados e, a outra, por uma parede de gesso e isolamento interior à cortina de vidro. Os pavimentos são mistos, de aço e betão, e as paredes divisórias são de gesso cartonado com estrutura metálica e isolamento.

A descrição das envolventes opaca e translúcida é apresentada nas Tabelas 3.7 e 3.8, respetivamente. A rede elétrica da Torre Norte, inicia-se no QGBT localizado no Piso 01, juntamente com o posto de transformação. A rede está dividida em circuito normal e em circuito de emergência, este ligado a um gerador alimentado a gasóleo. A rede de água que abastece as instalações sanitárias e o bar tem origem no Piso 02, onde estão instaladas duas bombas hidráulicas.

Tabela 3.7 Poluções da envolvente opaca da Torre Norte.

Solução	Local	Envolvente exterior	Descrição	U [†] [W/m ² .°C]
A	Corpo A	Vertical	Alvenaria de tijolo furado de 0,15+0,20 m	1
B	Corpo A	Horizontal	Betão armado com 0,3 m e betão de argila expandida de 0,1 m	0,93
C	Corpo B	Vertical	Parede com fachada de vidro de 6 mm com isolamento de 100 mm	0,25
D	Corpo B (Consola)	Horizontal	Betão armado com 27,5 cm, com acabamento exterior em chapa metálica	0,47
E	Corpo B	Horizontal	Betão armado com 0,2 m com isolamento	0,4

U[†], coeficiente de transmissão térmica (Silva, 2008).

O sistema de AVAC comum da Torre Norte possui dois *chillers* para produção de água fria que são arrefecidos a água. O *chiller* 1 tem capacidade térmica unitária de 865 kW e potência nominal elétrica de 145 kW, garantindo a produção de água fria, na estação de arrefecimento. O *chiller* 2, com capacidade térmica unitária de 215 kW e potência nominal elétrica de 60 kW, funciona exclusivamente na estação de aquecimento, suprimindo as necessidades de arrefecimento dos espaços de elevada carga térmica. Ambos localizam-se na central de frio, no Piso 01, juntamente com a torre de arrefecimento e as bombas hidráulicas que suportam o sistema.

Relativamente à produção de água quente, existem duas caldeiras com potência térmica unitária de 400 kW que funcionam, em conjunto, para aquecer o depósito de acumulação de água quente através de um permutador de calor. Este sistema encontra-se no Piso 3, na central térmica e em conjunto com as bombas hidráulicas que suportam o sistema de aquecimento. Há, ainda, uma outra forma de produzir água quente quando as caldeiras estão desligadas, através do circuito de condensação do *chiller* 2, que tem a possibilidade de passar no permutador de calor do depósito de acumulação, antes de ir à torre de arrefecimento.

Tabela 3.8 Soluções da envolvente translúcida da Torre Norte.

Solução	Local	Envolvente	Descrição				U [†] vidro	U vão	g [‡]
				Material translúcido	Caixilharia	Proteção	[W/m ² .°C]	[W/m ² .°C]	
1	Corpo A e B	Vertical exterior	Vidro duplo temperado (6+13+6) mm	-	-		2,71	-	0,54
2	Corpo A	Vertical exterior	Vidro duplo temperado (6+13+6) mm	-	Cortinas opacas; cor clara		2,71	-	0,29
3	Corpo A	Vertical exterior	Vidro simples 6 mm	-	-		5,84	-	0,95
4	Corpo B	Vertical exterior	Vidro duplo temperado (6+13+6) mm	-	Estores metálicos interiores; cor média		2,71	-	0,46

U[†], coeficiente de transmissão térmica; g[‡], fator solar nas condições de verão, assumindo uma ponderação de 30% do fator solar do vidro e 70% do fator solar do vidro e dispositivo de sombreamento ativado (Silva, 2008).

O corpo B possui um sistema ar-água a quatro tubos, composto por uma UTAN, por piso, localizada no núcleo central e por ventiloconvetores nos espaços individuais. As grelhas, nas portas, têm por objetivo encaminhar o ar para o sistema de extração das instalações sanitárias do respetivo piso. Há, também, um ventilador de insuflação que pressuriza as escadas do núcleo central, por razões de segurança contra incêndios.

No que respeita ao corpo A, este possui sistemas tudo-ar para os quatro anfiteatros, biblioteca, bar e *hall* de entrada. Estes são suportados por cinco UTA's localizadas no Piso 01 e por uma UTA e uma UTAN, no Piso 1 intermédio. As cinco UTA's do Piso 01 têm associados ventiladores para extração dos respetivos espaços condicionados. A extração da biblioteca é feita por um ventilador de extração localizado no Piso 01, enquanto no *hall* de entrada é feita por um ventilador instalado na cobertura do edifício. Os espaços condicionados, nomeadamente, quatro salas de aula, três laboratórios, gabinetes do Piso 0 e a sala de estudo, dispõem de um sistema ar-água a quatro tubos com ventiloconvetores e ar insuflado através de ventiladores. A exaustão destes espaços é feita por dois ventiladores instalados no Piso 01.

As caldeiras funcionam no período de aquecimento entre as 8h00 e as 18h00, nos dias úteis da semana, enquanto o *chiller* 1 opera entre as 6h45 e as 17h00, nos mesmos dias, durante a estação de arrefecimento. As UTA's e as UTAN's possuem um horário de funcionamento entre as 6h45 e as 18h45 (UTA's) e entre as 8h00 e as 20h00 (UTAN's), de segunda a sexta-feira. Os ventiladores de extração associados às UTA's cumprem com o mesmo período de funcionamento. Os restantes ventiladores de extração operam entre as 8h00 e as 20h00, com exceção dos ventiladores da casa de máquinas do elevador e do posto de transformação, que se encontram permanentemente ativos.

As soluções de iluminação na Torre Norte são apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 Sistema de iluminação da Torre Norte (adaptado do Relatório Auditoria, 2015b).

Tipo	Localização	Luminárias/lâmpadas [n]	Potência nominal lâmpadas [W]
Emergência (fluorescente)	Dispersa	128/256	11
Fluorescente compacta integrada	Hall de entrada	131/131	11
Fluorescente tubular T8	Corredores Piso 1	1 300/2 025	18/36/58
	Instalações sanitárias		
	Zonas de circulação		
Spots de halogéneo	Salas de aulas	324/324	50
	Gabinetes		
	Átrio elevadores		
LED's	Anfiteatros	104/104	12

A iluminação é controlada pelos seguranças do edifício, não havendo qualquer intervenção da gestão do edifício. Por indicação dos seguranças, as luzes dos espaços comuns são ligadas entre as 6h30 e as 22h00, de segunda a sexta-feira; contudo, existe uma sectorização das lâmpadas que se ligam, nunca estando a totalidade ligada, variando entre 25% e 80%. Daí que a potência nominal acima indicada seja por excesso.

3.3 COMPARAÇÃO DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A repartição das áreas dos edifícios em análise é apresentada na Figura 3.5. O Pavilhão Central assume relevo pela elevada percentagem de gabinetes associados à administração. O Pavilhão de Civil possui a mais elevada percentagem de salas de aula, sendo o edifício cuja atividade dos alunos tem mais relevância na sua ocupação. Este também se faz notar pela elevada percentagem de áreas comuns, em parte justificada pelo piso da garagem. A maior parte da área da Torre Norte, excluindo os espaços comuns, é dedicada a gabinetes e laboratórios para a investigação (Relatório Auditoria, 2015a; 2015b; 2017).

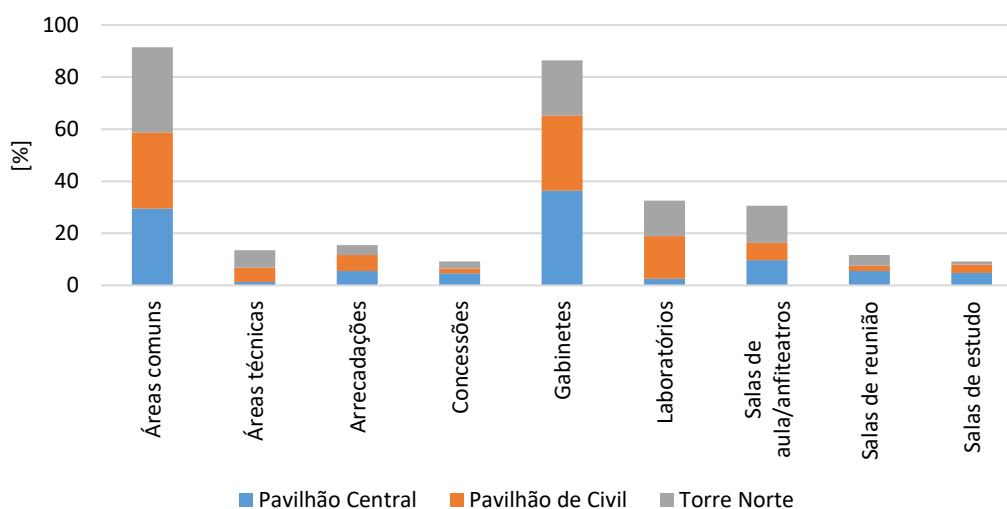


Figura 3.5 Repartição das áreas do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.

As potências instaladas das principais categorias consumidoras de eletricidade são ilustradas na Figura 3.6. Nestas categorias estão incluídos os laboratórios, mas sem os equipamentos específicos de investigação.

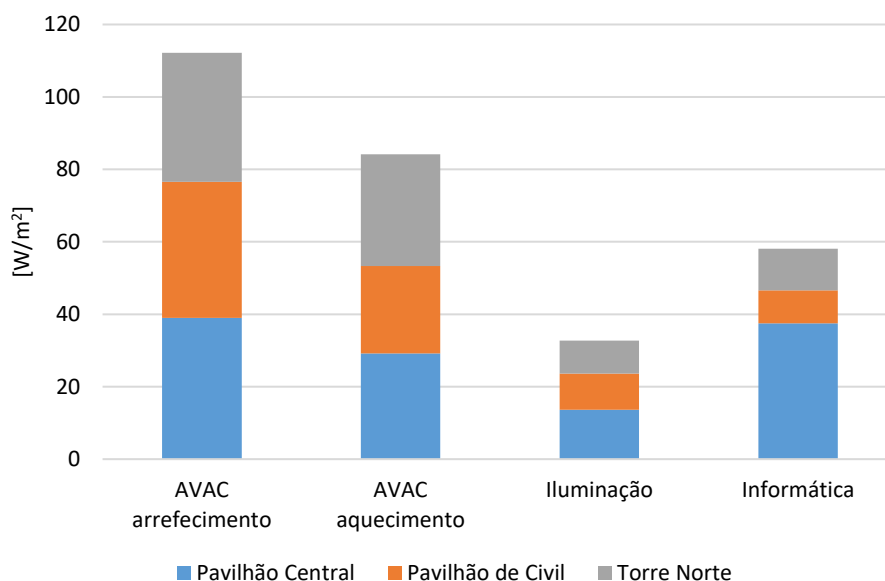


Figura 3.6 Repartição das potências instaladas por categoria dos consumidores e edifícios em análise.

A Torre Norte possui o sistema de AVAC de arrefecimento com menos potência instalada. Para as necessidades de aquecimento, o Pavilhão Central e a Torre Norte possuem potências/unidade de área semelhantes e é o Pavilhão de Civil que possui o valor mais reduzido. Na iluminação, o Pavilhão Central, com sistemas mais antigos, tem o maior valor do rácio aqui considerado e o mesmo se verifica para a sua parcela informática devido aos equipamentos do *Data Center* e da DSI (Relatório Auditoria, 2015a; 2015b; 2017).

Na Tabela 3.10 estão identificadas algumas das características dos edifícios que influenciam as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento. As áreas e volumes não são precisos, devido à inexistência de desenhos cotados dos edifícios. Na hierarquia da inércia térmica não se recorreu a cálculos. Esta depende das massas das componentes dos edifícios ponderada pelas suas dimensões. Assim, e pelas alvenarias espessas das paredes do Pavilhão Central, este foi classificado como tendo a inércia térmica mais forte. Em oposição, a Torre Norte com as suas paredes interiores e exteriores em gesso cartonado foi tida como o edifício com menor inércia térmica.

Tabela 3.10 Características dos edifícios em análise.

Edifício	Fachada exterior						Fator forma	Inércia térmica
	Envidraçados	Área	Nascente	Poente	Sul	Norte		
	[%]	[m ²]	[%]	[%]	[%]	[%]		
Pavilhão Central (A)	25,3	3 446	31,8	31,8	18,2	18,2	0,16	A > B e C
Pavilhão de Civil (B)	48,6	7 972	30,2	44,1	11,1	14,6	0,37	B > C
Torre Norte (C)	43,3	3 835	25,9	25,9	24,1	24,1	0,28	

O fator forma corresponde ao quociente da área de envolvente pelo volume interior. O RCCTE limita as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, consoante aquele fator. Um maior fator forma descreve uma situação crítica, pelo que o RCCTE aplica limites mais reduzidos das necessidades. A

inércia térmica é tida em conta no RCCTE para a definição dos valores máximos do fator solar dos vãos envidraçados e do fator de utilização dos ganhos térmicos (Camelo et al., 2006).

A percentagem de envidraçados e de repartição das áreas por ponto cardinal são parâmetros relacionados com o efeito da radiação no comportamento térmico dos edifícios. O Pavilhão de Civil e a Torre Norte têm uma percentagem similar de envidraçados (Tabela 3.10). Relativamente à fachada exterior, a área do Pavilhão de Civil é cerca do dobro dos outros dois edifícios. O Pavilhão Central e o Pavilhão de Civil apresentam uma distribuição idêntica das áreas de fachada exterior pelos pontos cardinais. A Torre Norte apresenta a maior percentagem de fachada exterior. Em termos do fator forma, o Pavilhão de Civil apresenta o valor mais elevado, seguido do Pavilhão de Civil e Torre Norte.

A Tabela 3.11 apresenta os intervalos dos coeficientes de transmissão térmica e fatores solares dos edifícios em análise. A inexistência de desenhos cotados impede o cálculo do U e do fator solar ponderados pelas áreas para cada edifício.

Tabela 3.11 Coeficientes de transmissão térmica e fatores solares dos edifícios em análise.

Edifício	U [†] paredes [W/m ² °C]	U cobertura [W/m ² °C]	U vão [W/m ² °C]	g [‡] vão
Pavilhão Central	1,10-2,23 ^{††}	1,67-2,42	1,89-5,30	0,22-0,76
Pavilhão de Civil	1,01-4,37	1,14-1,14	5,77-6,01	0,56-0,85
Torre Norte	0,25-1,00	0,40-0,93	2,71-5,84	0,29-0,95

U[†], coeficiente de transmissão térmica; g[‡], fator solar; ^{††}valores mínimo e máximo.

Os U's da cobertura mais elevados são observados no Pavilhão Central. O Pavilhão de Civil apresenta os U's mais elevados nas paredes e envidraçados. O Pavilhão de Civil apresenta, ainda, o valor mínimo do fator solar mais elevado. A Torre Norte possui os U's das paredes exteriores mais reduzidos. O corpo B, que contém mais de 70% da envolvente exterior da Torre Norte, possui paredes exteriores com um U de 0,25, envidraçados com U de 2,71 e fator solar de 0,46. Com base nestes resultados, a Torre Norte possui a envolvente com melhor desempenho térmico e o Pavilhão de Civil, a envolvente com pior desempenho.

4 METODOLOGIA

4.1 RECOLHA E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS

O Pavilhão Central, o Pavilhão de Engenharia Civil e a Torre Norte foram os edifícios do IST selecionados para o presente estudo. Os dados relativos aos consumos energéticos e hídricos, à meteorologia e à ocupação do Centro de Congressos do Pavilhão de Civil foram recolhidos no 2.º semestre de 2018. Os dados, o período de recolha e a fonte são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Dados, período de recolha e fonte.

Dados	Período	Fonte
Contagens de água mensais	2007-2017	Núcleo de manutenção
Contagens de eletricidade mensais	2007-2017	Núcleo de manutenção
Dados meteorológicos diários	2016-2017	Estação meteorológica do IST
Consumos de eletricidade e gás diários	2016-2017	<i>Campus</i> sustentável (EnergIST)
Consumos de água quarto-horários	2017	<i>Campus</i> sustentável (<i>WaterBeep</i>)
Eventos no Centro de Congressos	2016-2017	Centro de Congressos do Pavilhão de Civil

Os consumos de eletricidade estão disponíveis em séries de consumos diários, por registo automático, a partir de 2014. No presente estudo, foram utilizados os registos relativos a 2016 e 2017. Os consumos de água, em séries de registos automáticos, a uma escala quarto-horária, estão disponíveis, apenas para o Pavilhão de Civil e a partir de 2017. Os restantes registos, na escala quarto-horária, são referentes a redes que abastecem vários edifícios. Os consumos de gás diários foram recolhidos nas redes que abastecem o Pavilhão de Civil e a Torre Norte. Para a água foi considerado o custo de 1,884 €/m³ e para o gás, o custo de 0,08 €/kWh, como indicado pelo Núcleo de Manutenção do IST. Na conversão dos consumos de gás foi utilizado um fator de 12 kWh/m³, em conformidade com o relatório da Auditoria ao Pavilhão Central (2017). A transformação dos consumos de energia, em energia primária, foi feita a partir dos fatores de conversão definidos no RCTE (2013), i.e., 2,5 kWh_{EP}/kWh para a eletricidade e 1 kWh_{EP}/kWh para o gás natural. Relativamente às emissões de CO₂, utilizou-se um fator de 0,144 kgCO₂/kWh_{EP} (eletricidade) e 0,202 kgCO₂/kWh_{EP} (gás natural). Como sugerido por Lodi et al. (2017) para comparar edifícios, os consumos por unidade de área foram colocados na ordenada e os consumos absolutos na abcissa. O cálculo dos encargos com a eletricidade teve por base a fatura do *Campus* Alameda. A potência contratada dos edifícios em análise foi estimada de forma proporcional ao consumo de eletricidade. Conhecida a potência do *Campus* Alameda (3,3 MW), estimou-se a potência contratada, por edifício em estudo, de forma proporcional à percentagem do consumo dos edifícios face ao consumo do *Campus*. O preço de eletricidade e os períodos horários de média tensão, em Portugal Continental, são apresentados no Anexo C, Tabelas 4.1A e 4.2A.

Os dados foram analisados em função das estações definidas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro. A 'estação convencional de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último

decêndio anterior a 31 de maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C'. A 'estação convencional de arrefecimento é o conjunto dos quatro meses de Verão (junho, julho, agosto e setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas' (Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro). No presente estudo, foram utilizadas as expressões 'estação de aquecimento' e 'estação de arrefecimento', para uma maior simplicidade.

A análise dos dados em função das duas estações é justificada pela relação entre os consumos de eletricidade de AVAC e a temperatura média diária (Figura 4.1).

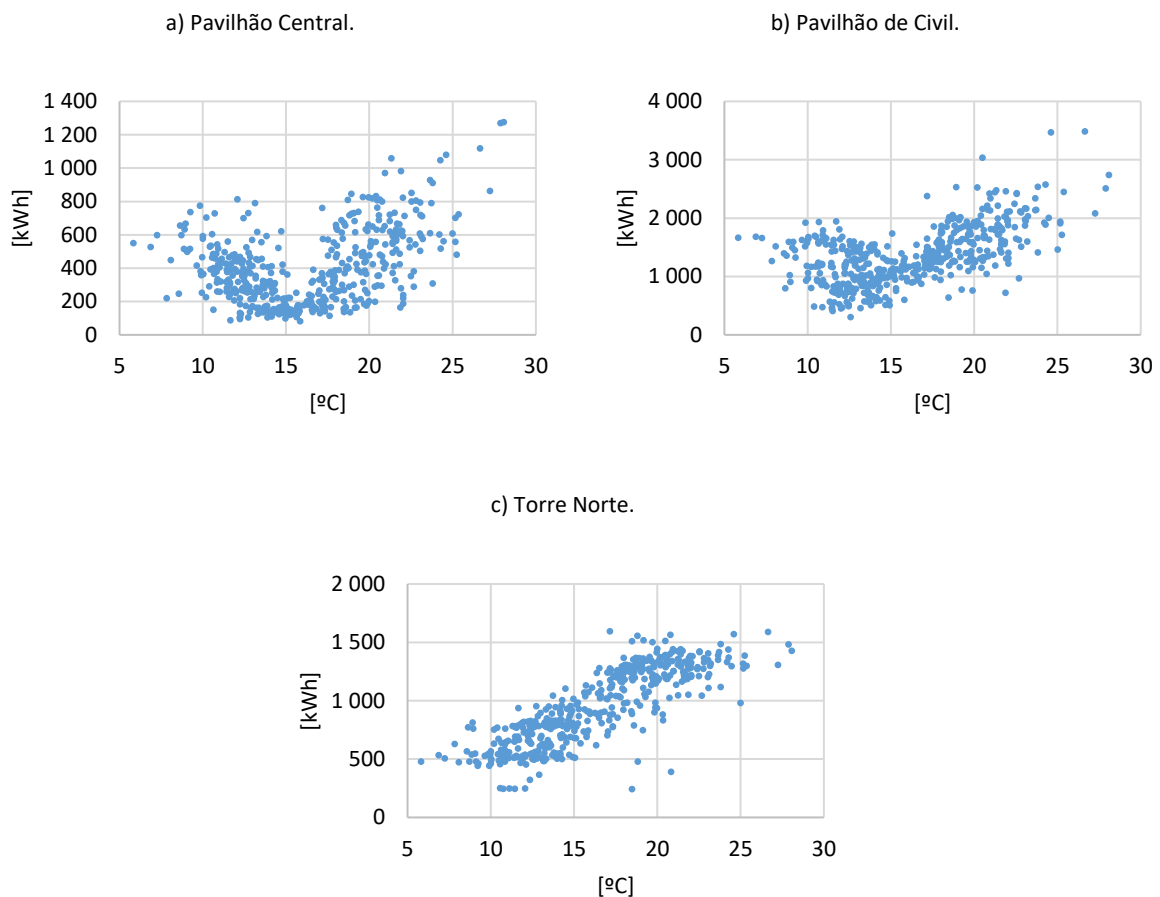


Figura 4.1 Relação entre os consumos de eletricidade para AVAC e a temperatura média diária no Pavilhão Central (a), Pavilhão de Civil (b) e Torre Norte (c), excluindo os fins de semana, os feriados e o encerramento do IST.

No Pavilhão Central (Figura 4.1 a) e Pavilhão de Civil (Figura 4.1b), o aumento da temperatura, até cerca de 16 °C, diminui os consumos de AVAC devido à redução das necessidades de aquecimento. A partir dos 16 °C, verifica-se o inverso, i.e., o aumento da temperatura média diária conduz a um aumento dos consumos de AVAC, devido às necessidades de arrefecimento mais elevadas. Uma relação similar é observada entre os consumos de eletricidade de AVAC e a radiação, humidade relativa e vento. Na Torre Norte (Figura 4.1c) a relação não é observada porque o sistema de aquecimento é sustentado por caldeiras a gás. Os dias que não integram as duas estações ($n = 84$) foram incluídos na estação 'sem requisitos'. A estação sem requisitos apresenta uma temperatura média diária e um desvio padrão de 18,5 °C e 2,4 °C, respetivamente. A subtração de um desvio padrão à média, dá-nos um valor de 16,1 °C, que fica ligeiramente acima do ponto de inflexão. Assim, foi optou-

se por aglomerar a estação sem requisitos à estação de arrefecimento. Os fins de semana, os feriados e o encerramento do IST foram excluídos da análise. Tal opção deve-se ao facto de o sistema de AVAC estar desligado nestes dias. Por conseguinte, os consumos de eletricidade não dependem das variáveis meteorológicas, com uma pequena exceção dos equipamentos de AVAC individuais.

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi efetuada no SPSS, versão 25. As médias, os desvios padrão e os valores mínimo e máximo para os consumos de eletricidade diários e variáveis meteorológicas foram calculados em função da estação de aquecimento/arrefecimento. Os consumos de eletricidade diários foram, também, descritos para o Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte. O teste t para amostras independentes foi utilizado para comparar as médias dos consumos de eletricidade diários e variáveis meteorológicas nas duas estações.

4.2.1 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla foi utilizada para investigar o efeito de variáveis meteorológicas, dias da semana e momento letivo nos consumos de eletricidade diários. As variáveis meteorológicas são a temperatura média diária, o vento, a radiação, a humidade relativa e a precipitação diária. Os dias da semana incluem apenas os dias úteis, i.e., de segunda a sexta-feira. O momento letivo foi dividido em período de aulas, períodos de exames e férias dos alunos. A análise de regressão incluiu, também, os eventos que ocorrem no Pavilhão Central como preditor dos consumos de eletricidade diários. Os eventos foram quantificados em termos de ocorrência, ou não, e através da ocupação do Centro de Congressos do Pavilhão de Civil, mais especificamente: (1) a totalidade do Centro, (2) grande parte do Centro incluindo o auditório, (3) as salas, *Hall's* e eventos pós-laborais incluindo o auditório, (4) as salas e *Hall's* e (5) os eventos pós-laborais incluindo o auditório. Os dias da semana, o momento letivo e os eventos entraram nos modelos de regressão como variáveis categóricas, i.e., variáveis fictícias. A sexta-feira, o período de exames e a ausência de eventos, no Centro de Congressos do Pavilhão de Civil, foram as categorias de referência para o dia da semana, momento letivo e eventos, respetivamente. Os pressupostos de multicolinearidade, normalidade, linearidade, homocedasticidade e independência de resíduos foram cumpridos. O fluxograma com a preparação dos dados, a verificação dos pressupostos e a melhoria dos coeficientes de regressão é apresentado no Anexo C, Figura 4.1A. O valor de alfa foi mantido a 0,05.

4.2.2 REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

Os consumos de eletricidade no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte foram, também, modelados através de redes neuronais artificiais, do tipo *feedforward*. Os modelos foram desenvolvidos para cada edifício e para a estação de aquecimento e arrefecimento, separadamente. Os *outliers* identificados nos modelos de regressão foram excluídos da análise. Os fins de semana, os feriados e os dias de encerramento do IST foram igualmente excluídos da análise, de modo a tornar possível a comparação dos modelos das redes neuronais artificiais com os modelos de regressão linear. As variáveis categóricas entraram nas redes neuronais através de variáveis fictícias. Os dados foram divididos numa amostra de treino (70%) e numa amostra de teste (30%). A

amostra de treino foi utilizada no processo de aprendizagem da rede neuronal e a amostra de teste foi utilizada para acompanhar a evolução dos erros de previsão e evitar o sobreajustamento dos modelos aos dados.

4.2.3 MODELOS DE REGRESSÃO COM ERROS ARMA

Os consumos de eletricidade diários e as temperaturas médias diárias do IST foram recolhidos sequencialmente ao longo de 2016 e 2017. O efeito do tempo nos modelos de regressão foi introduzido através da modelação dos erros, por modelos autorregressivos de médias móveis (ARMA). Tais modelos permitiram prever os consumos de eletricidade diários durante uma semana, conhecidos os valores da temperatura média diária, os momentos letivos e/ou os eventos no Centro de Congressos do Pavilhão de Civil.

Os modelos ARMA têm como requisito a recolha de valores em intervalos regulares, sem valores omissos, i.e., uma série temporal com desfasamento regular. Por esta razão, e contrariamente à regressão linear múltipla, não foi efetuada a divisão dos consumos de eletricidade diários, por estação (aquecimento e arrefecimento). Os feriados e os dias em que o IST esteve encerrado foram, também, incluídos na análise. Uma vez que os preditores meteorológicos têm um impacte simétrico nos consumos de eletricidade, em função da estação, apenas a temperatura média diária foi incluída nos modelos. No Pavilhão Central e no Pavilhão de Civil, foi efetuada uma transformação da temperatura média diária porque a sua relação com os consumos de eletricidade diários não era linear. Na transformação desta variável utilizou-se a equação 4.1.

$$\text{Temperatura média diária transformada} = |\text{Temperatura média diária} - 16| \quad (4.1)$$

A transformação permitiu obter uma correlação mais forte entre os consumos de eletricidade de AVAC e a temperatura média diária, nas estações de aquecimento e arrefecimento (Figura 4.2). Os feriados, os fins de semana e os dias em que o IST esteve encerrado foram excluídos da Figura 4.2 para melhor visualizar o efeito da transformação aplicada. Para a Torre Norte, não foi necessária qualquer transformação porque a correlação entre os consumos de eletricidade para AVAC e a temperatura média diária é elevada (Figura 4.1).

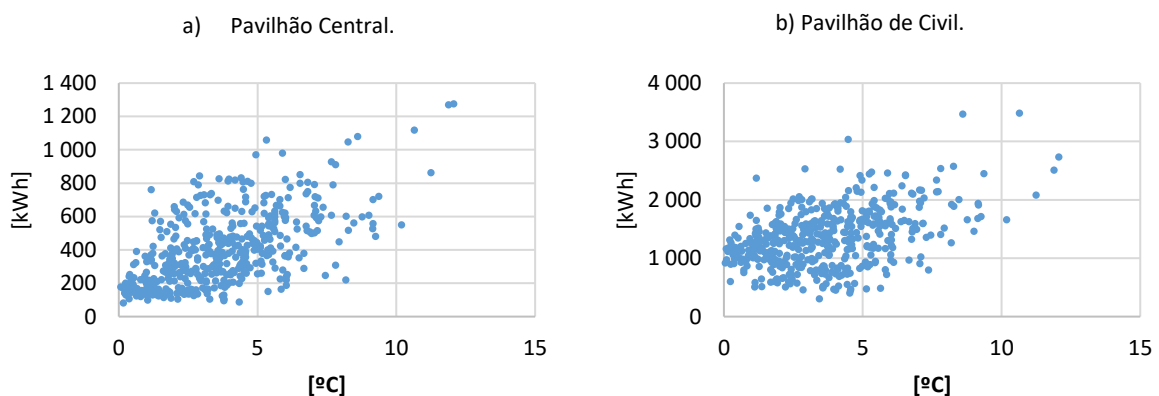


Figura 4.2 Relação entre os consumos de eletricidade para AVAC e a temperatura média diária transformada no Pavilhão Central (a) e Pavilhão de Civil (b), excluindo os fins de semana, os feriados e o encerramento do IST.

Dada a inexistência de registos de eletricidade diários, no período de 22 a 25 de janeiro de 2016, foram consideradas as observações registadas a partir de 26 de janeiro de 2016 até 29 de novembro de 2017, no ajustamento dos modelos de regressão com erros ARMA. Os consumos de eletricidade diários de 30 de

novembro a 7 de dezembro de 2017 foram utilizados na avaliação da qualidade de predição dos modelos. Uma vez que os consumos de eletricidade diários apresentam uma sazonalidade semanal foram utilizados os modelos ARMA $(p, q)(P, Q)_s$ para os erros dos modelos de regressão. As séries temporais cumpriram o requisito da variância constante.

Inicialmente, iterou-se um modelo de regressão com erros ARMA $(1,0)(1,0)_7$ para analisar a função de autocorrelação (ACF) e a função de autocorrelação parcial (PACF) dos resíduos, no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte. Os resíduos apresentaram autocorrelações na *lag* 1 e na *lag* 7 (periodicidade = 7) sendo indicativo de componentes autorregressivas e de médias móveis não sazonais e sazonais de ordem 1. De seguida, os consumos de eletricidade diários foram modelados com todas as combinações AR1, AR1 sazonal, MA1 e MA1 sazonal. O melhor modelo foi selecionado com base no valor mínimo obtido para a medida de ajustamento denominada *Bayesian Information Criterion* (BIC).

A Tabela 4.2 apresenta as combinações ARMA e os valores BIC. Os erros ARMA para o Pavilhão Central e Pavilhão de Civil foram identificados pela combinação $(1,0)(1,1)$ e os erros ARMA para a Torre Norte, pela combinação $(0,1)(1,1)$. A série de erros foi estacionária, para cada um dos edifícios, não sendo necessário aplicar diferenciação (Makridakis et al. 1998). A preparação dos dados, a estimação das ordens ARMA, a verificação dos pressupostos e a previsão dos consumos são apresentados na forma de fluxograma no Anexo C, Figura 4.2A.

Tabela 4.2 Combinações ARMA e valores BIC, para os três edifícios.

Erros ARMA	Pavilhão Central	Pavilhão Civil	Torre Norte
$(1,0)(1,0)_7$	12,453	12,509	11,569
$(1,0)(0,1)_7$	13,223	13,594	12,782
$(0,1)(1,0)_7$	12,506	12,533	11,555
$(0,1)(0,1)_7$	13,163	13,485	12,678
$(1,1)(1,1)_7$	12,055	12,220	11,638
$(1,1)(1,0)_7$	12,722	12,513	11,719
$(1,1)(0,1)_7$	13,173	13,496	12,689
$(1,0)(1,1)_7$	12,050 [†]	12,208 [†]	11,444
$(0,1)(1,1)_7$	12,139	12,267	11,424 [†]

[†]Valor mínimo de BIC.

Os modelos de regressão com erros ARMA têm a forma descrita na equação 4.2.

$$Y_t = b_0 + b_1X_{1,t} + \dots + b_kX_{k,t} + N_t \quad (4.2)$$

Onde,

$$(1 - \Phi_1 B^S)(1 - \phi_1 B)N_t = (1 - \theta_1 B^S)(1 - \theta_1 B)e_t$$

B Operador tal que $BxN_t = N_{t-1}$

S Sazonalidade

$X_{k,t}$ Preditor k no instante t

b_k Coeficiente de regressão do preditor k

N_t Termo do erro no instante t

- e_t Resíduo no instante t
- Φ_1 Coeficiente de autoregressão sazonal
- φ_1 Coeficiente de autoregressão
- θ_1 Coeficiente de média móvel sazonal
- θ_1 Coeficiente de média móvel

A qualidade de ajustamento do modelo foi avaliada através do R^2 . A qualidade da predição do modelo foi avaliada através do *mean absolute percentage error* (MAPE) e do *Theil's U – statistic* (U). A estatística U compara a qualidade de predição do modelo de regressão com erros ARMA com um modelo básico para o qual $\hat{y}_{t+1} = y_t$.

A estatística U é descrita na equação 4.3.

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n-1} \left(\frac{\hat{y}_{t+1} - y_t}{y_t} \right)^2}{\sum_{t=1}^{n-1} \left(\frac{y_{t+1} - y_t}{y_t} \right)^2}} \quad (4.3)$$

Onde,

- \hat{y}_{t+1} Valor previsto para o instante $t+1$
- y_{t+1} Valor observado para o instante $t+1$.
- y_t Valor observado no instante t

Em termos de interpretação, quando $U = 1$, o modelo básico é tão bom como o modelo de previsão avaliado; quando o $U < 1$, a qualidade do modelo básico é inferior ao modelo de previsão avaliado; quando $U > 1$, a qualidade do modelo básico é superior ao modelo de previsão avaliado (Makridakis et al., 1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE GRÁFICA DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS DO IST

5.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo incide sobre os consumos energéticos e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte. Primeiro, abordou-se a evolução dos consumos energéticos e hídricos dos três edifícios, entre 2007 e 2017. Segundo, comparou-se os consumos energéticos e hídricos anuais. Terceiro, apresentou-se os custos energéticos e hídricos dos edifícios em análise e do *Campus Alameda*. Quarto, incidiu-se sobre as frequências relativas acumuladas dos consumos de eletricidade diários dos edifícios em análise. Quinto, analisou-se os consumos horários de eletricidade e hídricos. Sexto, comparou-se os consumos energéticos e hídricos dos edifícios em análise com os estudos revistos. Por último, os resultados foram interpretados.

5.1.2 EVOLUÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS ANUAIS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A evolução dos consumos de eletricidade do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, entre 2007 e 2017, é apresentada na Figura 5.1a. A soma dos consumos de eletricidade dos três edifícios em análise e os consumos do *Campus Alameda*, no mesmo período, são apresentados na Figura 5.2b.

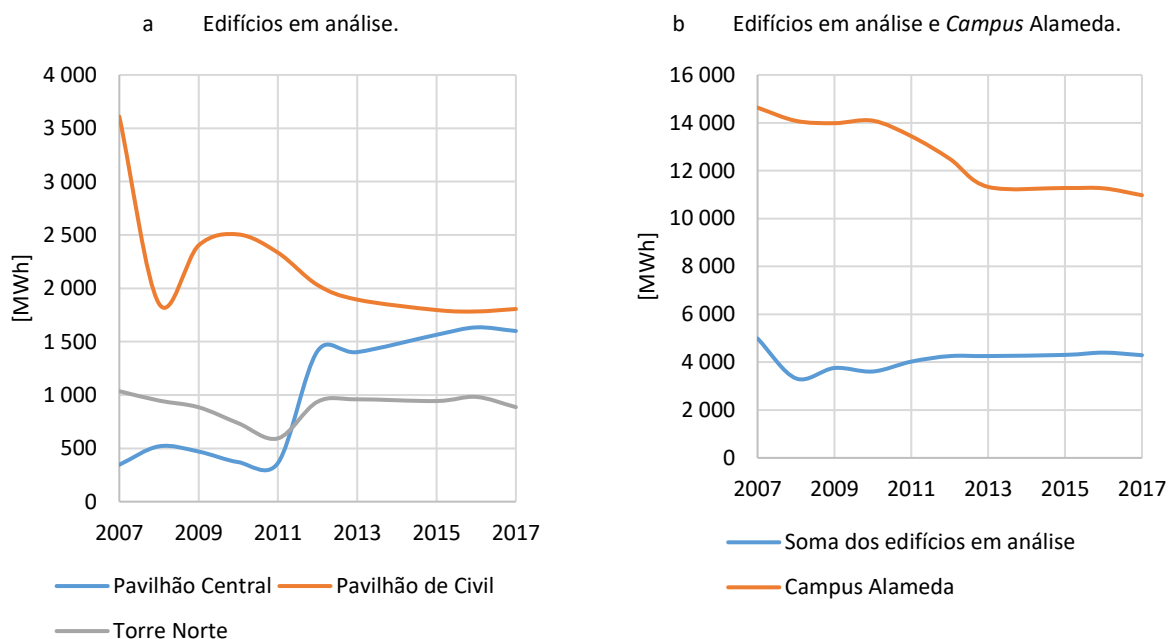


Figura 5.1 Evolução dos consumos de eletricidade anuais, no período 2007-2017.

O Pavilhão Central apresentou consumos anuais relativamente estáveis entre 2007 e 2010, ano a partir do qual se observa uma duplicação de consumos até 2011 e ligeiros aumentos até 2016. No Pavilhão de Civil, é visível um decréscimo entre 2007 e 2008, seguido de um aumento, até 2009 e de uma ligeira redução entre 2010 e 2017. A Torre Norte apresentou um decréscimo entre 2007 e 2011, seguido de um aumento entre 2011 e 2012 e valores estáveis até 2017. Relativamente ao Pavilhão Central, o aumento dos consumos de eletricidade está associado à ampliação do *Data Center* e da DSI. No Pavilhão de Civil, os consumos de 2007 e 2008 parecem estar

contaminados de erros de leitura. O consumo excessivo de 2007 foi, aparentemente, corrigido pela atribuição de um valor mais reduzido em 2008. A partir de 2010, houve uma ligeira diminuição até 2017 que se justifica pelas melhorias na operação do sistema de AVAC. As avarias de equipamentos terminais podem, também, ter contribuído para a redução nos consumos de eletricidade. A soma dos consumos dos três edifícios em análise foi estável entre 2007 e 2017 (Figura 5.1b). O *Campus Alameda* apresentou um decréscimo nos consumos de cerca de 25%, no período 2010 e 2013.

A evolução dos consumos hídricos para o Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte é apresentada na Figura 5.2. Para o Pavilhão Central apenas dispõe de registos válidos em 2007. O Pavilhão de Civil e a Torre Norte apresentam consumos irregulares, com um decréscimo bem evidente em 2011 e 2012, período coincidente com a crise financeira em Portugal.

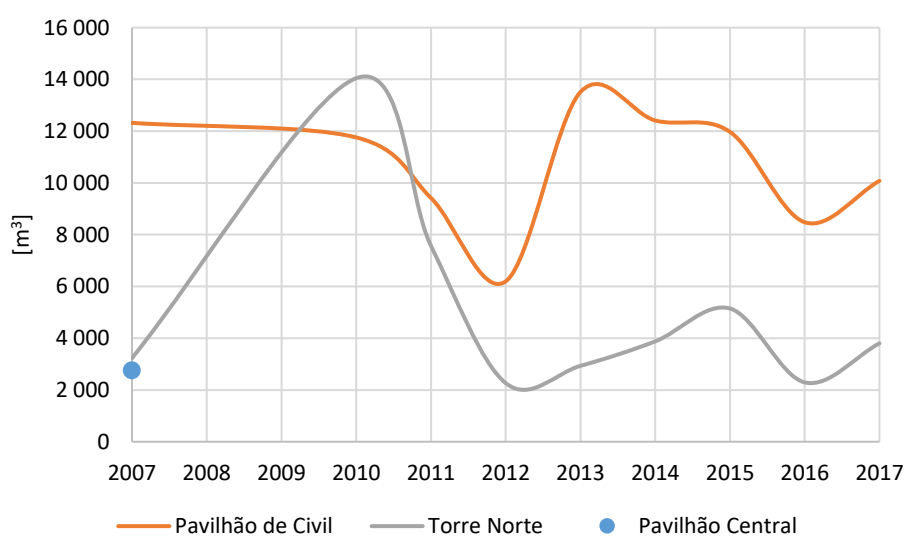


Figura 5.2 Evolução dos consumos hídricos anuais dos edifícios em análise, no período 2007-2017.

5.1.3 COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS ANUAIS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

Os consumos de eletricidade (a), gás (b), AVAC comum (c) e energia primária (d) são apresentados na Figura 5.3. As parcelas relativas à iluminação e informática, entre outras, foram excluídas devido à ausência de registos individuais. Os consumos de AVAC são alvo de estudo porque são registados em tempo real, na plataforma EnergiST. A análise dos consumos teve em conta que o Pavilhão Central e a Torre Norte possuem uma área da mesma ordem de grandeza. O Pavilhão de Civil é, aproximadamente, 2,5 vezes maior do que o Pavilhão Central e a Torre Norte. Os dados são relativos à média dos consumos de 2015, 2016 e 2017.

O Pavilhão Central foi o maior consumidor de eletricidade, em termos absolutos e por unidade de área (Figura 5.3a). Tal facto poderá justificar-se devido aos consumos elevados da parcela informática afeta aos serviços administrativos, ao *Data Center* e à DSI. Por outro lado, o Pavilhão de Civil apresenta o menor rácio de consumos de eletricidade por m². Possíveis explicações recaem nas grandes áreas que têm baixos consumos energéticos, como o Centro de Congressos (eventos ocasionais), a garagem e os armazéns dos laboratórios. Para além disso,

os consumos de AVAC são inferiores ao normal, uma vez que não são garantidas as condições de conforto dos utilizadores. A Torre Norte aparece numa posição intermédia, no rácio dos consumos de eletricidade por m^2 , devido aos consumos associados ao AVAC comum e aos seus laboratórios.

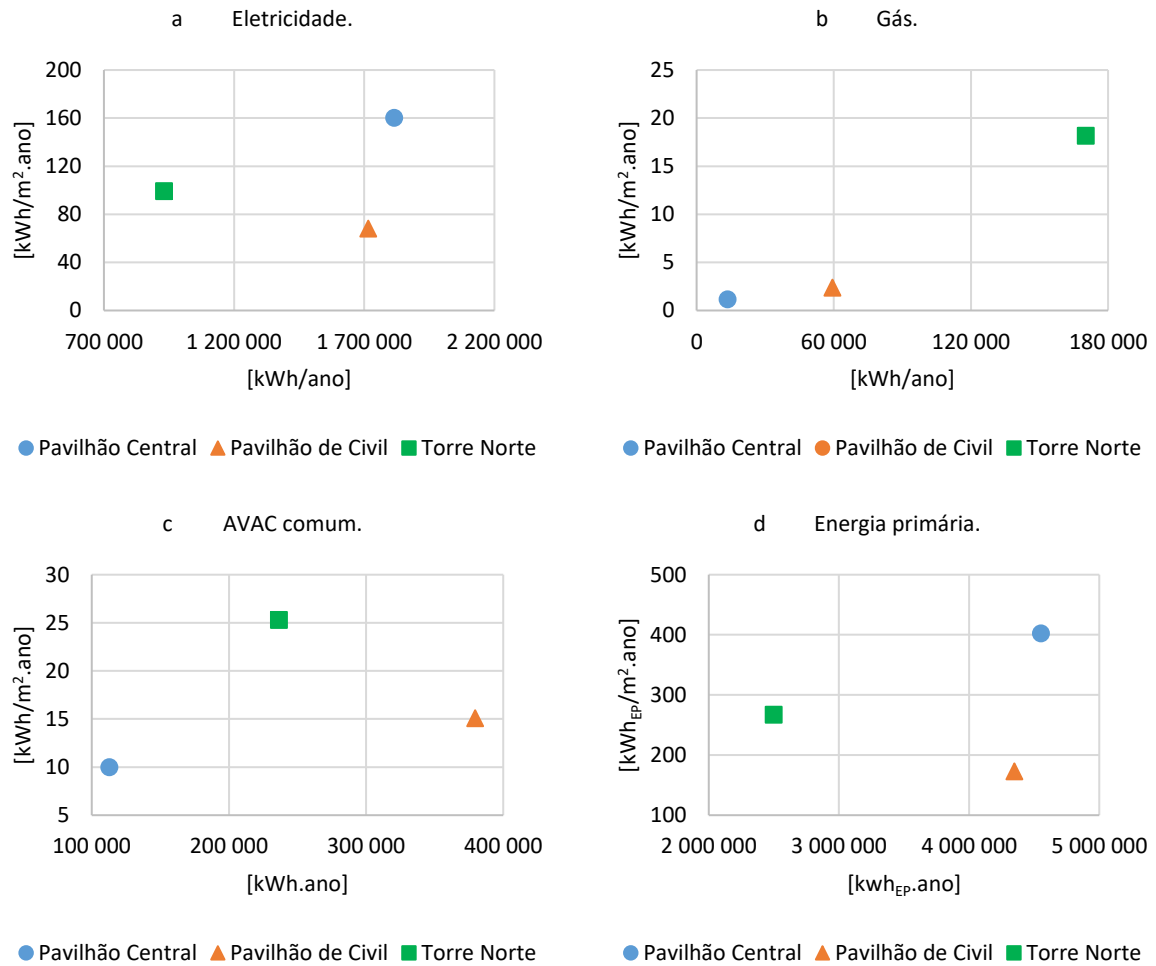


Figura 5.3 Consumos de eletricidade, gás, AVAC comum e energia primária (eletricidade e gás) dos edifícios em análise.

Na análise aos consumos de gás, a Torre Norte apresenta consumos mais elevados devido às caldeiras (Figura 5.3b). O Pavilhão Central e o Pavilhão de Civil apresentam consumos por unidade de área similares. Os consumos de AVAC comum são mais elevados no Pavilhão de Civil, em termos absolutos, comparativamente ao Pavilhão Central e à Torre Norte; no entanto, a Torre Norte é o caso mais crítico quando se consideram os consumos por m^2 (Figura 5.3c). A distribuição dos consumos de energia primária (Figura 5.3d) é similar aos consumos de eletricidade. Uma vez que o consumo de gás é baixo, a justificação para os consumos de energia primária é idêntica aos consumos de eletricidade.

As emissões de dióxido de carbono e os consumos de água são apresentados na Figura 5.4. Sobre as emissões de dióxido de carbono (Figura 5.4a), o caso crítico é o Pavilhão Central. Isto deve-se aos gastos de eletricidade associados aos serviços administrativos, *Data Center* e DSI. Relativamente ao consumo de água (Figura 5.4b), o Pavilhão de Civil é o edifício crítico. Tais consumos devem-se às atividades laboratoriais e concessões (bar e cantina). O Pavilhão Central e a Torre Norte apresentam consumos de água semelhantes.

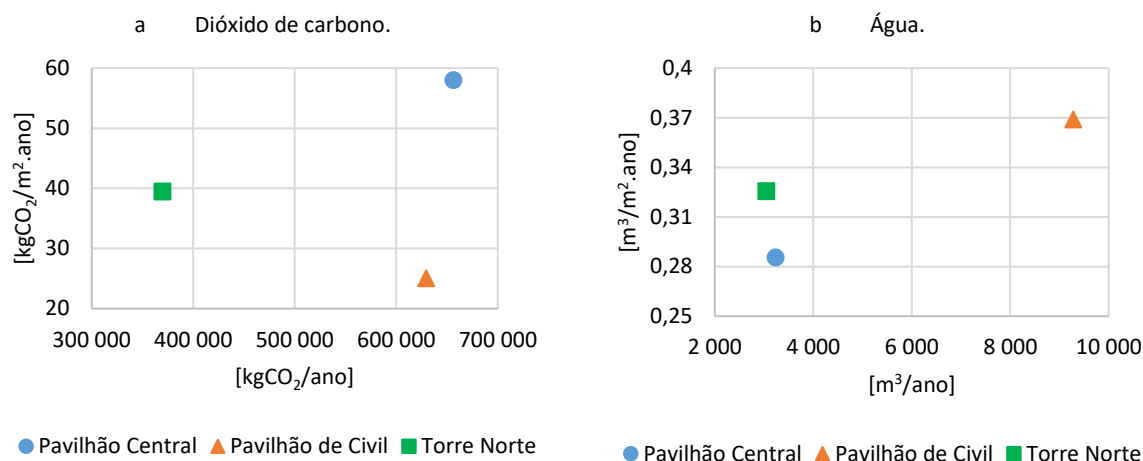


Figura 5.4 Emissões de dióxido de carbono e consumos de água dos edifícios em análise.

5.1.4 CUSTOS COM OS RECURSOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS ANUAIS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

Na tabela 5.1 estão indicados os custos energéticos e hídricos dos edifícios em análise e do *Campus Alameda*. Dos três edifícios em análise, apenas o Pavilhão de Civil possui um custo anual por unidade de área, inferior ao *Campus Alameda*.

Tabela 5.1 Custos com recursos energéticos e hídricos anuais dos edifícios em análise.

Edifício	Custo anual [€]	Custo anual por unidade de área [€/m ²]
Pavilhão Central	230 259	24,6
Pavilhão Civil	278 557	11,1
Torre Norte	153 968	13,6
<i>Campus Alameda</i> [†]	1 418 278	13,3

[†]São contabilizados, apenas os custos relativos à eletricidade.

A repartição dos custos com os recursos energéticos e hídricos anuais é apresentada na Figura 5.5.

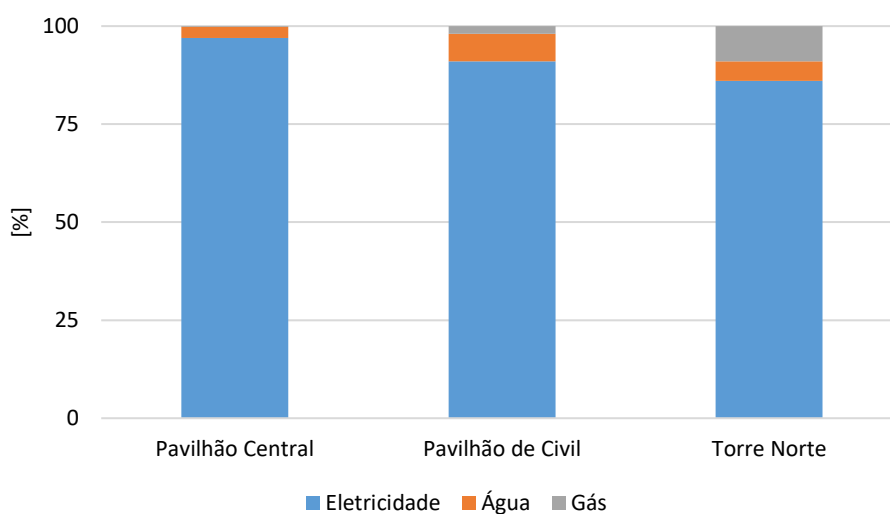


Figura 5.5 Repartição dos custos energéticos e hídricos no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.

Os custos de eletricidade correspondem a 97%, 91% e 86% dos custos energéticos e hídricos, do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, respetivamente. A percentagem dos custos de água foi de 7%, no Pavilhão de Civil. O gás representa 9% dos custos, na Torre Norte.

5.1.5 FREQUÊNCIAS RELATIVAS ACUMULADAS DOS CONSUMOS DE ELETRICIDADE DIÁRIOS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

Na Figura 5.6 estão identificados os consumos de eletricidade diários de 2016 e 2017, sob a forma de frequências relativas acumuladas. Os consumos de eletricidade caracterizam-se por um duplo 'S', indicativos de duas distribuições normais: uma relativa aos consumos de eletricidade nos dias úteis e outra, referente aos dias não úteis (fins-de-semana, feriados e encerramento do IST, no mês de agosto). Os dias não úteis representam cerca de 30% do total dos dias do ano. É neste ponto de corte que se observa a passagem de um 'S' para outro.

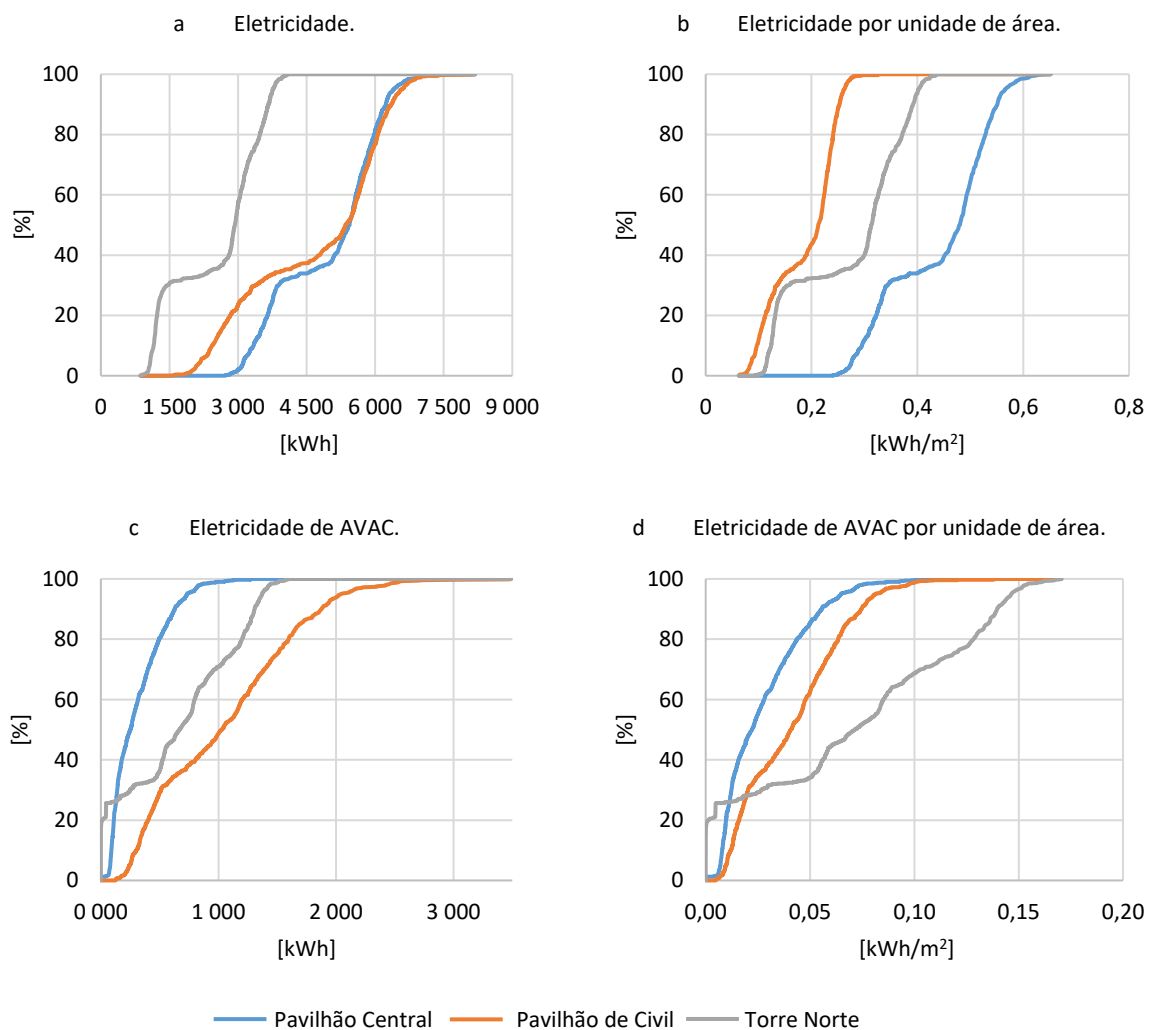


Figura 5.6 Frequências relativas acumuladas dos consumos de eletricidade diários totais e de AVAC, no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte.

Na Figura 5.6a estão representados os consumos de eletricidade diários totais. A distribuição dos consumos de eletricidade diários do Pavilhão Central revela um elevado grau de semelhança com o Pavilhão de Civil, apesar deste último possuir cerca de 2,5 vezes a área do primeiro. As diferenças ocorrem nos dias não úteis, quando o Pavilhão Central regista consumos superiores aos do Pavilhão de Civil, devido ao funcionamento ininterrupto do

Data Center. Na Figura 5.6b estão representados os consumos de eletricidade diários, por unidade de área. Os consumos de eletricidade são superiores no Pavilhão Central, comparativamente aos restantes edifícios. Nos dias não úteis, os consumos de eletricidade por unidade de área são similares no Pavilhão de Civil e na Torre Norte. Nos dias úteis, o Pavilhão de Civil possui os consumos de eletricidade diários mais baixos devido à elevada percentagem de áreas com baixos consumos como a garagem, os armazéns e o Centro de Congressos.

As frequências relativas acumuladas dos consumos de eletricidade diários de AVAC totais e por unidade de área são apresentadas nas Figuras 5.6c e 5.6d. Os consumos de AVAC não definem uma curva em forma de duplo 'S', devido ao sistema de AVAC estar desligado ao fim-de-semana. De realçar, o consumo de AVAC nulo, na Torre Norte, em 25% dos dias, contrariamente ao Pavilhão Central e ao Pavilhão de Civil (Figura 5.6c). Tais consumos de eletricidade de AVAC vão ao encontro de possíveis anomalias, nos relógios, como relatado nas auditorias anteriores [Auditoria ao Pavilhão Central (2017) e Auditoria ao Pavilhão de Civil (2015)].

No Pavilhão de Civil, a menor verticalidade dos consumos totais de AVAC é explicada por uma área cerca de duas vezes e meia superior às áreas do Pavilhão Central e da Torre Norte. Nos consumos de AVAC por unidade de área, a menor verticalidade é observada para a Torre Norte (Figura 5.6d). Tal facto deve-se à maior capacidade de adaptação do sistema de AVAC às cargas térmicas. Os consumos de AVAC diários por unidade de área do Pavilhão Central e do Pavilhão de Civil são similares (Figura 5.6d).

5.1.6 CONSUMOS HORÁRIOS DE ELETRICIDADE E HÍDRICOS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

A seleção dos dias, para comparar os consumos horários de eletricidade e água, teve por base a atividade intensa e as condições meteorológicas que exigiam cargas térmicas elevadas ao sistema de AVAC (Tabela 5.2). Os dias de análise foram 23 (sexta-feira), 24 (sábado) e 25 (domingo) de junho de 2017.

Tabela 5.2 Momento letivo, temperatura média e radiação média nos dias 23, 24 e 25 de junho de 2017.

Data	Momento letivo	Temperatura média [°C]	Radiação média [W/m ²]
23-06-2017	Período de exames	21,2	336,2
24-06-2017	Período de exames	19,9	225,2
25-06-2017	Período de exames	18,7	350,2

Os consumos horários de eletricidade totais e de AVAC para o Pavilhão de Civil, Pavilhão Central e Torre Norte, na sexta-feira, 23 de junho de 2017, são apresentados na Figura 5.7. A Figura 5.7a inclui, também, os consumos de água no Pavilhão de Civil. Os consumos de eletricidade e hídricos mais elevados ocorrem entre as 8h00 e as 18h00, nos dias úteis, com picos evidentes, às 15h00, no Pavilhão Central (eletricidade) e Pavilhão de Civil (água) (Figura 5.7a). No Pavilhão Central e no Pavilhão de Civil é observada uma diminuição dos consumos, à hora de almoço. Tal redução não é visível na Torre Norte.

Os consumos horários de eletricidade para o sistema de AVAC são apresentados na Figura 5.7b. O intervalo temporal dos consumos de AVAC é similar aos consumos totais. O Pavilhão Central apresenta uma diminuição dos consumos de AVAC, à hora de almoço, que não se verifica nos restantes edifícios. É, também, notório, um aumento dos consumos de AVAC, no turno da tarde, devido às maiores cargas térmicas a extrair. A Torre Norte

revela o sistema de AVAC a trabalhar próximo da sua potência máxima. Isto poderá ser indicativo da incapacidade do sistema em garantir as condições de conforto aos utilizadores.

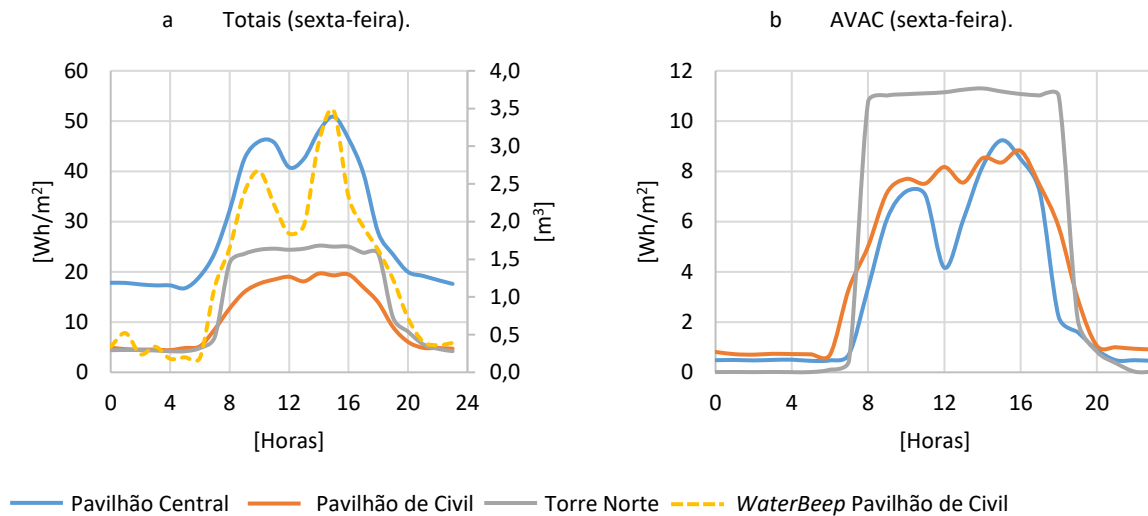


Figura 5.7 Consumos horários de eletricidade e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, na sexta-feira, 23 de junho de 2017.

A Figura 5.8 apresenta informação relativa ao sábado e domingo. Os consumos horários de eletricidade são constantes no Pavilhão Central e Torre Norte (Figura 5.8a). Os consumos horários da Torre Norte não são os esperados, visto que o edifício está encerrado ao fim-de-semana. Após consulta ao gestor do edifício, a justificação para este consumo teve por base um requerimento excecional para que a Torre Norte e o seu sistema de AVAC funcionassem, no sábado, dia 24 de junho de 2017. De realçar, também, os picos de consumo de água, no Pavilhão de Civil, às 10h00, 16h00 e 19h00. Ao nível dos consumos de eletricidade de AVAC, são observados consumos mais elevados entre as 8h00 e as 12h00 (Figura 5.8b).

Nas Figuras 5.8c e 5.8d estão representados os consumos horários de eletricidade e hídricos, no domingo, dia 25 de junho de 2017. Os padrões dos consumos horários de eletricidade totais (Figura 5.8c) e de AVAC (Figura 5.8d) são indicativos do encerramento dos edifícios, i.e., (1) consumos de eletricidade baixos no Pavilhão de Civil e Torre Norte e (2) consumos mais elevados no Pavilhão Central devido ao funcionamento constante do *Data Center* e respetivo sistema de refrigeração. O consumo do sistema de AVAC (Figura 5.8d) parece estar associado a falhas no relógio do sistema do Pavilhão de Civil (Relatório Auditoria, 2015a).

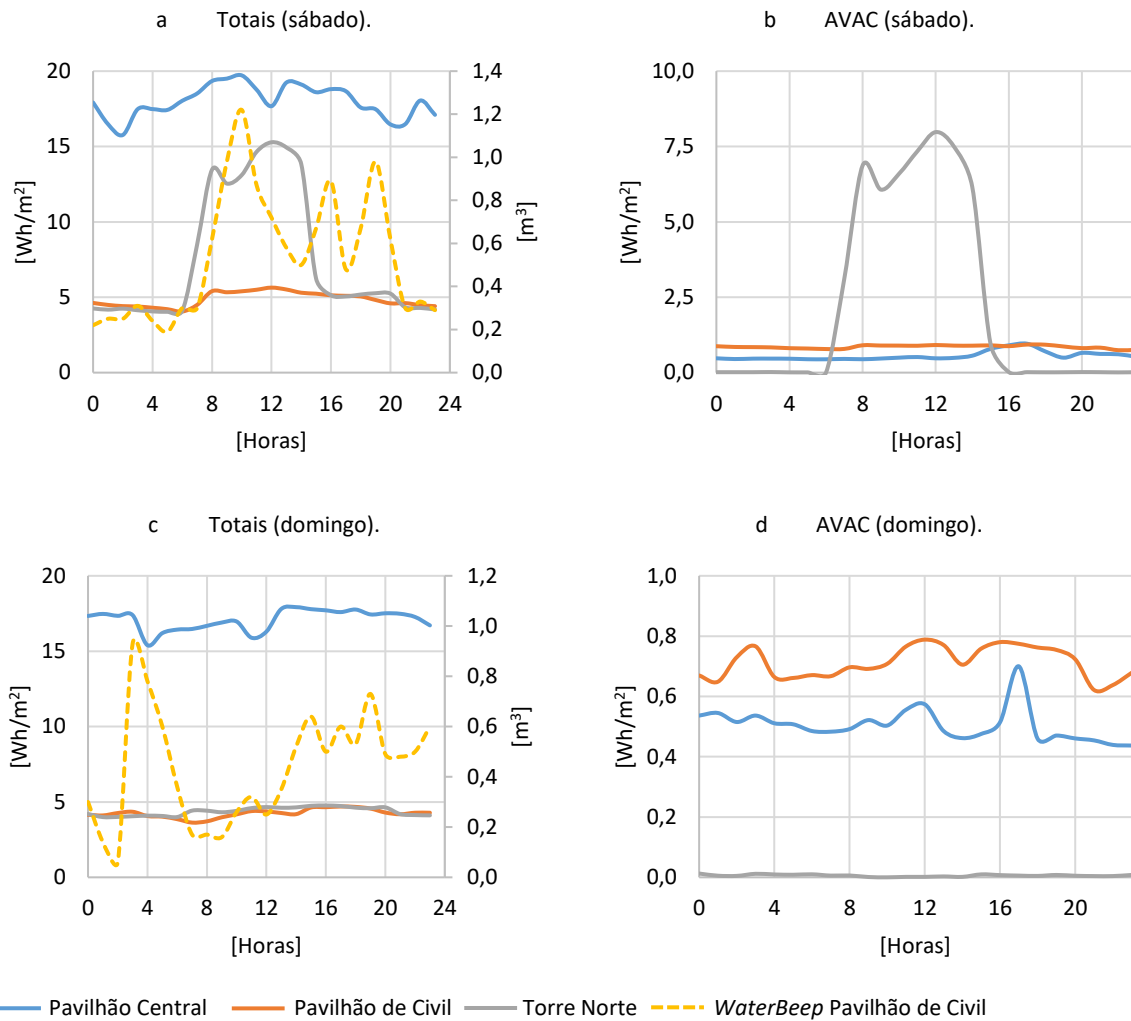


Figura 5.8 Consumos horários de eletricidade e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, no sábado, 24 de junho de 2017 e domingo, 25 de junho de 2017.

5.1.7 COMPARAÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE COM OUTROS ESTUDOS REVISTOS

Os consumos energéticos e hídricos dos edifícios são apresentados nas Figuras 5.9 a 5.11. No caso de um estudo reportar consumos de vários edifícios, o estudo é subdividido em alíneas, por exemplo, Chung et al. (2014a), Chung et al. (2014b), etc. O ano de construção do edifício e o clima são apresentados nas Tabelas 5.1A e 5.2A (Anexo D). Os consumos de energia anuais por unidade de área dos edifícios em análise e dos estudos revistos são apresentados na Figura 5.9. Os edifícios estão representados em função do tipo de utilização (administrativo, ciências, engenharia/investigação, misto e residência universitária). O intervalo de construção dos edifícios está compreendido entre 1927 e 2010; os edifícios estão distribuídos por cinco climas: Cfa, Csa, Cwb, Dwa e Bwh. O Pavilhão de Civil ($71 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$) e a Torre Norte ($118 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$) apresentam consumos de eletricidade anuais mais baixos do que os restantes edifícios. O Pavilhão Central apresenta consumos de eletricidade anuais similares aos edifícios estudados por Mata et al. (2014), Sesana et al. (2016) e Chung et al. (2014), este último, para o edifício construído em 1961, e consumos inferiores aos restantes edifícios dos estudos revistos.

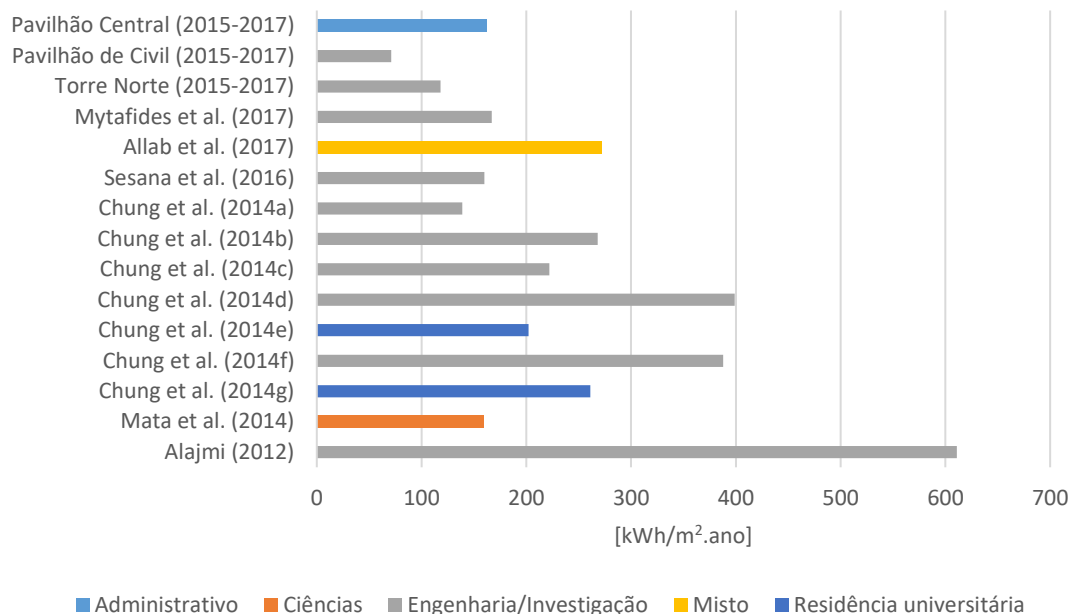


Figura 5.9 Consumos de energia anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos.

Os consumos de energia primária anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e dos artigos revistos são apresentados na Figura 5.10. Na Tabela 5.2A (Anexo D) são apresentados o ano de construção e o clima. O intervalo de construção está compreendido entre 1932 e 2013. Os edifícios estão distribuídos pelos climas Cfa, Cfb, Csa, Cwb e Dfb. O Pavilhão Central (402 kWh_{EP}/m².ano) apresenta consumos mais elevados do que a quase totalidade dos estudos revistos. Valores mais baixos são observados apenas quando se comparam os consumos do Pavilhão Central com os consumos dos estudos efetuados por Bourdeau et al. (2018) e Allab et al. (2017). O Pavilhão de Civil (173 kWh_{EP}/m².ano) e a Torre Norte (267 kWh_{EP}/m².ano) apresentam, também, consumos de energia primária anuais, por unidade de área, mais elevados do que a maioria dos edifícios dos estudos revistos.

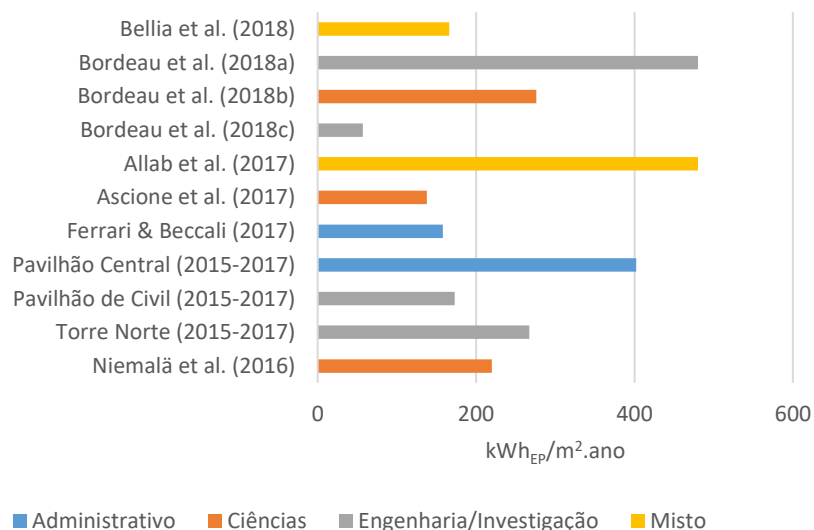


Figura 5.10 Consumos de energia primária anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos.

Bourdeau et al. (2018) reportam um edifício de engenharia/investigação construído em 2013, cujo consumo é três vezes inferior ao Pavilhão de Civil e mais de quatro vezes inferior ao da Torre Norte. Isto é devido à legislação

mais recente que exige que os edifícios sejam mais eficientes a nível energético e é indicativo do potencial de poupança energética dos edifícios do IST. Niemalä et al. (2016) referem que o mínimo nacional para os novos edifícios dedicados à educação na Finlândia é de 170 kWh_{EP}/m².ano. Nos três edifícios em análise apenas o Pavilhão de Civil está próximo deste valor.

Na Figura 5.11 são apresentados os consumos hídricos anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos. O Pavilhão Central, o Pavilhão de Civil e a Torre Norte têm consumos hídricos anuais de 0,29, 0,37 e 0,33 m³/m².ano, respetivamente. Os três edifícios do IST possuem consumos hídricos semelhantes, mas inferiores aos da média de 24 edifícios universitários reportados por Guan et al. (2016). Apenas o Pavilhão de Civil apresenta consumos superiores aos edifícios de artes e ciências analisados por Guan et al. (2016), na Noruega. Os consumos reportados pela Boston University, University of Colorado Boulder e University of California, Berkeley, são superiores aos dos edifícios em análise, mas possuem consumos hídricos anuais, por unidade de área, relativos a atividades desportivas e rega de jardins.

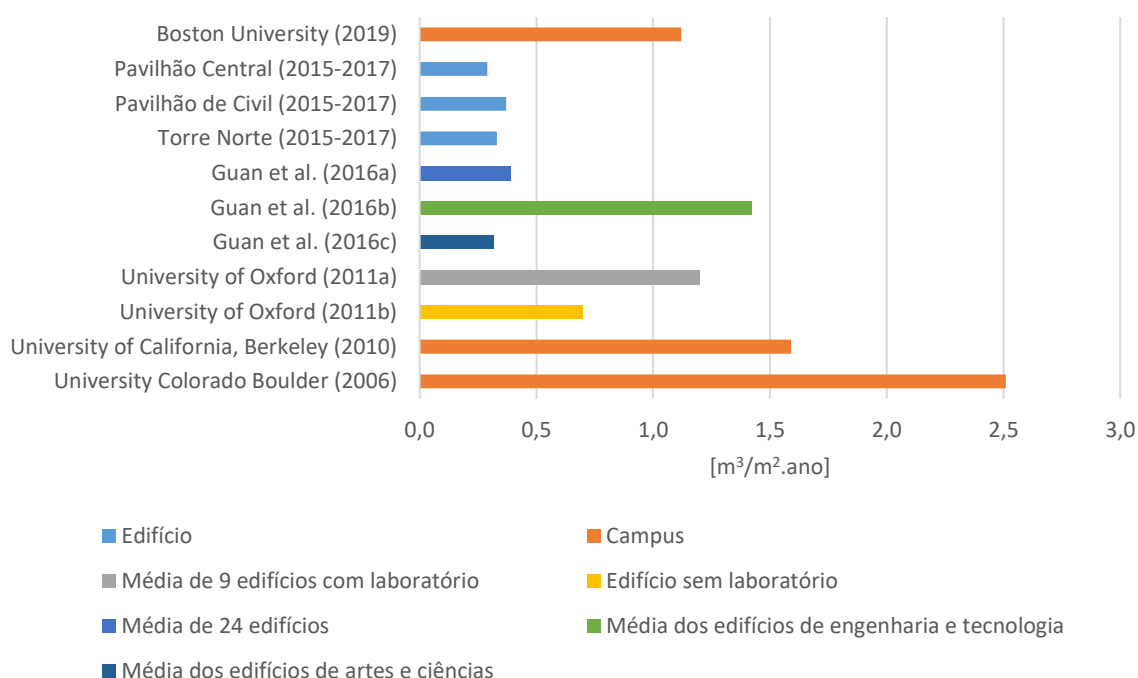


Figura 5.11 Consumos hídricos anuais, por unidade de área, dos edifícios em análise e estudos revistos.

5.1.8 COMPARAÇÃO DE ABORDAGENS E DISCUSSÃO

A análise do desempenho energético e hídrico de um edifício exige a normalização dos dados por unidade de área (Abdelalim et al., 2015). A isto acresce a variação nos consumos associada ao ano de construção (Ouf & Issa, 2017), às necessidades de aquecimento/arrefecimento (Bonnet et al., 2002), à ocupação e comportamentos dos utilizadores (Bourdeau et al., 2018), à gestão (Gul & Patidar, 2015) e ao tipo de utilização (Khoshbakht et al., 2018). É no contexto destas limitações que os resultados da análise gráfica anterior devem ser interpretados.

O Pavilhão Central evidenciou consumos energéticos três vezes superiores aos de um edifício administrativo italiano (Ferrari & Beccali, 2017). Estas diferenças, em edifícios de um clima semelhante, evidenciam que a

classificação 'administrativo' é pouco descritiva da especificidade de utilização energética. Os consumos elevados do Pavilhão Central estão associados à DSI e ao *Data Center*, utilizações que não se associam, necessariamente, a um edifício 'administrativo'. Relativamente aos consumos energéticos da categoria 'Engenharia/Investigação', observa-se um desvio padrão de 166 kWh/m².ano, nos consumos de energia, e de 179 kWh_{EP}/m².ano, nos consumos de energia primária. Esta variação é também ilustrativa de que a classificação engenharia/investigação é redutora da atividade desenvolvida. O Pavilhão Central apresentou consumos superiores ao edifício administrativo revisto e o Pavilhão de Civil e a Torre Norte apresentaram consumos inferiores à média dos edifícios de engenharia/investigação.

A idade do edifício teve um efeito significativo no consumo de energia em edifícios escolares canadianos (Ouf & Issa, 2017). As escolas mais novas consumiram menos gás, mas mais eletricidade do que as escolas mais antigas. Na Finlândia, os edifícios escolares mais novos apresentaram, também, menores necessidades de aquecimento (Sekki et al., 2015); contudo, o consumo de eletricidade variou significativamente entre os edifícios. Ainda no Luxemburgo, os edifícios mais novos consumiram mais energia do que os edifícios mais velhos (Thewes et al., 2014). Os edifícios de Investigação e Desenvolvimento apresentam, também, os consumos de eletricidade e água mais elevados (Bonnet et al., 2011). Os dados recolhidos em 80 *campi* universitários australianos permitiram concluir que os edifícios de Ciências apresentaram os consumos por unidade de área mais elevados (164 kWh/m²/year) e os edifícios de Saúde, os consumos mais baixos (136 kWh/m²/year) (Khoshbakht et al., 2018). Os edifícios de investigação foram, também, os que consumiram mais energia, com valores médios de consumo por unidade de área três vezes mais elevados do que os gabinetes dos docentes e edifícios administrativos, e duas vezes e meia mais elevados do que a biblioteca, edifícios para lecionação e edifícios mistos.

No que diz respeito aos consumos de água dos edifícios universitários, a sua variação é ainda superior à verificada nos consumos de eletricidade. Isto é devido à disponibilidade e ao custo da água, em cada País, e à especificidade de cada edifício (Bonnet et al., 2002). Os edifícios em análise possuem consumos hídricos baixos relativamente à média dos edifícios universitários revistos. Porém, os consumos são os esperados face aos espaços constituintes e aos consumos indicados para cada um deles (Bonnet et al., 2002). Assim como nos consumos energéticos, a comparação dos consumos de água, por unidade de área, entre edifícios, é apenas indicativa da eficiência hídrica se incidir sobre edifícios com o mesmo tipo de atividades consumidoras de água.

5.2 MODELAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

5.2.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E COMPARAÇÃO DE MÉDIAS

Os valores médios, os desvios padrão e os valores mínimos e máximos dos consumos de eletricidade diários no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, são apresentados na Tabela 5.3. Os valores médios dos consumos de eletricidade no Pavilhão Central e Torre Norte são superiores na estação de arrefecimento ($p < 0,001$). O oposto é observado no Pavilhão de Civil, isto é, os consumos de eletricidade são superiores na estação de aquecimento ($p = 0,006$). De realçar, também, que os desvios padrão e os consumos máximos de eletricidade são mais elevados na estação de arrefecimento, nos três edifícios.

Tabela 5.3 Consumos de eletricidade diários no Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento.

Edifício	Estação						<i>p</i>
	Aquecimento (kWh) [†]			Arrefecimento (kWh)			
	n	$\bar{x} \pm dp$	Mín-Máx	n	$\bar{x} \pm dp$	Mín-Máx	
Pavilhão Central	238	5 667±429	4 301-6 712	233	5 829±503	3 819-7 373	< 0.001
Pavilhão de Civil	238	5 828±599	3 816-7 398	233	5 664±678	3 277-8 184	0.006
Torre Norte	238	2 986±215	2 348-3 704	233	3 479±332	1 787-4 087	< 0.001

[†] \bar{x} , média; dp, desvio padrão; Mín, mínimo; Máx, máximo.

As variáveis meteorológicas utilizadas nos modelos de regressão são sumariadas na Tabela 5.4. A temperatura média diária ($p < 0,001$) e a radiação média diária ($p < 0,001$) são mais elevadas na estação de arrefecimento, comparativamente à estação de aquecimento. O vento médio diário ($p = 0,006$), a humidade relativa ($p < 0,001$) e a precipitação diária ($p < 0,001$) são mais elevados na estação de aquecimento.

Tabela 5.4 Valores médios, desvio padrão e intervalo (mínimo e máximo) para a temperatura média diária, vento médio diário, radiação média diária, humidade relativa e precipitação diária.

Variáveis	Estação						<i>p</i>
	Aquecimento			Arrefecimento			
	n	$\bar{x} \pm dp$	Mín-Máx	n	$\bar{x} \pm dp$	Mín-Máx	
Temperatura média diária (°C)	238	12,71±2,20	5,81-21,85	233	19,75±2,61	13,65-28,06	< 0,001
Vento médio diário (m/s)	238	4,14±2,18	0,00-9,54	233	3,60±2,14	0,00-8,40	0,006
Radiação média diária (W/m ²)	238	133,17±69,06	7,77-340,98	233	265,97±70,10	44,95-363,13	< 0,001
Humidade relativa (%)	238	65,67±12,04	26,37-90,14	233	53,32±12,63	20,87-82,27	< 0,001
Precipitação diária (mm)	238	27,42±61,9	0,00-442,60	233	5,07±22,27	0,00-194,30	< 0,001

[†] \bar{x} , média; dp, desvio padrão; Mín, mínimo; Máx, máximo.

5.2.2 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Os modelos de regressão para os consumos energéticos diários, no Pavilhão Central, são apresentados na Tabela 5.5. A temperatura média diária, o vento e a radiação são preditores significativos dos consumos de eletricidade diários, em ambas as estações. O contributo mais forte na explicação da variância nos consumos de eletricidade diários, quando a variância explicada pelas outras variáveis é controlada, é-nos dado pela temperatura média diária. Os consumos de eletricidade diários são, também, mais elevados à terça-feira, comparativamente à sexta-feira. Resultados similares são observados à quarta-feira, na estação de aquecimento. Os consumos de eletricidade diários são mais baixos no período de férias dos alunos. Na estação de arrefecimento, a precipitação é um preditor significativo dos consumos de eletricidade diários. Os consumos de eletricidade diários são mais elevados à segunda-feira, comparativamente à sexta-feira, e mais baixos no período de aulas, comparativamente ao período de exames. Sinais negativos nos coeficientes de regressão são observados na temperatura média diária e radiação (estação de aquecimento). Os modelos de regressão explicam 34,2% e 41,5% da variância dos consumos de eletricidade diários, nas estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

Tabela 5.5 Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários no Pavilhão Central: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.

Pavilhão Central	Estação					
	Aquecimento			Arrefecimento		
	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β
Temperatura	-78,43	11,36	-0,40***	80,81	10,69	0,44***
Vento	32,09	11,59	0,16**	28,94	12,05	0,13*
Radiação	-1,25	0,47	-0,20**	1,45	0,44	0,21**
Humidade relativa	-0,49	2,47	-0,001	-2,13	2,17	-0,06
Precipitação	0,40	0,39	0,06	2,54	1,18	0,12*
Dias da semana [†]						
Segunda-feira	84,55	75,45	0,08	157,05	78,19	0,13*
Terça-feira	167,37	74,84	0,16*	195,25	78,17	0,16*
Quarta-feira	202,63	73,39	0,19**	129,13	76,80	0,11
Quinta-feira	140,87	73,41	0,13	135,9	77,33	0,11
Momento letivo [‡]						
Período de aulas	-24,57	66,52	-0,03	-182,73	75,94	-0,19*
Férias dos alunos	-346,42	81,08	-0,29***	-107,80	70,74	-0,11

[†]Referência: sexta-feira; [‡]referência: período de exames; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: $R^2 = 0,34$ (aquecimento); $R^2 = 0,42$ (arrefecimento).

A tabela 5.6 apresenta os parâmetros estimados e os erros padrão dos modelos de regressão para o Pavilhão de Civil. A temperatura média diária está significativamente associada aos consumos de eletricidade diários. Na estação de aquecimento, quanto mais elevada é a temperatura média diária, mais baixos são os consumos de eletricidade diários. Na estação de arrefecimento, quanto mais elevada é a temperatura média diária, mais elevados são os consumos. A humidade relativa é, também, um preditor com significado estatístico. Valores mais elevados de humidade relativa estão associados a consumos de eletricidade diários mais baixos. A radiação está negativamente associada aos consumos de eletricidade diários, na estação de aquecimento. Os sinais dos coeficientes de regressão para a totalidade dos preditores meteorológicos são negativos, na estação de aquecimento. Relativamente aos preditores categóricos, os consumos de eletricidade diários são mais elevados à terça-feira e à quarta-feira, comparativamente à sexta-feira. Os consumos de eletricidade diários são, também, mais elevados à segunda-feira, relativamente à sexta-feira, na estação de arrefecimento. O preditor mais forte na explicação da variância dos consumos de eletricidade diários, quando as outras variáveis são controladas na análise, é o momento letivo. Os consumos de eletricidade diários são mais baixos no período de férias dos alunos, quando comparados com o período de exames. De forma similar, os consumos são mais baixos no período de aulas, comparativamente ao período de exames, na estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento, os consumos são mais elevados quando ocorrem eventos na totalidade do Centro, em grande parte do Centro, incluindo o auditório e nas salas e *Hall's*. Os modelos explicam 42,5% (estação de aquecimento) e 60,8% (estação de arrefecimento) da variação nos consumos de eletricidade diários.

Tabela 5.6 Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários no Pavilhão de Civil: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.

Pavilhão de Civil	Estação					
	Aquecimento			Arrefecimento		
	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β
Temperatura	-79,48	15,40	-0,29***	87,88	11,97	0,36***
Vento	-9,96	15,61	-0,04	18,61	14,09	0,06
Radiação	-1,82	0,67	-0,21**	0,77	0,50	0,08
Humidade relativa	-9,07	3,31	-0,18**	-5,08	2,45	-0,10*
Precipitação	-0,21	0,52	-0,02	2,27	1,32	0,08
Dias da semana [†]						
Segunda-feira	173,80	100,01	0,11	217,39	86,99	0,14*
Terça-feira	221,76	99,33	0,15*	241,16	87,74	0,15**
Quarta-feira	207,62	97,04	0,14*	174,20	86,18	0,11*
Quinta-feira	150,98	97,62	0,10	153,93	87,08	0,10
Momento letivo [‡]						
Período de aulas	-245,58	95,20	-0,19*	-61,48	87,53	-0,05
Férias dos alunos	-975,63	107,41	-0,59***	-984,92	78,93	-0,74***
Eventos ^{††}						
A totalidade do Centro	2,52	93,19	0,00	286,73	75,88	0,19***
Grande parte do Centro incluindo o auditório	168,59	99,71	0,10	423,91	76,32	0,26***
Salas, <i>Hall's</i> e eventos pós-laborais incluindo o auditório	411,46	286,82	0,08	a	a	a
Salas e <i>Hall's</i>	123,25	110,30	0,06	377,65	97,19	0,18***
Eventos pós-laborais incluindo o auditório	471,16	249,65	0,10	a	a	a

[†]Referência: sexta-feira; [‡]referência: período de exames; ^{††}referência: sem eventos; a, parâmetros não estimados devido à inexistência de eventos nestes espaços; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: $R^2 = 0,43$ (aquecimento); $R^2 = 0,61$ (arrefecimento).

Os resultados dos modelos de regressão para a Torre Norte são apresentados na Tabela 5.7. A temperatura média diária, a radiação e a humidade relativa são preditores significativos dos consumos elétricos diários. Sendo mais específico, os consumos de eletricidade diários são mais elevados, quanto mais alta é a temperatura média diária. Pelo contrário, os consumos são mais baixos, quanto mais elevada é a radiação e a humidade relativa. O vento está positivamente associado aos consumos de eletricidade diários, na estação de arrefecimento, i.e., à medida que o vento aumenta, aumentam os consumos de eletricidade diários. O preditor mais forte dos consumos de eletricidade diários é a temperatura média diária, quando controladas as restantes variáveis no modelo. Na estação de arrefecimento, os consumos energéticos diários são mais elevados à segunda-feira e à terça-feira, comparativamente à sexta-feira. Em ambas as estações, os consumos de eletricidade diários são mais baixos nos períodos de férias dos alunos, comparativamente ao período de exames. Ainda na estação de aquecimento, os consumos de eletricidade diários são mais elevados em período de aulas, comparativamente ao período de exames. Os modelos de regressão explicam 35,7% de variância nos consumos elétricos diários, na estação de aquecimento e 27,2%, na estação de arrefecimento.

Tabela 5.7 Sumário da análise de regressão linear múltipla para os preditores dos consumos de eletricidade diários na Torre Norte: estação de aquecimento e estação de arrefecimento.

Torre Norte	Estação					
	Aquecimento			Arrefecimento		
	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β	<i>B</i>	<i>SE B</i>	β
Temperatura média diária	46,02	5,62	0,47***	44,64	7,77	0,38***
Vento	-1,50	5,74	-0,02	31,17	8,70	0,22***
Radiação	-0,65	0,23	-0,21**	-1,32	0,32	-0,30***
Humidade relativa	-2,84	1,22	-0,16**	-5,61	1,59	-0,23**
Precipitação diária	0,11	0,19	0,03	-1,45	1,00	-0,09
Dias da semana [†]						
Segunda-feira	-10,00	37,34	-0,02	128,73	56,10	0,17*
Terça-feira	35,40	37,04	0,07	115,19	56,48	0,15*
Quarta-feira	26,58	36,32	0,05	92,84	55,04	0,12
Quinta-feira	32,57	36,33	0,06	81,03	55,26	0,11
Momento letivo [‡]						
Período de aulas	78,86	32,92	0,17*	-104,75	54,69	-0,17
Férias dos alunos	-108,52	40,13	-0,18**	-169,14	50,97	-0,27**

[†]Referência: sexta-feira; [‡]referência: período de exames; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: $R^2 = 0,36$ (aquecimento); $R^2 = 0,27$ (arrefecimento).

5.2.3 REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

A importância de cada preditor na construção das redes neuronais artificiais para predição dos consumos de eletricidade diários do Pavilhão Central é apresentada na Tabela 5.8. Os parâmetros dos modelos são apresentados no Anexo D, Tabelas 5.3A e 5.4A. Em ambas as estações, a temperatura é o preditor mais importante. A radiação é o segundo preditor mais importante na estação de aquecimento e o terceiro, na estação de arrefecimento. Nesta última, a precipitação foi o segundo preditor mais importante. O momento letivo e a humidade relativa tiveram importâncias similares na estação de aquecimento e arrefecimento. O dia da semana foi o preditor mais importante na estação de arrefecimento. O vento teve uma importância superior na estação de arrefecimento, comparativamente à estação de aquecimento. As redes neuronais artificiais explicam 51,48% e 51,15% dos consumos na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento, respetivamente.

Tabela 5.8 Importância dos preditores nas redes neuronais artificiais, no Pavilhão Central.

Variável	Estação de Aquecimento		Estação de Arrefecimento	
	Importância	Importância normalizada [%]	Importância	Importância normalizada [%]
Dia da semana	0,058	15,9	0,071	27,4
Momento letivo	0,152	41,5	0,102	39,4
Temperatura	0,367	100,0	0,258	100,0
Vento	0,109	29,6	0,116	45,1
Radiação	0,172	47,0	0,196	76,2
Humidade Relativa	0,077	20,9	0,055	21,5
Precipitação	0,065	17,7	0,202	78,3

A importância das variáveis independentes na construção dos modelos para o Pavilhão de Civil é apresentada na Tabela 5.9. Os pesos sinápticos e os desvios estimados pelo algoritmo de retropropagação do erro para as redes neurais artificiais são apresentados no Anexo D, Tabelas 5.5A e 5.6A. A temperatura foi o preditor mais importante em ambas as estações. O momento letivo foi o segundo preditor mais importante, na estação de arrefecimento e o terceiro na estação de aquecimento. A precipitação foi o segundo preditor mais importante na estação de arrefecimento. A radiação e a humidade relativa foram mais importantes na estação de aquecimento do que na estação de arrefecimento. Por outro lado, os eventos e o vento foram mais importantes na estação de arrefecimento. As redes neurais alcançaram uma explicação da variância dos consumos de eletricidade diários do Pavilhão de Civil de 61,36% (estação de aquecimento) e 68,23% (estação de arrefecimento).

Tabela 5.9 Importância dos preditores nas redes neurais artificiais, no Pavilhão de Civil.

Variável	Estação de Aquecimento		Estação de Arrefecimento	
	Importância	Importância normalizada [%]	Importância	Importância normalizada [%]
Dia da semana	0,073	33,8	0,057	29,1
Momento letivo	0,186	85,9	0,183	92,8
Eventos	0,073	33,8	0,094	47,4
Temperatura	0,216	100,0	0,198	100,0
Vento	0,053	24,6	0,070	35,4
Radiação	0,186	86,1	0,120	60,8
Humidade Relativa	0,160	74,0	0,097	48,8
Precipitação	0,052	24,0	0,181	91,8

Na Tabela 5.8 são apresentados os contributos dos vários preditores na estimação dos consumos de eletricidade diários na Torre Norte. Os modelos obtidos das redes neurais são apresentados no Anexo D, Tabelas 5.7A e 5.8A. A temperatura foi a variável mais forte na explicação dos consumos de eletricidade diários, seguida da humidade relativa e da radiação, em ambas as estações. O momento letivo, o vento e a precipitação tiveram importância similar, na estação de aquecimento e arrefecimento. O dia da semana foi mais importante na estação de arrefecimento, comparativamente à estação de aquecimento. As redes neurais obtiveram um R^2 de 51,24% na estação de aquecimento e de 36,62% na estação de arrefecimento.

Tabela 5.10 Importância dos preditores nas redes neurais artificiais, na Torre Norte.

Variável	Estação de Aquecimento		Estação de Arrefecimento	
	Importância	Importância normalizada [%]	Importância	Importância normalizada [%]
Dia da semana	0,074	23,9	0,102	40,4
Momento letivo	0,110	35,4	0,113	44,7
Temperatura	0,311	100,0	0,254	100,0
Vento	0,125	40,4	0,112	44,1
Radiação	0,136	43,8	0,159	62,8
Humidade Relativa	0,147	47,3	0,160	63,3
Precipitação	0,096	31,0	0,099	39,1

5.2.4 REGRESSÃO COM ERROS ARMA

Os parâmetros estimados e o significado estatístico dos preditores utilizados no modelo de regressão com erros ARMA, para o Pavilhão Central, são apresentados na Tabela 5.11. Os consumos de eletricidade diários são mais elevados quanto mais elevada é a temperatura média diária transformada e são, também, mais elevados, no período de aulas, férias dos alunos e períodos de exames, comparativamente ao encerramento do IST. A qualidade de ajustamento do modelo é elevada ($R^2 = 0,88$).

Tabela 5.11 Sumário da análise de regressão com erros ARMA no Pavilhão Central.

Variáveis	Componente	Desfasamento	Estimativa	SE
Consumo de eletricidade diário	Constante		3408,31***	974,34
	AR	Lag 1	0,57***	0,03
	AR, sazonal	Lag 1	1,00***	0,01
	MA, sazonal	Lag 1	0,98***	0,02
Temperatura média diária transformada	Numerador	Lag 0	60,99***	9,08
Momento letivo [†]				
Período de aulas	Numerador	Lag 0	1465,73***	66,75
Férias dos alunos	Numerador	Lag 0	1323,80***	71,01
Período exames	Numerador	Lag 0	1625,48***	86,13

[†]Referência: encerramento do IST; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: Periodicidade: 7 dias; $R^2 = 0,88$.

A qualidade de predição dos consumos de eletricidade diários, ao longo de uma semana, é apresentada na Figura 5.12. O valor de MAPE para as previsões é de 10,32%. O valor da estatística U (Theil) é inferior a 1 ($U = 0,299$), o que significa que a qualidade do modelo básico é inferior ao modelo de previsão avaliado.

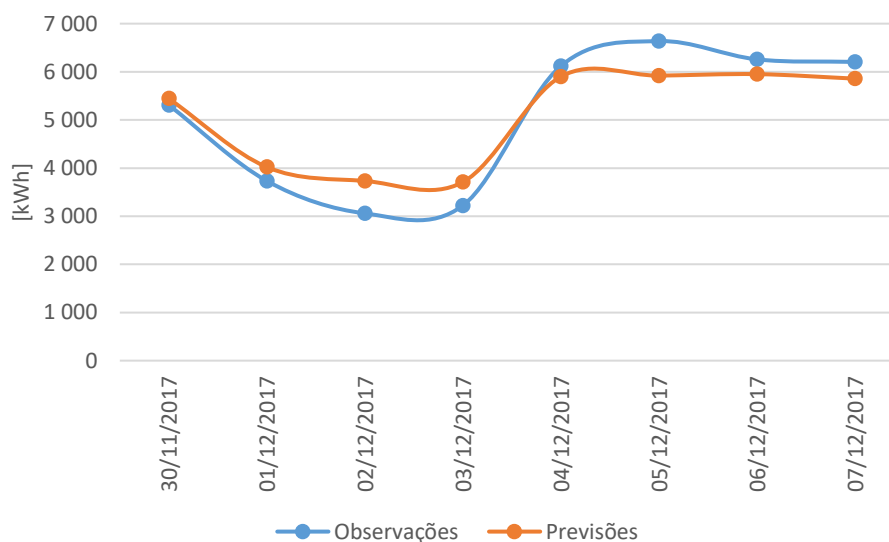


Figura 5.12 Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA no Pavilhão Central.

Os parâmetros do modelo para o Pavilhão de Civil são apresentados na Tabela 5.12. Os consumos de eletricidade diários são mais elevados quanto mais alta é a temperatura média diária transformada e há variação em função do momento letivo, isto é, os consumos de eletricidade diários são mais elevados no período de aulas, férias dos alunos, período de exames e feriados, comparativamente ao encerramento do IST. Os consumos de eletricidade diários são também mais elevados quando se realizam eventos no Centro ou parte do Centro de Congressos,

comparativamente aos dias em que não se realizam eventos. A qualidade de ajustamento do modelo é elevada ($R^2 = 0,92$).

Tabela 5.12 Sumário da análise de regressão com erros ARMA no Pavilhão de Civil.

Variáveis	Componente	Desfasamento	Estimativa	SE
Consumo de eletricidade diário	AR	Lag 1	0,61***	0,03
	AR, sazonal	Lag 1	1,00***	0,01
	MA, sazonal	Lag 1	0,88***	0,02
Temperatura média diária transformada	Numerador	Lag 1	54,871***	
Momento letivo [†]				
Período de aulas	Numerador	Lag 0	3120,80***	172,80
Férias dos alunos	Numerador	Lag 0	2432,69***	163,04
Período de exames	Numerador	Lag 0	3146,17***	179,68
Feriados	Numerador	Lag 0	1486,06***	174,88
Eventos no Centro de Congressos [‡]				
A totalidade do Centro	Numerador	Lag 0	273,97***	57,93
Grande parte do Centro incluindo o auditório	Numerador	Lag 0	227,19***	55,67

[†]Referência: encerramento do IST; [‡]referência: sem eventos * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: Periodicidade: 7 dias; $R^2 = 0,92$.

Os consumos de eletricidade diários observados e previstos são representados graficamente na Figura 5.13. O valor de MAPE para as previsões é 8,76%. A qualidade de predição do modelo é elevada ($U = 0,241$).

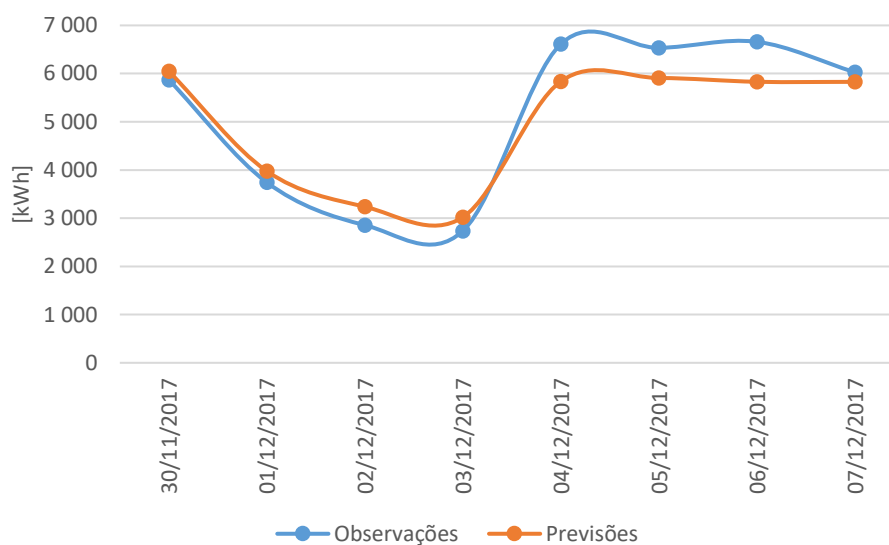


Figura 5.13 Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA no Pavilhão de Civil.

Os parâmetros do modelo de regressão com erros ARMA na Torre Norte são apresentados na Tabela 5.13. O modelo inclui a temperatura média diária transformada e o momento letivo. Ambos alcançam significado estatístico. À semelhança do modelo para o Pavilhão de Civil, os consumos de eletricidade diários são mais elevados no período de aulas, férias dos alunos, períodos de exames e feriados, comparativamente ao encerramento do IST. A qualidade de ajustamento do modelo é elevada ($R^2 = 0,91$).

Tabela 5.13 Sumário da análise de regressão com erros ARMA na Torre Norte.

Variáveis	Componente	Desfasamento	Estimativa	SE
Consumo de eletricidade diário	AR	Lag 1	-0,43*	0,04
	AR, sazonal	Lag 1	0,99***	0,04
	MA, sazonal	Lag 1	0,65***	0,03
Temperatura média diária	Numerador	Lag 0	28,64***	5,27
Momento letivo [†]				
Período de aulas	Numerador	Lag 0	1786,20***	95,73
Férias dos alunos	Numerador	Lag 0	1658,76***	86,94
Período de exames	Numerador	Lag 0	1860,25***	99,41
Feridos	Numerador	Lag 0	1027,70***	98,60

[†]Referência: encerramento do IST; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Nota: Periodicidade: 7 dias; $R^2 = 0,91$.

Os consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo, na Torre Norte, são representados graficamente na Figura 5.14. O valor de MAPE para as previsões é 12,95%. A qualidade de predição do modelo é elevada ($U = 0,231$).

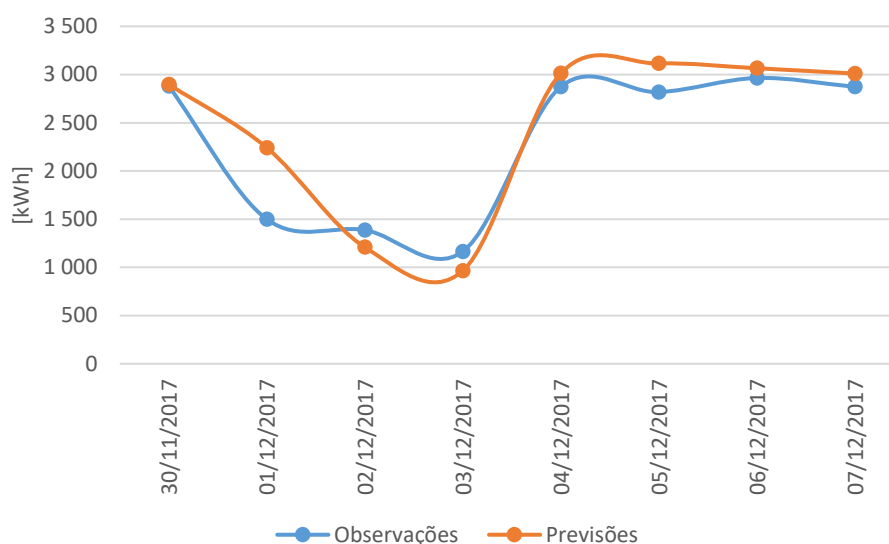


Figura 5.14 Consumos de eletricidade diários observados e previstos pelo modelo de regressão com erros ARMA na Torre Norte.

5.2.5 INTERPRETAÇÃO DO EFEITO DOS PREDITORES NO CONSUMO DE ELETRICIDADE DOS EDIFÍCIOS EM ANÁLISE

No Pavilhão Central e na estação de aquecimento, o aumento da temperatura e da radiação tiveram como consequência a redução dos consumos de eletricidade por reduzir as necessidades de aquecimento. A radiação está, também, relacionada com o número de horas solares, pelo que o seu aumento deve diminuir a utilização do sistema de iluminação artificial (Suehrcke et al., 2013). No Pavilhão de Civil, a temperatura teve o efeito esperado nos consumos de eletricidade, em ambas as estações climáticas. O coeficiente β foi superior na estação de arrefecimento. Resultados similares foram observados por Vilhena (2013) e Marçal (2015). Na Torre Norte, os resultados de alguns preditores não têm explicação teórica. Isto poderá justificar-se por não ter sido contabilizado o consumo de gás relativo ao aquecimento da água do sistema de AVAC e a necessidade de arrefecimento no bar. De igual modo, na estação de arrefecimento, tais resultados poderão ser justificados pelo funcionamento do sistema de climatização na sua capacidade máxima, durante grande parte da estação (Silva,

2008). A associação da temperatura ao consumo de eletricidade foi investigada em alguns estudos. Bourdeau et al. (2018) observaram uma relação mais forte entre o consumo elétrico e a ocupação do edifício, comparativamente à relação entre o consumo elétrico e a temperatura do ar exterior. O consumo de eletricidade foi, também, afetado pela temperatura exterior, quando esta foi superior à temperatura interior (Yoshida et al., 2017). A relação entre a temperatura e o consumo de eletricidade foi reportada por Khoshbakht et al. (2018) em 80 *campi* universitários. Os consumos de eletricidade foram mais altos em temperaturas elevadas ou baixas, devido às necessidades de arrefecimento e aquecimento dos edifícios.

O vento afeta o volume e a velocidade com que o ar entra nos edifícios (Borgesson & Brager, 2008). No Pavilhão Central, o coeficiente de regressão foi positivo para ambas as estações. Na estação de aquecimento, o aumento do vento eleva as renovações por hora, o que implica maiores necessidades de aquecimento. Na estação de arrefecimento ocorre o oposto, ou seja, mais renovações por hora implicam menos necessidades de arrefecimento. No entanto, muito vento leva a que os utilizadores fechem as janelas (Borgesson & Brager, 2008). Assim, na estação de aquecimento, o vento aumentou as necessidades de aquecimento resultando no aumento do consumo de eletricidade; na estação de arrefecimento é provável que os utilizadores tenham fechado as janelas, em dias de vento excessivo, aumentando as necessidades de arrefecimento. No Pavilhão de Civil, a humidade relativa obteve o sinal esperado, na estação de aquecimento e uma relação espúria, na estação de arrefecimento. Na estação de aquecimento, o aumento da humidade relativa levou a uma maior sensação térmica dos utilizadores, reduzindo as necessidades de aquecimento, como sugerido por Berglund (1998). Os eventos no Centro de Congressos não aumentaram os consumos energéticos, na estação de aquecimento, ao contrário do que acontece, na estação de arrefecimento, quando as temperaturas exteriores são mais elevadas.

Os consumos de eletricidade, no Pavilhão Central, à sexta-feira, foram mais baixos do que à terça-feira e quarta-feira, na estação de aquecimento. Tal facto é indicativo de uma diminuição do nível de atividade no edifício, à sexta-feira. Os consumos de eletricidade, no período de exames, foram superiores aos do período de férias dos alunos, na estação de aquecimento e mais elevados do que no período de aulas, na estação de arrefecimento. No período de exames há um aumento do consumo energético porque as salas deste edifício são muito requisitadas para a realização de exames e, possivelmente, porque há um aumento das atividades de secretaria. No Pavilhão de Civil, os consumos de eletricidade, na estação de aquecimento, foram superiores à terça-feira e à quarta-feira, relativamente a sexta-feira. Na estação de arrefecimento, os consumos foram superiores de segunda a quarta-feira, comparativamente aos consumos de sexta-feira. É, assim, evidente uma diminuição do nível de atividade do edifício, no último dia da semana. No que diz respeito ao momento letivo, os consumos foram superiores no período de exames. Na estação de arrefecimento, os consumos foram superiores no período de exames, relativamente às férias dos alunos. É notório que no período de exames há um aumento do nível de atividade no edifício, que é justificado pelo elevado número de alunos. Na Torre Norte, os consumos de eletricidade foram mais baixos à sexta-feira, na estação de arrefecimento. A redução de consumos está associada a um decréscimo no nível de atividade no edifício, que não se verifica na estação de aquecimento, provavelmente, devido a uma maior atividade de investigação. Os consumos de eletricidade foram mais reduzidos nas férias de alunos devido à não utilização dos espaços dedicados à lecionação. Na estação de

aquecimento, os consumos foram superiores no período de aulas, relativamente ao período de exames, o que revela mais uso dos espaços de lecionação para aulas do que para exames. A variação no consumo de eletricidade em função do dia da semana foi igualmente reportada por Raatikainen et al. (2016) em seis edifícios escolares na cidade de Kuopio, na Finlândia. Os consumos de eletricidade mais elevados foram observados à quarta-feira e os mais baixos aos sábados e domingos, refletindo o maior consumo nos dias de atividade letiva. Relativamente ao momento letivo, Yoshida et al. (2017) reportaram exigências elétricas mais acentuadas no verão e no inverno.

Os coeficientes de regressão (β 's) dos vários preditores são representados nas Figuras 5.15 e 5.16. Os asteriscos assinalam o significado estatístico dos preditores: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Efeitos com significado estatístico são observados na quase totalidade dos preditores. Os coeficientes de regressão são similares, à exceção do período de aulas, férias de alunos e períodos de exames. O momento letivo parece ter maior impacto no consumo de eletricidade, consoante a percentagem de área dedicada aos alunos. A percentagem de espaços/área é maior no Pavilhão de Civil, seguido do Pavilhão Central e Torre Norte. É por esta razão que o R^2 obtido nos modelos de regressão é paralelo à percentagem de espaços alocada aos alunos.

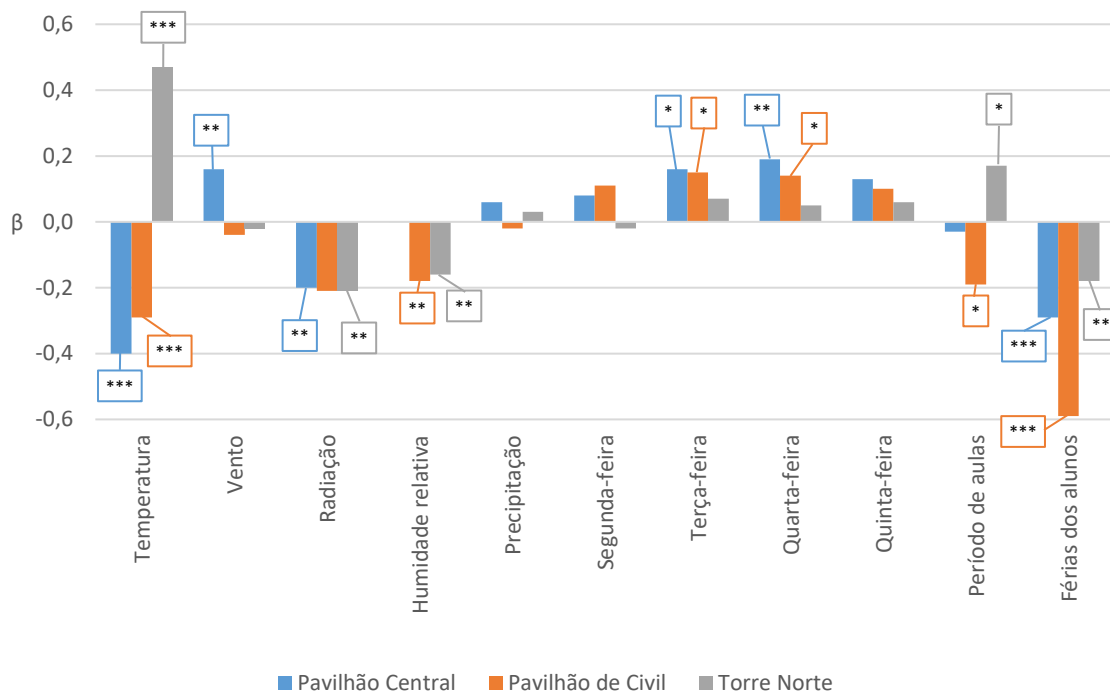


Figura 5.15 Coeficientes de regressão (β 's) para a estação de aquecimento, nos edifícios em análise.

Os pesos sinápticos obtidos para as redes neuronais artificiais do tipo perceptrão de multicamada são de difícil interpretação, pelo que não são indicados para descrever relações entre as variáveis independentes e a variável dependente (IBM Corp. Released, 2017). Não obstante, é de realçar que análises de sensibilidade identificaram a temperatura como o preditor mais importante, em todas as estações, ao contrário dos modelos de regressão. Isto é indicativo de que a temperatura tem uma relação não-linear com os consumos de eletricidade. Em todos os edifícios e estações, as redes neuronais artificiais obtiveram maior R^2 . O maior ajustamento das redes neuronais é justificado por terem a capacidade de introduzir não-linearidades e interações entre variáveis, que

não são considerados nos modelos de regressão. Essas interações acontecem, por exemplo, entre a temperatura e a radiação, cujo efeito conjunto pode maximizar ou diminuir os consumos energéticos consoante a estação climática. Algo similar acontece, entre o momento letivo e a temperatura porque os utilizadores recorrem mais ou menos ao sistema de climatização consoante o nível de ocupação do edifício.

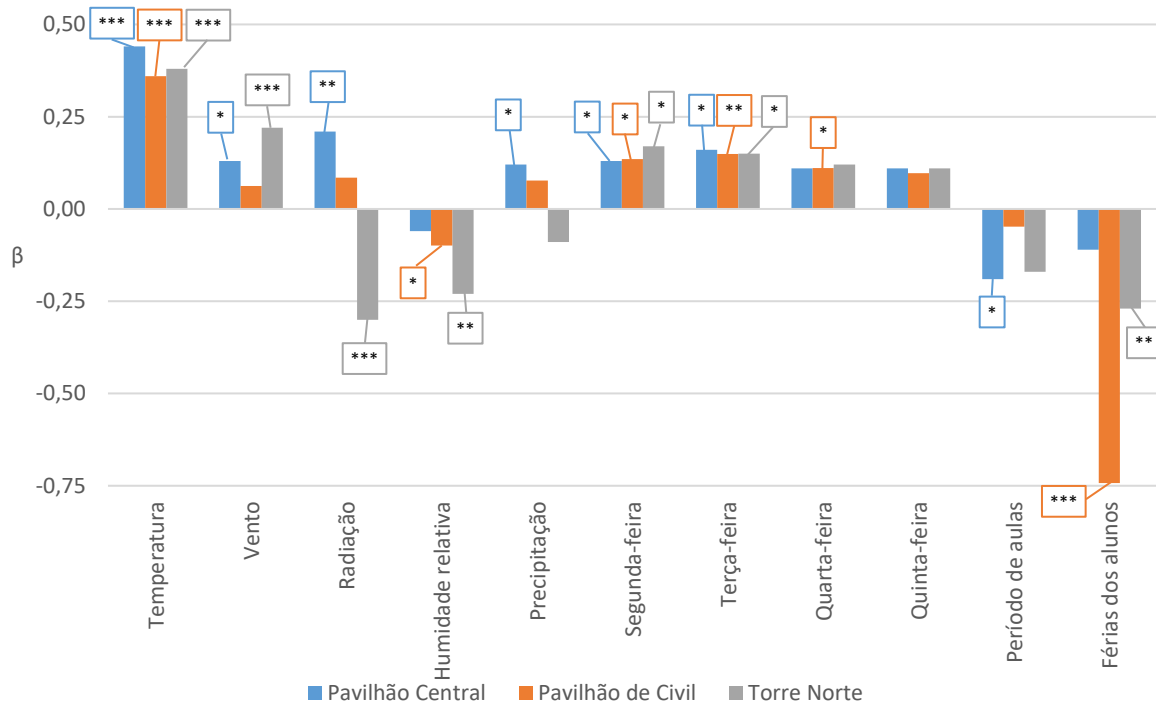


Figura 5.16 Coeficientes de regressão (β 's) para a estação de arrefecimento, nos edifícios em análise.

A qualidade de ajustamento dos modelos de regressão com erros ARMA reflete que os consumos de eletricidade estão autocorrelacionados, como sugerido por Bordeau et al. (2018). Por exemplo, em agosto, na regressão linear múltipla efetuada no período de encerramento do IST, a única informação de que o modelo dispõe sobre o nível de atividade é que se trata de um período de férias de alunos. No entanto, é sabido que o nível de ocupação do edifício vai aumentando até ao início do período de aulas. Os modelos de regressão com erros ARMA têm a capacidade de modelar estes padrões através da componente autorregressiva e de médias móveis. Nos modelos desenvolvidos, para além de se considerar que os consumos de eletricidade dependem dos consumos do dia anterior, foi introduzida uma componente sazonal de periodicidade igual a sete dias. Esta periodicidade é justificada pelos horários semanais definidos para as aulas, laboratórios e funcionários. A capacidade de predição dos modelos não é possível de avaliar através de um valor, ao contrário da qualidade de ajustamento (Makridakis et al., 1998). O valor MAPE apenas é utilizado para fazer comparações da qualidade de predição de vários modelos. A melhor qualidade de predição foi obtida no Pavilhão de Civil e a mais fraca para a Torre Norte. Tal facto está associado à percentagem dos espaços de aulas e aos preditores do nível de atividade, i.e., período de aulas, férias de alunos, período de exames, feriados e encerramento do IST.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Estudos sobre a implementação de medidas de racionalização energética em edifícios universitários foram revistos, num total de 27, 13 dos quais no IST. As medidas de racionalização energética foram divididas em intervenções na envolvente, sistema de AVAC e outros, nas quais se incluem as melhorias do sistema de iluminação e introdução de energias renováveis. Relativamente à racionalização hídrica, oito estudos foram analisados, um dos quais no IST. As medidas foram divididas segundo o princípio dos 5 R's sugerido por Afonso (2011) e outras. Entre as medidas de racionalização energética, a melhoria da envolvente, sobretudo dos envidraçados e paredes, a intervenção no sistema de AVAC e o uso de energia proveniente de fontes renováveis foram as mais relevantes. As medidas de racionalização hídrica mais comuns foram a deteção e reparos de derrames, a melhoria das práticas de irrigação e a instalação de equipamentos domésticos de baixo fluxo. É de realçar que as perdas nas redes de água têm elevado impacto nos consumos e que a consciencialização dos utilizadores complementa todas as outras medidas de racionalização hídrica implementadas. Um maior número de trabalhos incidu sobre a racionalização energética, comparativamente à racionalização hídrica, porque os consumos energéticos representam a maior percentagem de custos de gestão dos *campi* universitários.

Nos edifícios do IST, a medida de racionalização energética mais estudada foi a melhoria dos envidraçados o que revela o seu impacto no desempenho energético de edifícios, neste clima. É de salientar que esta interpretação é baseada na premissa de que os investigadores analisam os tipos de medida apropriados para os edifícios em análise. Tal, apenas não é visível nos autores que investigaram o pacote de medidas ótimo através de análises multiobjectivo como Ascione et al. (2017) e Niemälä et al. (2016). Os objetivos a otimizar são: (1) minimizar o custo global, (2) minimizar os consumos energéticos e (3) maximizar as condições de conforto dos utilizadores.

A seleção dos edifícios em análise foi feita por forma a incluir os diversos períodos de construção, soluções arquitetónicas e tipos de atividade do *Campus* Alameda. No entanto, cada edifício possui uma especificidade de consumo energético e deve ser abordado de forma individual. Face à disponibilidade de desenhos cotados e de soluções construtivas dos edifícios em análise, foi possível concluir que o Pavilhão de Civil possui as piores características de comportamento térmico e a Torre Norte as melhores, em função dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente.

No que diz respeito à caracterização dos edifícios em análise, com base na análise gráfica, os consumos do Pavilhão Central apresentaram uma tendência de aumento, enquanto que os restantes edifícios em análise apresentaram um consumo constante desde 2012 até 2017. A evolução dos consumos hídricos entre 2007 e 2017 é de difícil análise devido a erros nas leituras dos contadores de água. Não obstante, é visível um maior rigor desde 2012, ano em que foi criado o *Campus* Sustentável que conduziu várias campanhas de sensibilização aos seguranças para a importância destes registos. Ainda assim, é visível uma variabilidade elevada nos consumos anuais que poderá ser consequência da inexistência de uma política de gestão deste recurso. De realçar também que a variabilidade dos consumos de água é superior à dos consumos de eletricidade como referido por Bonnet et al. (2002). Relativamente aos consumos anuais nos edifícios em análise, o Pavilhão Central

é o edifício crítico nos consumos energéticos possuindo o maior valor absoluto e por unidade de área. O Pavilhão de Civil é o edifício crítico nos consumos hídricos. Os consumos de eletricidade diários dos edifícios em análise são passíveis de divisão em duas distribuições normais: dias úteis e dias não úteis. Os consumos de energia e hídricos dos edifícios em análise foi inferior à média dos consumos dos estudos revistos. Porém, esta conclusão não classifica os edifícios em análise como edifícios com elevado desempenho energético e eficientes na utilização de recursos hídricos, uma vez que os consumos dos artigos revistos não foram normalizados em função do clima e do tipo de atividade dos edifícios.

Os modelos de regressão permitiram concluir que o impacto das variáveis meteorológicas nos consumos de eletricidade é semelhante nos edifícios em análise, na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento. A diferença da qualidade de ajustamentos dos modelos está relacionada com as variáveis de ocupação, mais precisamente, com o momento letivo. Esta variável é tanto mais explicativa quanto maior a percentagem de espaços dedicados aos alunos. Assim, o ajustamento dos modelos foi crescente no sentido: Torre Norte, Pavilhão Central e Pavilhão de Civil. Os modelos de regressão linear múltipla permitiram ainda identificar que o impacto de eventos no Centro de Congressos do Pavilhão de Civil é apenas significativo na estação de arrefecimento. Os órgãos de gestão deste espaço devem ter esta conclusão em consideração.

As redes neuronais artificiais permitiram concluir que a relação entre as variáveis meteorológica e os consumos de eletricidade não são lineares e que existe interação entre nas variáveis explicativas. Por fim, os consumos de eletricidade foram modelados através de modelos de regressão com erros ARMA para inserir a componente tempo, na análise. Os modelos revelaram um elevado ajustamento e qualidade de predição dos consumos de eletricidade de uma semana. Não obstante, é de salientar que estes modelos requerem a utilização de softwares numéricos para modelarem a série de erros. Para além disso, os modelos de regressão com erros ARMA desenvolvidos necessitam da série de previsão das temperaturas médias diárias para predizer os consumos de eletricidade futuros. Convém referir que os parâmetros do modelo devem ser reajustados com as novas observações. Por estas razões, os modelos de regressão com erros ARMA não são de fácil utilização.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A informação recolhida no presente estudo e a modelação dos consumos energéticos e hídricos do Pavilhão Central, Pavilhão de Civil e Torre Norte devem ser utilizados na gestão do IST, numa perspetiva de reduzir os consumos, garantir as condições de conforto aos seus utilizadores e prolongar o período de vida útil dos edifícios. Os resultados revelaram que o IST apresenta um forte potencial para a poupança energética ao nível das energias renováveis, melhoria dos envidraçados, da envolvente opaca, dos equipamentos e gestão dos edifícios. O trabalho continuado poderá validar este e outros estudos anteriores e fornecer dados à comunidade científica sobre os consumos energéticos e hídricos em edifícios universitários. Importante, será o apoio do Governo da República e da União Europeia, no aumento do financiamento e melhoria da política económica para incentivar e apoiar a poupança energética e hídrica nas universidades. Não obstante, uma vez que o IST não dispõe de verba para aplicação da totalidade das medidas de racionalização energética, é importante delinear a estratégia mais vantajosa numa perspetiva de retorno do investimento. Tal aproximação foi inicialmente sugerida nos relatórios

de auditoria aos edifícios em análise, através da sua quantificação em termos de investimento (níveis 1 a 5) e aplicação (imediate, curto prazo, longo prazo ou inseridas em programas).

O presente estudo deveria ser alargado a outros edifícios do IST e universidades portuguesas. O envolvimento de alunos, docentes e funcionários do IST, na investigação e treino/consciencialização em tópicos sobre a energia e água é fulcral para uma atitude sustentável. A isto acresce uma melhor qualidade de vida e desempenho dos utilizadores. Numa fase inicial, medidas simples e práticas, como por exemplo, ativação/desativação dos dispositivos já disponíveis, diminuir a dispersão dos utilizadores no edifício e a presença de pessoal qualificado no edifício para consciencializar as pessoas da necessidade de mudança parecem ser efetivas.

Ainda no IST, a plataforma de registo dos consumos de eletricidade, gás e água (EnergIST) é uma ferramenta útil na quantificação dos consumos; contudo, a transferência dos dados é morosa e pouco prática, sendo impeditivo de extrair os dados em frequências de tempo mais reduzidas, como por exemplo, quarto-horária. A agilização deste processo seria, portanto, vantajosa para trabalhos futuros. Os consumos de água registados no EnergIST, em tempo real e para cada edifício, poderão também ser da maior importância na modelação dos consumos. A atualização das plantas, em suporte digital é relevante no cálculo de uma diversidade de parâmetros que influenciam o desempenho térmico dos edifícios. A implementação de um sistema similar ao EnergIST, em todas as universidades portuguesas, e a apresentação dos consumos através da representação gráfica efetuada no presente estudo, tornariam as comparações mais fáceis e, assim, a interpretação e justificação dos resultados.

Algo que emerge do presente estudo é a diversidade de medidas de racionalização energética. Neste contexto, torna-se pertinente desenvolver um pacote ótimo e comparar os vários edifícios. Os dados recolhidos e obtidos no presente estudo poderão ser a base para aperfeiçoar os modelos de simulação energética. Por exemplo, o nível de ocupação à sexta-feira é diferente dos restantes dias da semana. Desenvolvimentos futuros deveriam, também, incidir sobre a comparação dos modelos, na sua capacidade de predição dos consumos energéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelalim, A., O'Brien, W., & Shi, Z. (2015). Visualization of energy and water consumption and GHG emissions: A case study of a Canadian University Campus. *Energy and Buildings*, 109, 334-352. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.058
- Afonso, A. S. (2011, maio). *Certificação da Eficiência Hídrica de Produtos*. Comunicação apresentada in: Certificação da Eficiência Hídrica de Produto, Centro de Congressos do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Alajmi, A. (2012). Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings*, 47, 122-130. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.033
- Allab, Y., Pellegrino, M., Guo, X., Nefzaoui, E., & Kindinis, A. (2017). Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus. *Energy and Buildings*, 143, 202-219. doi:10.1016/j.enbuild.2016.11.028
- Almeida, R. (2017). *Assessment of the New Shading System Installed on Pavilhão de Civil Through EnergyPlus*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 303-319. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.056
- Autoria Pavilhão Central (2017). *Relatório de Auditoria Energética e Hídrica, Medidas de Racionalização Energética e do Consumo de Água: Pavilhão Central*. Retrieved from Lisboa, Instituto Superior Técnico: <http://sustentavel.unidades.tecnico.ulisboa.pt, 12-12-2018>
- Autoria Pavilhão de Civil (2015). *Relatório de Auditoria Energética (Eléctrica) e Medidas de Racionalização Energética: Edifício Pavilhão de Civil*. Retrieved from Lisboa, Instituto Superior Técnico-Campus Sustentável: <http://sustentavel.unidades.tecnico.ulisboa.pt , 12-12-2018>
- Autoria Torre Norte (2015). *Relatório de Auditoria Energética e Medidas de Racionalização Energética: Edifício Torre Norte*. Retrieved from Lisboa, Instituto Superior Técnico: <http://sustentavel.unidades.tecnico.ulisboa.pt. 12-12-2018>
- Bellia, L., Borrelli, M., De Masi, R. F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2018). University building: Energy diagnosis and refurbishment design with cost-optimal approach. Discussion about the effect of numerical modelling assumptions. *Journal of Building Engineering*, 18, 1-18. doi:10.1016/j.job.2018.02.017
- Bonnet, J.-F., Devel, C., Faucher, P., & Roturier, J. (2002). Analysis of electricity and water end-uses in university campuses case-study of the University of Bordeaux in the framework of the Ecocampus European Collaboration. *Journal of Cleaner Production*, 10, 13-24.
- Borgeson, S., & Brager, G. (2008). Occupant Control of Windows: Accounting for Human Behavior in Building Simulation. *UC Berkeley: Center for the Built Environment*. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/5gx2n1zz>
- Boston University (2019). Facilities Management & Planning of Boston University. <http://www.bu.edu/sustainability/what-were-doing/water/>, 14-01-2019

- Bourdeau, M., Guo, X., & Nefzaoui, E. (2018). Buildings energy consumption generation gap: A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings. *Energy and Buildings*, 159, 600-611. doi:10.1016/j.enbuild.2017.11.062
- Camelo, S., dos Santos, C., Ramalho, C., Gonçalves, H., & Maldonada, E. (2006). *Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios - Manual de apoio à aplicação do RCCTE* (H. G. e. E. Maldonado Ed. INETI ed.). Lisboa: INETI.
- Chung, M. H., & Rhee, E. K. (2014). Potential opportunities for energy conservation in existing buildings on university campus: A field survey in Korea. *Energy and Buildings*, 78, 176-182. doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.018
- Colorado University (2006). *Campus Water Use* (C. University Ed.). Denver: Colorado University.
- Correia, M. (2012). *Modelação dos Consumos Energéticos na Torre Sul do IST e Definição de Medidas de Racionalização dos Consumos Energéticos*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Deshko, V. I., & Shevchenko, O. M. (2013). University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach. *Energy and Buildings*, 66, 582-590. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.070
- Faustino, C. (2012). *Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Ferrari, S., & Beccali, M. (2017). Energy-environmental and cost assessment of a set of strategies for retrofitting a public building toward nearly zero-energy building target. *Sustainable Cities and Society*, 32, 226-234. doi:10.1016/j.scs.2017.03.010
- Guan, J., Nord, N., & Chen, S. (2016). Energy planning of university campus building complex: Energy usage and coincidental analysis of individual buildings with a case study. *Energy and Buildings*, 124, 99-111. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.051
- Gul, M. S., & Patidar, S. (2015). Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building. *Energy and Buildings*, 87, 155-165. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.027
- IBM.Corp (2017). *IBM SPSS Neural Network 25* (IBM Ed.). NY: IBM Corp
- Irulegi, O., Ruiz-Pardo, A., Serra, A., Salmerón, J. M., & Vega, R. (2017). Retrofit strategies towards Net Zero Energy Educational Buildings: A case study at the University of the Basque Country. *Energy and Buildings*, 144, 387-400. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.030
- Khoshbakht, M., Gou, Z., & Dupre, K. (2018). Energy use characteristics and benchmarking for higher education buildings. *Energy and Buildings*, 164, 61-76. doi:10.1016/j.enbuild.2018.01.001
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- Lodi, C., Malaguti, V., Contini, F., Sala, L., Muscio, A., & Tartarini, P. (2017). University energy planning for reducing energy consumption and GHG emissions: the case study of a university campus in Italy. *International Journal of Heat and Technology*, 35(Special Issue1), S27-S32. doi:10.18280/ijht.35Sp0104
- Makridakis, S. G., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications* (3rd Edition ed.): Wiley.

- Marçal, G. D. (2015). *Simulação Dinâmica do Sistema de Climatização do Pavilhão de Civil do IST em EnergyPlus*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Marinho, M., Gonçalves, M. d. S., & Kiperstok, A. (2014). Water conservation as a tool to support sustainable practices in a Brazilian public university. *Journal of Cleaner Production*, 62, 98-106. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.053
- Mata, É., López, F., & Cuchí, A. (2009). Optimization of the management of building stocks: An example of the application of managing heating systems in university buildings in Spain. *Energy and Buildings*, 41(12), 1334-1346. doi:10.1016/j.enbuild.2009.07.031
- Miranda, M. (2012). *Sistemas de Certificação na Eficiência Hídrica*. Paper presented at the XIX Congresso da Ordem dos Engenheiros- Sociedade, Território e Ambiente, Lisboa.
- Mobasheri, M. (2014). *Green roofs - construction and functional requirements for four buildings on the IST campus*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Mytafides, C. K., Dimoudi, A., & Zoras, S. (2017). Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 155, 98-114. doi:10.1016/j.enbuild.2017.07.083
- Niemelä, T., Kosonen, R., & Jokisalo, J. (2016). Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate. *Applied Energy*, 183, 1005-1020. doi:10.1016/j.apenergy.2016.09.044
- Ostojčić, S., Veršić, Z., & Muraj, I. (2016). Energy analysis and refurbishment strategy for Zagreb University buildings: Former Faculty of Technology in Zagreb by Alfred Albini. *Energy and Buildings*, 115, 47-54. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.043
- Ouf, M. M., & Issa, M. H. (2017). Energy consumption analysis of school buildings in Manitoba, Canada. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 359-371. doi:10.1016/j.ijbsbe.2017.05.003
- Patrício, J. (2013). *Modelação dos Consumos Energéticos no Pavilhão de Civil do IST e Definição de Medidas de Racionalização dos Consumos*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Pereira, J. (2015). *Simulação Energética de Películas em Envidraçados*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Raatikainen, M., Skön, J.-P., Leiviskä, K., & Kolehmainen, M. (2016). Intelligent analysis of energy consumption in school buildings. *Applied Energy*, 165, 416-429. doi:10.1016/j.apenergy.2015.12.072
- Sekki, T., Airaksinen, M., & Saari, A. (2015). Measured energy consumption of educational buildings in a Finnish city. *Energy and Buildings*, 87, 105-115. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.032
- Semprini, G., Marinosci, C., Ferrante, A., Predari, G., Mochi, G., Garai, M., & Gulli, R. (2016). Energy management in public institutional and educational buildings: The case of the school of engineering and architecture in Bologna. *Energy and Buildings*, 126, 365-374. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.009
- Sesana, M. M., Grecchi, M., Salvalai, G., & Rasica, C. (2016). Methodology of energy efficient building refurbishment: Application on two university campus-building case studies in Italy with engineering students. *Journal of Building Engineering*, 6, 54-64. doi:10.1016/j.jobee.2016.02.006

- Silva, O. (2008). *Análise da reabilitação da TORRE NORTE do IST face à introdução da certificação em edifícios de serviços existentes*. (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Silvério, D. (2011). *Simulação dinâmica do comportamento térmico da Torre Sul do campus da Alameda do IST*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Stanford University (2003). *Water Conservation, Reuse and Recycling Master Plan*. Santa Clara County: Stanford University.
- Suehrcke, H., Bowden, R. S., & Hollands, K. G. T. (2013). Relationship between sunshine duration and solar radiation. *Solar Energy*, 92, 160-171. doi:10.1016/j.solener.2013.02.026
- Thewes, A., Maas, S., Scholzen, F., Waldmann, D., & Zürbes, A. (2014). Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg. *Energy and Buildings*, 68, 460-470. doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.002
- UNFCCC. (2008). *Kyoto Protocol Reference Manual: on Accounting of Emissions and Assigned Amount*. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- University of California, Berkeley (2010). *Berkeley Water Conservation Report* Retrieved from <https://sustainability.berkeley.edu/, 29-12-2018>
- University of Oxford (2011). *University of Oxford Water Management Strategy* (U. o. Oxford Ed.). Oxford: University of Oxford.
- Velazquez, L., Munguia, N., & Ojeda, M. (2013). Optimizing water use in the University of Sonora, Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 46, 83-88. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.005
- Vilhena, T. (2013). *Simulação Dinâmica e Estudo de Medidas de Racionalização Energética do Pavilhão de Engenharia Civil do IST*. (Mestrado Dissertação), Universidade de Lisboa, IST, Lisboa.
- Wang, J. C. (2016). A study on the energy performance of school buildings in Taiwan. *Energy and Buildings*, 133, 810-822. doi:10.1016/j.enbuild.2016.10.036
- Yoshida, Y., Shimoda, Y., & Ohashi, T. (2017). Strategies for a sustainable campus in Osaka University. *Energy and Buildings*, 147, 1-8. doi:10.1016/j.enbuild.2017.04.020
- Zhang, X., Qi, Y., Wang, Y., Wu, J., Lin, L., Peng, H., . . . Zhang, Y. (2016). Effect of the tap water supply system on China's economy and energy consumption, and its emissions' impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 660-671. doi:10.1016/j.rser.2016.06.067

DOCUMENTOS NORMATIVOS

- Decreto-Lei 118/2013 de 20 de agosto. Conselho de Ministros. Diário da República Eletrónico, Versão à data de 13-07-2018.
- Decreto-Lei 78/2006 de 4 de abril. Ministério aa Economia e da Inovação. Diário da República N.º 67, SÉRIE I-A, 2411-2415.
- Decreto-Lei 79/2006 de 4 de abril. Ministério aa Economia e da Inovação. Diário da República N.º 67, SÉRIE I-A, 2416-2468
- Decreto-Lei 80/2006 de 4 de abril Ministério aa Economia e da Inovação. Diário da República N.º 67, SÉRIE I-A, 2468-2513.
- Diretiva 2002/91/CE de 16 de dezembro do Parlamento Europeu e Conselho, *relativa ao desempenho*

energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias L 1/65.

Diretiva/2010/31/UE de 19 de maio do Parlamento Europeu e Conselho *relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*. Jornal Oficial da União Europeia L 153/13.

WEB SITES

Sustainable Development Goals (2019). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>, 30-08-2019

Eurostat (2019). <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html>). 18-05-2018

AQUASTAT (2019). <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>, 23-07-2019

Worldometers, (2019). <https://www.worldometers.info/water/>, 23-07-2019

ANEXO A

Climas temperados

Csa- Clima temperado com Verão seco e quente:

- C: $-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- s: $P_{\text{min}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{min}}$ e $P_{\text{min}} < 40\text{ mm}$;
- a: $T_{\text{max}} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Csb- Clima temperado com Verão seco e temperado

- C: $-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- s: $P_{\text{min}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{min}}$ e $P_{\text{min}} < 40\text{ mm}$;
- b: não (a) e pelo menos 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cfa- Clima temperado sem estação seca com Verão quente:

- C: $-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- f: nem Cs nem Cw;
- a: $T_{\text{max}} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cfb- Clima temperado sem estação seca com Verão temperado:

- C: $-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- f: nem Cs nem Cw;
- b: não (a) e pelo menos 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cwb- Clima temperado com Inverno seco e Verão temperado:

- C: $-3\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{min}} < +18\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- w: $P_{\text{wmin}} < P_{\text{min}}$ and $P_{\text{max}} > 10 P_{\text{wmin}}$;
- b: não (a) e pelo menos 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Legenda:

Tann: Temperatura anual média;

Pann: Precipitação anual;

Tmáx: Temperatura média do mês mais quente;

Tmin: Temperatura média do mês mais frio;

Pmin: Precipitação do mês que menos choveu do verão;

Psmáx: Precipitação do mês que mais choveu do verão;

Pwmin: Precipitação do mês que menos choveu do inverno;

Pwmáx: Precipitação do mês que mais choveu do inverno;

Pth (Medida da Seca) = $2 \times T_{\text{ann}}$, se pelo menos 2/3 da chuva anual ocorreu no inverno; $2 \times T_{\text{ann}} + 28$, se pelo menos 2/3 da chuva anual ocorrer no verão; $2 \times T_{\text{ann}} + 14$, em caso contrário.

Clima quente

BWh- Deserto quente:

- BW: $P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$;
- h: $T_{\text{ann}} \geq +18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Climas frios

Dfb- Clima frio sem estação seca com Verão temperado:

- D: $T_{\text{min}} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- f: nem Ds nem Dw;
- b: não (a) e pelo menos 4 $T_{\text{mon}} \geq +10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dwa- Clima frio com Inverno seco e Verão quente:

- D: $T_{\text{min}} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- w: $P_{\text{wmin}} < P_{\text{min}}$ e $P_{\text{max}} > 10 P_{\text{wmin}}$;
- a: $T_{\text{max}} \geq +22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ds- Clima frio com Verão seco

- D: $T_{\text{min}} \leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- s: $P_{\text{min}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{min}}$ e $P_{\text{min}} < 40\text{ mm}$.

Tabela 2.1A Descrição dos edifícios revistos sobre medidas de racionalização energética (continuação).

Autor	País	Clima	Ano	Utilização/características do edifício								Sistemas de climatização (AVAC)																				
				Tipo de utilização				Piso		Dimensão		U [W/(m²K)]		Equipamento primário [n]					Equipamento secundário													
				Administrativo	Ciências	Engenharia/Inv.	Residência	Misto	Inferior	Superior	Área [m²]	Volume [m³]	Paredes	Cobertura	Envidraçados	C. gás trad.	C. gás cond.	C. fuelóleo	Chiller a ar	Chiller a água	Bomba calor	B. calor geo.	Torre arref.	UTAN's	UTA's	Bomba calor	Radiador	Ventiloconv.	Termovent.	Piso radiante	SAD	Exp. direta
Alajimi (2012)	Kuwait	BWh	-	-	-	x	-	-	-	-	2	7 020	-	0,6	0,2	3,4	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-
Ostojić et al. (2016)	Croácia	Cfb	1964	-	-	x	-	-	-	1	2	12 736	-	4	0,6-1,7	1,3-5,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Allab et al. (2017)	França	Cwb	1987	-	-	-	-	-	x	-	5	30 580	-	0,4	-	-	2	3	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Irulegi et al. (2017)	Espanha	Cfb	1992	-	x	-	-	-	-	-	6	13 722	-	0,6	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
Bellia et al. (2018)	Itália	Cfb	1990	-	-	-	-	-	x	1	3	7 935	-	0,3-0,8	0,3-0,5	1,8-2,7	1	1	-	2	-	-	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-
Yoshida et al. (2017)	Japão	Cfa	<1931	1*	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

V

*Omissão ou inexistência da variável; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; U, coeficiente de transmissão térmica; Inv, investigação; C. gás trad, caldeira de gás tradicional; C. gás cond, caldeira de gás condensado; C. fuelóleo, caldeira a fuelóleo; B. calor geo, bomba de calor geotérmica; Torre arref, torre de arrefecimento; UTAN, unidade de tratamento de ar novo; UTA, unidade de tratamento de ar; Ventiloconv, ventiloconvetor; Termovent, termoventilador; SAD, sistema de aquecimento distrital; Exp. Direta, expansão direta.

Tabela 2.1A Descrição dos edifícios revistos sobre medidas de racionalização energética (continuação).

Autor	País	Clima	Ano	Utilização/características do edifício								Sistemas de climatização (AVAC)																				
				Tipo de utilização					Piso		Dimensão		U [W/(m²K)]			Equipamento primário [n]					Equipamento secundário											
				Administrativo	Ciências	Engenharia/Inv.	Residência	Misto	Inferior	Superior	Área [m²]	Volume [m³]	Paredes	Cobertura	Envidraçados	C. gás trad.	C. gás cond.	C. fuelóleo	Chiller a ar	Chiller a água	Bomba calor	B. calor geo.	Torre arref.	UTAN's	UTA's	Bomba calor	Radiador	Ventiloconv.	Termovent.	Piso radiante	SAD	Exp. direta
Niemiälä et al. (2016)	Finlândia	Dfb	1960-1979	-	x	-	-	-	-	-	5	19 100	67 500	0,5	0,2	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	
			1961	-	-	x	-	-	-	-	-	6	9 122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x
Chung et al. (2014)	Coreia do Sul	Dwa	1969	-	-	x	-	-	-	1	7	22 145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			1974	-	-	x	-	-	-	-	-	4	7 861	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			1991	-	-	x	-	-	-	-	1	5	3 674	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			1999	-	-	-	x	-	-	-	1	7	11 894	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
			2005	-	-	x	-	-	-	-	2	6	3 707	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			2010	-	-	-	x	-	-	-	3	10	19 164	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-

[†]Omisso ou inexistência da variável; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; U, coeficiente de transmissão térmica; Inv, investigação; C. gás trad, caldeira de gás tradicional; C. gás cond, caldeira de gás condensado; C. fuelóleo, caldeira a fuelóleo; B. calor geo, bomba de calor geotérmica; Torre arref, torre de arrefecimento; UTAN, unidade de tratamento de ar novo; UTA, unidade de tratamento de ar; Ventiloconv, ventiloconvetor; Termovent, termoventilador; SAD, sistema de aquecimento distrital; Exp. Direta, expansão direta.

Tabela 2.2A Descrição dos edifícios revistos sobre medidas de racionalização energética no IST (continuação).

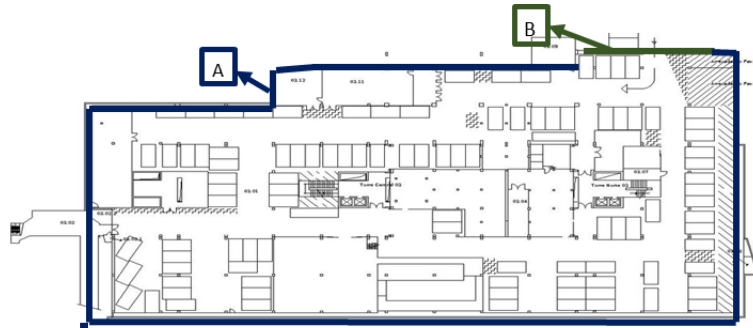
Autor/relatório	Utilização/características do edifício												Sistemas de climatização (AVAC)																					
	Edifício	Clima	Ano	Tipo de utilização				Piso		Dimensão		U [W/(m²K)]			Equipamento primário [n]					Equipamento secundário														
				Administrativo	Ciências	Engenharia/Inv.	Residência	Misto	Inferior	Superior	Área [m²]	Volume [m³]	Paredes	Cobertura	Envidraçados	C. gás trad.	C. gás cond.	C. fuelóleo	Chiller a ar	Chiller a água	Bomba calor	B. calor geo.	Torre arref.	UTAN's	UTA's	Bomba calor	Radiador	Ventiloconv.	Termovent.	Piso radiante	SAD	Exp. direta		
Silvério (2011)	Torre Sul	Csa	2000	-	-	x	-	-	3	12	10 100	-	0,4	-	2,7	2	-	-	2	-	-	-	1	x	x	-	-	x	-	-	-	-	x	
Correia (2012)																																		
Silva (2008)	Torre Norte	Csa	1994	1 ¹	-	x	-	-	2	12	11 312	-	0,3-1,0	0,4-0,9	2,7-5,8	2	-	-	-	-	2	-	-	1	x	x	-	-	x	-	-	-	-	x
Auditoria Torre Norte (2005)																																		

V

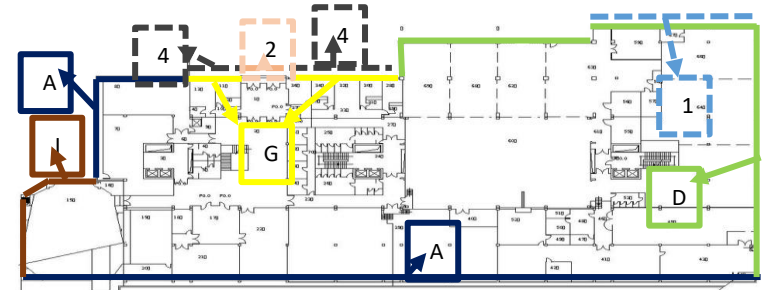
¹Omisso ou inexistência da variável; AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado; U, coeficiente de transmissão térmica; Inv, investigação; C. gás trad, caldeira de gás tradicional; C. gás cond, caldeira de gás condensado; C. fuelóleo, caldeira a fuelóleo; B. calor geo, bomba de calor geotérmica; Torre arref, torre de arrefecimento; UTAN, unidade de tratamento de ar novo; UTA, unidade de tratamento de ar; Ventiloconv, ventiloconvetor; Termovent, termoventilador; SAD, sistema de aquecimento distrital; Exp. Direta, expansão direta.

ANEXO B

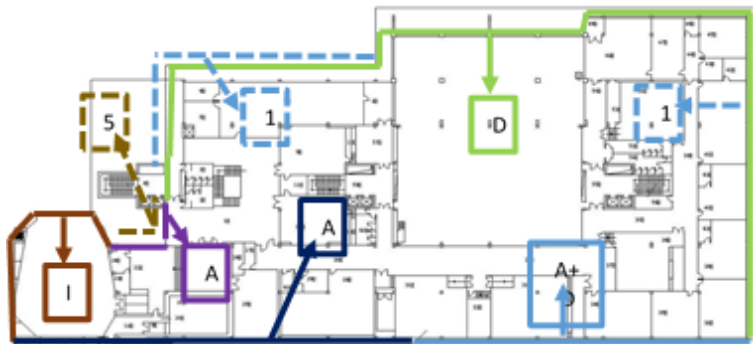
a Piso 03[†]



b Piso 02[†]



c Piso 01[†]

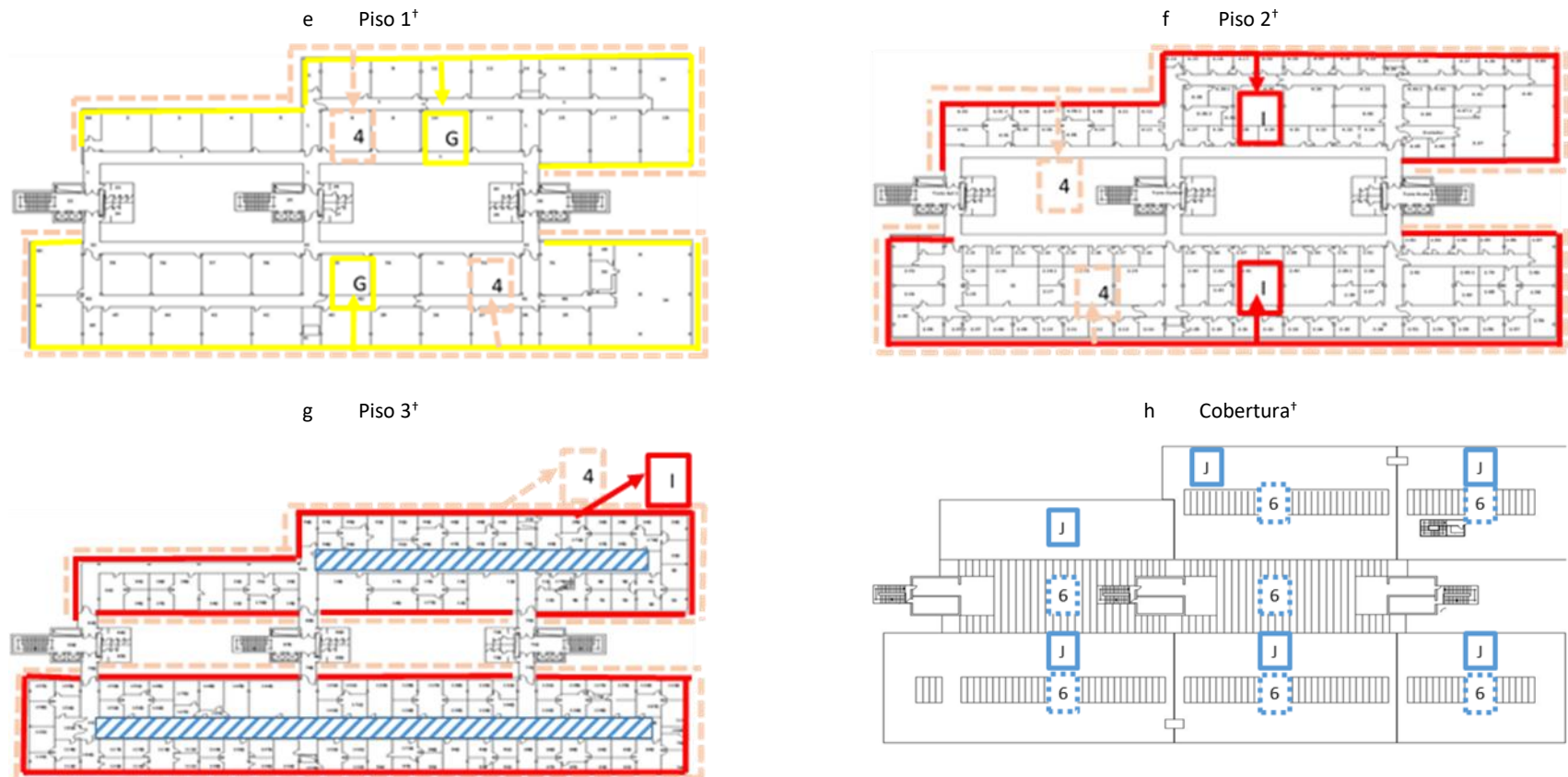


d Piso 0[†]



[†]Envolventes opaca (linha a cheio) e translúcida (linha a tracejado). A, betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m; B, painel de betão com 0,08 m + caixa-de-ar + betão armado com 0,03m; C, alvenaria de tijolo furado de 0,15 m; D, betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m + painel contraplacado; E, betão armado com 0,3 m + revestimento de madeira; F, alvenaria de tijolo furado de 0,20 m; G, betão armado pré-fabricado com 0,08m + lâ de rocha + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,07 m; H, betão armado com 0,1 m; I, betão armado com 0,1 m + lâ de rocha + revestimento de gesso; J, betão armado com 0,1m + betão de argila expandida com 0,1 m + camada de impermeabilização de feltro com 0,01 m; 1, vidro simples 6 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore metálico interior; 2, vidro simples incolor de 8 mm, caixilharia metálica sem corte térmico; 3, vidro simples incolor de 8 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore de lâminas interior; 4, vidro simples incolor de 6 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore metálico exterior; 5, vidro simples incolor de 6 mm, caixilharia de alumínio termolacado sem corte térmico, sem protecção; 6, placas de policarbonato alveolar incolor de 6 a 16 mm [Adaptado de Vilhena (2013)].

Figura 3.1A Plantas do Pavilhão de Civil.



[†]Envolventes opaca (linha a cheio) e translúcida (linha a tracejado). A, betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m; B, painel de betão com 0,08 m + caixa-de-ar + betão armado com 0,03m; C, alvenaria de tijolo furado de 0,15 m; D, betão armado com 0,3 m + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,15 m + painel contraplacado; E, betão armado com 0,3 m + revestimento de madeira; F, alvenaria de tijolo furado de 0,20 m; G, betão armado pré-fabricado com 0,08m + lâ de rocha + caixa-de-ar + tijolo furado de 0,07 m; H, betão armado com 0,1 m; I, betão armado com 0,1 m + lâ de rocha + revestimento de gesso; J, betão armado com 0,1m + betão de argila expandida com 0,1 m + camada de impermeabilização de feltro com 0,01 m; 1, vidro simples 6 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore metálico interior; 2, vidro simples incolor de 8 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore metálico exterior; 3, vidro simples incolor de 8 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore de lâminas interior; 4, vidro simples incolor de 6 mm, caixilharia metálica sem corte térmico, estore metálico exterior; 5, vidro simples incolor de 6 mm, caixilharia de alumínio termolacado sem corte térmico, sem protecção; 6, placas de policarbonato alveolar incolor de 6 a 16 mm [Adaptado de Vilhena (2013)]

Figura 3.1A Plantas do Pavilhão de Civil (continuação).

ANEXO C

Tabela 4.1A Preçário da eletricidade em 2007, sem o Imposto sobre o valor acrescentado (IVA).

Energia/potência	Preçário [†]	
	€/kWh	€/kWh.dia
Energia ativa		
Ponta	0,1023	
Cheia	0,0931	
Vazio	0,0691	
<i>Super</i> vazio	0,0592	
Potência		
Contratada		0,0349
Horas de ponta		0,2150

[†]Campus Sustentável-IST (2017).

Tabela 4.2A Períodos horários de média tensão em Portugal continental.

Dia	Período de hora legal [HH.mm] [†]	
	Inverno	Verão
Segunda a sexta-feira		
Ponta	17.00/22.00	14.00/17.00
Cheias	00.00/00.30	00.00/00.30
	07.30/17.00	07.30/14.00
	22.00/24.00	17.00/24.00
Vazio normal	00.30/02.00	00.30/02.00
	06.00/07.30	06.00/07.30
<i>Super</i> vazio	02.00/06.00	02.00/06.00
Sábado		
Cheias	10.30/12.30	10.00/13.30
	17.30/22.30	19.30/23.00
Vazio normal	00.00/03.00	00.00/03.30
	07.00/10.30	07.30/10.00
	12.30/17.30	13.30/19.30
	22.30/24.00	23.00/24.00
<i>Super</i> vazio	03.00/07.00	03.30/07.30
Domingo		
Vazio normal	00.00/04.00	00.00/04.00
	08.00/24.00	08.00/24.00
<i>Super</i> vazio	04.00/08.00	04.00/08.00

[†]Campus Sustentável-IST (2017).

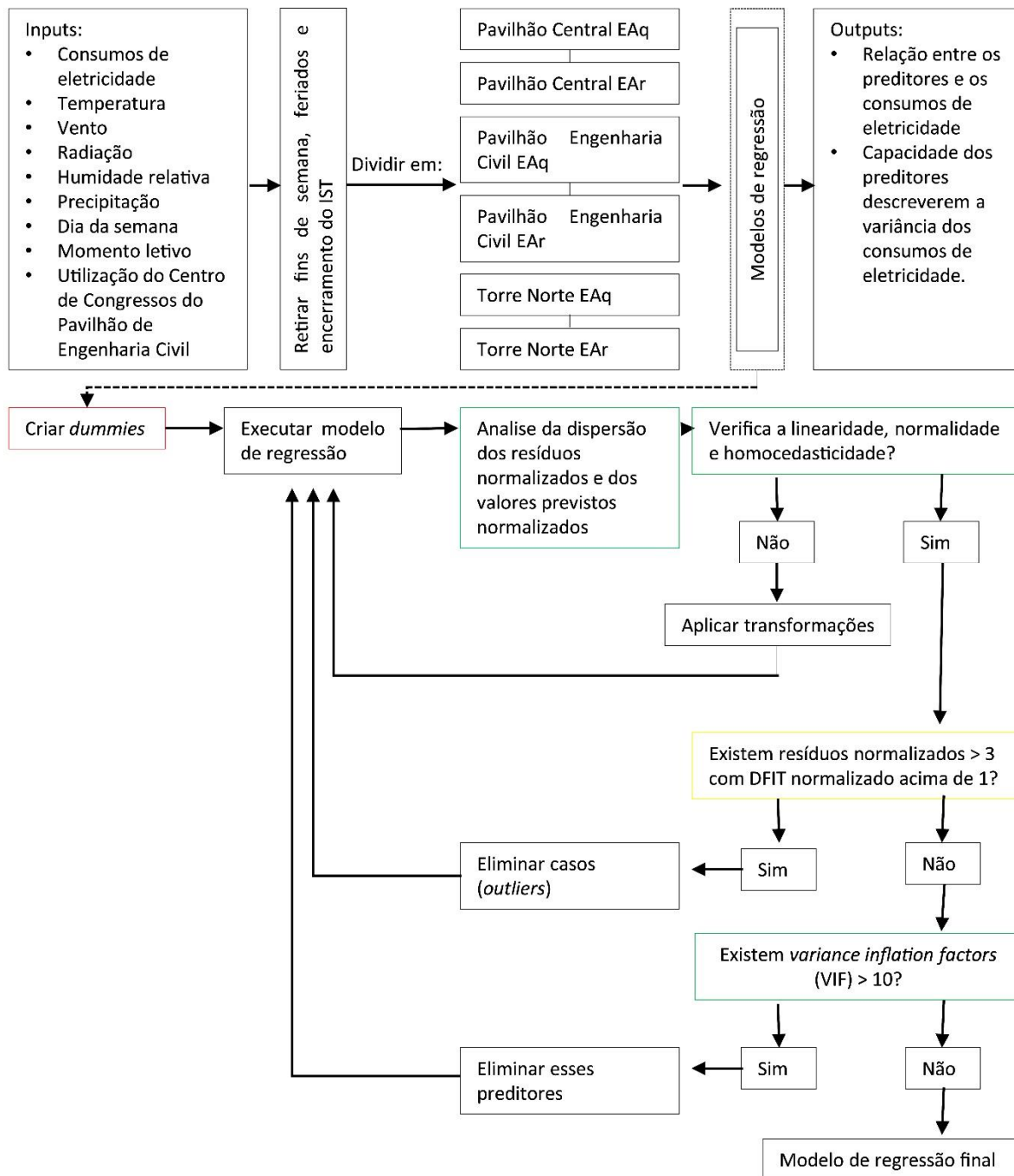


Figura 4.1A Metodologia utilizada na definição dos modelos de regressão linear múltipla: preparação dos dados (vermelho), verificação dos pressupostos (verde) e melhoria da estimação dos coeficientes de regressão (amarelo).

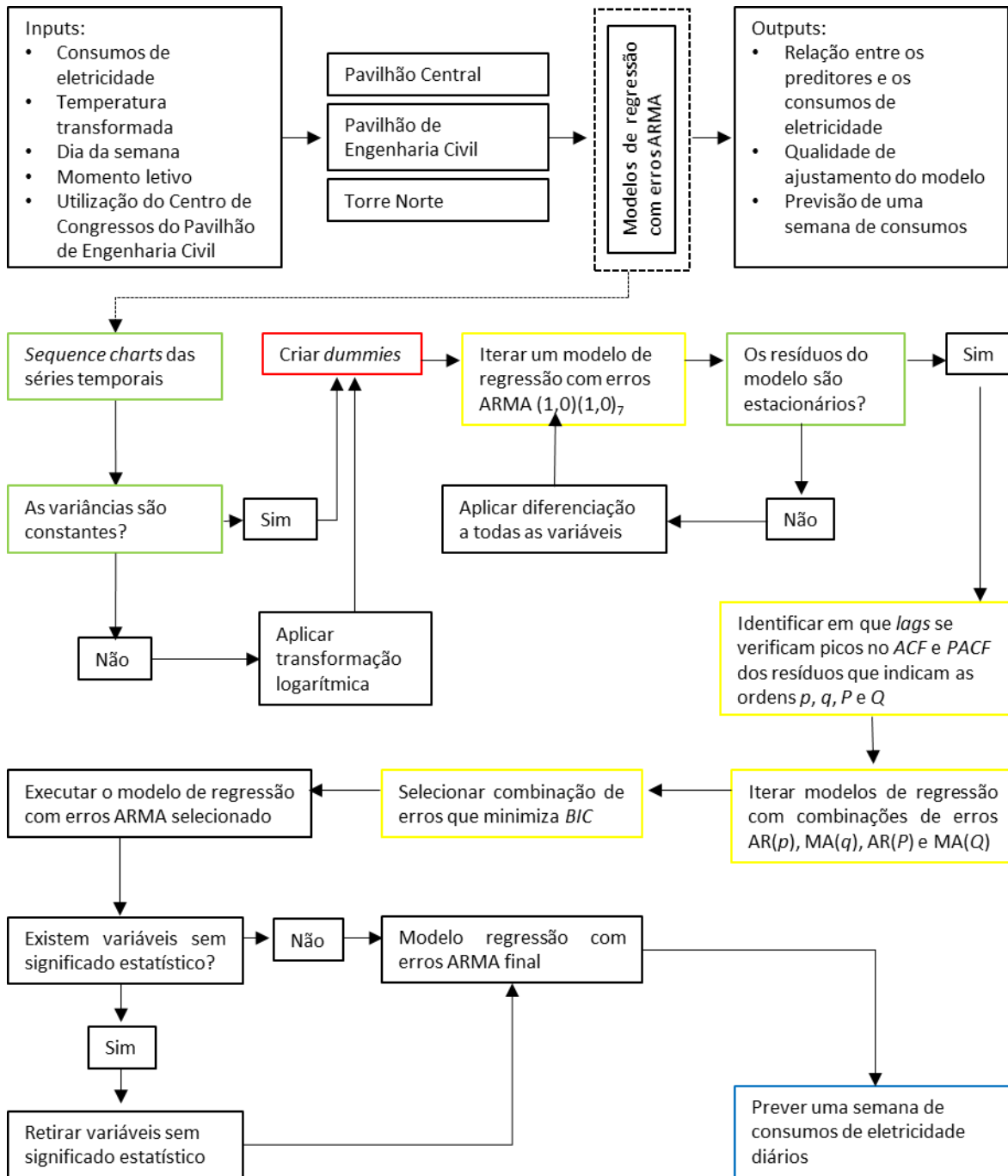


Figura 4.2A Metodologia utilizada na definição dos modelos de regressão com erros ARMA: preparação dos dados (vermelho), estimação das ordens ARMA (amarelo), verificação dos pressupostos (verde) e previsão (azul).

ANEXO D

Tabela 5.1A País, ano de construção e clima dos edifícios em análise e estudos revistos.

Edifícios/estudos	País	Ano de construção	Clima [†]
Pavilhão Central (2015-2017)	Portugal	1932	Csa
Pavilhão de Civil (2015-2017)	Portugal	1992	Csa
Torre Norte (2015-2017)	Portugal	1994	Csa
Mytafides et al. (2017)	Grécia	1973	Csa
Allab et al. (2017)	França	1987	Cwb
Sesana et al. (2016)	Itália	1927/1965	Cfa
Chung et al. (2014a)	Coreia do Sul	1961	Dwa
Chung et al. (2014b)		1969	Dwa
Chung et al. (2014c)		1974	Dwa
Chung et al. (2014d)		1991	Dwa
Chung et al. (2014e)		1999	Dwa
Chung et al. (2014f)		2005	Dwa
Chung et al. (2014g)		2010	Dwa
Mata et al. (2014)	Espanha		Cfa
Alajmi (2012)	Kuwait		Bwh

[†]Classificação climática de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006).

Tabela 5.2A País, ano de construção e clima dos edifícios em análise e estudos revistos.

Edifícios/estudos	País	Ano de construção	Clima [†]
Bellia et al. (2018)	Itália	1990	Cfb
Bourdeau et al. (2018a)	França	1987	Cfb
Bourdeau et al. (2018b)		1999	Cfb
Bourdeau et al. (2018c)		2013	Cfb
Allab et al. (2017)	França	1987	Cwb
Ascione et al. (2017)	Itália	1990	Csa
Ferrari & Beccali (2017)	Itália	1960/1969	Cfa
Pavilhão Central (2015-2017)	Portugal	1932	Csa
Pavilhão de Civil (2015-2017)	Portugal	1992	Csa
Torre Norte (2015-2017)	Portugal	1994	Csa
Niemalä et al. (2016)	Finlândia	1960/1979	Dfb

Tabela 5.3A Pesos sinápticos e desvios estimados para o Pavilhão Central, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).

Variáveis/preditores	Estação											
	Aquecimento (camada intermédia)					arrefecimento (camada intermédia)						
Preditor	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:6)	H(1:7)
Desvio	0,591	0,466	0,873	-0,254	-0,673	1,026	0,010	-0,350	-0,258	0,617	0,453	-0,146
Temperatura	-0,294	0,176	1,009	-0,161	-0,506	-0,315	0,335	-0,844	-0,425	-0,287	0,044	-0,635
Vento	-0,194	0,789	0,089	0,497	0,133	0,689	0,988	-0,122	0,471	-0,594	0,419	-0,095
Radiação	0,226	-0,690	0,210	0,291	0,085	-0,304	-0,282	0,384	0,067	0,825	0,386	-0,188
Humidade relativa	0,724	-0,332	0,089	-0,133	-0,484	0,188	-0,154	0,014	0,323	0,185	0,165	0,089
Precipitação	0,111	0,240	0,245	-0,108	0,016	0,186	0,397	-0,085	0,164	0,028	0,312	0,309
Dia da semana												
Segunda-feira	0,081	-0,086	-0,064	0,215	0,081	-0,352	0,199	-0,247	0,320	-0,008	-0,293	-0,031
Terça-feira	0,312	0,271	0,392	0,124	-0,088	-0,121	-0,281	0,324	-0,367	0,343	0,484	-0,042
Quarta-feira	-0,152	0,150	-0,239	-0,080	-0,251	0,308	0,007	-0,186	0,094	-0,120	0,426	0,326
Quinta-feira	0,101	0,388	0,096	0,171	-0,224	0,201	-0,140	0,340	-0,290	0,623	0,257	-0,356
Sexta-feira	-0,293	-0,284	-0,089	0,293	-0,225	0,334	-0,106	0,072	0,302	0,145	-0,230	0,194
Momento letivo												
Período de aulas	0,044	0,674	-0,025	-0,369	0,068	-0,226	0,490	0,355	0,021	-0,357	-0,315	0,176
Férias dos alunos	-0,506	-0,362	0,752	-0,353	-0,032	0,564	0,709	0,841	-0,357	0,537	-0,093	-0,078
Período de exames	0,830	0,317	0,296	-0,317	0,609	-0,136	-1,068	-0,848	0,332	0,350	0,830	0,112

Tabela 5.4A Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para o Pavilhão Central, nas estações de aquecimento e arrefecimento.

Camada intermédia	Estação de aquecimento		Estação de arrefecimento	
		Camada de saída	Camada intermédia	Camada de saída
Desvio		-0,069	Desvio	-0,360
H(1:1)		0,498	H(1:1)	-0,674
H(1:2)		0,687	H(1:2)	0,821
H(1:3)		-0,787	H(1:3)	-0,688
H(1:4)		-0,084	H(1:4)	-0,236
H(1:5)		0,307	H(1:5)	0,976
			H(1:6)	0,457
			H(1:7)	0,281

Tabela 5.5A Pesos sinápticos e desvios estimados para o Pavilhão de Civil, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).

Variáveis/preditores	Estação										
	Aquecimento (camada intermédia)					arrefecimento (camada intermédia)					
	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:6)
Preditor											
Desvio	-0,461	0,225	0,530	-0,172	0,109	-0,273	0,454	0,734	-0,630	-0,001	0,858
Temperatura	0,796	0,009	-0,250	0,191	-0,797	0,399	-0,212	-0,633	0,401	0,251	-0,255
Vento	0,140	-0,336	0,176	0,143	0,234	0,523	0,662	-0,014	-0,641	-0,561	-0,163
Radiação	0,334	-0,073	0,253	0,247	-0,915	0,473	0,935	0,011	-1,032	-0,426	0,338
Humidade relativa	-0,251	-0,928	0,146	-0,182	-0,115	0,206	0,168	0,684	-0,447	0,301	0,042
Precipitação	-0,333	-0,142	0,063	-0,088	0,030	0,468	-0,394	-0,542	0,127	-0,094	0,016
Dia da semana											
Segunda-feira	-0,423	0,229	-0,141	-0,217	0,372	0,340	0,038	0,239	-0,070	-0,352	0,439
Terça-feira	0,502	0,420	0,288	0,180	-0,060	0,449	0,086	0,063	-0,243	-0,003	-0,019
Quarta-feira	-0,229	0,140	0,524	-0,191	0,084	-0,165	0,233	0,669	-0,118	0,587	-0,225
Quinta-feira	0,467	0,511	0,174	0,237	-0,077	-0,475	0,076	-0,004	-0,005	0,436	0,008
Sexta-feira	0,269	-0,301	-0,462	0,087	0,095	0,125	-0,055	-0,233	-0,607	-0,402	0,060
Momento letivo											
Período de aulas	-0,166	0,491	-0,118	0,348	-0,274	0,070	-0,397	0,404	0,300	0,584	0,584
Férias dos alunos	-0,387	-0,912	-0,469	0,721	-0,649	0,167	-0,169	0,165	-1,065	-0,602	-0,590
Período de exames	0,278	-0,276	-0,234	-0,489	-0,256	-0,576	1,060	0,360	0,095	0,508	0,663

Tabela 5.6A Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para o Pavilhão de Civil, nas estações de aquecimento e arrefecimento.

Camada intermédia	Estação de aquecimento		Estação de arrefecimento	
		Camada de saída		Camada de saída
Desvio		0,119	Desvio	0,246
H(1:1)		0,598	H(1:1)	0,484
H(1:2)		0,736	H(1:2)	0,739
H(1:3)		0,502	H(1:3)	-0,780
H(1:4)		-0,859	H(1:4)	0,737
H(1:5)		0,856	H(1:5)	0,571
			H(1:6)	0,923

Tabela 5.7A Pesos sinápticos e desvios estimados para a Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento (camada intermédia).

Variáveis/preditores	Estação														
	Aquecimento (camada intermédia)									arrefecimento (camada intermédia)					
Preditor	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:6)	H(1:7)	H(1:8)	H(1:9)	H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	H(1:5)	H(1:6)
Desvio	-0,627	-0,040	0,336	-0,077	-0,104	-0,617	-0,714	0,711	-0,229	-0,114	0,239	0,066	-0,739	-0,555	-0,948
Temperatura	0,050	-1,269	-0,456	-0,049	-0,257	0,333	0,211	-1,885	0,173	0,173	0,427	0,061	0,095	0,534	-0,886
Vento	-0,936	-0,071	0,322	-0,261	-1,594	-0,271	0,354	-1,021	0,291	0,572	-0,683	0,203	0,484	-0,016	0,320
Radiação	-0,163	0,527	-0,307	-0,228	-0,929	0,012	-0,144	-0,742	-0,205	-0,518	0,678	0,253	0,422	-1,835	0,166
Humidade relativa	0,435	-0,878	-0,158	-0,043	0,101	-0,672	0,038	0,625	0,262	-0,458	-0,825	-1,007	0,253	-0,907	-0,150
Precipitação	0,947	-0,240	-0,187	-0,389	0,135	0,783	-0,159	-0,168	-0,105	-0,139	0,658	0,229	-0,205	0,172	0,010
Dia da semana															
Segunda-feira	-0,214	0,983	0,347	-0,198	-0,218	-0,160	-0,509	-0,151	-0,262	0,304	-0,105	-0,470	-0,001	0,724	-0,527
Terça-feira	-0,349	-1,451	0,103	0,213	-0,891	-0,136	0,614	0,214	-0,053	-0,123	0,536	0,307	-0,030	-0,220	-0,778
Quarta-feira	0,207	0,734	-0,277	-0,482	-0,067	0,133	0,338	-0,241	0,117	0,077	0,106	0,083	0,312	0,570	-0,013
Quinta-feira	0,989	-0,168	-0,125	0,023	0,700	0,414	0,043	1,151	-0,163	0,016	-0,155	-0,026	-0,499	-0,009	-0,386
Sexta-feira	0,040	0,432	0,258	0,431	0,340	-0,073	0,379	0,172	0,066	0,436	-0,150	0,495	0,389	-0,992	0,525
Momento letivo															
Período de aulas	-1,488	-0,320	0,092	0,551	0,211	-0,127	-0,288	0,512	-0,290	-0,380	0,177	0,049	-0,379	0,453	-0,129
Férias dos alunos	0,656	-0,074	-0,272	-0,190	0,681	-0,473	0,766	0,416	-0,501	-0,079	-0,384	-1,472	0,373	-1,784	-0,938
Período de exames	0,427	0,667	-0,329	-0,195	-0,494	0,720	0,116	-0,317	0,597	0,524	0,105	0,297	-0,699	0,724	-0,828

Tabela 5.8A Conexões entre a camada intermédia e a camada de saída para a Torre Norte, nas estações de aquecimento e arrefecimento.

Camada intermédia	Estação de aquecimento		Estação de arrefecimento	
	Camada de saída		Camada intermédia	Camada de saída
Desvio	0,087		Desvio	-0,188
H(1:1)	-0,735		H(1:1)	-0,315
H(1:2)	-0,313		H(1:2)	-0,332
H(1:3)	0,012		H(1:3)	0,669
H(1:4)	-0,037		H(1:4)	0,660
H(1:5)	0,778		H(1:5)	0,677
H(1:6)	0,373		H(1:6)	-0,922
H(1:7)	-0,084			
H(1:8)	-0,761			
H(1:9)	0,304			