

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Sistema de condicionamento de ar para as salas de aula do prédio da Engenharia
Mecânica**

Erick E. Matsumori

**São Paulo
2004**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Sistema de condicionamento de ar para as salas de aula do prédio da Engenharia
Mecânica

Trabalho de conclusão do curso de
graduação do Departamento de
Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Erick E. Matsumori

Orientador: Prof. Alberto H. Neto

Área de concentração: Engenharia
Mecânica

São Paulo
2004

RESUMO

O trabalho de projeto de um sistema de condicionamento de ar nas salas de aula do prédio da Engenharia Mecânica tem por objetivo propor uma solução técnica para o problema de conforto térmico causado pelas altas temperaturas, principalmente na época do verão, e agravado pela falta de laje na estrutura do prédio e de ventilação adequada das salas.

Este projeto, durante a sua realização, passa por algumas etapas, como levantamento das plantas das salas de aula, levantamento dos perfis de ocupação das salas (pessoas, iluminação, equipamentos, etc.), levantamento dos materiais de revestimento (paredes, teto, vidros, etc.) e de suas características, levantamento da orientação das salas (radiação solar), cálculo da carga térmica por meio do programa de simulação Energy Plus, dimensionamento e seleção do sistema de condicionamento de ar até o levantamento de custos de instalação e operação.

De acordo com os resultados das simulações e com algumas considerações feitas com relação às limitações de construção civil e à tecnologia dos equipamentos avaliados, este trabalho mostra que o sistema mais adequado de climatização de ambientes para as salas de aula do prédio da Engenharia Mecânica é o do tipo split, com menores custos tanto de instalação como de operação.

ABSTRACT

The main purpose of this project is to propose a technical solution to the thermal comfort problem faced by teachers and students from University of São Paulo, caused by high temperatures and inadequate ventilating system inside the Mechanics Engineering classrooms building.

This project, during its development, pass through some steps, like assessment of the building dimensions, the classrooms occupancy profiles (people, lights, electric equipments, etc.), the building materials and their characteristics (walls, roof, floor, etc.), the building location thermal load calculations (simulations) using software Energy Plus, HVAC system selection up to the equipments and operations costs.

According to the simulations results and some considerations concerning building restraints and the equipment technology, the split is the system that best fits the needs and requirements of this building, in terms of installation and operations costs.

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais que desde o início da minha vida me possibilitaram a realização dos meus sonhos, sempre também com o auxílio de minhas queridas irmãs. Agradeço aos meus amigos, pois sem eles nada deste trabalho valeria a pena.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	CONFORTO TÉRMICO	2
2.1	Metabolismo básico	3
2.2	Saúde e calor	6
2.3	Produtividade e calor	9
3	CLIMATIZAÇÃO DE AMBIENTES	10
3.1	Princípio de funcionamento	10
3.1.1	Compressor	11
3.1.2	Evaporador	11
3.1.3	Condensador	12
3.1.4	Válvula de expansão	12
3.1.5	Fluido refrigerante	12
3.2	Equipamentos de climatização de ambientes	13
3.2.1	Climatizador de ar de janela	14
3.2.2	Climatizador de ar tipo <i>Split</i>	15
3.2.3	Climatizador de ar <i>Self Contained</i>	16
3.2.4	Centrais de água gelada (<i>Chiller</i>)	17
4	ENERGY PLUS	20
4.1	Testes e validações	20
4.2	EP-Launch (Simulador)	21
4.3	IDF Editor	22
5	DESCRIÇÃO DAS SALAS	25
5.1	Sala A0	25
5.2	Sala A1	26
5.3	Sala A2	26
5.4	Salas A3, A5, A7, A8, A9 e A11	26
5.5	Salas A4 e A6	26
5.6	Salas A10 e A10A	26
5.7	Dimensões das salas	27
6	ENTRADA DE DADOS PARA SIMULAÇÃO	28
6.1	Localização e clima	28
6.2	Dias típicos	28
6.3	Construção de Superfícies	30
6.4	Definição e Geometria das zonas térmicas	31
6.5	Horários (Schedules)	34
6.6	Ganhos energéticos	35
6.6.1	Pessoas	36
6.6.2	Iluminação	36
6.6.3	Equipamentos elétricos	37
6.7	Cálculo de carga térmica	38
7	RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE CARGAS TÉRMICAS	39
7.1	Avaliação das condições atuais	39
7.2	Cálculo das cargas térmicas	41
7.3	Perfis de cargas térmicas	43
7.4	Resumo dos resultados de cargas térmicas	45
8	SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	46

8.1	Dimensões	46
8.2	Equipamentos e instalação	47
8.3	Tarifação	50
9	CONCLUSÕES	56
10	BIBLIOGRAFIA	59

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é dimensionar um sistema de climatização de ambientes para as salas de aula do prédio do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

É necessário um sistema de climatização de ambientes para essas salas, devido ao problema de conforto térmico causado pelas altas temperaturas, principalmente na época do verão, e agravado pela falta de laje na estrutura do prédio e de ventilação adequada das salas.

Para se iniciar o trabalho é necessária uma compreensão do que é o conforto térmico e como ele afeta as atividades diárias das pessoas.

Será descrita aqui toda a construção das salas, com suas portas, janelas, paredes, teto e piso, com suas reais dimensões, bem como um perfil médio de ocupação destas por parte de alunos e professores de engenharia mecânica da Escola Politécnica.

Para tornar possível o dimensionamento do sistema em questão, outros dados importantes também serão descritos, como posicionamento do prédio em relação ao sol, as temperaturas normalizadas pela ABNT para os cálculos de cargas térmicas, velocidade do vento, umidade relativa do ar, a quantidade de energia liberada pela iluminação, pelas pessoas e pelos equipamentos elétricos, etc.

De posse de todos esses dados é possível, através do *software Energy Plus*, que também será mais bem descrito adiante, simular as condições vividas pelos alunos e professores no dia-a-dia, tanto em dias típicos, como para um período, por exemplo, de um ano.

Ao final do trabalho, com base nos resultados das simulações, será definido o sistema de climatização de ambientes que mais se adequa às condições de construção e operacionais das salas de aula.

2 CONFORTO TÉRMICO

As condições climáticas comumente não interferem na temperatura interna do corpo humano que permanece constante, pois o homem é um ser homeotérmico e sua temperatura interna varia de 33° a 41° C. As alterações só irão ocorrer quando a temperatura do ambiente ultrapassa limites nos quais o organismo não consegue mais equilibrar a temperatura, quer seja baixa ou alta temperatura.

O metabolismo do corpo se dá com a queima de calorias e a produção de energia, devido ao oxigênio que gera, então, o calor interno do corpo que faz com que o homem troque calor com o meio. Essa troca pode ser feita por condução, convecção, radiação e evaporação.

O organismo humano faz a troca com o meio por condução quando há o contato entre o corpo e algum objeto e haja um gradiente de temperaturas entre eles.

A troca de calor por convecção se dá quando há uma diferença de temperatura entre o corpo e um fluido em movimento sobre ele, como o ar ou a água.

Tanto as transferências de calor por condução, como por convecção, exigem a presença de um gradiente ou uma diferença de temperatura entre dois meios. Em contraste, a transferência de calor por radiação térmica não exige a presença de um meio material, sendo, portanto, uma taxa de energia emitida pelo corpo em função de sua temperatura não nula para as superfícies que o circundam.

Com a evaporação há perda de calor do corpo para o ambiente através de massa do suor liberado pelo corpo para o meio externo.

Os mecanismos termo-reguladores existem para manter estável a temperatura interna do corpo, pois, como dito anteriormente, não pode ultrapassar certos limites, porque com o ganho ou perda de calor pode ocorrer um aumento ou diminuição interna no organismo ocasionando danos à saúde ou até mesmo a morte do indivíduo.

Em ambientes com temperaturas mais baixas, o organismo tende a perder calor para o meio e logo os mecanismos termo-reguladores são acionados com o objetivo de evitar a perda e aumentar a produção interna de calor. Respectivamente acontecem os seguintes mecanismos: a vaso constrição periférica, que faz com que haja a contração

dos vasos capilares mais próximos à pele e a dilatação dos vasos mais próximos aos órgãos internos. Isto ocorre para que a temperatura da pele fique o mais próximo possível da temperatura do meio evitando a perda por radiação e convecção. O mecanismo do arrepio, que é a movimentação do músculo para aquecimento da pele por atrito e aumenta sua rugosidade evitando assim a perda por convecção. Persistindo o frio, o homem começa a fazer uso de seus mecanismos instintivos, como curvar o corpo, e esfregar as mãos. Pode ainda ingerir alguma bebida ou alimento quente e utilizar-se de suas habilidades, como tecer roupas apropriadas, fazer abrigos, etc.

Na presença do calor ocorrem em seqüência os seguintes mecanismos: a vaso dilatação periférica, que faz com que aumente a temperatura da pele aumentando a perda de calor para o meio por convecção e por radiação; o suor, que será evaporado. A evaporação incrementa as perdas de calor do corpo. A temperatura da pele aumenta se o ar estiver muito úmido, pois não ocorre a evaporação total e parte do suor fica em sua superfície.

Poderá ocorrer também a redução automática do metabolismo com o intuito de diminuir a produção interna do calor no organismo.

Baseado na existência desses fatores, pode-se dizer que o conforto térmico ocorre quando as trocas de calor que o corpo está submetido for nulo e a temperatura da pele e o suor estiverem dentro de certos limites, satisfazendo as condições de conforto de organismo humano.

2.1 Metabolismo básico

Metabolismo básico é a condição que se observa em um sujeito saudável, após 12 horas de jejum, deitado, em repouso absoluto, normalmente vestido e em condições ambientais de conforto.

As variáveis de conforto térmico se dividem em ambientais, atividade física e vestimenta. As variáveis ambientais são as temperaturas do ar, umidade relativa e a velocidade do ar.

Quanto maior a atividade física, tanto maior será o calor gerado por metabolismo.

Tabela 1: atividade e calor gerado pelo metabolismo

Atividade	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
Sentado Teatro	65	30	95
Sentado com trabalho leve	70	45	115
Atividade moderada no escritório de trabalho	75	55	130
Trabalho sedentário - Restaurante	80	80	160
Dançando moderadamente	90	160	250
Trabalho Pesado	170	255	425
Atividades atléticas	210	315	525

(ASHRAE Fundamentals, 1997)

Com relação à vestimenta, podemos dizer que a sua resistência térmica é de grande importância na sensação de conforto térmico do homem, pois troca de calor com o meio será menor se maior for a resistência térmica da roupa. Esta variável é medida em "clo", que tem um valor físico de $0,155\text{m}^2\text{K/W}$.

Tabela 2: índice de índices de resistências térmicas de roupas

Homem	clo	Mulher	clo
Camiseta regata	0,06	Calcinha e sutiã	0,05
Camiseta	0,09	Blusinha leve	0,20
Cueca	0,05	Blusinha pesada	0,29
Camisa manga curta	0,14	Vestido leve	0,22
Camisa manga longa	0,22	Vestido pesado	0,70
Calça leve	0,26	Saia leve	0,10
Calça pesada	0,32	Saia pesada	0,22
Blusa leve	0,20	Calça leve	0,26
Blusa pesada	0,37	Calça pesada	0,44
Jaqueta leve	0,22	Blusa leve	0,17
Jaqueta pesada	0,49	Blusa pesada	0,37
Meias	0,04	Jaqueta leve	0,17
Sapatos	0,04	Meia-calça	0,01
Botas	0,08	Sandália	0,02
		Sapato	0,04

A tabela anterior foi proposta por Berglund (1980) e deve ser utilizada combinada com a seguinte equação, de acordo com McCullough e Jones (1984).

$$I_{clo} = 0,835 \sum I_{clui} + 0,161 \quad (1)$$

em que I_{clui} é a resistência térmica efetiva de cada peça de vestuário, e I_{clo} é a resistência térmica total do conjunto.

Em um clima muito quente é aconselhável utilizar roupas leves e abertas, pois as roupas longas e grossas (pesadas) dificultam a evaporação fazendo com que o suor evaporado permaneça entre a pele e a roupa, prejudicando a troca de calor entre a pessoa e o meio.

2.2 Saúde e calor

A combinação de altas temperaturas (significativamente acima do normal) e umidade relativa alta pode reduzir drasticamente a capacidade do corpo humano de manter a sua temperatura interna correta. Exposições prolongadas em ambientes com temperatura excessiva e umidade alta podem causar câimbras, esgotamento, fadiga térmica, e até danos ao cérebro – AVC (Acidente Vascular Cerebral). Para alguns, especialmente para os idosos e enfermos o calor em excesso pode causar a morte.

O Índice de Calor (IC), também chamado de "Temperatura Aparente", é uma medida de como a umidade associada à altas temperaturas reduz a capacidade do corpo em manter-se frio. O IC é o valor de temperatura que fornece a mesma sensação térmica que o corpo humano interpreta quando a umidade e/ou temperatura fogem dos níveis normais. Por exemplo, se a temperatura do ar é de 34°C, e a umidade é de 50% o efeito destas condições no corpo equivale a uma temperatura de 39,5°C. A premissa para o cálculo do Índice de Calor é que, a pessoa a ser avaliada, esteja à sombra, ao nível do mar, e com vento de 10 km/h. Exposições ao sol podem aumentar o IC entre 3° e 8°C. Variações na velocidade do vento normalmente têm pequeno efeito sobre o IC.

A tabela a seguir mostra a Temperatura Aparente (IC) com base na Temperatura do Ar e a Umidade Relativa do Ambiente.

Tabela 3: Temperatura aparente

U.R.(%)	Temperatura do Ar (°C)							
	26	28	30	32	34	36	38	40
30	24,8	27,2	29,7	32,0	34,4	37,2	40,5	44,2
40	25,9	28,1	30,9	33,6	36,7	40,0	44,1	49,3
50	26,4	29,0	32,0	35,2	39,5	44,3	49,7	55,9
60	27,5	30,1	33,3	37,4	42,6	49,3	56,5	63,3
70	28,4	31,3	35,2	40,6	47,5	55,0	63,1	-
Temperatura Aparente (°C) - Índice de Calor								

O grau de stress causado pelo calor pode variar com a idade, saúde, e características do corpo. A seguir estão listados alguns possíveis sintomas de stress térmico associado a intervalos de Temperatura Aparente (IC)

Tabela 4: Stress térmico associado a intervalos de temperatura aparente

Temp. Aparente	Nível de Perigo	Síndrome de Calor (sintomas)
27° – 32°C	Atenção	Possível fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física
32° – 41°C	Muito cuidado	Possibilidade de câimbras, esgotamento, e insolação para exposições prolongadas e atividade física.
41° – 54°C	Perigo	Câimbras, insolação, e esgotamento prováveis. Possibilidade de dano cerebral (AVC) para exposições prolongadas com atividade física.
Mais que 54°C	Extremo Perigo	Insolação e Acidente Vascular Cerebral (AVC) iminente

2.3 Produtividade e calor

As perdas na produtividade por excesso de calor foram analisadas e apresentadas pela Agência Espacial Norte Americana através do relatório NASA Report CR-1205-1, conforme a tabela abaixo. O relatório conclui, por exemplo, que quando a temperatura da área de trabalho atinge 30°C a produtividade cai cerca de 20% e há um aumento de 75% na frequência de erros.

Tabela 5: Perda de produtividade

Temperatura (°C)	26	28	30	32	34	36	38	40
Produtividade (%)	-6,5	-12,5	-20,0	-28,5	-39,0	-51,0	-64,5	-76,5
Frequência de erros (%) *	+3,5	+12	+75	+270	+550	> +700	-	-

* Ex. se o nível de erros é 1/200 (0,5%) a 24°C o nível de erros passará para 3,7/200 (1,85%) a 32°C.

O conforto térmico pode trazer muitas vantagens para o ser humano, como maior rendimento do trabalho, menor índice de acidentes, menor índice de doenças (fadiga, exaustão, desidratação), melhor entrosamento funcional, social e até maiores lucros.

Desta maneira pode-se verificar que a observação do conforto térmico dos ocupantes é de fundamental importância no projeto, e de forma a proporcionar aumento de produtividade das pessoas que ocupam o ambiente.

3 CLIMATIZAÇÃO DE AMBIENTES

Uma das características das instalações de climatização de ambientes é propiciar mais conforto ao homem. Isso permitiu que os espetáculos teatrais deixassem as arenas e fossem para salas fechadas, permitiu sessões de cinema com conforto, permitiu pacientes em salas de UTI, recuperando suas saúdes, permitiu que cirurgiões operassem durante horas sem encharcar de suor o corpo do paciente.

O sistema de climatização de ambientes permitiu o avanço das comunicações, da TV, da indústria farmacêutica, da indústria química, da informática, da chegada do primeiro homem à lua, das usinas hidroelétricas, das plataformas de extração de petróleo, das usinas siderúrgicas, das usinas atômicas de eletricidade, da telefonia, do celular, da indústria alimentícia, da indústria de cosméticos.

A climatização de ambientes revolucionou e continua revolucionando a construção civil, permitiu a criação de edifícios com maior aproveitamento vertical, viabilizou túneis e tornou, nestes últimos vinte anos, a vida mais fácil de ser vivida.

De aparente fácil concepção e instalação, necessita, porém, de conhecimentos e práticas profundas e específicas.

Uma instalação mal projetada e mal executada pode causar danos irreparáveis, assim como o mau motorista os causa por sua inépcia e imperícia ao volante de seu automóvel.

É necessário se ter uma noção exata da carga térmica, do tipo adequado de equipamento, de filtros corretamente selecionados, ar exterior, controles adequados, instalações elétrica e hidráulica bem dimensionadas, dutos, bombas, ventiladores, torres, difusores ou bocas de ar, motores, tudo, enfim, corretamente especificado, velocidades e pressões.

3.1 Princípio de funcionamento

Um sistema de refrigeração é composto basicamente por:

- Compressor;
- Evaporador (Congelador);
- Condensador (Radiador);

- Tubo Capilar ou Válvula de Expansão;
- Filtro secador;
- Fluido refrigerante.

3.1.1 Compressor

O compressor de um sistema de refrigeração funciona no sentido inverso de um motor à combustão. O funcionamento de um compressor é apresentado na Fig. 1:

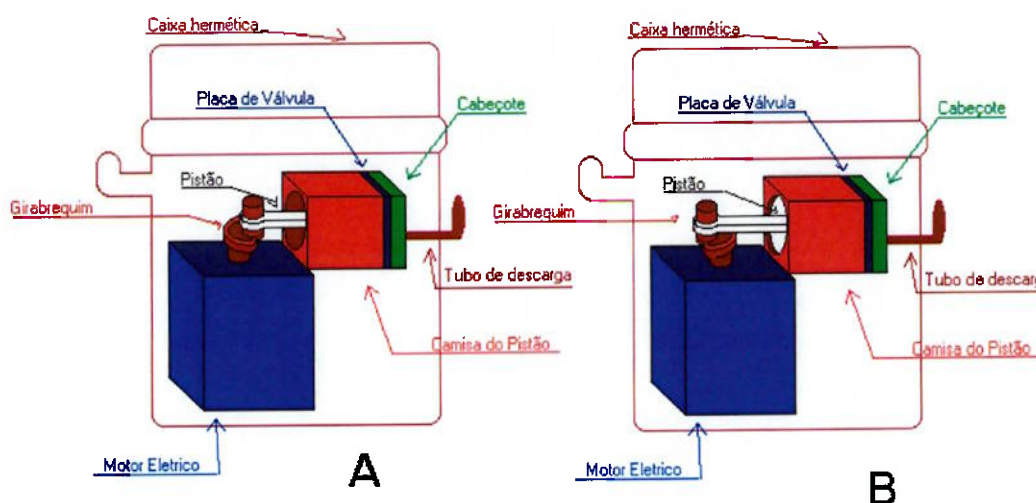


Figura 1 - Compressor

Basicamente o motor elétrico aciona o pistão que comprime o fluido na camisa e abre a válvula de alta (posição A do desenho). Depois o pistão é puxado e a válvula de baixa abre e o fluido refrigerante entra na camisa (posição B do desenho), assim continuamente até que o motor elétrico seja desligado. Sua função é circular o fluido no sistema, e causar uma diferença de pressão no sistema; entre o evaporador e o condensador.

3.1.2 Evaporador

O evaporador é basicamente uma serpentina de cobre ou alumínio ou às vezes de ferro. Sua função é evaporar o fluido que está dentro dele, e retirar o calor do ambiente.

3.1.3 Condensador

O condensador é semelhante ao evaporador, mas sua função é inversa. Ele tem como objetivo condensar o fluido que deixa o compressor, rejeitando para o meio ambiente calor retirado pelo evaporador.

3.1.4 Válvula de expansão

A válvula de expansão é simplesmente um dispositivo que liga o condensador ao evaporador, e sua função é controlar o fluxo de fluido no sistema. No caso da geladeira a válvula de expansão passa a ser simplesmente um tubo com diâmetro bem pequeno denominado tubo capilar. Para sistemas de maior porte é usada uma válvula de expansão que ajusta automaticamente a quantidade de fluido que circula pelo sistema, conforme as condições de operação.

3.1.5 Fluido refrigerante

A função do fluido refrigerante é transportar o calor do evaporador para o condensador.

O sistema completo é exemplificado pela Fig. 2:

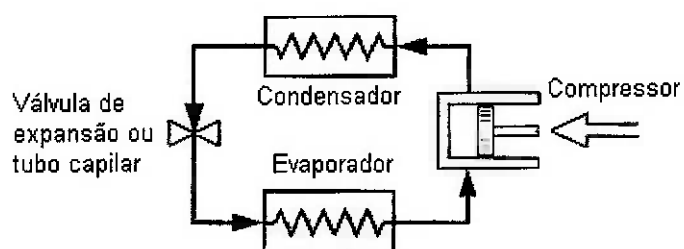


Figura 2 - Diagrama simplificado do sistema de compressão de vapor

Para o aparelho de climatização de ambientes, o funcionamento se dá da seguinte forma:



Figura 3 - Funcionamento aparelho de climatização de ambientes

De acordo com a Fig. 3, a seta nº 1 indica a entrada de ar quente que vem da sala para o aparelho. Esse ar é passado pelo evaporador (indicado pela cor azul), que está em uma temperatura menor. O ar então perde calor e esfria voltando para a sala com uma temperatura menor, sendo representado no desenho pela seta nº 2.

Enquanto isso, o condensador (representado pela cor marrom) está sendo resfriado pelo ar de fora da sala. A seta nº 3 representa a entrada de ar frio para o condensador, que por sua vez está em uma temperatura maior. O ar externo recebe calor, sendo rejeitado para o ambiente novamente.

Resumindo, o calor do ar de dentro da sala é absorvido pelo evaporador e solto pelo condensador no ar de fora da sala.

Estão representados ainda neste desenho o compressor (cor cinza) e um sistema de ventilação forçada (cor verde) que permite a movimentação de ar para os trocadores de calor do sistema.

3.2 Equipamentos de climatização de ambientes

Existem no mercado diversos modelos e sistemas construtivos de aparelhos de climatização de ambientes, desde os mais compactos, mas menos eficientes, até os centrais que são utilizados para grandes prédios e com maiores eficiências.

3.2.1 Climatizador de ar de janela



Figura 4 - Condicionador de ar de janela

É o tipo mais simples de equipamento (vide Fig. 4) de expansão direta e condensação a ar, normalmente limitado a capacidades entre 1.775 e 7.500 kcal/h (5,01 e 8,78 kW).

A seguir estão apresentadas algumas vantagens e desvantagens deste tipo de equipamento:

Vantagens

- Compactos, não requerem instalação especial, fácil manutenção;
- Controle e atendimento específico de uma determinada área;
- Não ocupam espaço interno útil;
- São produzidos para aquecimento por reversão de ciclo (bomba de calor).

Desvantagens

- Pequena capacidade, maior nível de ruído, não tem flexibilidade;
- Maior custo energético (kW/TR), distribuição de ar a partir de ponto único;
- Alterações na fachada da edificação;
- O local ideal para sua instalação normalmente interfere como aberturas ou outros elementos do prédio.

3.2.2 Climatizador de ar tipo *Split*



Figura 5 - Climatizador de ar tipo *Split*

São equipamentos que, pela capacidade e características, aparecem logo após os condicionadores de janela.

O Split (vide Fig. 5) é um aparelho dividido em duas unidades (evaporadora e condensadora) que devem ser interligadas por tubulações de cobre por onde circulará o refrigerante e possui múltiplas opções de montagem.

São aparelhos que atendem uma gama de obras muito ampla, especialmente devido à sua versatilidade.

São produzidos nas capacidades de 7.000 BTU/h até 60.000 BTU/h (2,05 até 17,57 kW).

A seguir estão apresentadas algumas vantagens e desvantagens deste tipo de equipamento:

Vantagens

- São compactos, de fácil instalação e manutenção, têm grande versatilidade;
- Interferem pouco com fachadas;
- A distribuição de ar pode ser por dutos, operam como bomba de calor (ciclo reverso).

Desvantagens

- Capacidade limitada.

3.2.3 Climatizador de ar *Self Contained*

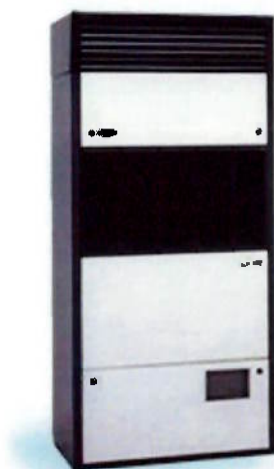


Figura 6 - Climatizador de ar *Self Contained*

São aqueles aparelhos de climatização de ar, Fig. 6, compactos ou divididos que encerram em seus gabinetes todos os componentes necessários para efetuar o tratamento do ar, tais como: filtração, refrigeração, umidificação, aquecimento, desumidificação, movimentação do ar.

Possuem ainda sistemas de comando, controles e segurança. Praticamente são condicionadores que, para operar, necessitam somente de força (energia elétrica) e de drenagem.

Suas potências normalmente situam-se na faixa de 3TR a 30TR (10,54 a 105,41 kW), podendo tanto ser instalados com insuflamento com “Plenum” ou como climatizadores de ambientes centrais, geralmente distribuindo o ar tratado através de redes de dutos. São fabricados para condensação a ar ou água.

A seguir estão apresentadas algumas vantagens e desvantagens deste tipo de equipamento:

Vantagens do Self Contained:

As principais vantagens que apresentam são:

- Maior simplicidade de instalação;
- Em geral menor custo por TR, manutenção mais econômica;

- Fabricação seriada com aprimoramentos técnicos constantes, garantia de desempenho por testes de fábrica;
- Manutenção e reposição de peças mais eficientes;
- Maior rapidez de instalação;
- Grande versatilidade para projetos (zoneamentos, variações de demanda) etc.

Desvantagens

- Não são produzidos para operar como bomba de calor. Os equipamentos divididos requerem procedimentos habituais de vácuo e carga de fluido refrigerante.

3.2.4 Centrais de água gelada (*Chiller*)



Figura 7 – *Chiller* condensação a ar

Este equipamento, como mostra a Fig. 7, mais conhecidos como resfriadores de líquidos, quando usados para fins de climatização de ambientes utilizam a água como fluido intermediário. Esta água, devidamente resfriada ($\pm 7^{\circ}\text{C}$) é levada para as unidades condicionadoras para água gelada, conhecidas como "*Fan Coils*".

Os "*Fan Coils*" nada mais são do que um conjunto de serpentinas (através da qual circula a água resfriada), um ventilador (responsável pela movimentação do ar a ser tratado) e um sistema de filtragem do ar.

Os resfriadores de líquido são produzidos numa larga faixa de capacidades:

- Desde 20 até 220 TR (70,27 até 773,02 kW) quando utilizam compressores recíprocos ou alternativos;

- Desde 250 até 1.000 TR (878,43 até 3513,72 kW) ou mais quando utilizam compressores centrífugos.

São também projetados para condensação a ar ou água. Estes sistemas são, sem dúvida, os que impõem uma maior complexidade ao conjunto.

A seguir estão apresentadas algumas vantagens e desvantagens deste tipo de equipamento:

Vantagens

Pelas suas características, o sistema inclui diversas vantagens, entre as quais citamos:

- Economia de custos de operação;
- Menor potência instalada;
- Controle preciso dos ambientes climatizados;
- Maior eficiência em cargas parciais;
- Menor área ocupada pela centralização do equipamento em um único local;
- Facilidade de manutenção;
- Alto desempenho.

Desvantagens

- Geralmente implicam num custo elevado de implantação;
- Para aquecimento necessitaria acréscimo de equipamentos adicionais (caldeira) ou resistências elétricas nas unidades condicionadoras;
- Maior complexidade do sistema.

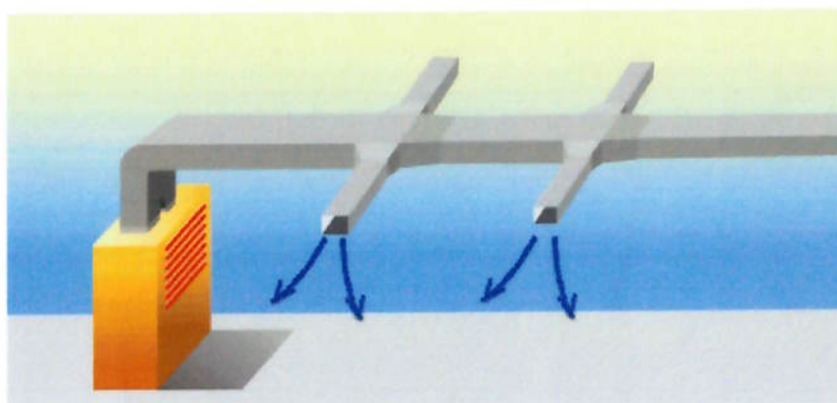


Figura 8 – Modelo de sistema de distribuição de ar

A seleção e o projeto de um sistema de água gelada estão predominantemente vinculados à atuação das empresas especializadas em projetos de sistemas de climatização de ambientes. Da mesma forma, a sua instalação é sempre feita por instaladores qualificados e, muitas vezes, especializados neste tipo de obra. A otimização do processo de seleção está vinculada ao uso de programas de computador. As especificações e o projeto são rígidos e com um nível de detalhes adequado ao esclarecimento de todos os quesitos envolvidos. A Fig. 8 representa o sistema de distribuição de ar, que deve ser dimensionado para que todas as áreas da construção recebam o ar resfriado ou aquecido.

Os resfriadores ou "chillers" são instalados em casas de máquinas especialmente concebidas para esta finalidade, incluindo os sistemas de distribuição de água gelada, bombas de recalque, painéis elétricos de segurança e controle e sistema de água de condensação para equipamentos de condensação a água. Os equipamentos de condensação a ar utilizam normalmente condensadores remotos, adequadamente localizados.

Este tipo de equipamento atende uma parcela das obras de médio porte e a quase totalidade das obras de grande porte.

A complexidade e custo inicial são geralmente justificados pelas diversas vantagens mencionadas relativas a maior eficiência destes equipamentos.

4 ENERGY PLUS

Energy Plus é um programa de simulação de energia predial para modelagem de aquecimento, resfriamento, iluminação, ventilação e outros fluxos de energia. Este programa é distribuído gratuitamente pelo Departamento de Energia do Estados Unidos.

É um programa baseado nas características e capacidades dos *softwares Blast* e *DOE-2*, porém com inovadas capacidades de simulação, como frequência de menos de uma hora na tomada de dados, sistemas modulares e integração com os prédios com simulação de zonas baseadas em balanço de aquecimento, fluxo de ar em várias zonas, conforto térmico e sistemas fotovoltaicos.

Energy Plus é um software autônomo de simulação com uma interface relativamente amigável, sendo que a transferência de informações é feita através de arquivos de texto.

Este programa é formado por dois utilitários que auxiliam na criação de dados de entrada e a realizar as simulações, sendo o editor de IDF (*Input Data File*) e o *EP-Launch*, respectivamente.

4.1 Testes e validações

Os Testes de Simulação de Energia Predial (*Building Energy Simulation Test – BESTest*) para Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar da Agência Internacional de Energia (IEA) contêm um conjunto de testes analíticos, assim como um conjunto de resultados comparativos para outros sete programas de simulação predial que participaram no projeto da IEA.

Testes analíticos comparam os resultados de programas com soluções matemáticas para casos simples. Sendo este um excelente método para se avaliar a precisão dos resultados, uma vez que há apenas uma solução para cada caso analisado, dadas as condições de contorno. Testes comparativos comparam programas com eles mesmos ou com outros programas de simulação. Os dois tipos de testes promovem dois tipos de resultados: validação e solução de problemas com o programa (*bugs*).

A validação é obtida quando os resultados do programa em teste são similares aos resultados analíticos. A solução de problemas do programa é obtida quando em certos casos os resultados não condizem com soluções analíticas ou com soluções de outros programas já validados, tornando necessária uma procura sistemática para se determinar a fonte da diferença.

Existem dois testes que já foram concluídos com o Energy Plus:

- Testes comparativos usando a norma ANSI/ASHRAE 140-2001 e os métodos de Testes de Simulação de Energia Predial (*Building Energy Simulation Test – BESTest*) do Programa de Aquecimento Solar e Refrigeração da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programm - IEA SHC*);
- Testes descritos no projeto nº22 do Programa de Aquecimento Solar e Refrigeração da Agência Internacional de Energia (IEA) HVAC BESTest.

Em ambos os testes já concluídos, o Energy Plus obteve um erro máximo, considerando-se os resultados analíticos e comparativos, de 5,6%, demonstrando que seus resultados são realmente válidos.

4.2 EP-Launch (Simulador)

O *EP-Launch* é uma maneira simples de simular os arquivos do *Energy Plus*. O *EP-Launch* permite que o usuário selecione o arquivo de entrada diretamente ou de uma lista de arquivos recentes, como mostrado na Fig. 9. Permite também a seleção de arquivos de dados de tempo (temperaturas, velocidade do vento, etc.) de determinadas regiões ou cidades. Depois que a simulação do *Energy Plus* termina, o *EP-Launch* relata a ocorrência de algum erro ou alerta. Além disso, *EP-Launch* funciona como um gerenciador dos arquivos a cada simulação e permite acesso a um editor de texto para quaisquer arquivos de entrada ou de saída. Ele acessa relatórios de diversos arquivos com os resultados de simulação, e ainda tem a possibilidade de acionar um software capaz de visualizar os arquivos em desenho das construções, como o AUTOCAD®.

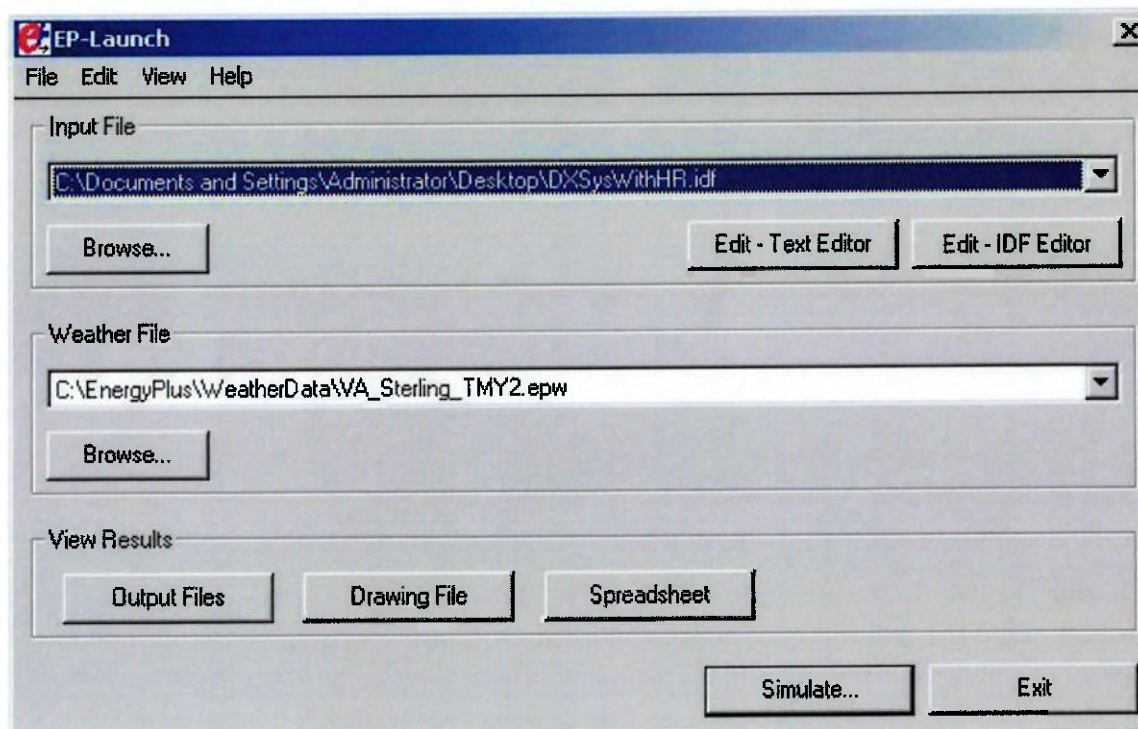


Figura 9 - Tela do *EP-Launch*

4.3 IDF Editor

Um meio simples de criar e editar os arquivos de entrada de dados (IDF) do *Energy Plus* é através do *IDF Editor*, sendo que na Fig. 10 pode ser observada uma visualização da tela de acesso. Qualquer objeto do *Energy Plus* pode ser visto e editado usando um formulário. Para entradas com várias opções, há uma lista. Quando uma entrada numérica tem uma faixa de valores válidos, esses valores são mostrados. Ele disponibiliza também automaticamente uma lista de nomes de objetos quando um objeto precisa estar ligado à outro. Mostrando objetos do mesmo tipo próximos uns aos outros em uma tabela, há uma facilidade de se observar dados que são diferentes no interior do prédio. As saídas do *IDF Editor* são colocadas no *Energy Plus* como um arquivo de entrada com sintaxe e comentários que facilitam o entendimento do usuário.

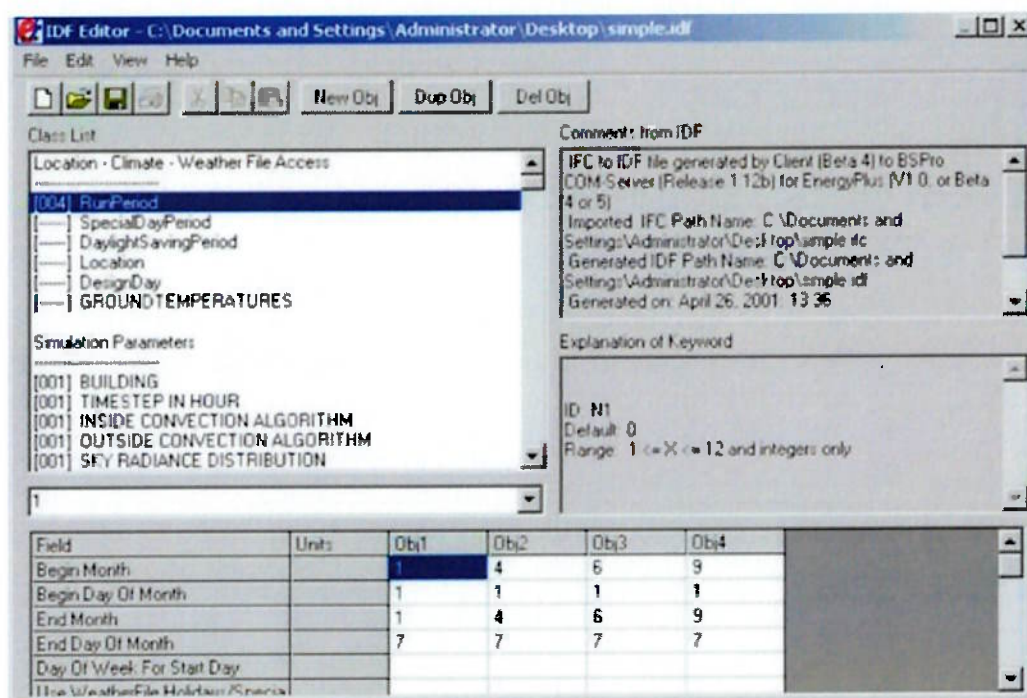


Figura 10- Tela do *IDF Editor*

A Fig. 11 mostra a tela de um programa de visualização de desenhos CAD que são gerados pelo Energy Plus. Esta saída permite verificar se a modelagem física do prédio foi feita corretamente.

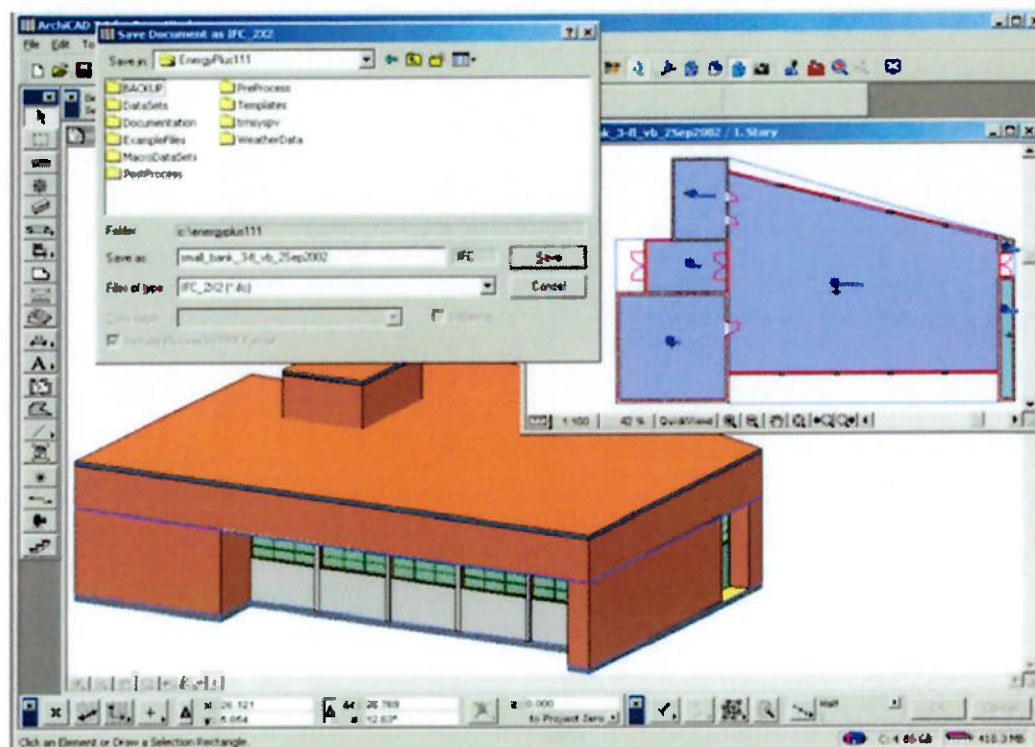


Figura 11 - Programa visualizador de desenho

Os arquivos de saída da simulação do *Energy Plus* são basicamente o *.dwg (desenho) e arquivos que contém os valores numéricos obtidos. Esses arquivos numéricos dependem dos dados que foram requeridos no arquivo IDF e podem ser facilmente tratados no Microsoft Excel, facilitando a criação de gráficos e tabelas.

5 DESCRIÇÃO DAS SALAS



Figura 12 - Sala de aula completamente cheia

Observando-se a Fig. 12, pode-se notar o nível de ocupação de algumas salas de aulas, que serão objeto deste trabalho. Esta situação é bastante comum de ser encontrada nas salas da Engenharia Mecânica. Em dias quentes de verão, é praticamente insuportável assistir aulas, tanto pelo incômodo do calor, como o barulho dos ineficientes ventiladores de teto.

As salas de aula do prédio da Engenharia Mecânica a serem analisadas são as seguintes: A0 (Poli Júnior), A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A10A e A11, totalizando 13 ambientes que serão analisados e simulados para obtenção das cargas térmicas necessárias para que se tenha um conforto térmico adequado.

5.1 Sala A0

Esta sala pertence à Poli Júnior. Nela estão alguns computadores e o número pessoas médio considerado para a simulação é de 12. Esta sala está constantemente em uso, desde o período da manhã, até à noite.

5.2 Sala A1

É uma sala dividida em duas, mas aqui considerada como apenas uma. Metade desta sala está atualmente desocupada e a outra metade é um laboratório de controle e automação em que se encontram diversos computadores para tais fins. Seu nível de ocupação é de cerca de 20 alunos por aula, porém elas não são freqüentes, sendo aproximadamente 4 aulas por semana.

5.3 Sala A2

É a maior das salas de aula da Engenharia Mecânica e talvez por esse motivo, a mais problemática. Sua capacidade máxima é de 200 alunos, quantidade que é atingida apenas em determinados horários e em alguns dias do ano. Ela possui apenas quatro ventiladores de teto. Sua área de vidro recebe bastante radiação solar durante quase todo o dia. Apesar de não estar sempre em sua ocupação máxima, seu uso é constante.

5.4 Salas A3, A5, A7, A8, A9 e A11

Estas salas de aula possuem as mesmas dimensões e perfis de ocupação bastante semelhantes. Seu uso é bastante freqüente e suas capacidades máximas são de aproximadamente 60 pessoas cada, o que não ocorre com freqüência. Estas salas não recebem radiação solar direta devido à presença de grandes árvores à frente de suas janelas.

5.5 Salas A4 e A6

Estas duas salas possuem as mesmas dimensões das salas A3, A5, A7, A8, A9 e A11, porém sua capacidade é limitada pela quantidade de assentos e pelas grandes mesas de desenho. Seu uso também é pouco freqüente, sendo de aproximadamente 4 vezes por semana, durante 2 horas cada.

5.6 Salas A10 e A10A

As salas A10 e A10A juntas têm as mesmas dimensões das salas A3, A4, etc. A diferença é que elas são divididas formando salas menores. Seu uso é menos freqüente do que as salas ímpares, mas mais freqüentes do que as salas A4 e A6.

5.7 Dimensões das salas

Para entendimento das dimensões, foram adotadas algumas referências: as dimensões de comprimento são dadas como sendo a distância da lousa até a parede à sua frente. Apenas para as salas A0 e A1, o comprimento é dado pela distância da parede onde se situa a porta até a parede à sua frente, pois estas salas não possuem lousas. Todas as salas possuem pé direito (altura) de 3 metros. Na tabela 6 são apresentadas as dimensões principais de todas as salas analisadas.

Tabela 6: Dimensões das salas de aula

Salas	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A10A	A11
Compr. (m)	6,6	13,4	12,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	6,2	6,2	12,4
Largura (m)	13,4	18,8	17,0	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4

Na Fig. 13 há uma planta das salas de aulas do prédio. Nela se pode ter a noção das dimensões das salas, bem como sua disposição. As barras pretas indicam os locais onde estão situadas as lousas em cada sala, salvo nas salas A0 e A1.

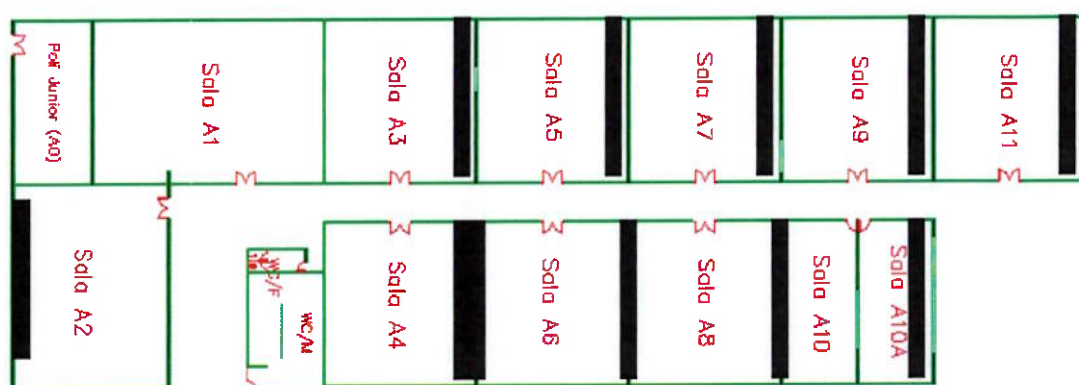


Figura 13 - Planta das salas de aula

6 ENTRADA DE DADOS PARA SIMULAÇÃO

6.1 Localização e clima

Para a simulação, alguns dados da localização do prédio são necessários, tais como:

- Latitude = $-23,62^{\circ}$
- Longitude = $-46,65^{\circ}$
- GMT = -3
- Altitude = 803m

Sendo:

Latitude: Distância, medida em graus, a partir do equador terrestre até o paralelo do observador, na direção Norte-Sul. A latitude pode ser N ou S (positiva para norte e negativa para sul).

Longitude: Ângulo formado entre o meridiano de Greenwich na Inglaterra e o meridiano do observador, na direção Leste-Oeste. A longitude pode ser L ou O (positivo para leste e negativo para oeste).

GMT (Greenwich Meridian Time - Horário no meridiano de Greenwich, na Inglaterra): Um GMT = -3 significa um atraso de 3 horas em relação ao horário do meridiano de Greenwich.

Altitude: Altura em determinado ponto medida a partir do nível do mar.

Os dados de localização geográfica utilizados são referentes à cidade de São Paulo.

6.2 Dias típicos

Os dias típicos são utilizados para que o *software Energy Plus* tenha parâmetros para simular as condições desejadas em dias com condições térmicas características.

Para este trabalho foram definidas duas épocas distintas do ano: verão e inverno. Em cada uma dessas duas estações do ano foram simulados cinco dias de uma semana, para que os valores de saída da simulação fossem uma média e não apenas uma imagem de um dia apenas.

Tabela 7: Condições climáticas para verão e para inverno

	Verão	Inverno
Máxima temperatura de bulbo seco (°C)	32	24
Variação de temperatura (°C)	10	10
Temperatura de bulbo úmido (°C)	24	18
Pressão barométrica (Pa)	92043	92043
Velocidade do vento (m/s)	2,4	2,6
Direção do vento (°)	135	112

6.3 Construção de Superfícies

Para se colocar os dados de construção do prédio na simulação do *Energy Plus* são necessárias as definições de todo o material construtivo das salas.

Tabela 8: Definições dos materiais construtivos das salas

Nome	Argamassa	Tijolo	Concreto	Madeira	Telha de Zinco	Forro	Laje
Espessura (m)	0,01	0,18	0,12	0,05	0,002	0,01	0,12
Condutividade (W/m.K)	0,72	0,69	1,2	0,12	85	0,036	1,4
Densidade (kg/m ³)	1860	2000	2300	510	6800	105	2300
Calor Específico (J/kg.K)	780	800	800	1380	400	795	880

Tabela 9: Características dos vidros utilizados nas salas

Nome	Vidro
Espessura (m)	0,003
Condutividade (W/m.K)	0,9

Através dos materiais, são formados o teto, o piso, as paredes, as portas e as janelas. A construção de cada uma dessas partes se dá informando-se cada camada que compõe a parte, partindo-se da camada mais externa (se houver mais de uma).

Tabela 10: Composição de cada elemento construtivo

Nome	Parede	Piso	Teto	Janela	Porta
Camada externa	Argamassa	Concreto c/ brita	Telha de zinco	Vidro	Madeira
2ª camada	Tijolo		Espaço de ar		
3ª camada	Argamassa		Forro		

6.4 Definição e Geometria das zonas térmicas

A entrada dos dados geométricos dos prédios é bastante trabalhosa e exige bastante atenção, pois deve seguir critérios de orientação e ordem de disposição dos vértices da construção. Caso esta orientação e ordem não sejam colocadas adequadamente, ocorrem problemas de incompatibilidade geométrica, causando uma falha na simulação.

São definidas no arquivo IDF, através do *IDF Editor*, as zonas que serão simuladas para determinado prédio. Nesse caso, cada sala de aula representa uma zona, que possui perfil de ocupação, temperaturas, cargas térmicas independentes das demais.

Os dados geométricos são inseridos através de coordenadas cartesianas, em que se escolhe um ponto como sendo o “zero” do prédio.

Definidos o ponto inicial e as zonas, devem-se inserir as coordenadas de cada parede, chão e teto. Isto é feito determinando os vértices de cada superfície, em um sentido pré-definido. Neste caso, o sentido era o anti-horário, partindo-se do ponto mais alto

à esquerda, do ponto de vista de quem vê a superfície pelo lado de fora da zona térmica.

Este processo é feito para cada parede, atentando-se para que os vértices de paredes que se encontram, sejam os mesmos para não gerar uma construção com paredes abertas, o que gera um travamento da simulação.

Para cada superfície definem-se ainda os materiais que as constituem e se são expostas à luz solar e ao vento, como pode ser observado na Fig. 14.

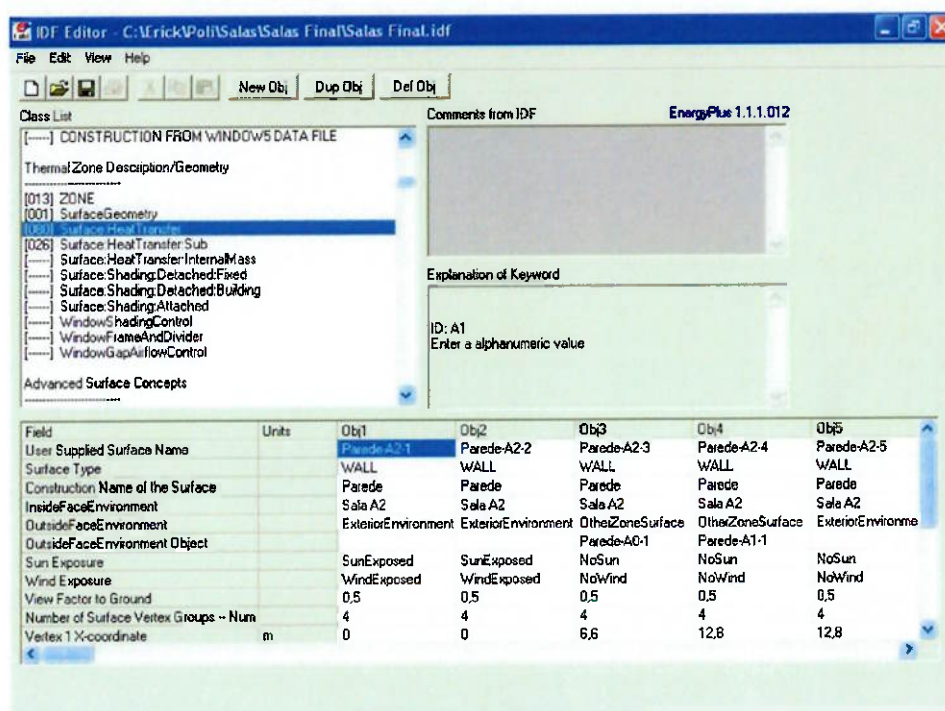


Figura 14 - Tela de entrada de geometria de superfícies

O mesmo processo é feito também com as portas e janelas, como na Fig. 15.

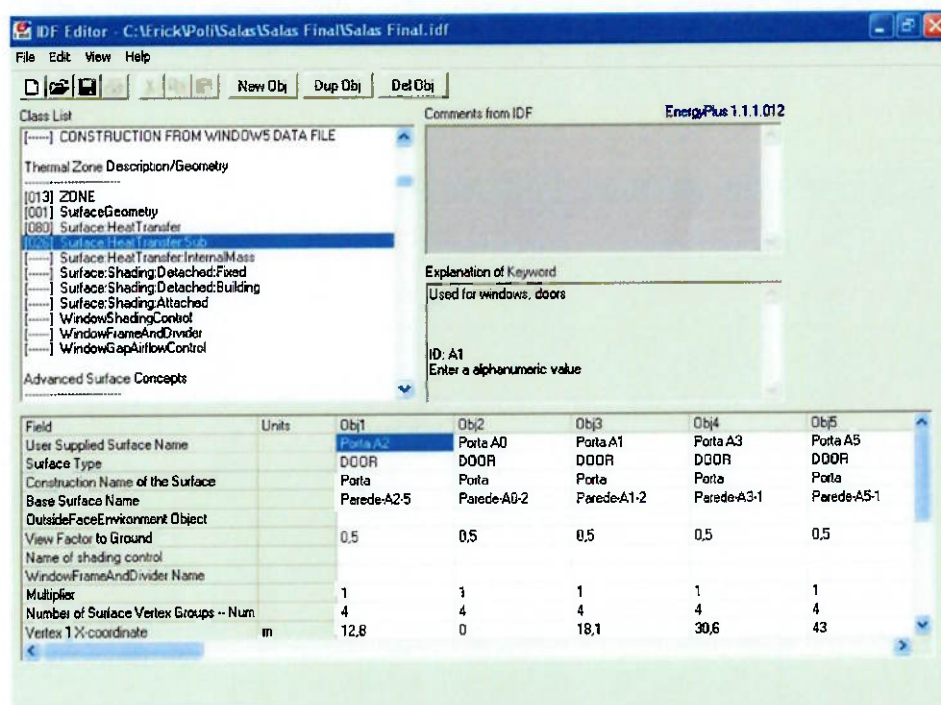


Figura 15 - Entrada de geometria de portas e janelas

6.5 Horários (Schedules)

Na seção de horários, são definidos os valores que podem variar durante a simulação, como por exemplo, os horários em que as pessoas ocupam as salas de aula, quando os equipamentos elétricos estão ligados, etc. Uma parte da tela onde são definidos os horários para cada item em tabelas pode ser visto na Fig. 16.

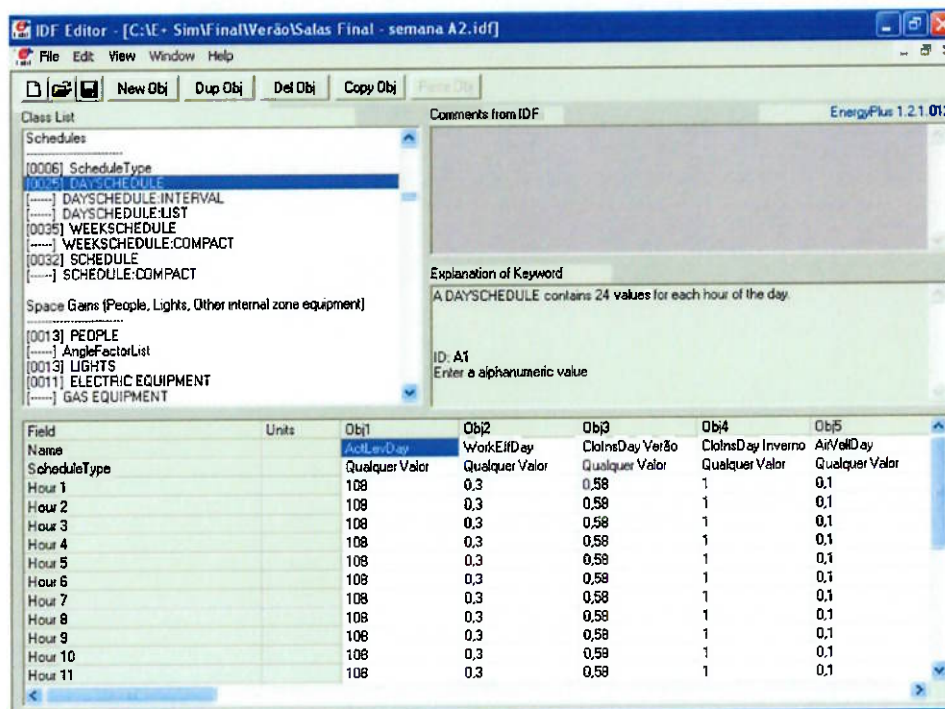


Figura 16 - Tela de programação de horários

Esses horários são divididos em horários diários (DaySchedule), com os valores para um dia. Depois de definidos os dias, define-se os horários semanais (WeekSchedule) que são formados pelas combinações dos horários diários. E, por fim, os horários finais (Schedules) em que são definidos os períodos de ocorrência dos horários semanais, que podem ser de um ano.

Um dos horários diários é o tipo de atividade física realizada pelas pessoas, representado pelo calor gerado, em Watts. Uma tabela com os valores de calor de determinadas atividades físicas já foi mostrada no capítulo 2 deste trabalho.

As vestimentas das pessoas também são definidas nos horários diários, uma vez que dependendo do clima, as pessoas utilizam mais ou menos roupas. Esses valores são

definidos através da tabela e da fórmula apresentadas no capítulo 2 e são uma média, visto que varia de cada pessoa a quantidade de vestimentas. Para o verão o valor em Clo definido foi de 0,58 e, para o inverno, 1,0.

Nesta seção da programação é que são definidos os níveis de ocupação de pessoas em cada ambiente. Para isto foi feito um levantamento dos horários das aulas em cada sala e foram definidas as quantidades de pessoas de acordo com cada tipo de aula e a capacidade de cada uma. Novamente, esses níveis de ocupação são apenas uma média, pois a cada semestre os horários das aulas mudam, bem como as quantidades de pessoas. O impacto dos níveis de ocupação são percebidos quando se observam os resultados de cargas térmicas, que serão apresentados mais à frente, principalmente pela manhã, quando estas sobem rapidamente, representando o início de uma aula e no horário do almoço e no final do dia, quando há uma queda das cargas.

Por último, foram colocados na programação do *Energy Plus* os horários de utilização de equipamentos elétricos em cada sala. A sala A0 é a única em que há utilização constante de equipamentos, como computadores. As outras salas utilizam os equipamentos elétricos, como retro-projetores, *laptops*, ventiladores, etc. apenas esporadicamente. Nestas salas, para que fossem feitas as simulações, foram definidos alguns dias e horários aleatórios, pois não se pode precisar quando ou onde os equipamentos citados serão usados, dependendo de cada professor e do conteúdo de cada aula.

A iluminação artificial também é um fator importante no cálculo das cargas térmicas. Por isso, de acordo com os horários das aulas, também se define os horários de utilização de luz elétrica.

6.6 Ganhos energéticos

Para o caso das salas do prédio de Engenharia Mecânica da Poli, os ganhos energéticos podem ser de três fatores: pessoas, iluminação e equipamentos elétricos.

6.6.1 Pessoas

O número de pessoas tem uma grande influência no perfil de cargas térmicas de um determinado ambiente. Nesta parte da entrada de dados da simulação, determina-se o número de pessoas máximo para cada sala. Através do horário (*schedule*) se faz a variação no perfil de ocupação, que é dado pelo valor máximo de pessoas multiplicado por um fator de 0 a 1. Por exemplo, se o número máximo for 50 e no horário (*schedule*) para pessoas estiver o fator 0,4, o programa irá simular o ambiente contendo 20 pessoas. Além do horário de pessoas, nesta parte se define também os horários de vestimentas e atividade física. A Fig. 17 ilustra a tela de entrada dos dados para “pessoas”.

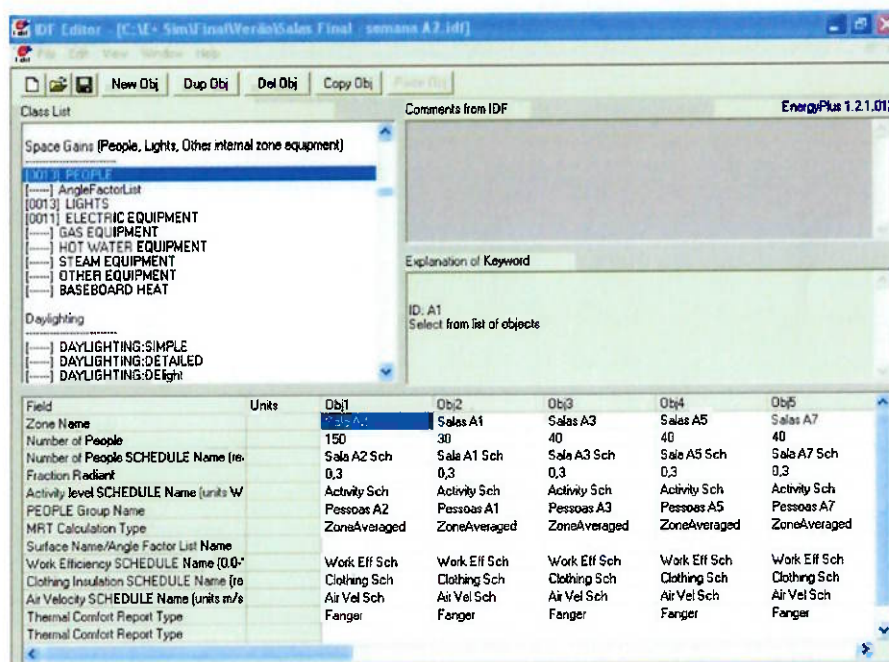


Figura 17 - Ganhos energéticos – pessoas

6.6.2 Iluminação

As principais entradas de dados informativos para o programa sobre a iluminação são a descrição de quanta potência elétrica é consumida pelas lâmpadas do ambiente e os horários que ficam acesas, como mostra a Fig. 18.

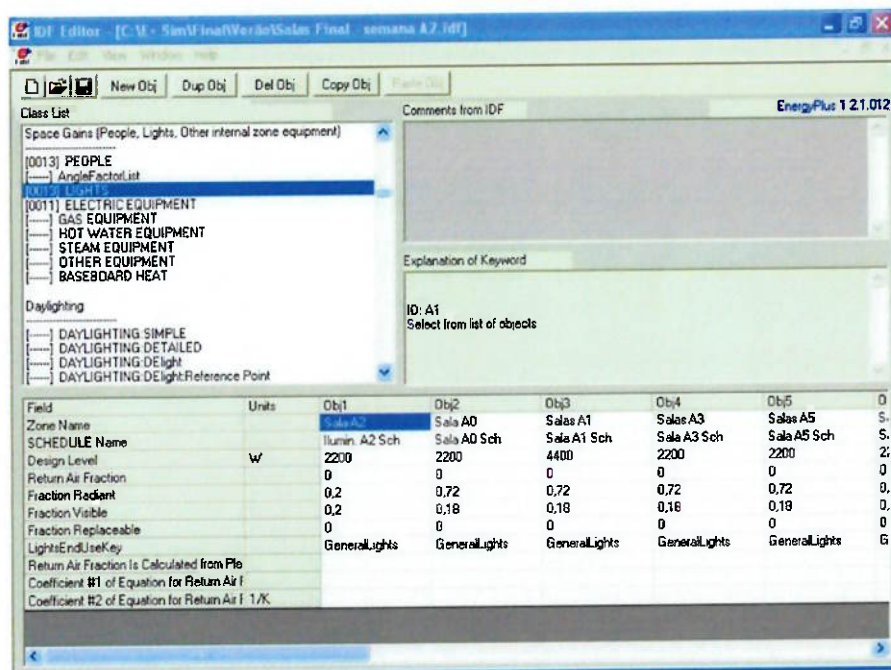


Figura 18 - Ganhos energéticos – iluminação

6.6.3 Equipamentos elétricos

Assim como para a iluminação elétrica, na entrada de dados dos equipamentos elétricos, os principais dados são os de potência elétrica total destes e os horários em que ficam em funcionamento, como mostra a Fig. 19.

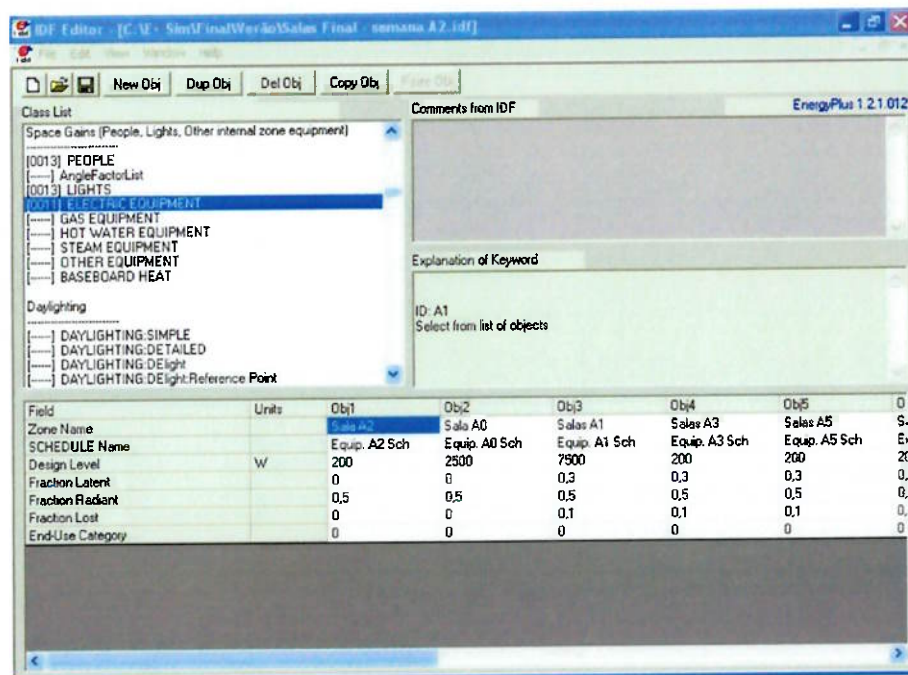


Figura 19 - Ganhos energéticos - equipamentos elétricos

6.7 Cálculo de carga térmica

O modo de utilização do *Energy Plus* através de uma opção de simulação denominada “*purchased air*”, que é uma forma simplificada de se realizar as simulações prediais, sem necessidade de se definir circuitos de água ou de ar, etc. Esta opção é utilizada quando se deseja estudar o desempenho de um sistema ideal de um edifício, sendo necessário, para tanto, apenas definir os controles das zonas térmicas, as configurações dos equipamentos das zonas e os componentes para insuflamento do ar no ambiente condicionado. A partir daí, o programa calcula as cargas térmicas necessárias para se atingir as especificações determinadas. Nas tabelas de entrada de dados, como mostra a Fig. 20, são definidas as temperaturas do ar fornecido para aquecimento ou resfriamento, 50°C e 14°C, respectivamente, bem como a umidade absoluta do ar: 0,005 kg água/kg ar.

The screenshot shows the IDF Editor window with the title bar "[C:\E\ Sim\ final\ Verão\ Salas Final - semana A2.idf]". The Class List on the left includes "Zone Forced Air Units" and "Unitary Equipment". The "Purchased Air" option is selected under Zone Forced Air Units. The Comments from IDF pane on the right shows "ID: N3" and "No default value available". The main data table at the bottom lists fields for five zones (Obj1 to Obj5) with their respective units and values.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Purchased Air Name		Ar Sala A2	Ar Sala A0	Ar Sala A1	Ar Sala A3	Ar Sala A5
Zone Supply Air Node Name		N6 A2	N6 A0	N6 A1	N6 A3	N6 A5
Heating Supply Air Temp	C	50	50	50	50	50
Cooling Supply Air Temp	C	14	14	14	14	14
Heating Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-d	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Cooling Supply Air Humidity Ratio	kg-H2O/kg-d	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
heating limit		NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT
Maximum heating air flow rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize
cooling limit		NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT	NO LIMIT
Maximum cooling air flow rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize
outside air		NO OUTSIDE AIR	NO OUTSIDE AIR	NO OUTSIDE AIR	NO OUTSIDE AIR	NO OUTSIDE AIR
Outside air flow rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize
heating availability schedule						

Figura 20 - Tela de entrada para a opção de “*Purchased air*”

7 RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE CARGAS TÉRMICAS

7.1 Avaliação das condições atuais

Durante a programação do Energy Plus, para os cálculos de cargas térmicas, há a possibilidade de se modelar o sistema sem que haja um sistema de climatização de ambientes instalado. Nessa situação uma das análises que pode ser feita é a das temperaturas médias no interior de cada sala sem os aparelhos de climatização de ambientes, ou seja, nas condições atuais.

Pelos resultados obtidos, pode-se verificar que esses ambientes do prédio da Engenharia Mecânica da Poli realmente necessitam de um sistema que faça a sua climatização, dadas as condições de conforto térmico citadas no Cap. 2.

Observando o gráfico da Fig. 21, pode-se notar que a temperatura na sala A2 pode ultrapassar os 38°C. Deve ser feita uma ressalva com relação a estas temperaturas, pois a simulação no *Energy Plus*, neste caso, considera todas as salas fechadas e sem renovação de ar, o que é impossível na realidade. Estima-se que a temperatura nas salas pode chegar até no máximo 32°C, o que pode causar queda de produtividade, aumento na probabilidade de se cometer erros e até problemas de saúde. Este perfil se refere a um dia típico de verão, sendo avaliado durante as 24 horas deste.

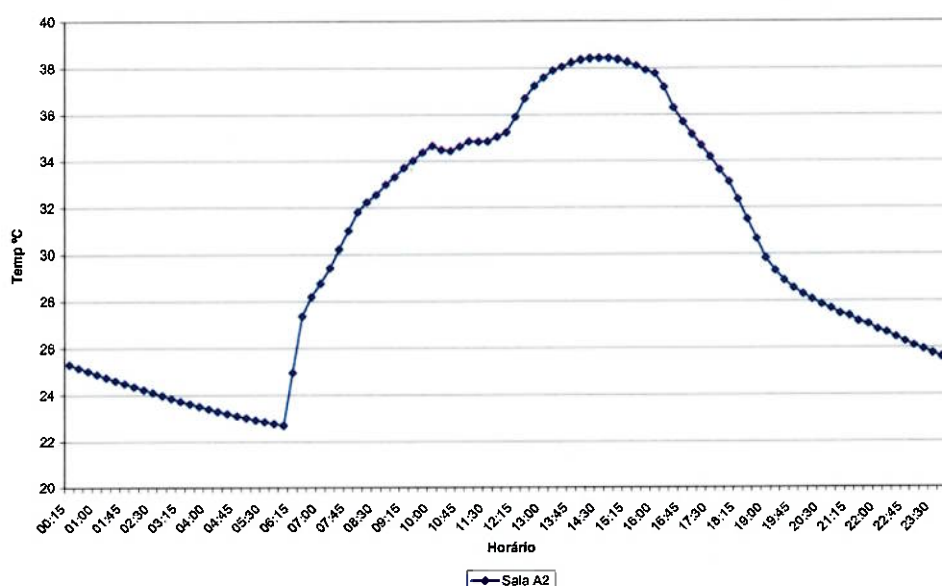


Figura 21 - Perfil de temperaturas sala A2 - verão

A Fig. 22 mostra os perfis de temperaturas para todas as salas do prédio em um dia típico de verão, tornando possível a comparação entre eles.

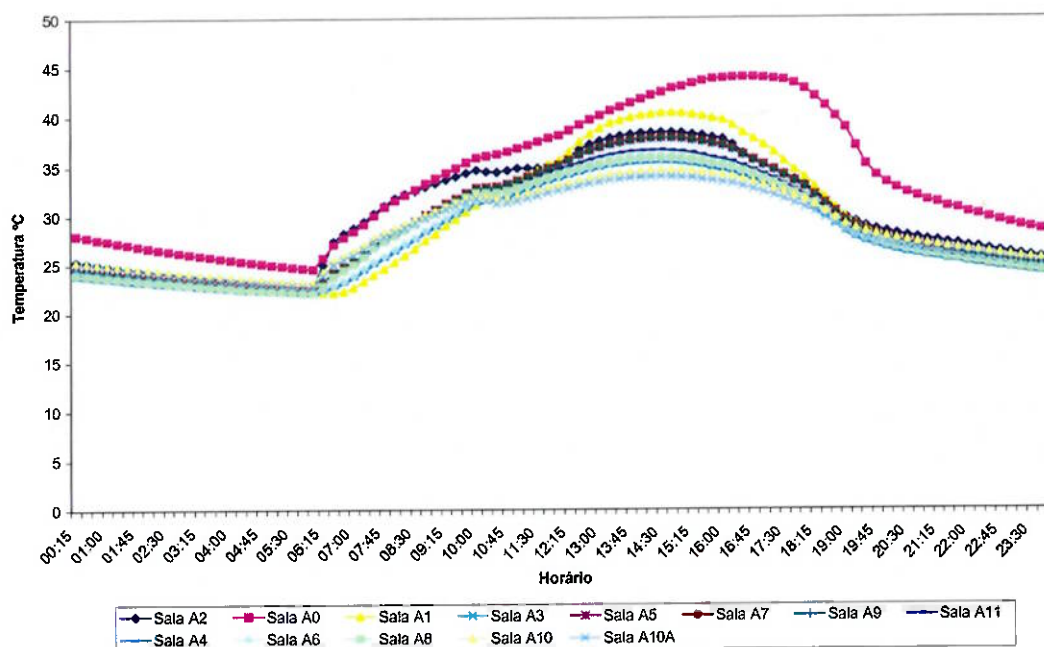


Figura 22 - Perfil de temperaturas das salas - verão

A Fig. 23 ilustra o gráfico do perfil de temperaturas da sala A2 no inverno.

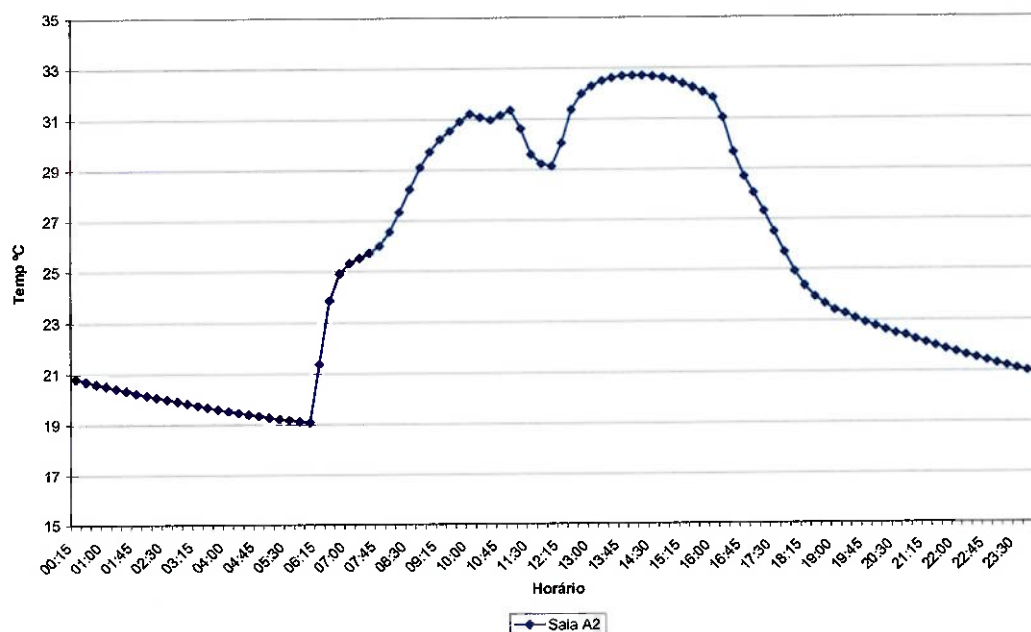


Figura 23 - Perfil de temperaturas sala A2 – inverno

A Fig. 24 mostra o comparativo dos perfis de temperaturas de todas as salas no inverno.

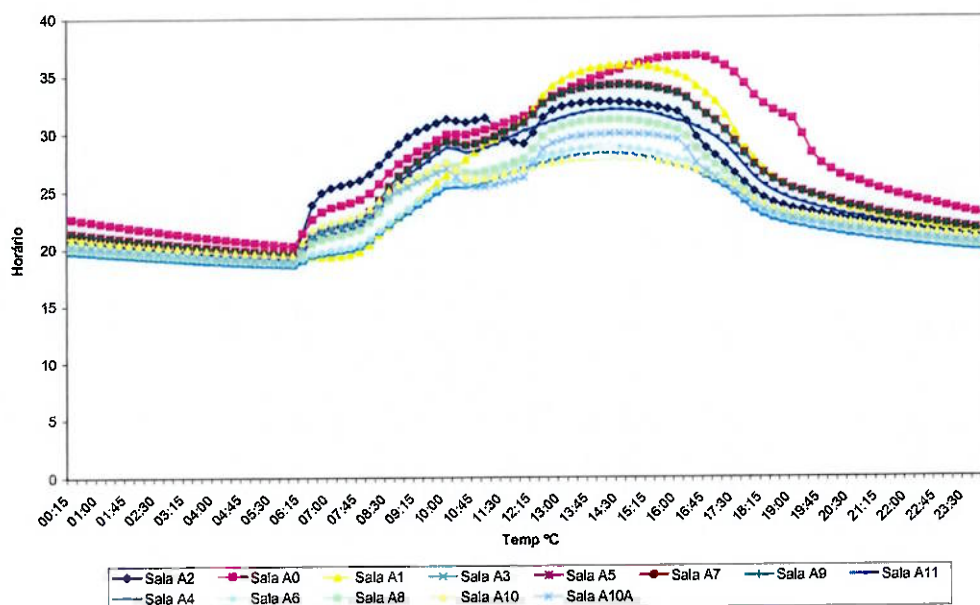


Figura 24 - Perfil de temperaturas das salas – inverno

7.2 Cálculo das cargas térmicas

Baseado no artigo 5º, item F da Portaria MS nº 3.523/98 do Ministério da Saúde Pública, a taxa de renovação do ar adequada de ambientes climatizados deve ser, no mínimo, de 27 m³/hora/pessoa, exceto no caso específico de ambientes com alta rotatividade de pessoas. Nestes casos a taxa de renovação do ar mínima será de 17 m³/hora/pessoa. Para garantir o cumprimento da portaria, foram aplicados os valores aqui apresentados e, utilizando os resultados das simulações, foi realizado o balanço de energia na serpentina, que será explicado a seguir.

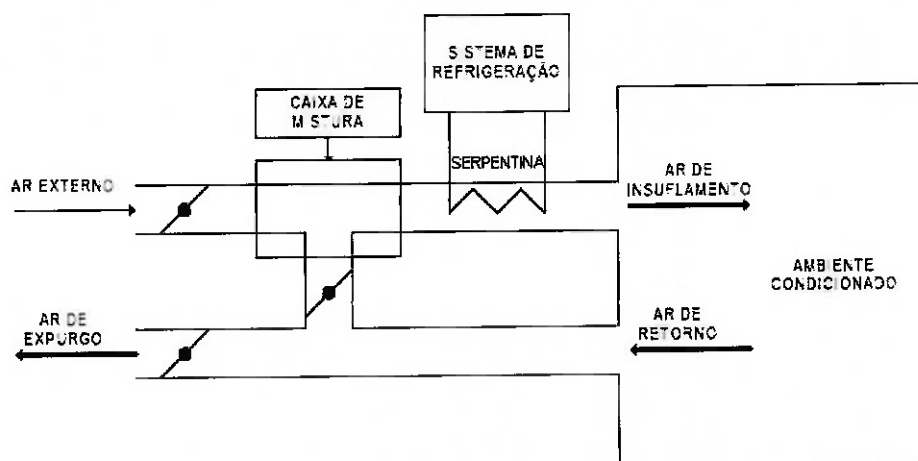


Figura 25 - Representação de um sistema de climatização de ambientes

Observando-se a Fig. 25, observa-se que a vazão de ar externo mais a vazão de ar de retorno é igual à vazão de ar de insuflamento, portanto:

$$\dot{m}_{\text{retorno}} = \dot{m}_{\text{insuflamento}} - \dot{m}_{\text{externo}} \quad (2)$$

em que a vazão de insuflamento é obtida através das simulações do Energy Plus e a vazão de ar externo é estimada pela quantidade de pessoas no ambiente, multiplicado por 27m³/hora/pessoa.

Tem-se ainda que, pela Primeira Lei da Termodinâmica para um volume de controle:

$$\dot{Q}_{\text{serpentina}} = \dot{m}_{\text{insuflamento}} (h_{\text{caixa de mistura}} - h_{\text{insuflamento}}) \quad (3)$$

A entalpia de insuflamento pode ser obtida através dos dados de entrada do *Energy Plus*, onde se determinou as condições do ar de insuflamento. Com os dados de temperatura de bulbo seco e umidade absoluta, é possível se determinar a entalpia através de uma carta psicrométrica.

Para a determinação da entalpia da caixa de mistura, deve obter a temperatura e a umidade absoluta desta. Tendo os valores do ar externo, definidos na entrada de

dados do Energy Plus e do ar de retorno, obtido através dos resultados das simulações, faz-se uma média ponderada:

$$T_{mist} = PR * T_{retorno} + (1 - PR) * T_{externo} \quad (4)$$

$$\omega_{mist} = PR * \omega_{retorno} + (1 - PR) * \omega_{externo} \quad (5)$$

em que:

$$PR = \frac{\dot{m}_{retorno}}{\dot{m}_{insuflamento}} \quad (6)$$

7.3 Perfis de cargas térmicas

A Fig. 25 traz o perfil de cargas térmicas para a sala A2 em um dia típico de verão como resultado da simulação do *Energy Plus*.

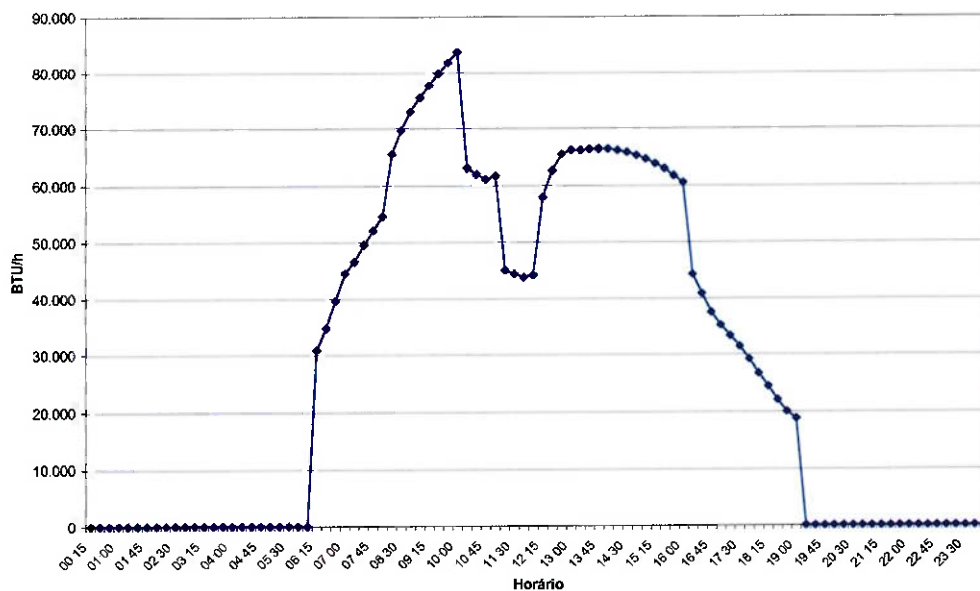


Figura 26 - Perfil de cargas térmicas sala A2 – verão

Na Fig. 26 abaixo, pode-se observar o perfil de cargas térmicas da sala A2 simulada em condições de um dia típico de inverno.

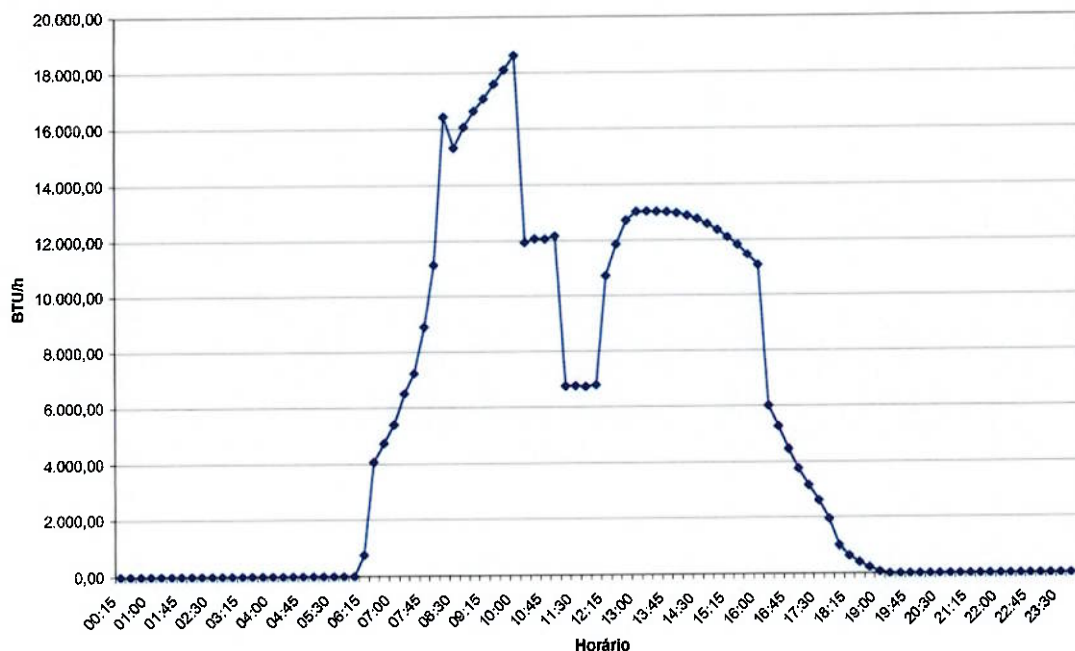


Figura 27 - Perfil de cargas térmicas sala A2 – inverno

Os perfis de cargas térmicas da sala A2 podem dar uma noção de como é a variação destas ao longo do dia. Esta sala foi tomada como exemplo por possuir as maiores dimensões e, portanto, maior capacidade de ocupação. Os perfis das outras salas podem possuir semelhanças com o da sala A2, mas as variações dependem dos horários das ocupações, posição da sala em relação ao sol (recebe iluminação solar direta na parte da manhã ou da tarde) e do nível de ocupação.

Durante o dimensionamento dos equipamentos de climatização de ambientes, a unidade TR é comumente utilizada. Esta sigla é uma unidade de medida de potência que significa tonelada de refrigeração e equivale a 12.000 BTU/h ou 3,51685 kW.

7.4 Resumo dos resultados de cargas térmicas

Depois de feitas as simulações e os cálculos das cargas térmicas pode-se fazer uma tabela para poder comparar os resultados obtidos e iniciar os estudos para a definição dos equipamentos mais adequados para o prédio da Engenharia Mecânica da Poli.

Tabela 11: Resultados das cargas térmicas em kW, BTU/h e TR

Sala	Carga térmica máxima (kW)	Carga térmica máxima (BTU/h)	Carga térmica máxima (TR)
A0	11,94	40.772,79	3,40
A1	31,05	106.036,21	8,83
A2	43,29	147.833,12	12,32
A3	24,45	83.507,28	6,96
A4	11,22	38.324,69	3,19
A5	23,20	79.242,19	6,60
A6	15,27	52.139,65	4,34
A7	23,11	78.917,01	6,57
A8	22,52	76.902,23	6,41
A9	23,16	79.103,49	6,59
A10	13,03	44.497,89	3,71
A11	17,37	59.329,14	4,94
A10A	18,78	64.126,69	5,34

8 SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

A seleção dos equipamentos para a climatização de ambientes é um processo que leva em conta diversos fatores, como modelos dos equipamentos, formas construtivas, cargas térmicas, consumo energético, custos dos equipamentos, custos de instalação, etc.

Para este trabalho iremos considerar apenas dois tipos de equipamentos: *split* e *chiller* (central).

Baseado nos resultados de cargas térmicas pode-se determinar quais modelos de *split* ou *chiller* são os mais adequados. Definidos os modelos de cada tipo, é feita uma análise de custos, tanto de equipamento, como de instalação e gastos com energia elétrica ao longo de um longo período para se definir qual é o mais vantajoso economicamente.

8.1 Dimensões

Do ponto de vista construtivo, pode haver pouca diferença entre os aparelhos de climatização de ambientes do tipo *split* e do *chiller*, pois em ambos os casos podem ser utilizados aparelhos de troca de calor com o ambiente a ser climatizado que são idênticos no que se refere o aspecto externo, como mostra a Fig. 27. No caso do uso de *chiller* utilizam-se para as unidades evaporadoras os chamados fancoletes.



Figura 28 – Fancolete ou split

A grande diferença física entre os dois tipos de equipamentos está na unidade de troca com o ambiente externo, unidade condensadora e *chiller*, respectivamente. As unidades condensadoras dos aparelhos tipo *split* são de porte pequeno e ocupam pouco espaço, apesar de ser necessárias várias unidades. Em contrapartida, um

chiller pode ser utilizado em comum com todos os ambientes a serem climatizados, mas ocupa uma grande área para ser instalado, principalmente o modelo de condensação a ar que tem sido mais utilizado ultimamente devido ao seu custo mais baixo, tanto de instalação, como de operação.

Tabela 12: Diferenças de dimensões entre os condensadores

Modelo	Largura (mm)	Profundidade (mm)	Altura (mm)
Chiller R-22 (83,3 TRs)	1900	3295	2260
Unidade condensadora para bi-split (8 TRs)	900	860	960

8.2 Equipamentos e instalação

O custo dos equipamentos, bem como os gastos com energia elétrica são fatores determinantes para a seleção do tipo de equipamento a ser instalado em cada construção. Com a determinação das cargas térmicas máximas em cada sala, pode-se definir os tipos de aparelhos *split* e central que podem ser utilizados.

Tabela 13: Custos com equipamentos e instalações para um sistema *split*

Sala	Equipamento	Custo do equipamento (R\$)
A0	Split 3,5 TR	R\$ 6.480,00
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A1	Split 4 TR	R\$ 7.050,00
	Split 5 TR	
	Unidade condensadora 4 TR	
	Unidade condensadora 5 TR	
A2	Split 4 TR	R\$ 13.010,00
	Split 4 TR	
	Unidade condensadora 8 TR	R\$ 7.520,00
	Unidade condensadora 5 TR	
	Split 5 TR	

A3	Split 3,5 TR	R\$ 12.960,00
	Split 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A4	Split 3,5 TR	R\$ 6.480,00
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A5	Split 3,5 TR	R\$ 12.960,00
	Split 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A6	Split 5 TR	R\$ 7.520,00
	Unidade condensadora 5 TR	
A7	Split 3,5 TR	R\$ 12.960,00
	Split 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A8	Split 3,5 TR	R\$ 12.960,00
	Split 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A9	Split 3,5 TR	R\$ 12.960,00
	Split 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
	Unidade condensadora 3,5 TR	
A10	Split 4 TR	R\$ 7.050,00
	Unidade condensadora 4 TR	
A10A	Split 3 TR	R\$ 11.620,00
	Split 3 TR	
	Unidade condensadora 3 TR	
	Unidade condensadora 3 TR	
A11	Split 5 TR	R\$ 7.520,00
	Unidade condensadora 5 TR	
Total Equipamentos		R\$ 139.050,00
Instalação		R\$ 6.952,50
Total		R\$ 146.002,50

Os custos de instalação são estimados em aproximadamente 5% do custo total dos equipamentos e é o valor médio utilizado para cálculo de custos no mercado de climatização de ambientes.

Tabela 14: Custos com equipamentos e instalações para um sistema central

Sala	Equipamento
Todas	Chiller 83,3 TR
A0	Fancoil 1,5 TR
	Fancoil 2 TR
A1	Fancoil 4 TR
	Fancoil 2,5 TR
	Fancoil 2,5 TR
A2	Fancoil 1,5 TR
	Fancoil 1,5 TR
	Fancoil 5 TR
	Fancoil 5 TR
A3	Fancoil 3 TR
	Fancoil 4 TR
A4	Fancoil 1,5 TR
	Fancoil 2 TR
A5	Fancoil 3 TR
	Fancoil 4 TR
A6	Fancoil 2,5 TR
	Fancoil 2,5 TR
A7	Fancoil 3 TR
	Fancoil 4 TR
A8	Fancoil 3 TR
	Fancoil 4 TR
A9	Fancoil 3 TR
	Fancoil 4 TR
A10	Fancoil 4 TR
A10A	Fancoil 3 TR
	Fancoil 3 TR
A11	Fancoil 2,5 TR
	Fancoil 2,5 TR

Total em Dólares	US\$ 249.900,00
Total em Reais	R\$ 674.730,00

*Considerando-se a cotação de US\$ 1 = R\$ 2,70

Para o sistema de climatização de ambientes do tipo central, devido à sua maior complexidade de instalação, faz-se uma estimativa baseada nos preços praticados no mercado, onde os custos totais de equipamentos somados com a instalação podem ser de aproximadamente US\$ 3.000,00 por TR. Estão inclusos os custos dos equipamentos, as tubulações, a instalação do *chiller*, bem como a alvenaria que o abrigará, etc.

8.3 Tarifação

Para os consumidores de grande porte como indústrias e universidades, o contrato de fornecimento de energia elétrica com a distribuidora é diferente daquele que funciona para residências e é chamado de horo-sazonal.

Entre as muitas diferenças, vale dizer que em residências é paga apenas a energia efetivamente consumida, com um único preço para o *kWh* (kilowatt x hora). A energia consumida pela Universidade de São Paulo tem preços diferentes por ter um contrato tipo horo-sazonal, que depende do horário do dia e da época do ano.

Nos meses chamados “secos”, de difícil reposição do volume de água gasto na produção de energia, compreendidos entre os meses de maio a novembro, a energia é mais cara do que nos outros meses do ano, onde o regime de chuvas garante a reposição dos reservatórios e, por isso mesmo, chamados de meses “úmidos”.

Ao longo de um dia, o preço da energia é maior no *horário de ponta*, compreendido entre 18h e 21h. As outras vinte e uma horas restantes do dia são chamadas de *horário fora de ponta*. No horário de ponta, a USP paga três vezes mais pela energia consumida. Nos fins de semana, para efeito de tributação, os horários de *ponta* e *fora de ponta* não são considerados.

Na tarifação horo-sazonal também é levada em conta a demanda de energia (kW), com custos diferenciados para os horários de *ponta* e *fora de ponta*. A demanda é monitorada de 15 em 15 minutos, sendo cobrado pela concessionária o maior valor registrado. Caso a maior demanda registrada ultrapasse a *demanda contratada* com a concessionária a instituição é penalizada. Caso a maior demanda registrada no período seja inferior à demanda contratada, tanto horários de *ponta* como para o *fora de ponta*, paga-se integralmente o valor estabelecido no contrato.

Para se calcular os custos de utilização dos equipamentos, que se refletem nos gastos com energia elétrica, toma-se por base o consumo elétrico (em Watts) obtido nos catálogos dos equipamentos, o tempo de utilização destes durante um mês, que pode ser ainda extrapolado para um ano, e as tarifas cobradas pelas concessionárias de energia elétrica.

Para este trabalho, verificou-se que o subgrupo ao qual pertence à Escola Politécnica é o A3a (30kV a 44kV).

Para os cálculos dos gastos com energia elétrica dos equipamentos de climatização de ambientes, serão considerados apenas os horários fora de ponta, pois a grande parte da energia utilizada será nessa faixa de horário.

Tabela 15: Custos de consumo por época do ano, baseados nos dados da Eletropaulo

Subgrupo A3a	Custo do consumo (R\$/MWh)
Ponta seca	229,25
Ponta úmida	209,40
Fora de ponta seca	118,10
Fora de ponta úmida	104,8

Tabela 16: Custos de operação para um sistema *split*

Sala	Equipamento	Demanda (kW)	Consumo mensal verão (kWh)	Custos mensais (R\$)
A0	Split 3,5 TR	0,25	30	3,144
	Unidade condensadora 3,5 TR	3,07	368,4	38,6083
A1	Split 4 TR	0,25	50	4,716
	Split 5 TR	0,29	58	5,47056
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	820	77,3424
	Unidade condensadora 5 TR	5,28	1056	99,6019
A2	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Split 5 TR	0,29	52,2	5,47056
	Unidade condensadora 5 TR	5,28	950,4	99,6019
	Unidade condensadora 8 TR	8,3	1494	156,571
A3	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	738	77,3424
A4	Split 3,5 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3,5 TR	3,07	552,6	57,9125
A5	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	738	77,3424

A6	Split 5 TR	0,29	52,2	5,47056
	Unidade condensadora 5 TR	5,28	950,4	99,6019
A7	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	738	77,3424
A8	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Split 3,5 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 3,5 TR	3,07	552,6	57,9125
A9	Split 3 TR	0,19	34,5	3,58416
	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	738	77,3424
A10	Split 4 TR	0,25	45	4,716
	Unidade condensadora 4 TR	4,1	738	77,3424
A10A	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Split 3 TR	0,19	34,2	3,58416
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
	Unidade condensadora 3 TR	3	540	56,592
A11	Split 5 TR	0,29	52,5	5,47056
	Unidade condensadora 5 TR	5,28	950,4	99,6019

Total				1.666,89
-------	--	--	--	----------

Tabela 17: Custos de operação para um sistema central

Sala	Equipamento	Demanda (kW)	Consumo mensal verão (kWh)	Custos mensais (R\$)
Todas	Chiller 83,3 TR	75,72	13.629,60	1.428,38
A0	Fancoil 1,5 TR	0,171	34,2	2,15
	Fancoil 2 TR	0,192	38,4	2,41
A1	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
	Fancoil 2,5 TR	0,192	34,56	3,62
	Fancoil 2,5 TR	0,192	34,56	3,62
A2	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A3	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A4	Fancoil 1,5 TR	0,171	30,78	3,23
	Fancoil 2 TR	0,192	34,56	3,62
A5	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A6	Fancoil 2,5 TR	0,912	164,16	17,20
	Fancoil 2,5 TR	0,192	34,56	3,62
A7	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A8	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A9	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04

A10	Fancoil 4 TR	0,32	57,6	6,04
A10A	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
	Fancoil 3 TR	0,256	46,08	4,83
A11	Fancoil 2,5 TR	0,192	34,56	3,62
	Fancoil 2,5 TR	0,192	34,56	3,62
Total				1.575,31

9 CONCLUSÕES

Com a finalização deste trabalho, é possível verificar a necessidade de um sistema de climatização de ambientes nas salas de aula do prédio da Engenharia Mecânica. De acordo com as análises de perfis de temperatura, pode-se observar que estas podem chegar aos 32°C em uma sala de aula lotada e causar um grande desconforto para os ocupantes, principalmente na época do verão.

Com todos os dados levantados de construção do prédio, bem como dos materiais que o compõem, sua posição geográfica, os perfis de ocupação de cada sala de aula e a utilização de iluminação e equipamentos elétricos aliados a informações de dias típicos de verão ou inverno, foi possível fazer a modelagem de um sistema de climatização de ambientes que atende aos requisitos de conforto térmico necessários para que se possam ter aulas muito mais produtivas e menos desgastantes.

Baseado nas cargas térmicas resultantes das simulações feitas através do software *Energy Plus* pôde-se dimensionar os equipamentos adequados a cada sala. Levantando-se os custos tanto de aquisição dos equipamentos, como de instalação, temos que o sistema *split* apresenta menores custos. No entanto, os gastos com energia elétrica para um sistema central são menores do que para um sistema *split*.

Comparando-se então os custos de equipamentos e instalação com os custos de consumo de energia elétrica, temos que a diferença anual é de aproximadamente R\$1.100,00. Extrapolando essa diferença para vários anos e comparando com a diferença de custos de instalação e equipamentos, verifica-se que o sistema central somente seria viável para um período de utilização muito além de 100 anos. O que torna o sistema *split* mais viável, já que pode-se prever que o sistema de climatização de ambientes deve ser trocado ou reformado antes desse período.

Tabela 18: Comparativo de custos entre sistema central e *split*:

Sistema	Custos		
	Equipamentos	Instalação	Energia mensal
Split	R\$ 139.050,00	R\$ 6.952,50	R\$ 1.666,89
Central	R\$ 674.730,00		R\$ 1.575,31

Deve ser feita uma ressalva quanto à tecnologia dos equipamentos aqui comparados. Para o sistema de climatização de ambientes central, foram adotados trocadores de calor que são semelhantes a *splits*. Os trocadores para sistemas centrais mais comumente utilizados possuem capacidades maiores, podendo servir mais de uma sala, representando uma centralização das cargas e uma redução da capacidade instalada. Nos custos finais, a diferença de tecnologias destes equipamentos pode acarretar menores custos de operação para o sistema central, talvez até justificando a maior viabilidade de instalação deste tipo de equipamento.

Há também outras razões para embasar a decisão de se selecionar um sistema do tipo *split* para as salas de aula do prédio de Engenharia Mecânica. A primeira delas se baseia no fato de que as aulas não acontecem durante todo o dia e em todas as salas de aula e, a cada semestre, os horários de aulas em cada sala muda, conforme as matérias oferecidas e os professores que as ministram, tornando os horários de ocupação destas bastante flexíveis. Isso faz com que possa haver horários com pouca ocupação das salas de aula, mas que, se tivermos um sistema central instalado, ele deverá ficar ligado, mesmo sendo muito pouco utilizado, causando um grande desperdício de energia. Com um sistema *split*, que é independente para cada sala, pode-se ligar os equipamentos conforme a necessidade de cada sala.

Outro fato considerado para a escolha do sistema *split* é o tamanho dos equipamentos externos que, apesar de serem em grande número, são mais compactos, tornando mais simples sua instalação, como por exemplo, abaixo das janelas de cada sala. Um chiller deve ser instalado em um local com grande espaço físico, com uma estrutura

de alvenaria para abrigá-lo e a uma certa distância das salas de aula, devido à quantidade de ventiladores que promovem a troca de calor com o ambiente externo, tornando-o bastante ruidoso.

10 BIBLIOGRAFIA

- Incropera, Frank P., DeWitt, David P., “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, 4ª Edição, LTC Editora, 1996.
- Jones, W. P., “Air Conditioning Engineering”, 5th Edition, Butterworth Heinmann Edit., 2001.
- Sauer, Harry J., Howell, Ronald H., Coad, William J., “Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning”, a Textbook with design data based on the 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals, ASHRAE.
- van Wylen, Gordon J., Sonntag, Richard E., Borgnakke, Claus, “Fundamentos da Termodinâmica”, 5ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., 1998.
- Site – Cabano Engenharia: www.cabano.com.br (Out/04).
- Site – Hitachi Divisão Ar Condicionado: www.hitachisa.com.br (Nov/04)
- Site – U.S. Department of Energy – Energy Plus Energy Simulation Software: www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ (Jul/04)
- Site – Eletropaulo: www.eletropaulo.com.br (Nov/04)
- Site – NASA Report CR-1205-1: www.bessamaire.com (Nov/04)