

nota final

8,0
(oit)

RAFAEL MORITA NISHIO



**ESTUDO E MODELAGEM DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS
PREDIAIS VISANDO A AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO
CONSUMO ENERGÉTICO**

Trabalho de Formatura
apresentado à EPUSP para
obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

São Paulo
2002

RAFAEL MORITA NISHIO

**ESTUDO E MODELAGEM DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS
PREDIAIS VISANDO A AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO
CONSUMO ENERGÉTICO**

Trabalho de Formatura
apresentado à EPUSP para
obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo
Dezembro 2002

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras..... | i |
| Lista de Tabelas | iv |
| Lista de Abreviaturas | vi |
| Lista de Símbolos | vi |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÕES..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVO | 3 |
| | |
| 2. PRÉDIOS INTELIGENTES E USO RACIONAL DE ENERGIA..... | 4 |
| 2.1 SISTEMA DE ILUMINAÇÃO..... | 5 |
| 2.2 SISTEMA DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO (VAC) | 6 |
| 2.3 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS (SED) | 7 |
| 2.4 MODELAGEM DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS | 8 |
| 2.4.1 Redes de Petri (RP)..... | 8 |
| 2.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA A SER EMPREGADA..... | 14 |
| 2.6 SISTEMAS HÍBRIDOS | 15 |
| 2.7 MODELAGEM DE SISTEMAS HÍBRIDOS | 16 |
| 2.7.1 Extensões de redes de Petri para modelagem de sistemas híbridos | 16 |
| 2.8 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS | 19 |
| 2.8.1 Simulação de sistemas a eventos discretos | 19 |
| 2.8.2 Simulação de sistemas contínuos | 19 |
| 2.8.3 Simulação de sistemas híbridos..... | 20 |
| | |
| 3. METODOLOGIA DE MODELAGEM | 21 |
| 3.1 ETAPAS DA METODOLOGIA | 21 |
| | |
| 4. ESTUDO DE CASO..... | 24 |
| 4.1 USO DA ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL..... | 25 |
| 4.2 SISTEMA DE AR CONDICIONADO | 25 |
| 4.3 COLETA DE DADOS | 26 |
| 4.4 RATEIO DE CUSTOS ENTRE ÁREA PRIVADA E ÁREA COMUM | 26 |
| 4.5 ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO PRÉDIO..... | 27 |
| 4.6 MAPEAMENTO DO USO DA ÁREA..... | 30 |
| 4.7 DEFINIÇÃO DOS PONTOS CRÍTICOS DO CASO EM ESTUDO | 34 |
| 4.8 DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DO SISTEMA ATUAL..... | 36 |
| 4.8.1 Análise dos dados coletados..... | 38 |
| | |
| 5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA ATUAL..... | 51 |
| 5.1 MODELAGEM DO SISTEMA ATUAL..... | 51 |
| 5.2 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DOS MODELOS DO SISTEMA ATUAL | 74 |
| | |
| 6. MODELAGEM DE UM SISTEMA OTIMIZADO..... | 87 |
| 6.1 DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DO MODELO OTIMIZADO | 87 |
| 6.2 MODELAGEM DO SISTEMA OTIMIZADO | 89 |

| | |
|--|------------|
| 6.3 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DO MODELO OTIMIZADO | 92 |
| 7. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DESENVOLVIDOS..... | 98 |
| 8. CONCLUSÕES..... | 99 |
| 9. BIBLIOGRAFIA..... | 101 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| <i>O conceito de controle para SED é definido como a execução de operações conforme um procedimento pré-estabelecido. Sua estrutura funcional pode ser vista na figura 2-1 [Miyagi, 1996].</i> | 7 |
| <i>figura 2-2 – Diagrama conceitual básico do sistema de controle SED</i> | 7 |
| <i>figura 2-3 – Representação dos três elementos básicos de uma RP e seus relacionamentos.</i> | 8 |
| <i>figura 2-4 – a) A é condição para que o evento B ocorra - A é uma pré-condição de B. b) C é pós-condição de B.</i> | 10 |
| <i>figura 2-5 – Dinâmica de disparo em uma rede CF.</i> | 10 |
| <i>figura 2-6 – Representação de uma rede de Petri LT.</i> | 11 |
| <i>figura 2-7 – Indicação dos arcos ponderados e a dinâmica do sistema.</i> | 11 |
| <i>figura 2-8 – Elementos do PFS</i> | 13 |
| <i>figura 2-9 – Etapas da simulação híbrida</i> | 20 |
| <i>figura 3-1 – Metodologia para a modelagem dos sistema de ar condicionado, iluminação e equipamentos eletrônicos de um prédio.</i> | 21 |
| <i>figura 4-1 – Ambientes do andar típico com relação a ocupação e uso de equipamentos eletrônicos</i> | 31 |
| <i>figura 5-1 – Modelo conceitual do Sistema de Entrada do andar.</i> | 52 |
| <i>figura 5-2 – Modelo conceitual do Sistema de Saída do andar.</i> | 52 |
| <i>figura 5-3 – Modelo em rede de Petri da entrada do andar.</i> | 53 |
| <i>figura 5-4 – Modelo conceitual do Sistema de Controle de Acesso de Entrada do andar.</i> | 54 |
| <i>figura 5-5 – Modelo conceitual do Sistema de Controle de Acesso de Saída do andar.</i> | 54 |
| <i>figura 5-6 – Modelo em rede de Petri do controle de acesso.</i> | 55 |
| <i>figura 5-7 – Modelo conceitual da integração dos Sistema de Entrada Saída e Sistema de Controle de Acesso.</i> | 56 |
| <i>figura 5-8 – Modelo de integração entre a entrada do andar e o Sistema de Controle de Acesso.</i> | 57 |

| | |
|--|----|
| <i>figura 5-9 – Demarcação das zonas do andar.</i> | 58 |
| <i>figura 5-10 – Diagrama da zona B</i> | 59 |
| <i>figura 5-11 – Detalhe da zona B.</i> | 60 |
| <i>figura 5-12 – Modelo conceitual do Sistema de Energização do andar.</i> | 61 |
| <i>figura 5-13 – Modelo em redes de Petri do sistema de energização do andar.</i> | 61 |
| <i>figura 5-14 – Sistema de energização do aparelho de ar condicionado.</i> | 62 |
| <i>figura 5-15 – Sistema de energização do sistema de iluminação.</i> | 62 |
| <i>figura 5-16 – Modelo conceitual do sistema de iluminação da área individual.</i> | 63 |
| <i>figura 5-17 - Modelo conceitual do sistema de iluminação da área central.</i> | 63 |
| <i>figura 5-18 – Modelo em redes de Petri de parte do sistema de iluminação da área central.</i> | 64 |
| <i>figura 5-19 - Modelo em redes de Petri de parte do sistema de iluminação da área central (área dos corredores).</i> | 65 |
| <i>figura 5-20 - Modelo funcional do sistema de iluminação para a área individual.</i> | 65 |
| <i>figura 5-21 – Modelo conceitual do aparelho de ar condicionado integrado com o Sistema de Energia do andar.</i> | 66 |
| <i>figura 5-22 – Modelo em redes de Petri do aparelho de ar condicionado.</i> | 67 |
| <i>figura 5-23 – Modelo em rede PDT do compressor.</i> | 72 |
| <i>figura 5-24 – Modelo conceitual do acionamento do microcomputador</i> | 74 |
| <i>figura 5-25 – Diagrama da integração dos sistemas apresentados</i> | 74 |
| <i>figura 5-26 – Potência consumida referente às lâmpadas da área central.</i> | 76 |
| <i>figura 5-27 – Potência consumida referente às lâmpadas das salas individuais.</i> | 77 |
| <i>figura 5-28 – Consumo energético médio diário por monitores de microcomputador.</i> | 78 |
| <i>figura 5-29 – Número de funcionários durante o expediente.</i> | 81 |
| <i>figura 5-30 – Quantidade de lâmpadas acesas na área central.</i> | 82 |
| <i>figura 5-31 – Quantidade de lâmpadas acesas nas áreas individuais.</i> | 82 |
| <i>figura 5-32 – Temperatura do ambiente a partir do início do expediente.</i> | 83 |
| <i>figura 5-33 – Variação da energia interna do escritório.</i> | 83 |
| <i>figura 5-34 – Zoon in em $t=200$ min.</i> | 84 |
| <i>figura 5-35 - Variação de temperatura devido as cargas térmicas.</i> | 85 |

| | |
|--|----|
| <i>figura 5-36- Variação da energia com deslocamento do eixo de referência.</i> | 85 |
| <i>figura 6-1 – Arcos habilitadores e inibidores para acionamento/desacionamento do aparelho de ar condicionado.</i> | 90 |
| <i>figura 6-2 – Sinal de habilitação e inibição do Controle de Acesso.</i> | 90 |
| <i>figura 6-3 – Sinal de habilitação/inibição para acender/apagar as lâmpadas</i> | 91 |
| <i>figura 6-4 – Sinal para acender/apagar as lâmpadas</i> | 91 |
| <i>figura 6-5 – Uso das lâmpadas no escritório (sem corredores)</i> | 94 |
| <i>figura 6-6 – Variação da temperatura com referência em zero.</i> | 96 |
| <i>figura 6-7 – Variação da energia com o sistema otimizado.</i> | 97 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| <i>tabela 4-1 – Consumo de energia conforme leituras do relógio medidor da área privada</i> | 27 |
| <i>tabela 4-2 - Consumo de energia total da área privada (todos os andares)</i> | 27 |
| <i>tabela 4-3 - Consumo de energia total da área comum</i> | 27 |
| <i>tabela 4-4 – Tabela com a média diária de horas trabalhadas de cada funcionário</i> | 29 |
| <i>tabela 4-5 – Descrição dos itens disponíveis na instalação</i> | 32 |
| <i>tabela 4-6 – Descrição do itens do local indicado na figura 4-1</i> | 33 |
| <i>tabela 4-7 – Consumo total por agrupamento de itens de consumo.</i> | 34 |
| <i>tabela 4-8 – Dispositivos de controle para sistema de iluminação</i> | 35 |
| <i>tabela 4-9 - Dispositivos de controle para sistema de ventilação</i> | 35 |
| <i>tabela 4-10 – Resultado do estudo de tempo .</i> | 40 |
| <i>tabela 4-11 – Distribuição de período de trabalho</i> | 41 |
| <i>tabela 4-12 – Tabela de período trabalhado por funcionário</i> | 42 |
| <i>tabela 4-13 –Distribuição de impressões diárias.</i> | 43 |
| <i>tabela 4-14 – Tabela do uso de impressoras.</i> | 44 |
| <i>tabela 4-15 – Distribuição dos dias quentes e frios</i> | 45 |
| <i>tabela 4-16 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia quente</i> | 45 |
| <i>tabela 4-17 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia ameno</i> | 45 |
| <i>tabela 4-18 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia frio</i> | 46 |
| <i>tabela 4-19 – Análise do ar condicionado que atende o escritório</i> | 46 |
| <i>tabela 4-20 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia quente</i> | 46 |
| <i>tabela 4-21 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia ameno</i> | 47 |
| <i>tabela 4-22 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia frio</i> | 47 |

| | |
|--|----|
| <i>tabela 4-23 - Análise do ar condicionado que atende o escritório</i> | 47 |
| <i>tabela 4-24 - Discriminação dos itens da tabela para a tabela 4-25.</i> | 48 |
| <i>tabela 4-25 - Tabela resumo do consumo energético após análise.</i> | 49 |
| <i>tabela 5-1 - Média de uso das salas individuais e número de luminárias.</i> | 75 |
| <i>tabela 5-2 - Consumo de energia das luminárias das salas individuais.</i> | 76 |
| <i>tabela 5-3 - Tempo de uso de cada estação e consumo de energia dos monitores.</i> | 79 |
| <i>tabela 6-1 - Consumo de energia estimado para as lâmpadas dos corredores</i> | 93 |
| <i>tabela 6-2 - Consumo de energia do modelo otimizado sem corredores</i> | 93 |
| <i>tabela 6-3 - Consumo de energia dos monitores com a utilização do recurso sleep mode.</i> | 95 |

Lista de Abreviaturas

CE – Redes de Petri condição-evento.

CPD – Centro de Processamento de Dados.

EI – Edifícios Inteligentes.

IAQ – Qualidade interna do ar (*Indoor Air Quality*).

LT – Redes de Petri lugar-transição.

MFG – *Mark Flow Graph*.

PFS – *Production Flow Schema*.

PTD – Redes de Petri Predicado/Transição Diferenciais

RP – Redes de Petri.

RPC – Redes de Petri Coloridas.

RPD – Redes de Petri Diferenciais.

RPE – Redes de Petri Estocásticas.

RPLT – Redes de Petri Lugar/Transição.

RPI – Redes de Petri Interpretadas.

SED – Sistema a eventos discretos.

SVC – Sistema a variáveis contínuas

TR – Toneladas de refrigeração (unidade de potência de máquinas térmicas)

VCA – Sistema de ventilação e ar condicionado (originalmente HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning).

Listas de Símbolos

P = lugares de uma rede de Petri.

Tr = Transições de uma rede de Petri

t = tempo

I = período de uso do banheiro por funcionário

COP = eficiência da máquina

QL = Energia retirada

W = Energia gasta

$\dot{Q}_{\text{pessoas+equipamento}}$ = carga térmica de pessoas e equipamentos

\dot{Q}_{pessoas} = carga térmica de pessoas

$\dot{Q}_{\text{equipamentos}}$ = carga térmica de equipamentos

E = Energia total do sistema (J)

\dot{m} = vazão mássica do ar (kg/s)

cp = calor específico do ar (T=25oC, p=1atm) (KJ/kgK)

T_{in} = temperatura do ar de saída do aparelho de ar condicionado (K)

T_{ref} = temperatura de referência qualquer (K)

T = temperatura do ambiente interno do escritório (K)

n = número de pessoas dentro do escritório

\dot{q}_p = carga térmica gerada por uma pessoa (W)

\dot{q}_c = carga térmica gerada por um microcomputador (W)

n1 = número de lâmpadas acionadas

\dot{q}_l = carga térmica gerada por uma lâmpada fluorescente (W)

\dot{q}_{amb} = carga térmica do ambiente externo ao escritório (W)

M_{ar} = massa total de ar dentro do escritório (kg)

$\dot{q}_{paredes}$ = carga de penetração das paredes (W)

\dot{q}_{teto} = carga de penetração do teto (W)

\dot{q}_{piso} = carga de penetração do piso (W)

\dot{q}_{norte} = carga de penetração da parede norte (W)

\dot{q}_{sul} = carga de penetração parede sul (W)

\dot{q}_{leste} = carga de penetração da parede leste (W)

\dot{q}_{oeste} = carga de penetração da parede oeste (W)

$\dot{q}_{serviço}$ = carga de serviço devido a abertura de portas e outras infiltrações de ar (W)

A_{vidro} e A_{parede} = área lateral de parede e de vidro onde há contato com o meio externo (m²)

$T_{projeto}$ e $T_{escritório}$ = temperatura do ar externo de projeto e temperatura do ar dentro do escritório respectivamente (K)

h_1 e h_2 = coeficiente de troca de calor por convecção do lado externo e interno ao escritório (W/m².K)

Δx_{vidro} e Δx_{parede} = espessura do vidro e da parede (m)

k_{vidro} e k_{parede} = condutividade térmica do material (W/mK)

RESUMO

Devido às necessidades de aumentar a produtividade e diminuir os custos operacionais, as empresas vêm buscando a resolução desta problemática através da introdução do conceito de edifícios inteligentes. Tal prática vem se tornando popular devido às novas metodologias que consideram as peculiaridades do edifício e as interações deste com os usuários.

Neste contexto, se faz necessária a incorporação e efetivo uso de sistemas mecatrônicos (sistemas mecânicos e eletromecânicos integrados por computador) e de informação, que capacitem, o edifício, para a prestação de serviços avançados com elevado grau de autonomia, permitindo além do controle automatizado, a monitoração, gestão e manutenção dos diferentes sistemas prediais, considerando critérios de otimização e integração.

Assim, um edifício inteligente pode ser considerado como aquele que proporciona aos usuários o máximo conforto e comodidade através das novas tecnologias com a finalidade de aumentar a produtividade de seus ocupantes, otimizar o uso dos recursos (energia elétrica, sistema de ar condicionado e outros) e obter redução de custos.

Levando-se em consideração estes aspectos, em particular o de reduzir custos, é que se conduziu o desenvolvimento deste trabalho. De modo específico, desenvolveu-se a modelagem e análise da integração de alguns sistemas prediais visando a avaliação e otimização do consumo energético. O estudo foi baseado na teoria de sistemas a eventos discretos em função das características operacionais dos sistemas prediais e como ferramenta de modelagem foi utilizada a rede de Petri.

Palavras – chaves: Sistemas prediais, redes de Petri, consumo energético, sistemas a eventos discretos, análise de sistemas.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no meio comercial, o termo “prédios inteligentes” tem se popularizado, mas não há ao certo uma única definição. No entanto, apesar das diferentes formas de se definir o conceito de prédios inteligentes, existe um consenso comum entre elas: um prédio inteligente pode ser considerado como aquele que proporciona aos usuários o máximo de conforto e de comodidade através das novas tecnologias com a finalidade de aumentar a eficiência de seus ocupantes, assim como otimizar o uso dos recursos (energia elétrica, sistema de ar condicionado e outros) e também de reduzir custos [Abramson, 1995].

1.1 Motivações

Segundo [Qayoumi,2000], no novo mercado global as empresas devem procurar sempre se tornar mais competitivas e eficientes. A produtividade e a segurança ganharam, nesse contexto, uma fundamental importância para a avaliação da empresa. Tanto em “chão de fábricas” como em escritórios, existe uma preocupação maior em oferecer aos funcionários um ambiente de trabalho agradável e seguro, de modo que seu desempenho seja o melhor possível. Além disso, a redução de custos operacionais também tem se tornado uma outra preocupação frente a forte competitividade do mercado, que exige que os produtos e serviços sejam oferecidos com qualidade e a um baixo custo.

Desse modo, a utilização de prédios inteligentes para o abrigo das atividades de uma empresa tem se tornado cada vez maior devido às novas soluções desenvolvidas que consideram as peculiaridades funcionais que esses edifícios devem ter, e que relacionam ainda o comportamento e interações dos usuários [Finley, 1991]. Além dessas observações, deve-se ressaltar que esses edifícios devem ser projetados de modo que se possa fazer emprego de novas tecnologias, uma vez

que a vida útil de um prédio normalmente é longa em relação ao tempo necessário para o desenvolvimento da tecnologia.

Para que se atinja as metas propostas por um edifício inteligente, este deve incorporar sistemas mecatrônicos e de informação, que permitam que os serviços sejam oferecidos com elevado grau de autonomia [Roth, 1988]. Permitindo assim, que se faça uma gestão e manutenção dos sistemas prediais visando concomitantemente a otimização e a integração dos mesmos.

Neste contexto, a energia utilizada ou o sistema de energia, pode ser controlado visando a redução de custos. Conforme agências governamentais dos Estados Unidos estudos já vêm sendo realizados nessa área com o intuito de planejar para os próximos anos a construção de prédios comerciais energeticamente mais eficientes [Canada, 2001].

Deve-se considerar que o termo “eficiente” tem um sentido amplo, envolvendo não só o emprego de equipamentos eletrônicos mais econômicos, mas também fazer o uso racional da energia. Desse modo, torna-se de fundamental importância a análise desse sistema para a especificação de um controle ótimo para o uso da energia.

Apesar do consumo da energia possuir uma dinâmica contínua, essa pode ser definida através das mudanças de estados como consequência da ocorrência de eventos discretos, ou seja, o uso de energia está atrelado a eventos realizados pelos usuários, eventos internos dos equipamentos, eventos externos que alteram as condições operacionais dos sistemas. Desse modo, o sistema pode ser abordado como um sistema a eventos discretos [Gustin, 1999].

Como ferramenta de modelagem, é empregada as Redes de Petri por está ser uma técnica eficiente para o estudo a sistemas de eventos discretos e por ter-se mostrado adequada no caso dos sistemas prediais [Gomes, 1997; Gustin, 1999].

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar, modelar e analisar a relação e integração de alguns sistemas prediais visando a avaliação e otimização do consumo energético.

O estudo de caso considerado para o desenvolvimento do trabalho é um edifício comercial no qual considera-se o consumo de energia em função da iluminação, do ar condicionado e dos equipamentos de informática instalados no local.

A abordagem considerada para este propósito baseia-se na aplicação de técnicas derivadas das redes de Petri, em função dos trabalhos e ferramentas já desenvolvidas e do potencial que estas apresentam.

2. PRÉDIOS INTELIGENTES E USO RACIONAL DE ENERGIA

Atualmente, o aumento da eficiência de um funcionário tem sido atribuído à comodidade e conforto provindos do uso de tecnologias avançadas nos meios de trabalho que permitem que equipamentos e sistemas funcionem mais eficientemente, e que por consequência melhoram a atuação do profissional e reduzem os custos operacionais [Finley, 1991].

Segundo o artigo da [Siemens Building Technologies, 2001] as empresas estão em busca de idéias e soluções para reduzir riscos e custos operacionais, aumentar a força competitiva e prover mais conforto, segurança e bem estar para os ocupantes de um prédio.

Uma estratégia para se fazer isso é a integração efetiva de sistemas prediais, como ar condicionado, iluminação, sistema de alarme de incêndio, segurança e outros. Quanto maior for o nível de integração, menor será o custo operacional de um prédio [Siemens Building Technologies, 2001].

Ainda segundo o mesmo artigo, como consequência da automação, caso seja bem concebida e implementada adequadamente, o rendimento dos equipamentos e a produtividade deverão ser maiores, e os custos operacionais menores.

Outro benefício com a automação é que através da supervisão do sistema, informações precisas são obtidas e utilizadas para objetivos específicos como: monitoração, diagnóstico, manutenção e análise da energia. Ainda, estas informações podem ser utilizadas para prevenções de falhas críticas e reparos [Siemens Building Technologies, 2001].

Além deste benefício, através de um controle central também é possível explorar e implementar novos conceitos relacionados com a economia de energia, sendo possível distinguir a energia gasta por cada ambiente e assim dividir a despesa

envolvida. Pode ser feito ainda um controle do consumo de energia, liberando o uso desta para uma determinada área onde efetivamente é necessário. As lâmpadas poderão ser acessas automaticamente em função do nível de iluminação natural medida por um sensor de luminosidade [Piper, 1998c].

O controle dos sistemas prediais neste contexto tem acesso e realiza o processamento das informações fazendo com que a vida útil de equipamentos aumente e conseqüentemente que o custo operacional diminua, além de possibilitar o aumento da eficiência e o conforto dos ocupantes de um prédio [Piper, 1998c].

2.1 Sistema de Iluminação

Segundo [Moore, 2000] a maximização do uso da luz solar disponível para iluminar o interior de edifícios pode economizar significativamente o gasto de energia com iluminação e também contribuir para a produtividade dos usuários. Para tanto, sugere o controle da iluminação através do uso de “*dimmers*” eletrônicos para lâmpadas fluorescentes combinado com a instalação de transdutores fotos-sensíveis.

Dados estatísticos revelam que aproximadamente quarenta e um por cento (41%) da energia utilizada em um prédio comercial é atribuída para a iluminação artificial, mais especificamente trinta e cinco por cento (35%) para iluminação e seis por cento (6%) para o sistema de ar condicionado remover o calor gerado pelas lâmpadas. No entanto, com o uso de dispositivos, como o descrito acima, consegue-se economizar oitenta por cento (80%) da energia gasta com iluminação e ainda possibilita-se um controle do nível da claridade do ambiente mais próxima do ponto de conforto para os seres humanos. Como reflexo desta solução, o sistema de ar condicionado pode aumentar sua economia entre quinze a trinta por cento (15 a 30%) dependendo do clima [Moore, 2000].

Apesar da eficiência desse controle através de “*dimmers*” e transdutores fotos-sensíveis, a grande maioria dos sistemas centrais de controle não consegue responder às necessidades individuais. Desse modo, o controle de ocupação também deve ser implementado através da instalação de sensores de presença [Fetters, 1998].

Além desses controles, a adoção de novas tecnologias, como o uso de sistemas de “*dimmers*” contínuos ao invés de sistemas “*on/off*”, e uso de diferentes

tipos de venezianas como o de ajuste automático ao invés do ajuste manual diminuem os gastos em até cinquenta por cento (50%) [Galasiu, 2000].

Apesar da disponibilidade desses recursos a implementação do controle da iluminação é complexa. Isso se deve principalmente a uma modelagem não muito realística, pois envolve-se nesse processo o imensurável comportamento humano [Reinhart, 2000].

2.2 Sistema de Ventilação e Ar Condicionado (VAC)

O uso de sistema de ventilação e ar condicionado em sistemas prediais se faz necessário para controlar a qualidade de ar interna (*indoor air quality air* – IAQ). O seu papel, portanto, pode ser atribuído a dois aspectos: re-estabelecer a IAQ após um longo período sem atuação do VAC¹; e para remoção de contaminantes gasosos do ambiente de trabalho, como CO₂, gases liberados de pinturas ou móveis novos [Shaw, 1996].

A sua importância, no entanto, não se limita às condições de conforto que são geradas, mas também com o consumo elevado de energia. Conforme o National Research Council of Canadá, o VAC representa trinta e dois por cento (32%) do consumo de energia elétrica de uma instalação. Desse modo, o estudo para reduzir o consumo energético do VAC é fundamental quando se deseja reduzir gastos com relação ao consumo energético.

Um modo de reduzir esse tipo de custo é melhorando a eficiência operacional do sistema VAC. A atualização dos equipamentos (troca do “*chiller*”, manutenção da tubulação), bem como a implementação de controles programáveis podem ser aplicados desde que o sistema esteja adequadamente dimensionado [Piper, 2002a]. Atualmente, pode-se dizer que a eficiência de um “*chiller*” aumentou em quarenta por cento (40%) com relação àqueles produzidos há quinze anos atrás.

Ganhos maiores ainda são obtidos com a utilização de drivers de frequência variável. O resultado final é que os novos aparelhos têm conseguido economizar

¹ A sigla original seria HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning, porém, como aqui no Brasil os sistemas de ventilação normalmente possuem somente a ventilação e o sistema de ar condicionado, foi adotado a sigla para VAC – ventilação e ar condicionado.

cinquenta por cento (50%) da energia em uso em relação aos equipamentos de 15 anos atrás [Piper, 2002b].

2.3 Sistemas a Eventos Discretos (SED)

Os sistemas a Eventos Discretos (SED) são sistemas criados pelo homem na qual a sua dinâmica é caracterizada por estados discretos pela ocorrência de eventos instantâneos em intervalos irregulares e desconhecidos [Ramadge & Wonham, 1989].

Para este tipo de sistemas, novos controladores têm sido desenvolvidos baseados na tecnologia de computadores que estão substituindo aqueles controles baseados em relés eletromagnéticos [Miyagi, 1996]

Apesar da particularidade dos processos em cada instalação, procedimentos genéricos podem ser implementados através do uso de controles programáveis de uso geral. Por consequência, o uso e desenvolvimento de “*softwares*” são fundamentais para a utilização dos recursos destes controladores [Miyagi, 1996].

O conceito de controle para SED é definido como a execução de operações conforme um procedimento pré-estabelecido. Sua estrutura funcional pode ser vista na figura 2-1 [Miyagi, 1996].

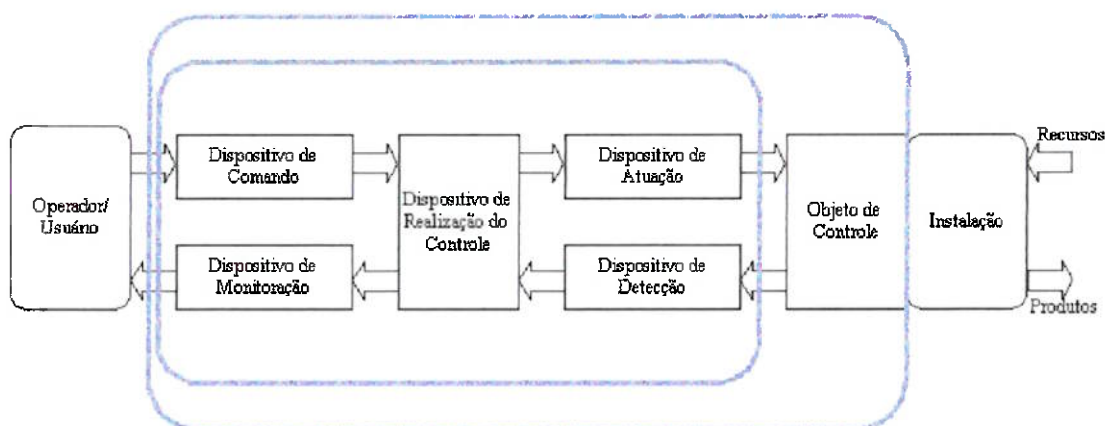


figura 2-2 – Diagrama conceitual básico do sistema de controle SED

2.4 Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos

2.4.1 Redes de Petri (RP)

Redes de Petri (RP) foram introduzidas por Carl Adam Petri em sua tese de doutorado (1962), como técnica para descrever relações entre condições e eventos no estudo de protocolos de comunicação entre componentes assíncronos. Desde então a rede de Petri tem sido aplicada em diversas áreas envolvendo modelagem e análise de sistemas vistos como SED. Entre estas áreas podem ser citadas: “*design*” de protocolos de redes de computadores, modelagem e controle de sistemas de manufaturas flexíveis, “*design*” e análise de “*hardwares*”, engenharia de “*software*” e análise de desempenho. Os fatores atrativos dessa técnica de análise e modelagem se referem ao aspecto de como as características dos sistemas concorrentes são tratadas tanto conceitual como matematicamente [Maciel, 2002].

Além disso, a RP permite uma visualização do sistema, pois possui uma representação gráfica que consiste de elementos conectados por segmentos orientados de ligação chamados de *arcos*. Estes elementos fazem a conexão entre outras duas estruturas, os *lugares* (P) representados por círculos e as *transições* (Tr) representadas por barras. O encadeamento destes três elementos se dá pelo intercalamento deles [Gustin, 1999]. Assim, partindo-se de um *lugar*, um *arco* deve apontar para uma *transição* e um *arco* desta *transição* deve apontar para um *lugar*, conforme figura 2-3 abaixo.

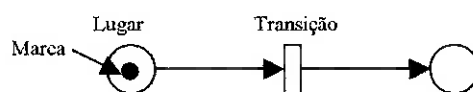


figura 2-3 – Representação dos três elementos básicos de uma RP e seus relacionamentos.

A RP pode ser caracterizada como um multigrafo, já que é permitido ter múltiplos *arcos* de um elemento do grafo até outro. Também é considerada bipartida, já que seus elementos são particionados em *lugar/transição* e é orientada devido à presença dos *arcos* orientados. Uma possível interpretação de cada um dos elemento é o seguinte [Miyagi, 1996]:

- *Lugares* – representam condições (pré e pós-condições) que podem estar associadas ao modo de operação ou à disponibilidade de um

recurso do sistema. Estes elementos podem armazenar itens e/ ou torná-los visíveis.

- *Transições* – correspondem à ocorrência de um evento que causa a mudança de estado do sistema. São os elementos que produzem, transportam, ou alteram itens.
- *Arcos* – estabelecem relações causais entre os eventos e as condições e vice-versa.
- *Marca* – indicam a manutenção de um estado (condição). Podem também representar itens. Um estado do sistema é descrito pela distribuição das *marcas* nos *lugares* da rede, isto é, sua *marcação*.
- *Disparo* – Estabelece o início de uma *transição*.

2.4.1.A Propriedades das Redes de Petri

As principais propriedades que uma rede de Petri pode apresentar são descritas abaixo [Gustin, 1999]:

1. **Consistência:** a partir de uma *marcação* inicial M_0 e uma sequência de disparos, o sistema retorna a M_0 desde que todas as *transições* tenham ocorrido pelo menos uma vez.
2. **Conservatividade:** Para qualquer *marcação* M da rede, a soma das *marcas* é constante.
3. **Limitabilidade:** Consiste em verificar se o número de *marcas* na rede ou num *lugar* é limitada ou não à partir de uma dada *marcação* inicial.
4. **Segurança:** Decorre da propriedade anterior e diz se que uma rede é segura quando ela é 1-limitada, ou seja, o número de *marcas* contidas em qualquer *lugar* é sempre 0 ou 1.
5. **Vivacidade:** Consiste em verificar se para cada *transição* existe uma sequência legal de *disparos* que leva a uma *marcação* no qual aquela *transição* seja habilitada. Esta propriedade permite verificar a

corrência ou não do *deadlock* (fenômeno que ocorre quando, eventos e condições se combinam de forma que outros eventos são impedidos de ocorrerem – sistema travado).

6. **Reversibilidade:** Uma rede é dita reversiva se, partindo de qualquer ponto (*marcação*) do sistema, esta pode retornar ao estado inicial.

2.4.1.B Tipos de Redes de Petri

A. Redes Condição-Evento (CE)

Nesse tipo de rede, um *evento* somente irá ocorrer se determinadas *condições* estiverem satisfeitas [Miyagi, 1996]. Na figura 2-4 abaixo, é possível notar que o *evento* B somente irá ocorrer quando a *condição* A for satisfeita, ou seja, receber uma *marca*. No exemplo b) da figura 2-4, exemplifica o caso em que a *condição* C é uma *pós-condição* para que B ocorra, ou seja, esse *evento* somente ocorre se C não possuir uma *marca*.

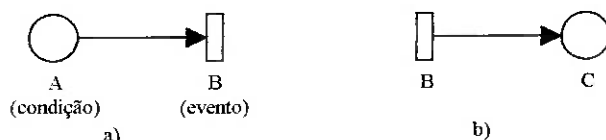


figura 2-4 – a) A é *condição* para que o *evento* B ocorra - A é uma pré-condição de B. b) C é pós-condição de B.

Quando uma *condição* (*lugar* A) é satisfeita (uma identificação é feita através de uma *marca*) a *transição* ligada a esta condição é habilitada. Após a habilitação a *transição* disparará se a pós-condição (*lugar* C) não estiver satisfeita. Ao final a pré-condição que estava satisfeita deixa de estar e a pós-condição passa a estar satisfeita (vide figura 2-5).

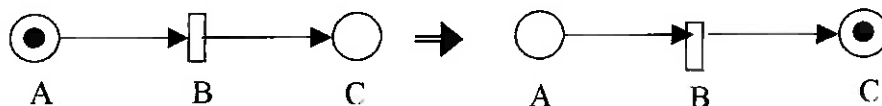


figura 2-5 – Dinâmica de disparo em uma rede CE.

Em alguns casos, no entanto, as redes CE não possuem um comportamento determinístico no qual seja possível prever qual dos eventos terá prosseguimento no

caso de um *conflito*. Isto é, um *conflito* ocorre quando dois eventos estão ativados e a ocorrência de um implica na desativação do outro, ou quando dois eventos ativados têm no mínimo uma pré ou pós-condição em comum [Miyagi, 1996].

Dependendo do grafo é possível obter uma situação de *contacto*, no qual um evento depende tanto da pré como da pós-condição. E normalmente uma é complemento da outra. Ou seja, se uma estiver satisfeita a outra obrigatoriamente não estará [Miyagi, 1996].

B. Redes Lugar-Transição (LT)

Na rede LT os *lugares* podem armazenar mais de uma *marca*, conforme figura 2-6. Como consequência, esta rede permite modelar entidades físicas que possuem uma capacidade $n > 1$, sendo n o número de *marcas* armazenadas em um *lugar* [Gustin, 1999].

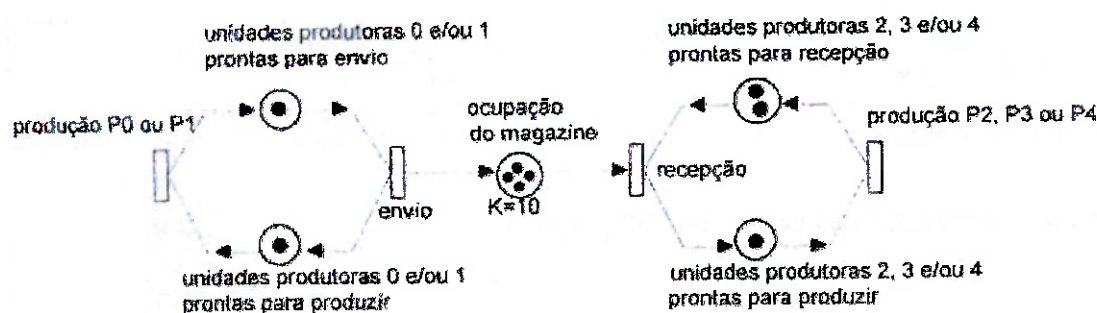


figura 2-6 – Representação de uma rede de Petri LT.

Outra característica fundamental dessa representação é a possibilidade de enviar mais de uma *marca* para uma *transição* através dos *arcos* ponderados, que é representado por uma inscrição numérica no *arco*. Vide figura 2-7.

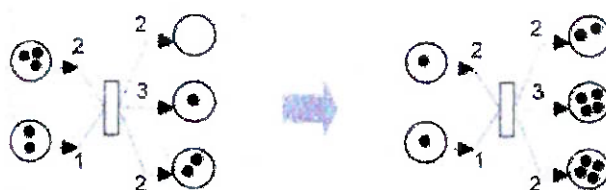


figura 2-7 – Indicação dos arcos ponderados e a dinâmica do sistema.

C. Redes de Petri Estocásticas (RPE)

Em alguns casos as *transições* podem ser temporizadas, como por exemplo, a *transição trabalhar*, no qual a sua execução não é imediata. Dentro deste contexto, pode-se definir *transições* temporizadas determinísticas no qual o tempo é conhecido e *transições* estocáticas, no qual o tempo é baseado em estudos probabilísticos. Para este último caso, um tempo random é associado com o disparo da *transição*, onde o tempo é geralmente distribuído segundo uma lei exponencial [Palomino, 1995].

D. Redes de Petri Coloridas (RPC)

Essa representação condensa a descrição e análise de sistemas compostos por diversos subsistemas semelhantes que trabalham em paralelo [Gustin, 1999]. A grande vantagem das RPC, é a possibilidade de representar o fluxo de objetos (*marcas*) diferentes em um mesmo processo que utiliza as mesmas instalações, por exemplo. Para tanto, cada objeto recebe um tipo próprio de marca, sendo possível discriminar item por item no processo modelado.

Assim, como a rede LT, a RPC também possui *arcos* ponderados, porém com as características de distinguir o fluxo de cada tipo de *marca* e por consequência os objetos que podem “fluir” em cada *arco*.

Uma outra forma de classificar as redes de Petri é em função de sua aplicação prática. Assim têm-se as redes de Petri interpretadas. Neste tipo de rede são associadas variáveis com significado prático aos seus elementos, representando condições e ações existentes no sistema. Tais variáveis podem indicar o estado de atuadores, sensores, etc., permitindo assim, modelar a interação com o ambiente externo [Cardoso & Valette, 1997].

Estas redes podem ser usadas para a modelagem de ações de controladores lógicos e são fundamentais para a automação industrial.

Assim, a rede de Petri se constitui como uma poderosa ferramenta para o modelagem e análise de SED. Entretanto, na modelagem de sistemas complexos e com diferentes níveis de abstração se evidencia um ponto fraco em uma de suas principais características: sua visualização gráfica. Desta maneira, verifica-se que é

adequado que a modelagem inicial seja realizada utilizando interpretações conceituais e a partir deste modelo seja conduzido um detalhamento. E, é neste contexto que a técnica do PFS (Production Flow Schema) [Hasegawa et al., 1988] é considerado. O PFS é uma extensão interpretada das redes de Petri (de modo que herdam o poder de representação e as técnicas formais de análise de grafos), própria para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SED.

Production Flow Schema (PFS)

No desenvolvimento das estratégias de controle de SED os eventos podem ser subdivididos em outros eventos e estados, de modo que uma hierarquia seja estabelecida. Assim, o tratamento a ser dado a este tipo de evento é o de macro-evento.

Percebe-se então que ao invés de se realizar uma modelagem direta do sistema, que dependendo da complexidade torna-se impossível, o uso do PFS permite que o modelo evolua de um modelo conceitual básico até o seu nível de maior complexidade e com uma visualização muito mais sistematizada e racional. Essa abordagem também é conhecida como *top-down* [Miyagi, 1996].

O PFS possui três elementos estruturais: Distribuidores ou elementos interatividade: representados por círculos; atividades: representadas por um bloco entre colchetes com inscrições em linguagem natural; arcos orientados dos distribuidores para as atividades e vice-versa. Na figura 2-8 possível verificar sua simbologia.

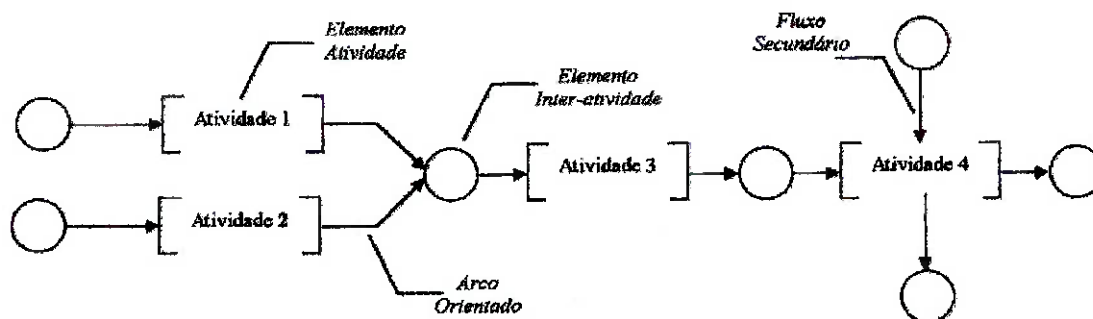


figura 2-8 – Elementos do PFS

O diagrama resultante da combinação desses três elementos e que representam um fluxo de itens num processo produtivo é chamado de PFS, não existindo o conceito de *marcas*, *marcações* e de *disparos*.

Para o uso do PFS deve-se considerar que cada *distribuidor* é capaz de armazenar e tornar visíveis os itens. Cada elemento *atividade* representa um componente que é responsável por uma ação sobre os itens. Os *arcos* orientados representam uma relação lógica e abstrata entre elementos *interatividade* e *atividades*.

O PFS pode ser usado no contexto de uma metodologia que permite o refinamento gradativo deste até uma rede de Petri. Desse modo, tem-se um procedimento sistemático e racional segundo uma abordagem *top-down* até que se atinja o nível desejado de detalhamento. Assim, inicialmente cria-se um modelo conceitual do sistema através do PFS, com o objetivo de descrever as principais características das funções que serão consideradas no sistema [Gustin, 1999]. No segundo passo, na descrição funcional, os elementos do grafo PFS são detalhados sendo gerados sub-grafos em redes de Petri.

2.5 Definição da Metodologia a Ser Empregada

Como foi exposto, as redes de Petri pelas suas características se constituem em uma ferramenta adequada para a modelagem dos sistemas considerados neste trabalho. No entanto, as redes de Petri que descrevem um sistema real podem ser consideravelmente grandes e dependendo da complexidade do sistema, a sua modelagem se torna difícil.

No caso do método do PFS, onde fica clara a inter-relação entre *atividades* e *interatividades* devido ao fato de focar uma modelagem conceitual, o desenvolvimento do modelo é mais simples. Por este motivo, é utilizada como ferramenta para a modelagem conceitual do sistema. Para obter o modelo funcional do sistema detalha-se o modelo em PFS em redes LT.

2.6 Sistemas Híbridos

O estudo do conceito de sistemas híbridos neste trabalho se faz necessário devido a alguns sistemas prediais terem como característica a variação contínua de certos parâmetros, como por exemplo, a variação de temperatura do ambiente, associada a ocorrências de eventos discretos como, por exemplo, a abertura/fechamento de “*dampers*” de renovação de ar.

Existem diversas definições do que é um sistema híbrido. Essas definições levam em conta a característica das interações entre a parte do sistema com dinâmica contínua e a parte onde a evolução dos estados é dirigida por eventos discretos instantâneos [Villani, 2000]. A seguir apresentam-se algumas definições de sistema híbrido e ao final a definição que será utilizada no presente trabalho.

Uma definição de um sistema híbrido pode ser considerada como aquele sistema que contém pelo menos uma variável discreta e pelo menos uma variável contínua [Alla & David, 1998].

Outra definição de um sistema híbrido corresponde a um típico sistema de variáveis contínuas (SVC), representado por equações diferenciais, em que eventos discretos ocorrem causando modificações não-contínuas e que não podem ser representadas através de equações diferenciais [Gotesman & Lopez-Benitez, 1996].

Para [Wieting, 1996], sistemas híbridos são sistemas onde existe uma mistura de variáveis discretas e contínuas se influenciando mutuamente em um mesmo nível hierárquico.

Em termos de controle, [Champagnat, 1998] define que um sistema híbrido corresponde a interação de um sistema de controle local basicamente contínuo com um sistema supervisor a eventos discretos.

Porém, neste trabalho, considera-se a definição adotada em [Villani, 2000] de que um sistema híbrido é aquele em que a não observância da parte discreta ou da parte contínua compromete o modelo desenvolvido. Por exemplo, no caso de um aparelho de ar condicionado, a ocorrência de um evento discreto influencia a variação contínua do sistema, isto é, o evento de entrada de um funcionário afeta de

modo contínuo a temperatura ambiente até que o equilíbrio térmico e as condições de conforto térmico sejam novamente estabelecidos.

2.7 Modelagem de sistemas híbridos

Da mesma maneira que existem várias definições de sistemas híbridos, existem inúmeras abordagens para modelagem, análise e controle deste tipo de sistema. Alguns autores definem um modelo homogêneo que engloba em um único formalismo as partes de eventos discretos e de dinâmica contínua. Outros autores, por outro lado, utilizam-se de formalismos específicos para cada parte e posteriormente definem um modelo para fazer o interfaceamento entre eles [Villani, 2000].

Segundo [Antsaklis & Nerode, 1998], algumas abordagens consistem em extensões de modelos contínuos, descritos por equações diferenciais ordinárias nas quais são incluídas variáveis cujos valores podem ser modificados de forma descontínua no tempo. Normalmente, estas abordagens são utilizadas em sistemas contínuos de alta complexidade com o objetivo de obter informações relativas à estabilidade do sistema.

Analogamente, um outro tipo de abordagem consiste na modificação de técnicas de modelagem utilizadas em SED adaptados com novos elementos que permitem a representação da dinâmica contínua do sistema [Antsaklis & Nerode, 1998].

Dos dois tipos de abordagem, para o presente trabalho, o que melhor se adequa as características de interesse é a segunda, uma vez que a análise envolvida foca no nível de gerenciamento dos sistemas (VAC, iluminação e micro-computadores em termos de consumo energético) com características predominantemente discretas.

2.7.1 Extensões de redes de Petri para modelagem de sistemas híbridos

Diversas extensões da rede de Petri têm sido propostas para facilitar a modelagem de sistemas a eventos discretos mais complexos, como o PFS e o MFG.

Da mesma maneira, para sistemas híbridos, existem extensões como as que estão descritas a seguir.

Redes de Petri Híbridas

Basea-se na rede LT (RPLT). Além dos *lugares* e *transições* discretas são adicionados *lugares* contínuos, cuja *marcação* é um número real não negativo, e *transições* contínuas, as quais são associadas velocidades máximas de *disparos* representando o fluxo contínuo das *marcas* [Alla & David, 1998].

Com a inserção destes dois elementos procura-se representar um fluxo contínuo, que pode ser entre outros exemplos, um fluxo de energia ou material [Villani, 2000].

Redes de Petri Diferenciais (RPD)

O objetivo desta extensão é de unir as vantagens de uma representação gráfica com as vantagens da modelagem através de relações matemáticas entre os diversos elementos do sistema [Villani, 2000].

Nesta rede são introduzidos *lugares* diferenciais, cuja *marcação* é um número real, e *transições* diferenciais, as quais são associadas velocidades de *disparo* que podem ser constantes ou funções dependentes da *marcação* dos *lugares* diferenciais [Villani, 2000].

Redes de Petri Predicado Transição Diferenciais (redes PTD)

Este modelo combina as redes de Petri com equações diferenciais algébricas. O objetivo deste modelo é o de modelar um fluxo contínuo de material que é processado em diversos equipamentos e cuja configuração é alterada de forma discreta. As redes de Petri representam as diversas configurações discretas possíveis para os diferentes equipamentos enquanto o sistema de equações diferenciais algébricas, associados aos *lugares* que representam as diferentes configurações, modela a evolução contínua do estado do sistema quando em uma determinada configuração [Villani, 2000].

Este modelo apresenta maior flexibilidade em relação às redes de Petri Híbridas e às redes de RPD no que se refere a modelagem da parte contínua, uma vez

que esta parte é derivada diretamente do equacionamento matemático do sistema. Entre as desvantagens desta solução se encontra a necessidade, durante a simulação ou implementação prática do sistema, da coexistência de dois ambientes distintos: um responsável pela evolução da rede de Petri (discreta) e outro responsável pela resolução do sistema de equações diferenciais. Outra desvantagem é a ausência de uma representação gráfica da parte contínua. Essa característica faz com que o modelo seja composto por uma série de sub-redes de Petri não conectadas entre si graficamente [Villani, 2000].

Contudo, apesar das dificuldades apresentadas considera-se que, a rede PTD é a que melhor se adequa para a modelagem de sistemas prediais principalmente devido a facilidade de construção do modelo híbrido a partir da definição das relações matemáticas entre as propriedades das variáveis contínuas em diferentes pontos do sistema [Villani, 2000]

As redes PDT combinam as redes de Petri Predicado/Transição com equações diferenciais. Esta rede pode ser definida como uma 9-úpla $= \{P, T, F, X, S, Hc, J, M_0, V_0\}$, em que [Villani, 2000]:

- P é um conjunto finito de *lugares* da rede;
- T é um conjunto finito de *transições* da rede;
- $F \subseteq \{P \times T\} \cup \{T \times P\}$ é o conjunto de *arcos* direcionados;
- X é o vetor de variáveis contínuas associadas à rede;
- S é o conjunto de expressões booleanas associadas aos *lugares*;
- Hc é o conjunto de expressões booleanas associadas as *funções de habilitação* das *transições*;
- J é a conjunta das funções de junção associada às *transições*;
- M_0 é a *marcação* inicial da rede;
- X_0 é o valor inicial das variáveis pertencentes a X .

2.8 Simulação de Sistemas

Simulação é, em geral entendida como a “imitação” de uma operação ou de um processo do mundo real. Independentemente do uso de computadores, a simulação envolve a geração de uma “história artificial” de um sistema para a análise de suas características operacionais [Miyagi, 2002].

O comportamento de um sistema é estudado através de um modelo de simulação, que uma vez desenvolvido e validado, pode ser usado para investigar uma grande variedade de questões sobre o sistema. Deste modo, através da simulação é possível verificar mudanças e perturbações nos sistemas existentes a fim de prever seu impacto no seu desempenho ou estudar sistemas ainda na fase de concepção, antes que sejam efetivamente implementados [Miyagi, 2002].

2.8.1 Simulação de sistemas a eventos discretos

Este tipo de simulação é própria para análise de sistemas em que o estado discreto das variáveis é modificado através da ocorrência de eventos, ditos instantâneos [Miyagi, 2002].

A análise do modelo empregado, neste tipo de simulação, é baseada em métodos numéricos ao invés de métodos analíticos. Este último método é caracterizado pelo emprego do raciocínio dedutivo/matemático para resolver o modelo, enquanto que o primeiro método emprega procedimentos computacionais para resolver modelos matemáticos. A característica do método numérico é que ele executa uma “história artificial” baseada nas suposições assumidas para o modelo [Miyagi, 2002].

2.8.2 Simulação de sistemas contínuos

Conforme [Villani, 2000], um exemplo de simulação contínua é, a partir do modelo construído, adotar algumas configurações para os estados discretos das redes PTD e com base nisto, simula-se numericamente as equações resultantes.

O objetivo desta etapa é de validar o conjunto de equações adotadas sob algumas situações pré-determinadas.

2.8.3 Simulação de sistemas híbridos

Um exemplo de simulação de sistemas híbridos seria um em que existe um acoplamento de dois ambientes de simulação: o primeiro de redes de Petri e o segundo de equações diferenciais. Os ambientes definem simulações que evoluem de forma intercalada sendo sincronizados pelos eventos, ou seja, executa-se uma simulação até a ocorrência de um evento e, então, troca-se de ambiente de simulação, conforme pode ser visto figura 2-9 [Villani, 2000].

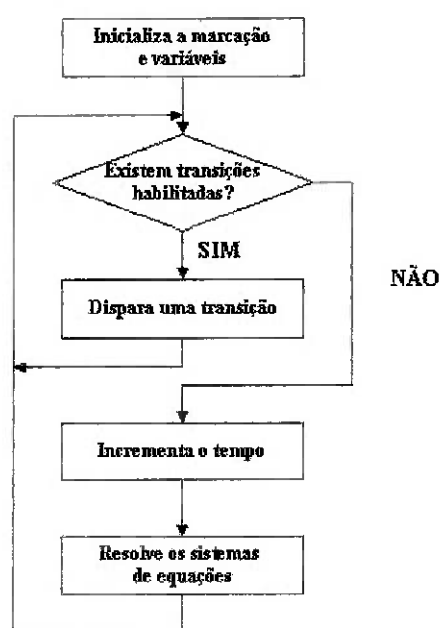


figura 2-9 – Etapas da simulação híbrida

O primeiro passo da simulação é definir o estado inicial do sistema verificando a *marcação* inicial dos modelos em rede de Petri, e o valor de todas as variáveis contínuas.

Posteriormente, verifica-se a existência ou não de *transições* habilitadas, para então, no próximo passo, dispará-las aleatoriamente. Incrementa-se o tempo e inicia a simulação numérica de equações diferenciais. Por último calcula-se as propriedades das variáveis de interesse do estudo (no caso do ar condicionado, a temperatura, etc.).

3. METODOLOGIA DE MODELAGEM

Para otimizar o consumo energético de um prédio é necessário inicialmente criar um modelo do sistema atual e validá-lo, pois experimentações reais são, em geral, impraticáveis.

3.1 Etapas da metodologia

Deste modo, apresenta-se a metodologia utilizada para modelar o sistema em consideração (sistema de ar condicionado, iluminação e equipamentos eletrônicos de um prédio) e uma descrição sucinta de cada etapa:

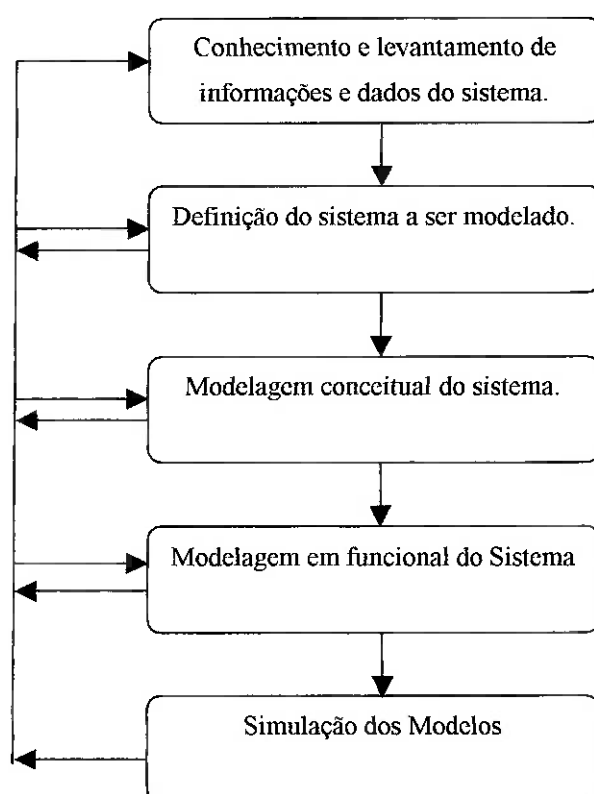


figura 3-1 – Metodologia para a modelagem dos sistema de ar condicionado, iluminação e equipamentos eletrônicos de um prédio.

Conhecimento e levantamento de dados do sistema:

Nessa etapa levanta-se as características do sistema que permitem desenvolver a sua definição, sendo considerados os requisitos e funções necessárias ao sistema.

Nessa etapa o contato com usuários, projetistas e gerenciadores do prédio é fundamental para se conhecer as peculiaridades do objeto estudado. Todas as informações, tanto às de origem de entrevistas como de documentação, devem ser levadas em consideração para o conhecimento devido e também como um estudo preliminar na identificação dos pontos relevantes ao sistema.

Definição do sistema a ser modelado

Nessa fase, as informações levantadas na etapa anterior são analisadas e é feita a validação técnica do atendimento das necessidades do sistema.

Com essa análise, erros de interpretação e a necessidade de novos levantamentos são avaliados em virtude de não apresentar informações suficientemente claras ou identificação de dados contraditórios ou incorretos. A viabilidade econômica e técnica também devem ser avaliadas nesta fase.

Por consequência outras características do sistema são definidas, como o tipo de controle, a estratégia para funcionamento em grupo e integração com outros sistemas prediais.

Modelagem conceitual do sistema

Nesta etapa a modelagem de cada um dos elementos estruturais do sistema é realizada de forma sistemática e hierárquica, sendo seu escopo abordar a modelagem no nível conceitual das atividades dos sistemas.

Na formulação do modelo conceitual, é adotada como ferramenta de modelagem o PFS.

Modelagem funcional do sistema

Nesta etapa, o modelo detalhado em redes de Petri é desenvolvido a partir do modelo conceitual em PFS.

Simulação dos modelos

Os modelos são simulados com o objetivo de validar se eles representam adequadamente as especificações do sistema real, de tal forma que seu comportamento dinâmico seja coincidente com o comportamento esperado.

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido para um prédio comercial e tal enfoque se justifica pela grande quantidade de edifícios presentes na paisagem urbanística das grandes metrópoles para alocação de escritórios, como pode ser observado na região da Av. Paulista, Av. Eng. Luiz Carlos Berrini ou Av. Nações Unidas em São Paulo.

Um prédio comercial típico da região mencionada pode ser considerado como aquele que possui sistema de controle de seus acessos, sistema de elevadores, sistema de emergência e alarmes, sistema de ar condicionado e sistema de iluminação. Seus andares típicos são independentes um dos outros tanto no aspecto dos sistemas instalados quanto ao fato de poderem ser alocados ou não a diferentes empresas.

O andar típico, em geral, possui um sistema próprio de controle de acessos, sistema de ar condicionado central próprio e sistema de iluminação própria. Quanto aos equipamentos e facilidades de trabalho dos usuários, considera-se que possui estações de trabalho individuais, salas individuais, banheiros masculino e feminino, e salas de reuniões.

A ocupação do andar normalmente é feita por atividades administrativas e de serviço associados a empresas típicas do ramo industrial, de consultoria, bancos, e outras mais. Seus funcionários trabalham, em geral, diretamente com microcomputadores, telefones e arquivos.

No presente estudo, foi considerado um prédio existente na cidade de São Paulo com doze andares sendo servido de um sistema de elevadores (quatro elevadores), um sistema de ar condicionado central para a área comum (recepção), sistema de iluminação próprio (garagem, recepção, hall dos elevadores), um sistema de alarme central que atinge todos os andares. Disponibiliza de uma área útil de

quinhentos metros quadrados por andar ($500 \text{ m}^2/\text{andar}$), sendo que cada andar é ocupado por uma empresa diferente.

4.1 Uso da iluminação artificial

O sistema de iluminação do andar típico é constituído de uma chave geral que aciona todas as lâmpadas, exceto aquelas confinadas nas salas individuais e cujo acionamento é feito através de um interruptor.

A iluminação local é feita por luz artificial sendo que as lâmpadas são acionadas das seis horas da manhã até às vinte horas. O controle delas é feito diretamente pela administradora do prédio, e nos casos em que algum funcionário continue trabalhando após o horário de desligamento, ele deverá fazer uma solicitação a administradora, permanecendo iluminado o andar inteiro, exceto as salas privadas.

Apesar do prédio considerado possuir na prática uma boa disponibilidade de iluminação natural, ela aparentemente não é suficientemente aproveitada.

4.2 Sistema de ar condicionado

Segundo a administradora do prédio, **CB RICHARD ELLIS**, o acionamento dos dois aparelhos de ar condicionados alocados no andar de estudo é feito pelo pessoal de manutenção do prédio.

Apesar da existência de dois aparelhos, somente um (aparelho A) foi projetado para atender as necessidades do andar (500 m^2), o segundo (aparelho B) foi dimensionado para atender as especificações de temperatura de um servidor de computadores alocadas em uma sala de três metros quadrados (3 m^2), sem ocupação humana.

O acionamento do aparelho A ocorre sempre às 6 horas da manhã ou quando a recepcionista recebe pedido de algum funcionário. Do mesmo modo ocorre o seu desacionamento. Se isto não for feito, automaticamente a administradora do edifício realiza esta tarefa às vinte horas. O aparelho B permanece, em princípio, acionado vinte quatro horas por ser destinado à manter a temperatura da sala (sala número 28 na figura 4-1 do servidor central do escritório).

Os dois aparelhos têm capacidades semelhantes e possuem um potência de 9 TR, com consumo nominal de 11.245 W (incluindo ventilação com motor de 1HP).

4.3 Coleta de Dados

A coleta de dados tem como objetivo permitir a identificação dos pontos de consumo de energia e a determinação dos pontos críticos a serem considerados.

Para análise do consumo de energia em kWh, é necessário fazer o estudo de tempo que cada funcionário fica trabalhando, o tempo de uso dos equipamentos instalados e a potência consumida por cada equipamento. Assim, primeiramente foi levantado o gasto que este escritório típico possui com relação ao consumo energético e também o consumo energético propriamente dito. Posteriormente foi realizado o estudo do tempo que os funcionários permanecem dentro do andar, bem como o período em que as lâmpadas ficam acessas durante o período de trabalho e o custo total de energia do andar, para então confrontar o resultado estimado com o valor exato indicado pelos medidores.

4.4 Rateio de Custos entre Área Privada e Área Comum

Antes de prosseguir com os resultados deve se entender qual a grandeza da quantidade de energia utilizada. Cabe aqui indicar que a administração do prédio, a CB RICHARD ELLIS, é a responsável pelas informações. A conta por ela repassada para o andar em estudo se refere a dois tipos de pagamentos, um com relação ao andar (área privada) e outra com relação aos gastos da área comum do prédio (garagem, elevador, recepção, banheiros coletivos, por exemplo).

Conforme informações da administradora, o rateio de custo é feito proporcionalmente ao gasto de cada andar sobre a conta da área comum, ou seja, caso o custo de energia da área comum do prédio for x , o custo total da área privada (de cada empresa ou entidade típica usuária do prédio) for y , e o andar em estudo contribuir com $0,13y$ o rateio da área comum, para esse caso, será de $0,13x$.

Para tanto, as instalações elétricas possuem relógios de leitura de consumo por andar, um central para área privada e um para área comum.

O consumo real para quatro meses, conforme as leituras dos relógios medidores da área privada apontam, são apresentados na tabela 4-1. Observa-se que tratam-se dos quatro meses em que a temperatura ambiente é mais elevada em virtude da época do ano (verão).

tabela 4-1 – Consumo de energia conforme leituras do relógio medidor da área privada

| Consumo de Energia - Área Privada (kWh) | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|
| jan | feb | mar | apr | média |
| 7,613.00 | 6,459.50 | 6,824.50 | 8,375.50 | 7,318.13 |

tabela 4-2 - Consumo de energia total da área privada (todos os andares)

| Consumo de Energia - Área Privada Total (kWh) | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|
| Jan | feb | mar | apr | média |
| 222.301,42 | 187.479,37 | 197.049,40 | 195.758,44 | 200.647,16 |

tabela 4-3 - Consumo de energia total da área comum

| Consumo de Energia - Área Comum (kWh) | | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| jan | feb | mar | apr | média |
| 212.599,58 | 280.390,63 | 275.171,60 | 305.918,56 | 268.520,09 |

4.5 Estudo da utilização do prédio

O estudo de utilização pelos usuários foi realizado baseando-se na entrada e saída de cada funcionário no andar. O acesso a este é realizado através um leitor magnético de cartões, sendo a informação (entrada ou saída de pessoas) registrada em um computador. Os dados coletados neste trabalho foram extraídos do relatório de entrada e saída.

Apesar dessa facilidade, os dados armazenados e estudados não necessariamente representam a realidade, pois existem funcionários que têm acesso ao andar sem utilizar o próprio cartão. Esse tipo de prática é observado quando dois funcionários chegam ao andar juntos, sendo que somente um deles pede acesso passando o cartão enquanto que o outro apenas aproveitava o acesso liberado. O mesmo é verificado quando da saída do andar.

Na tabela 4-4 é possível verificar uma estimativa das quantidades de horas trabalhadas dentro do andar. Deve-se notar que existem funcionários que somente se apresentam na empresa esporadicamente (*home office*) e os funcionários que sempre estão presentes no escritório (caracterizando as diferentes naturezas de atividades dos usuários).

tabela 4-4 – Tabela com a média diária de horas trabalhadas de cada funcionário

| ID | Totalização | Média | Status |
|-----------|--------------------|--------------|---------------|
| 1 | 494:00:00 | 8:14:00 | Office |
| 2 | 550:00:00 | 9:10:00 | Office |
| 3 | 613:00:00 | 6:48:40 | Office |
| 4 | 648:30:00 | 7:12:20 | Office |
| 5 | 696:00:00 | 7:44:00 | Office |
| 6 | 249:00:00 | 4:09:00 | Office |
| 7 | 764:00:00 | 8:29:20 | Office |
| 8 | 690:30:00 | 7:40:20 | Office |
| 9 | 488:30:00 | 5:25:40 | Office |
| 10 | 138:00:00 | 4:36:00 | Home Office |
| 11 | 233:30:00 | 7:47:00 | Home Office |
| 12 | 350:00:00 | 5:50:00 | Office |
| 13 | 781:30:00 | 8:41:00 | Office |
| 14 | 731:30:00 | 8:07:40 | Office |
| 15 | 548:00:00 | 6:05:20 | Office |
| 16 | 463:00:00 | 5:08:40 | Office |
| 17 | 743:00:00 | 8:15:20 | Office |
| 18 | 252:00:00 | 8:24:00 | Home Office |
| 19 | 241:00:00 | 4:01:00 | Office |
| 20 | 432:00:00 | 7:12:00 | Office |
| 21 | 266:30:00 | 8:53:00 | Home Office |
| 22 | 780:00:00 | 8:40:00 | Office |
| 23 | 423:30:00 | 7:03:30 | Office |
| 24 | 550:00:00 | 6:06:40 | Office |
| 25 | 272:30:00 | 9:05:00 | Home Office |
| 26 | 829:00:00 | 9:12:40 | Office |
| 27 | 94:00:00 | 3:08:00 | Home Office |
| 28 | 788:00:00 | 8:45:20 | Office |
| 29 | 328:00:00 | 10:56:00 | Home Office |
| 30 | 790:30:00 | 8:47:00 | Office |
| 31 | 744:30:00 | 8:16:20 | Office |
| 32 | 338:00:00 | 11:16:00 | Home Office |
| 33 | 708:30:00 | 7:52:20 | Office |
| 34 | 139:30:00 | 4:39:00 | Home Office |
| 35 | 127:30:00 | 4:15:00 | Home Office |
| 36 | 474:00:00 | 7:54:00 | Office |
| 37 | 61:00:00 | 2:02:00 | Home Office |
| 38 | 158:00:00 | 5:16:00 | Home Office |
| 39 | 547:00:00 | 6:04:40 | Office |
| 40 | 373:00:00 | 6:13:00 | Office |
| 41 | 574:00:00 | 6:22:40 | Office |
| 42 | 112:30:00 | 3:45:00 | Home Office |
| 43 | 214:30:00 | 3:34:30 | Office |
| 44 | 465:30:00 | 7:45:30 | Office |
| 45 | 56:00:00 | 1:52:00 | Home Office |
| 46 | 186:00:00 | 6:12:00 | Home Office |

4.6 Mapeamento do Uso da Área

O uso do andar considerado não é distribuído uniformemente no tempo, ocorrendo em alguns dias o uso de apenas cinquenta por cento do andar. Isso ocorre pelo fato da natureza de algumas atividades obrigarem os usuários a passarem a maior parte do tempo fora do escritório.

A figura 4-1, ilustra o ambiente do andar típico, posteriormente na tabela 4-5 e tabela 4-6 são apresentados outros dados referentes a distribuição genérica de aparelhos eletrônicos por região identificada.

Ressalta-se que algumas considerações e simplificações são assumidas quanto ao tempo de funcionamento de cada tipo de aparelho. No caso das impressoras, apesar de ficarem alocadas com funcionários que trabalhem cerca de oito horas, é feita uma estimativa que apenas a mesma fique ligada por apenas meia hora por dia no caso das impressoras com jato de tinta, e uma hora por dia no caso das impressoras laser.

No caso do fax, o tempo estimado de funcionamento estabelecido foi de cinco horas pelo fato de que mensagens são recebidas sem a necessidade de um funcionário estar presente.

Para o uso dos banheiros, foi considerado que os mesmos ficam ocupados durante cinco horas do dia, uma vez que é normal aos ocupantes utilizarem uma vez no período da manhã e outra no período da tarde segundo a estimativa dada na eq. 4-1. 4-1. 4-1:

$$t = \frac{2 * I * F}{60} = \frac{2 * 3 \text{ min} * 46}{60} = 4,6 \text{ horas} \quad \text{eq. 4-1}$$

Onde t é o tempo de funcionamento, I é o intervalo de uso por funcionário por período e F é o número de ocupantes do andar. Os demais horários podem ser vistos na tabela 4-5.

Quanto aos aparelhos, em geral, assume-se como hipótese simplificadora que os eletrônicos não permaneçam em *stand by*, sendo ligados e desligados

conforme necessidade de uso. Isso pode ser adotado, pois o consumo nesse modo de operação é bastante reduzido.

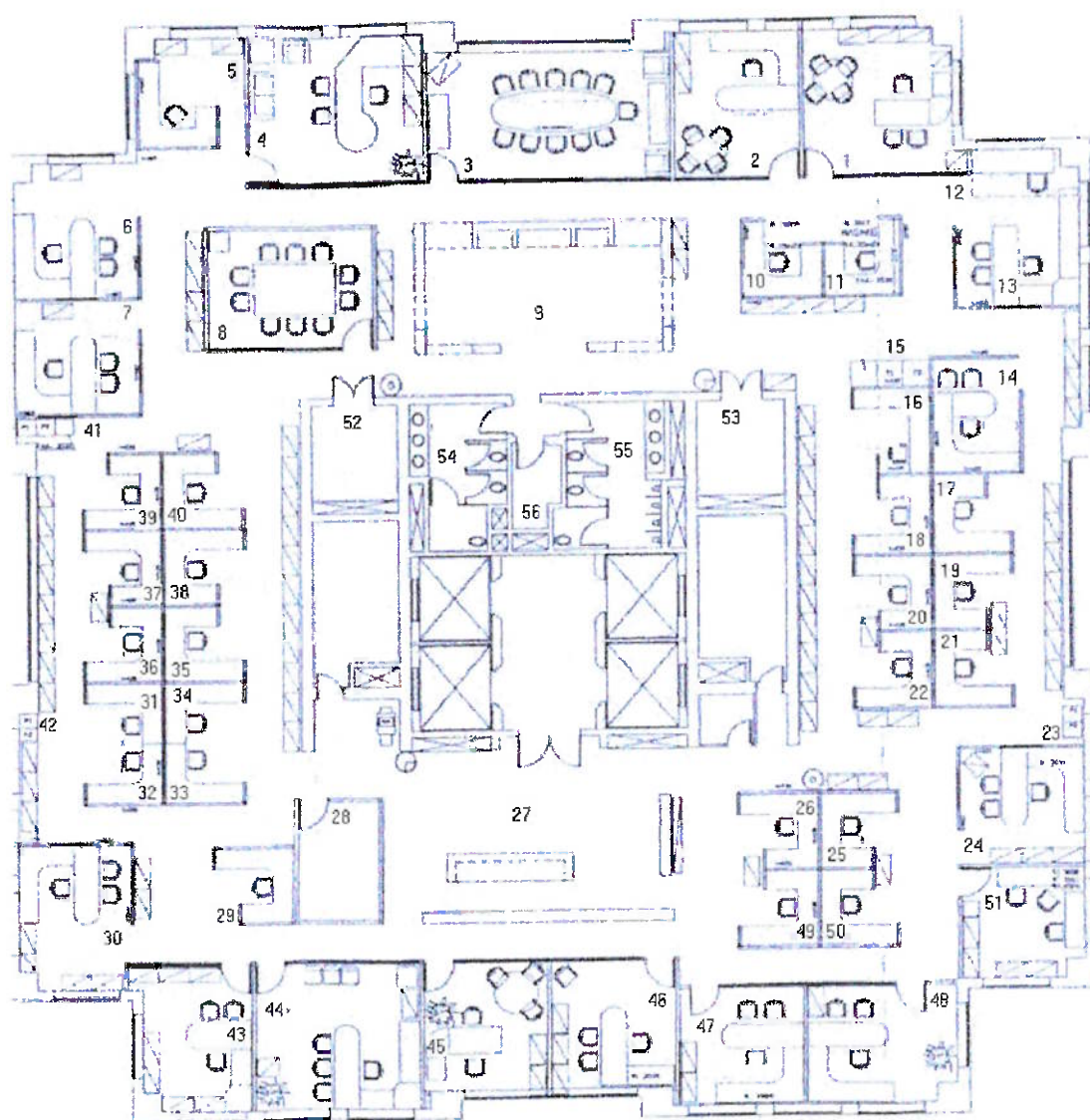


figura 4-1 – Ambientes do andar típico com relação a ocupação e uso de equipamentos eletrônicos

tabela 4-5 – Descrição dos itens disponíveis na instalação

| Item | Identificação | Potência (W) | Tempo de uso |
|--------------------------|---------------|--------------|-----------------------|
| servidor | A | 300 | 24 h/dia |
| monitor | B | 80 | usuário |
| Torre da CPU | C | 100 | usuário |
| Falantes | D | 12 | 0,5 h/dia |
| Notebooks | E | 49.95 | usuário |
| Impressora jato de tinta | F | 12 | 0,5 h/dia |
| Impressora laser | G | 290 | 1,0 h/dia |
| Lâmp. fluor. Tubular | H | 30 | 15 h/dia ou sala ind. |
| Lâmp. fluor. Compactas | I | 15 | 5 h/dia |
| Lâmp. Halógenas | J | 35 | local |
| Exaustor | L | 2400 | 5 h/dia |
| Fax | M | 13.2 | 5 h/dia |
| Scanner | N | 12 | 0,5 h/dia |
| Cafeteira | O | 100 | 5 h/dia |
| Micro-ondas | P | 800 | 0,5 h/dia |
| Geladeira | Q | 1700 | 24 h/dia |
| Bebedor | R | 100 | 5 h/dia |
| Copiadora | S | 300 | 13 h/dia |
| Ar condicionado | T | 10500 | local |

As referências usuário e local devem ser vistas na tabela 4-6.

tabela 4-6 – Descrição do itens do local indicado na figura 4-1

| horas/dias | local | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | Wh/dia |
|------------|-------|---|----|----|----|----|----|----|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------------|
| 8 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | 4 | | | | | | | | | | | | 3 366.00 |
| 9 | 2 | | 1 | | | 1 | 1 | | 4 | | | | | | | | 1 | | | | 5.034.05 |
| 0,5 | 3 | | | | | | | | 6 | | | | | | | | | | | | 180.00 |
| 4 | 4 | | 1 | | | 1 | 1 | | 6 | | | | | | | | | | | | 1.961.80 |
| 4 | 5 | | | | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.099.80 |
| 4 | 6 | | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | | | | | | | | | | | | 3.426.00 |
| 6 | 7 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.989.00 |
| 0,5 | 8 | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | 3.600.00 |
| 5 | 9 | | | | | | | | | 5 | | | | | 1 | | 1 | | | | 1.875.00 |
| 0,5 | 10 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 900.00 |
| 8 | 11 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 2 | | | | 1 | | | | | | | | 3.316.00 |
| 4 | 12 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.626.00 |
| 8 | 13 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 2 | | | | | | | | | | | | 3.250.00 |
| 1 | 14 | | 1 | | | 4 | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.179.80 |
| 24 | 15 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 290.00 |
| 9 | 16 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 2.526.00 |
| 8 | 17 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 2.346.00 |
| 8 | 18 | | 1 | 1 | 1 | | | | 0 | | | | | | | | | | | | 1.446.00 |
| 8 | 19 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 2.346.00 |
| 4 | 20 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.626.00 |
| 9 | 21 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 2.526.00 |
| 0,5 | 22 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 996.00 |
| 13 | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | 3.900.00 |
| 8 | 24 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 3 | | | | | | | | | | | | 4.150.00 |
| 8 | 25 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | 2.356.00 |
| 4 | 26 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | 1.694.00 |
| 15 | 27 | | 2 | 2 | 2 | | 1 | | 5 | | 2 | | | | | | | | | | 10.969.50 |
| 24 | 28 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7.200.00 |
| 8 | 29 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | | | | | | | 2.418.00 |
| 8 | 30 | | 1 | | | 1 | 1 | | 2 | | | | | | | | | | | | 2.843.60 |
| 8 | 31 | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 1.039.60 |
| 8 | 32 | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 1.039.60 |
| 8 | 33 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | 2.350.00 |
| 8 | 34 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 1.446.00 |
| 4 | 35 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.626.00 |
| 4 | 36 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.626.00 |
| 0,5 | 37 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 996.00 |
| 8 | 38 | | | | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | 1.299.60 |
| 0,5 | 39 | | | | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | 924.98 |
| 0,5 | 40 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | 996.00 |
| 24 | 41 | | | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 368.00 |
| 24 | 42 | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | 580.00 |
| 8 | 43 | | 1 | | | 1 | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | 2.963.60 |
| 8 | 44 | | 1 | | | 1 | 1 | | 6 | | | | | | | | | | | | 3.923.60 |
| 8 | 45 | | 1 | | | 1 | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | 2.963.60 |
| 8 | 46 | | 1 | | | 1 | 1 | | 2 | | | | | | | | | | | | 2.003.60 |
| 8 | 47 | | 1 | | | 1 | | | 4 | | | | | | | | | | | | 2.959.60 |
| 8 | 48 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | 3.370.00 |
| 8 | 49 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | 2.412.00 |
| 8,5 | 50 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | 2.506.25 |
| 0 | 51 | | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | 0.00 |
| 2,5 | 52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 52.500.00 |
| 5 | 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 26.250.00 |
| 5 | 54 | | | | | | | | | 10 | | 1 | | | | | | | | | 12.750.00 |
| 5 | 55 | | | | | | | | | 10 | | 1 | | | | | | | | | 12.750.00 |
| 10 | 56 | | | | | | | | 1 | | | | | | | 1 | 1 | | | | 3.000.00 |
| 15 | cor. | | | | | | | 19 | | | | | | | | | | | | | 17.100.00 |
| | total | 1 | 40 | 29 | 29 | 17 | 18 | 5 | 108 | 20 | 7 | 2 | 6 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 244.180,58 |

Obs: cor = corredores

De acordo com a tabela 4-6, o *consumo diário* num andar típico é de 244.180,58 Wh, portanto, em um mês (22 dias úteis) o consumo será de 7325,12 kWh, estando próximo a média dada pela tabela 4-1. Portanto, comparando com o

valor exato, pode-se dizer que a aproximação e as hipóteses feitas acima são aceitáveis como modelo de consumo do andar (diferença de 0,1%).

É possível observar pela tabela 4-7 que o sistema de iluminação representa aproximadamente 32,0% do consumo de energia, o sistema de ventilação (ar condicionado e exaustores) representa 42,1%. Dos aparelhos eletrônicos, os microcomputadores (monitor e torre da CPU) são os que apresentam a maior contribuição para os gastos referentes à energia (16,71%).

tabela 4-7 – Consumo total por agrupamento de itens de consumo.

| Consumo Total por Grupos e Sistemas | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|------------|---------|---------|
| Grupos | Itens | Wh/dia | % item | % grupo |
| Sistema de iluminação | lâmpadas | 74820 | 30,64% | |
| | compactas | 1500 | 0,61% | |
| | dicroicas | 1925 | 0,79% | 32,0% |
| Aparelhos Eletrônicos de Escritório | servidor | 7200 | 2,95% | |
| | monitor | 21600 | 8,85% | 16,71% |
| | computador | 19200 | 7,86% | |
| | Falantes | 168 | 0,07% | |
| | Notebooks | 4670,3 | 1,91% | |
| | Impressora jato de tinta | 79,25 | 0,03% | |
| | Impressora laser | 1160 | 0,48% | |
| | scanner | 12 | 0,00% | |
| | fax | 396 | 0,16% | |
| | copiadora | 3900 | 1,60% | 7,2% |
| Outros Aparelhos Elétricos | cafeteira | 500 | 0,20% | |
| | microondas | 400 | 0,16% | |
| | geladeira | 3400 | 1,39% | |
| | bebedor | 500 | 0,20% | 2,0% |
| VAC | exaustores | 24000 | 9,83% | |
| | ar | 78.750,00 | 32,25% | 42,1% |
| TOTAL | | 244.180,58 | 100,00% | 100,0% |
| Consumo Mensal Calculado (kWh) | | 7.325,42 | | |
| Consumo Mensal Medido (kWh) | | 7.318,13 | | |

4.7 Definição dos Pontos Críticos do Caso em Estudo

Desse modo, conclui-se que, os sistemas de iluminação e de ventilação são os itens mais preocupantes em relação ao consumo energético dentro do prédio comercial considerado e, por conseguinte em um andar típico do mesmo.

Nos dois casos acima identificados, um controle efetivo e inteligente pode ser considerado.

Para o controle de acionamento do sistema de iluminação, os elementos que poderiam compor o sistema conforme figura 2-2, estão listados abaixo conforme tabela 4-8. Para o sistema de ventilação, os elementos estão listados na tabela 4-9.

tabela 4-8 – Dispositivos de controle para sistema de iluminação

| <i>Classificação</i> | <i>Dispositivos</i> |
|----------------------------|--|
| Dispositivo de comando | Botoeira, chaves. |
| Dispositivo de atuação | Contactador |
| Dispositivo de detecção | Sensores de luz, sensores de presença. |
| Dispositivo de monitoração | Lâmpadas sinalizadoras |
| Dispositivo de realização | Circuito elétrico ou Controle Programável (CP) |

tabela 4-9 - Dispositivos de controle para sistema de ventilação

| <i>Classificação</i> | <i>Dispositivos</i> |
|----------------------------|--|
| Dispositivo de comando | Botoeira, chaves |
| Dispositivo de atuação | Contactador |
| Dispositivo de detecção | Sensores de temperatura, velocidade de fluxo de ar |
| Dispositivo de monitoração | Mostradores |
| Dispositivo de realização | Circuito elétrico ou Controle Programável (CP) |

Conforme pode-ser verificado na tabela 4-6 e devido à característica de acionamento das lâmpadas (contínuo no período do dia), o maior problema do sistema de iluminação é o tempo de operação da mesma. Soma-se a isso o não aproveitamento adequado da luz natural. Desse modo, uma estratégia para a redução do consumo energético do sistema de iluminação seria o aproveitamento da luz natural e de um controle adequado do tempo de operação. Nota-se que as duas sugestões atuam sobre a variável do tempo (variável de controle) e sobre o objeto de controle: as lâmpadas.

Para o sistema de ventilação o controle deve atuar diretamente sobre a temperatura ambiente de modo que se mantenha um nível de conforto aos ocupantes. O objeto de controle, nesse caso, é o próprio aparelho de ar condicionado e a variável de controle deverá ser a temperatura. Um ponto a ser ressaltado é o comportamento dinâmico do aparelho como um sistema de variáveis contínuas, no qual o aparelho

trabalha continuamente com cargas diferenciadas. Contudo, na prática é comum o uso de um controle “on/off” para uma carga constante. Observa-se ainda que o modo de operação no caso específico deste trabalho é do tipo “on off”. Apesar dessa real possibilidade, uma verificação do consumo deve ser realizada, uma vez que a corrente de partida dos motores elétricos usados nos aparelhos de ar condicionado é muito maior que a corrente de regime permanente.

Quanto ao terceiro item relevante, o uso dos monitores, a possibilidade de implementar um controle lógico é mais complexa, pois considera-se que o mesmo é utilizado quando o ocupante da “baia” entra no local de trabalho, apesar do funcionário não permanecer em tempo integral utilizando o microcomputador. Uma possibilidade de se reduzir esse tipo de gasto seria o treinamento para que os monitores fossem desligados na ausência do empregado e a utilização de recursos como “energy saving” disponíveis em sistemas operacionais como o WINDOWS. A variável de controle é o tempo de operação.

4.8 Definição das Estratégias do Sistema Atual

A seguir descreve-se as estratégias de operação do sistema atual e que foram utilizadas para a modelagem do sistema atual.

Estratégia para o sistema de iluminação da área comum²

Considerou-se que neste escritório ocorrem situações, em determinados dias, em que áreas estão desocupadas, ou parcialmente desocupadas pelos funcionários. Apesar disto, não existe um controle do sistema de iluminação por área, mas um controle único que aciona o sistema do andar inteiro, excluindo as salas individuais ou de reuniões.

A tomada de decisão para o acionamento ou não deste sistema é feito conforme as seguintes opções e o mesmo é controlado pela equipe de manutenção do edifício.

² Entende-se por área comum a área de trabalho onde estão todas as estações de trabalho do escritório, excluindo as salas individuais ou de reunião.

- Funcionamento durante o expediente de trabalho que é definido como sendo das seis horas até às vinte horas do dia (intervalo de 15 horas).
- Funcionamento fora do expediente de trabalho após as vinte horas do dia.

Caso algum funcionário necessite ficar por mais tempo, além do expediente, um pedido deve ser feito até a administração do edifício solicitando para não desacionarem o sistema de iluminação às vinte horas do dia. E quando da saída do andar, o mesmo deverá contatar a equipe de manutenção para desligar o sistema de iluminação.

Estratégia para o sistema de iluminação das salas individuais e de reuniões

A diferença do acionamento do sistema de iluminação das salas individuais e das salas de reuniões com a área comum é o fato de que o usuário da sala é quem faz o acionamento ao invés da equipe de manutenção do edifício.

Portanto a tomada de decisão é feita conforme a chegada e saída do funcionário à sua sala ou à sala de reunião.

Estratégia para o sistema de ar condicionado do andar

Assim como ocorre com o sistema de iluminação, o sistema de ar condicionado do andar também não possui um controle de área. Deste modo, independentemente da área estar ocupada ou não ela será refrigerada.

A tomada de decisão é feita da seguinte maneira:

- O aparelho de ar condicionado é acionado pelo mesmo período que o sistema de iluminação, no entanto permanece em *stand-by* até que a temperatura seja elevada além da temperatura de referência do termostato (vinte e quatro graus Celsius.).

Estratégia para o sistema de ar condicionado do CPD (Centro de Processamento de Dados)

No caso do centro de processamento de dados existe uma exigência de que a temperatura não exceda dezenove graus Celsius. Devido ao caráter de funcionamento dos equipamentos de informática, que é de operar durante vinte e quatro horas por dia, o sistema de ar condicionado não é desacionado.

Deste modo, assim como ocorre com o sistema de ar condicionado do andar, este aparelho é acionado permanecendo em *stand by* até o momento em que a temperatura do ambiente ultrapasse o valor de *set* do termostato.

Estratégia para o sistema de fornecimento energético

A estratégia adotada para o fornecimento de energia elétrica do andar (computadores, faxes, impressoras, cafeteira e outros) é a mesma adotada para o acionamento do sistema de iluminação da área comum.

A tomada de decisão para o acionamento ou não deste sistema é feito conforme as seguintes opções e o mesmo é controlado pela equipe de manutenção do edifício.

- Funcionamento durante o expediente de trabalho que é definido como sendo das seis horas até às vinte horas do dia (intervalo de 15 horas).
- Funcionamento fora do expediente de trabalho após as vinte horas do dia.

4.8.1 Análise dos dados coletados

Com as estratégias levantadas é possível analisar os cálculos de consumo realizados com base na coleta de dados. Conforme ressaltado anteriormente, pode-se analisar separadamente o uso do sistema de abastecimento energético, em específico para o uso dos computadores, do ar condicionado e do sistema de iluminação.

O sistema de abastecimento energético do andar fornece energia a todos os equipamentos eletrônicos instalados no mesmo, como por exemplo: os micro-computadores, aparelhos de faxes, impressoras, cafeteiras e outros. Para o modelo adotado, o funcionamento dos computadores pode ser atrelado à presença de um

funcionário em sua respectiva estação de trabalho e, portanto o consumo de energia também é função do tempo de permanência do usuário.

Para simular o uso de computadores, adotam-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- O computador permanece ligado pelo período em que o funcionário esteja trabalhando.
- O tempo de uso de impressoras é menor que o tempo de uso dos microcomputadores
- Considera-se que todos os autofalantes do microcomputador ficam disponíveis durante o período em que o funcionário está trabalhando.
- Assume-se que os quatorze funcionários *home-office* equivalem a dois funcionários fixos mensais (Sempre há dois *home-office* por dia no escritório, deste modo o total de funcionários fixos pode ser considerado como de 33).

Portanto, para a análise é necessário fazer um levantamento do período médio que cada funcionário passa no escritório. Isto pode ser feito através do estudo de tempo realizado anteriormente, cujo resultado é expresso na tabela 4-10.

tabela 4-10 – Resultado do estudo de tempo .

| ID | Totalização | Média | Status |
|----|-------------|----------|-------------|
| 1 | 494:00:00 | 8:14:00 | Office |
| 2 | 550:00:00 | 9:10:00 | Office |
| 3 | 613:00:00 | 6:48:40 | Office |
| 4 | 648:30:00 | 7:12:20 | Office |
| 5 | 696:00:00 | 7:44:00 | Office |
| 6 | 249:00:00 | 4:09:00 | Office |
| 7 | 764:00:00 | 8:29:20 | Office |
| 8 | 690:30:00 | 7:40:20 | Office |
| 9 | 488:30:00 | 5:25:40 | Office |
| 10 | 138:00:00 | 4:36:00 | Home Office |
| 11 | 233:30:00 | 7:47:00 | Home Office |
| 12 | 350:00:00 | 5:50:00 | Office |
| 13 | 781:30:00 | 8:41:00 | Office |
| 14 | 731:30:00 | 8:07:40 | Office |
| 15 | 548:00:00 | 6:05:20 | Office |
| 16 | 463:00:00 | 5:08:40 | Office |
| 17 | 743:00:00 | 8:15:20 | Office |
| 18 | 252:00:00 | 8:24:00 | Home Office |
| 19 | 241:00:00 | 4:01:00 | Office |
| 20 | 432:00:00 | 7:12:00 | Office |
| 21 | 266:30:00 | 8:53:00 | Home Office |
| 22 | 780:00:00 | 8:40:00 | Office |
| 23 | 423:30:00 | 7:03:30 | Office |
| 24 | 550:00:00 | 6:06:40 | Office |
| 25 | 272:30:00 | 9:05:00 | Home Office |
| 26 | 829:00:00 | 9:12:40 | Office |
| 27 | 94:00:00 | 3:08:00 | Home Office |
| 28 | 788:00:00 | 8:45:20 | Office |
| 29 | 328:00:00 | 10:56:00 | Home Office |
| 30 | 790:30:00 | 8:47:00 | Office |
| 31 | 744:30:00 | 8:16:20 | Office |
| 32 | 338:00:00 | 11:16:00 | Home Office |
| 33 | 708:30:00 | 7:52:20 | Office |
| 34 | 139:30:00 | 4:39:00 | Home Office |
| 35 | 127:30:00 | 4:15:00 | Home Office |
| 36 | 474:00:00 | 7:54:00 | Office |
| 37 | 61:00:00 | 2:02:00 | Home Office |
| 38 | 158:00:00 | 5:16:00 | Home Office |
| 39 | 547:00:00 | 6:04:40 | Office |
| 40 | 373:00:00 | 6:13:00 | Office |
| 41 | 574:00:00 | 6:22:40 | Office |
| 42 | 112:30:00 | 3:45:00 | Home Office |
| 43 | 214:30:00 | 3:34:30 | Office |
| 44 | 465:30:00 | 7:45:30 | Office |
| 45 | 56:00:00 | 1:52:00 | Home Office |
| 46 | 186:00:00 | 6:12:00 | Home Office |

Analisando este estudo, chega-se a distribuição da tabela 4-11, em que é possível observar que existe uma probabilidade maior dos funcionários permanecerem de sete a nove horas dentro do escritório.

tabela 4-11 – Distribuição de período de trabalho

| Intervalos | Período de permanência dos funcionários | | Probab. % | Probab. Acum.% | Dígitos Aleatórios | Horas de Trabalho Atribuídas |
|------------|---|-------|-----------|----------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | 03:01 | 04:00 | 7% | 7% | 1 ~ 7 | 04:00 |
| 2 | 04:01 | 05:00 | 11% | 18% | 8 ~ 18 | 05:00 |
| 3 | 05:01 | 06:00 | 9% | 27% | 19 ~ 27 | 06:00 |
| 4 | 06:01 | 07:00 | 18% | 44% | 28 ~ 44 | 07:00 |
| 5 | 07:01 | 08:00 | 22% | 67% | 45 ~ 67 | 08:00 |
| 6 | 08:01 | 09:00 | 22% | 89% | 68 ~ 89 | 09:00 |
| 7 | 09:01 | 10:00 | 7% | 96% | 90 ~ 96 | 10:00 |
| 8 | 10:01 | 11:00 | 2% | 98% | 97 ~ 98 | 11:00 |
| 9 | 11:01 | 12:00 | 2% | 100% | 99 ~ 100 | 12:00 |

Considerando quarenta e quatro dias (dois meses) [mesmo período de coleta de dados observado na tabela 4-10] obteve-se a média para cada um dos trinta e três funcionários do escritório, conforme tabela 4-12, onde *local* se refere ao local enumerado na figura 4-1, *status* se refere ao estado do local (ocupado/desocupado) e *ID* se refere ao funcionário que ocupa o local referido.

tabela 4-12 – Tabela de período trabalhado por funcionário

| Local | Status | ID | Acumulado (44 dias) | Média |
|-------|---------|----|---------------------|---------|
| 1 | ocupado | AA | 348:00:00 | 7:54:33 |
| 2 | ocupado | BB | 335:00:00 | 7:36:49 |
| 4 | ocupado | CC | 341:00:00 | 7:45:00 |
| 7 | ocupado | DD | 322:00:00 | 7:19:05 |
| 11 | ocupado | EE | 307:00:00 | 6:58:38 |
| 12 | ocupado | FF | 337:00:00 | 7:39:33 |
| 13 | ocupado | GG | 318:00:00 | 7:13:38 |
| 16 | ocupado | HH | 336:00:00 | 7:38:11 |
| 17 | ocupado | II | 341:00:00 | 7:45:00 |
| 18 | ocupado | JJ | 323:00:00 | 7:20:27 |
| 19 | ocupado | LL | 325:00:00 | 7:23:11 |
| 24 | ocupado | MM | 330:00:00 | 7:30:00 |
| 25 | ocupado | NN | 320:00:00 | 7:16:22 |
| 26 | ocupado | OO | 347:00:00 | 7:53:11 |
| 27 | ocupado | PP | 332:00:00 | 7:32:44 |
| | | QQ | 348:00:00 | 7:54:33 |
| 29 | ocupado | RR | 335:00:00 | 7:36:49 |
| 30 | ocupado | SS | 332:00:00 | 7:32:44 |
| 31 | ocupado | TT | 336:00:00 | 7:38:11 |
| 32 | ocupado | UU | 322:00:00 | 7:19:05 |
| 33 | ocupado | VV | 327:00:00 | 7:25:55 |
| 34 | ocupado | XX | 336:00:00 | 7:38:11 |
| 35 | ocupado | YY | 331:00:00 | 7:31:22 |
| 36 | ocupado | ZZ | 338:00:00 | 7:40:55 |
| 37 | ocupado | KK | 329:00:00 | 7:28:38 |
| 43 | ocupado | WW | 341:00:00 | 7:45:00 |
| 44 | ocupado | AB | 313:00:00 | 7:06:49 |
| 45 | ocupado | BC | 334:00:00 | 7:35:27 |
| 46 | ocupado | CD | 319:00:00 | 7:15:00 |
| 47 | ocupado | DE | 339:00:00 | 7:42:16 |
| 48 | ocupado | FG | 338:00:00 | 7:40:55 |
| 49 | ocupado | HI | 336:00:00 | 7:38:11 |
| 50 | ocupado | JL | 339:00:00 | 7:42:16 |

As impressoras não serão acionadas pelo mesmo período que os computadores estão operando. Desde modo é necessário realizar um levantamento de impressões por funcionário para então obter uma média diária para cada funcionário. Conhecendo-se a taxa de impressão (folhas impressas por tempo) pode-se estimar o

tempo que as impressoras operam por dia e, portanto, calcular o consumo delas. Para o uso de impressoras, as seguintes considerações foram feitas:

- Alguns funcionários possuem impressoras pessoais do tipo jato de tinta.
- Os funcionários que não possuem impressoras usam uma das cinco impressoras lasers disponíveis no andar.
- O tempo de uso das impressoras laser é a somatória de todos os tempos gastos pelos funcionários que não possuem impressora própria, sendo dividido igualmente entre as cinco.
- Os tempos de uso das impressoras foram calculados através da quantidade média de impressões que cada funcionário faz por dia.
- A taxa de impressão de uma impressora jato de tinta medida foi de uma folha por minuto, no modo normal³.
- A taxa de impressão de uma impressora laser medida foi de 3 folhas por minuto.

Segundo um levantamento, a tabela 4-13 foi criada.

tabela 4-13 –Distribuição de impressões diárias.

| Impressões Diárias | Probab.% | Probab. Acum.% | Dígitos Aleatórios |
|--------------------|----------|----------------|--------------------|
| 10 | 46% | 46% | 1 ~ 46 |
| 20 | 27% | 73% | 47 ~ 73 |
| 30 | 12% | 85% | 74 ~ 85 |
| 40 | 7% | 92% | 86 ~ 92 |
| 50 | 5% | 97% | 93 ~ 97 |
| 60 | 3% | 100% | 98 ~ 100 |

Analisando, obtém-se a tabela 4-14, em que a potência de 12 W é referente à impressora jato de tinta e a potência de 290 W é referente a impressora laser.

³ “Modo normal” refere-se a qualidade de impressão, que pode ser normal, otimizada ou econômica.

tabela 4-14 – Tabela do uso de impressoras.

| Lugar | Potência (W) | ID | acumulado | média | Tempo (min) | (W) |
|-------|--------------|----|-----------|-------|-------------|-----|
| 1 | 290 | AA | 1030 | 23 | 8 | 38 |
| 2 | 12 | BB | 810 | 18 | 18 | 89 |
| 4 | 12 | CC | 760 | 17 | 17 | 83 |
| 7 | 12 | DD | 800 | 18 | 18 | 88 |
| 11 | 12 | EE | 910 | 21 | 21 | 100 |
| 12 | 290 | FF | 870 | 20 | 7 | 32 |
| 13 | 12 | GG | 880 | 20 | 20 | 97 |
| 16 | 290 | HH | 920 | 21 | 7 | 34 |
| 17 | 290 | II | 850 | 19 | 6 | 31 |
| 18 | 290 | JJ | 860 | 20 | 7 | 31 |
| 19 | 290 | LL | 870 | 20 | 7 | 32 |
| 24 | 12 | MM | 920 | 21 | 21 | 101 |
| 25 | 12 | NN | 880 | 20 | 20 | 97 |
| 26 | 12 | OO | 850 | 19 | 19 | 93 |
| 27 | 12 | PP | 810 | 18 | 18 | 89 |
| | 290 | QQ | 750 | 17 | 6 | 27 |
| 29 | 12 | RR | 960 | 22 | 22 | 105 |
| 30 | 290 | SS | 860 | 20 | 7 | 31 |
| 31 | 290 | TT | 790 | 18 | 6 | 29 |
| 32 | 12 | UU | 850 | 19 | 19 | 93 |
| 33 | 290 | VV | 990 | 23 | 8 | 36 |
| 34 | 290 | XX | 1150 | 26 | 9 | 42 |
| 35 | 290 | YY | 930 | 21 | 7 | 34 |
| 36 | 290 | ZZ | 810 | 18 | 6 | 30 |
| 37 | 290 | KK | 890 | 20 | 7 | 33 |
| 43 | 12 | WW | 910 | 21 | 21 | 100 |
| 44 | 12 | AB | 750 | 17 | 17 | 82 |
| 45 | 12 | BC | 970 | 22 | 22 | 107 |
| 46 | 290 | CD | 800 | 18 | 6 | 29 |
| 47 | 12 | DE | 880 | 20 | 20 | 97 |
| 48 | 290 | FG | 930 | 21 | 7 | 34 |
| 49 | 12 | HI | 890 | 20 | 20 | 98 |
| 50 | 290 | JL | 900 | 20 | 7 | 33 |

Para o caso dos aparelhos de ar condicionado, a análise é feita em duas partes distintas, pois uma máquina abastece o andar inteiro e a outra está destinada para o CPD (servidor de computadores e central de PABX). Sendo que na primeira situação a máquina é ajustada para trabalhar em uma temperatura de 24°C e na última em 19°C.

A seguir é apresentado o estudo do aparelho para o escritório e posteriormente o estudo feito para o aparelho que atende o CPD.

tabela 4-15 – Distribuição dos dias quentes e frios

| descrição | Faixa de Temperatura | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
|-----------|----------------------|----------|----------------|--------------------|
| alta | >28 | 30 | 30 | 1 - 30 |
| média | 22 - 26 | 45 | 75 | 31 - 75 |
| fria | <20 | 25 | 100 | 76 - 100 |

tabela 4-16 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia quente

| Ambiente de Escritório | | | | |
|------------------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| Alta | 8 | 20 | 20 | 1 - 20 |
| | 7 | 60 | 80 | 21 - 80 |
| | 6 | 20 | 100 | 81 - 100 |
| | 5 | 0 | 100 | |
| | 4 | 0 | 100 | |
| | 3 | 0 | 100 | |
| | 2 | 0 | 100 | |

tabela 4-17 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia ameno

| Ambiente de Escritório | | | | |
|------------------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| média | 8 | 0 | 0 | |
| | 7 | 0 | 0 | |
| | 6 | 20 | 20 | 1 - 20 |
| | 5 | 60 | 80 | 21 - 80 |
| | 4 | 20 | 100 | 81 - 100 |
| | 3 | 0 | 100 | |
| | 2 | 0 | 100 | |

tabela 4-18 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia frio

| Ambiente de Escritório | | | | |
|------------------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| baixa | 8 | 0 | 0 | |
| | 7 | 0 | 0 | |
| | 6 | 0 | 0 | |
| | 5 | 0 | 0 | |
| | 4 | 20 | 20 | 1 - 20 |
| | 3 | 60 | 80 | 21 - 80 |
| | 2 | 20 | 100 | 81 - 100 |

tabela 4-19 – Análise do ar condicionado que atende o escritório

| Ambiente de Escritório | | | | |
|------------------------|---------------------------------|-----------|--|----------------------------------|
| Dias | Números Aleatórios p/ Descrição | Descrição | Números Aleatórios p/ Período de Funcionamento | Período de Funcionamento (Horas) |
| 1 | 71 | média | 58 | 5 |
| 2 | 54 | média | 11 | 6 |
| 3 | 58 | média | 11 | 6 |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| 41 | 11 | alta | 3 | 8 |
| 42 | 100 | baixa | 55 | 3 |
| 43 | 68 | média | 92 | 4 |
| 44 | 2 | alta | 44 | 7 |
| Total | | | | 216 |
| Média | | | | 4,9 |

tabela 4-20 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia quente

| Ambiente CPD | | | | |
|--------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| Alta | 8 | 45 | 45 | 1 - 45 |
| | 7 | 55 | 100 | 46 - 100 |
| | 6 | 0 | 100 | |
| | 5 | 0 | 100 | |
| | 4 | 0 | 100 | |
| | 3 | 0 | 100 | |
| | 2 | 0 | 100 | |

tabela 4-21 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia ameno

| Ambiente CPD | | | | |
|--------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| média | 8 | 0 | 0 | |
| | 7 | 0 | 0 | |
| | 6 | 50 | 50 | 1 - 50 |
| | 5 | 50 | 50 | 51 - 100 |
| | 4 | 0 | 100 | |
| | 3 | 0 | 100 | |
| | 2 | 0 | 100 | |

tabela 4-22 – Distribuição do período de operação do ar condicionado para um dia frio

| Ambiente CPD | | | | |
|--------------|--------------------------|----------|----------------|--------------------|
| | Período de funcionamento | Proba. % | Proba. Acum. % | Números Aleatórios |
| baixa | 8 | 0 | 0 | |
| | 7 | 0 | 0 | |
| | 6 | 0 | 0 | |
| | 5 | 0 | 0 | |
| | 4 | 45 | 45 | 1 - 45 |
| | 3 | 55 | 100 | 46 - 100 |
| | 2 | 0 | 100 | |

tabela 4-23 - Análise do ar condicionado que atende o escritório

| Ambiente do CPD | | | | |
|-----------------|---------------------------------|-----------|--|--------------------------|
| Dias | Números Aleatórios p/ Descrição | Descrição | Números Aleatórios p/ Período de Funcionamento | Período de Funcionamento |
| 1 | 71 | média | 58 | 5 |
| 2 | 54 | média | 11 | 6 |
| 3 | 58 | média | 11 | 6 |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| 42 | 100 | baixa | 55 | 3 |
| 43 | 68 | média | 92 | 5 |
| 44 | 2 | alta | 44 | 8 |
| Total | | | | 238 |
| Média | | | | 5.4 |

A análise do sistema de iluminação para a atual configuração do sistema não se faz necessária uma vez que as lâmpadas são acionadas e desacionadas pela

administração do edifício, sem que o usuário interfira no procedimento. Porém ressalta-se que no modelo otimizado a ser proposto tal fato deverá ser reconsiderado.

Colhendo os resultados desta análise, levantou-se a tabela 4-24 e tabela 4-25.

tabela 4-24 – Discriminação dos itens da tabela para a tabela 4-25.

| Item | Código | Pot. (W) |
|--------------------------|--------|----------|
| servidor | A | 300 |
| monitor | B | 80 |
| Torre da CPU | C | 100 |
| Falantes | D | 12 |
| Notebooks | E | 49,95 |
| Impressora jato de tinta | F | 12 |
| Impressora laser | G | 290 |
| Fluor. Tubular | H | 30 |
| Fluor. Compactas | I | 15 |
| Lamp. Halógenas | J | 35 |
| Exaustor | L | 2400 |
| Fax | M | 13 |
| Scanner | N | 12 |
| Cafeteira | O | 100 |
| Micro-ondas | P | 800 |
| Geladeira | Q | 1700 |
| Bebedor | R | 100 |
| Copiadora | S | 300 |
| Ar condicionado | T | 11245 |

tabela 4-25 – Tabela resumo do consumo energético após análise.

| Lugar | Área | média horas trabalhadas | | Equipamentos | | | | | | | | | | | | | | | | Consumo diário (Wh) | Cons. | | Total | | |
|-------|------------|-------------------------|------|--------------|---|---|---|---|---|---|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---------------------|-------|---|-------|-----|-----------------|
| | | | | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | L | M | N | O | P | Q | | R | S | | T | Impressora (wh) |
| 1 | individual | 7:54:33 | 7,9 | 1 | 1 | 1 | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | 2465 | 0 | 2465 |
| 2 | individual | 7:36:49 | 7,6 | 1 | | | 1 | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | | 1900 | 89 | 1989 |
| 3 | reunião | | 0,5 | | | | | | | 6 | | | | | | | | | | | | | 90 | 0 | 90 |
| 4 | individual | 7:45:00 | 7,8 | 1 | | | 1 | 1 | | 6 | | | | | | | | | | | | | 2418 | 83 | 2501 |
| 5 | comum | | 0,0 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| 6 | comum | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 3 | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| 7 | comum | 7:19:05 | 7,3 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1852 | 88 | 1939 |
| 8 | reunião | | 0,5 | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | 60 | 0 | 60 |
| 9 | comum | | 5,0 | | | | | | | | | 5 | | | | 1 | | | 1 | | | | 1875 | 0 | 1875 |
| 10 | comum | | 0,0 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 11 | comum | 6:58:38 | 7,0 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 2 | | | | 1 | | | | | | | | | 2335 | 100 | 2435 |
| 12 | comum | 7:39:33 | 7,7 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1928 | 0 | 1928 |
| 13 | comum | 7:13:38 | 7,2 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 2 | | | | | | | | | | | | | 2282 | 97 | 2379 |
| 14 | comum | | 0,0 | 1 | | | | 4 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 15 | comum | | 0,0 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 0 | 111 | 111 |
| 16 | comum | 7:38:11 | 7,6 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1909 | 0 | 1909 |
| 17 | comum | 7:45:00 | 7,8 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1948 | 0 | 1948 |
| 18 | comum | 7:20:27 | 7,3 | 1 | 1 | 1 | | | | 0 | | | | | | | | | | | | | 1402 | 0 | 1402 |
| 19 | comum | 7:23:11 | 7,4 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1871 | 0 | 1871 |
| 20 | comum | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 21 | comum | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 22 | comum | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 23 | comum | | 4,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | 1200 | 0 | 1200 |
| 24 | comum | 7:30:00 | 7,5 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 3 | | | | | | | | | | | | | 2790 | 101 | 2891 |
| 25 | comum | 7:16:22 | 7,3 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | 1 | | | | | | | 1939 | 97 | 2036 |
| 26 | comum | 7:53:11 | 7,8 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 2049 | 93 | 2142 |
| 27 | comum | 7:54:33 | 7,8 | 2 | 2 | 2 | | 1 | | 5 | | 2 | | | | | | | | | | | 5791 | 89 | 5880 |
| 28 | comum | | 24,0 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7200 | 0 | 7200 |
| 29 | comum | 7:36:49 | 7,6 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | | | | 2099 | 0 | 2099 |
| 30 | comum | 7:32:44 | 7,5 | 1 | | | | 1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | 1875 | 105 | 1980 |
| 31 | comum | 7:38:11 | 7,6 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 988 | 0 | 988 |
| 32 | comum | 7:19:05 | 7,3 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | 949 | 0 | 949 |
| 33 | comum | 7:25:55 | 7,4 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1871 | 93 | 1964 |
| 34 | comum | 7:38:11 | 7,6 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1459 | 0 | 1459 |
| 35 | comum | 7:31:22 | 7,5 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1890 | 0 | 1890 |
| 36 | comum | 7:40:55 | 7,7 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1928 | 0 | 1928 |
| 37 | comum | 7:28:38 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 548 | 0 | 548 |
| 38 | comum | | 0,0 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 39 | comum | | 0,0 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 40 | comum | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 450 | 0 | 450 |
| 41 | comum | | 24,0 | | | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 312 | 111 | 423 |
| 42 | comum | | 0,0 | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | 0 | 223 | 223 |
| 43 | individual | 7:45:00 | 7,8 | 1 | | | | 1 | 1 | 4 | | | | | | | | | | | | | 1950 | 0 | 1950 |
| 44 | individual | 7:08:49 | 7,1 | 1 | | | | 1 | 1 | 6 | | | | | | | | | | | | | 2201 | 100 | 2301 |
| 45 | individual | 7:35:27 | 7,6 | 1 | | | | 1 | 1 | 4 | | | | | | | | | | | | | 1900 | 82 | 1982 |
| 46 | individual | 7:15:00 | 7,3 | 1 | | | | 1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | 1387 | 107 | 1493 |
| 47 | individual | 7:42:16 | 7,7 | 1 | | | | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | | 1925 | 0 | 1925 |
| 48 | individual | 7:40:55 | 7,7 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 4 | | | | | | | | | | | | | 2402 | 97 | 2499 |
| 49 | comum | 7:38:11 | 7,6 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 1588 | 0 | 1588 |
| 50 | comum | 7:42:16 | 7,7 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | | | 1 | | | | | | | | 1609 | 98 | 1706 |
| 51 | individual | | 0,0 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | 0 | 111 | 111 |
| 52 | comum | | 4,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 55203 | 0 | 55203 |
| 53 | comum | | 5,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 60825 | 0 | 60825 |
| 54 | comum | | 5,0 | | | | | | | | | 10 | | 1 | | | | | | | | | 12750 | 0 | 12750 |
| 55 | comum | | 5,0 | | | | | | | | | 10 | | 1 | | | | | | | | | 12750 | 0 | 12750 |
| 56 | comum | | 10,0 | | | | | | | | 1 | | | | | | | 1 | 1 | | | | 25030 | 0 | 25030 |
| cor. | comum | | 15,0 | | | | | | | | 19 | | | | | | | | | | | | 570 | 0 | 570 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | | 246983 |

Conforme pode ser observado, o consumo diário deste escritório típico, analisando os resultados obtidos, é de 247 kW, o que representa no final do mês um gasto de 7.400 kW. Este valor se aproxima tanto do valor real como também do valor estimado que fora apresentado no anteriormente (7.325 kW), apresentando um erro de 1,0%. Deste modo pode-se considerar que os dados levantados estão coerentes.

5. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA ATUAL

5.1 Modelagem do sistema atual

Para a modelagem do sistema atual foram considerados apenas os subsistemas relevantes para o estudo de consumo de energia. Deste modo apresentam-se a seguir os modelos elaborados dos sistemas de iluminação, ar condicionado e do sistema de distribuição de energia para o uso de micro-computadores.

Como ferramenta construtiva dos modelos em rede de Petri foi utilizado o *software HPSIM*, que disponibiliza recursos para edição e simulação dos mesmos.

Modelagem do andar

O modelo desenvolvido a seguir é para a simulação de um dia de funcionamento. Tal medida fora definida para restringir a modelagem aos componentes principais deste modelo (ar condicionado da área central, sistema de iluminação, equipamento eletrônico – microcomputador), caso contrário, seria necessário criar seqüências para reiniciar as condições iniciais do sistema, o que não faz parte dos objetivos do presente trabalho.

Principalmente para o sistema do ar condicionado é importante a modelagem do andar, uma vez que é neste sistema que ocorrem as principais cargas térmicas. Ainda, a modelagem e simulação deste sistema em redes de Petri permitem o cálculo do consumo energético referente ao uso do sistema de iluminação e também ao uso de microcomputadores.

O andar constituiu-se de um hall de entrada com acesso controlado, de estações de trabalho, de banheiros, copa e sala de reuniões. Para este modelo, entretanto serão consideradas as instalações que apresentam a maior taxa de uso e conseqüentemente os locais onde o consumo de energia são elevados: “baías” com as estações de trabalho.

Entretanto é necessário conhecer também o fluxo de pessoas no andar. Deste modo apresenta-se na figura 5-1 e na figura 5-2 o modelo conceitual do *Sistema de Entrada Saída* do andar, que foi dividido em duas partes (*Entrada* e *Saída*) para facilitar a modelagem deste sistema. Na figura 5-3 é apresentado o modelo funcional da entrada do andar.

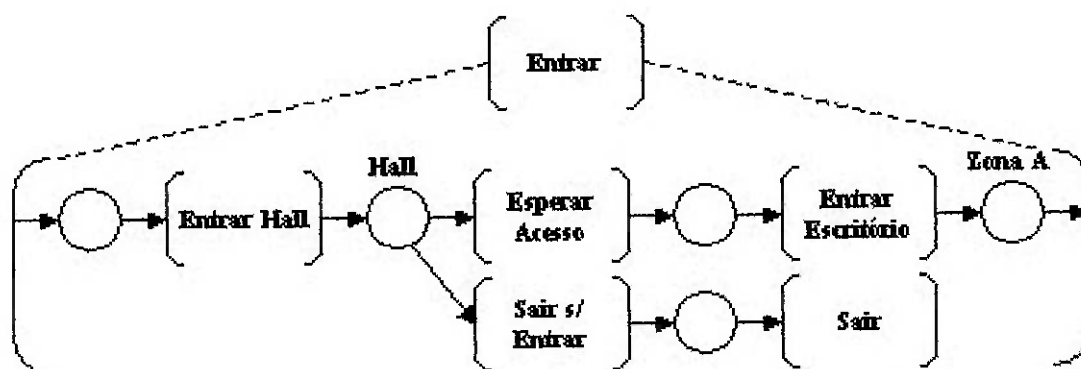


figura 5-1 – Modelo conceitual do *Sistema de Entrada* do andar.

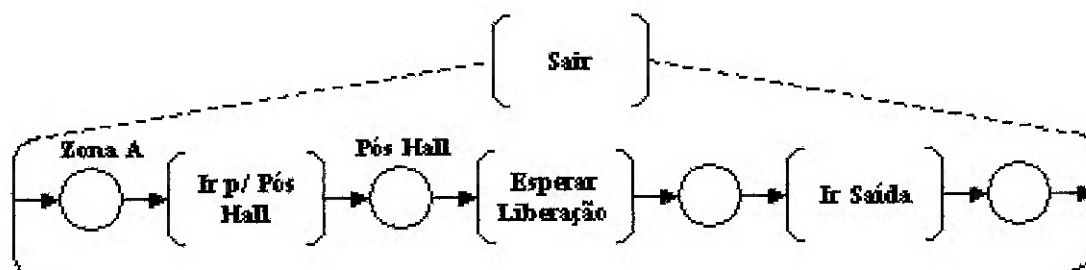


figura 5-2 – Modelo conceitual do *Sistema de Saída* do andar.

Quando algum funcionário chega, o mesmo entra primeiramente no Hall e espera a liberação de sua entrada. Caso o *Controle de Acesso* libere sua entrada, através de um sinal, o funcionário entra no escritório dirigindo-se para o corredor. Caso contrário o *Controle de Acesso* envia um sinal negativo e a pessoa não autorizada deve sair sem entrar no escritório. Para o caso de saída do escritório, o funcionário entra no local *Pós Hall* e espera o sinal do *Controle de Acesso* para destravar a porta. Posteriormente o funcionário encaminha-se para a saída.

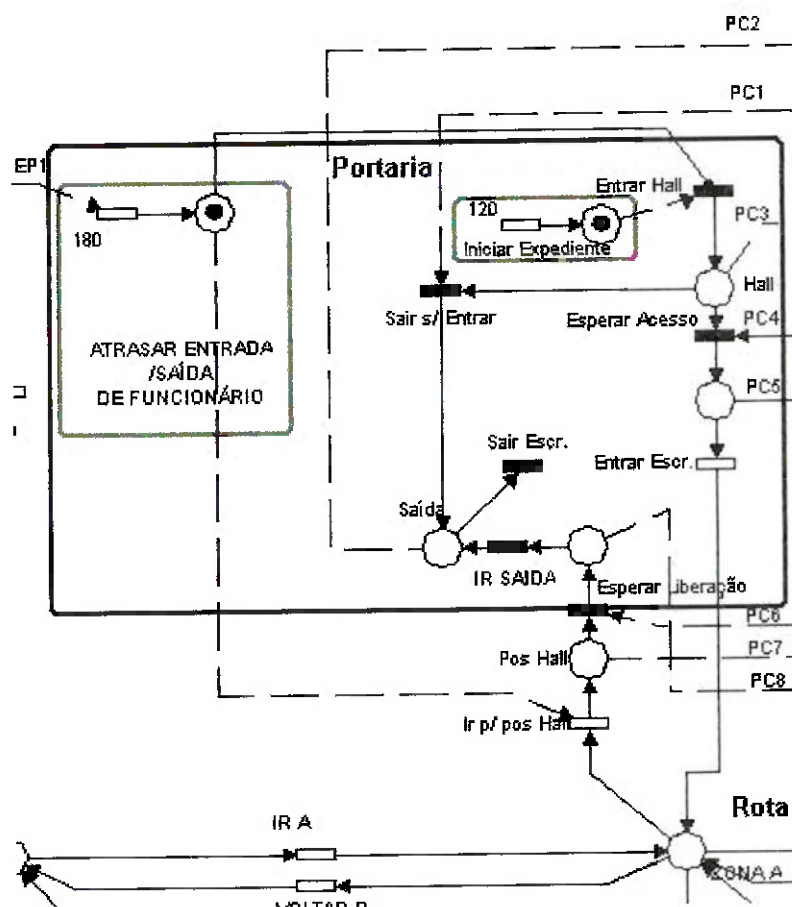


figura 5-3 – Modelo em rede de Petri da entrada do andar.

Na figura 5-3, os códigos *PC1*, *PC2*, *PC3*, *PC4*, *PC5*, *PC6*, *PC7* e *PC8*, referem-se a comunicação através de arcos habilitadores e inibidores entre a *Portaria* e o *Controle de Acesso*. O código *EP1*, refere-se a comunicação entre o *Sistema de Energia* e a *Portaria*.

Os subsistemas apresentados na mesma figura, *Atrasar entrada/saída de funcionário* e *Iniciar Expediente*, foram desenvolvidos para fins de simulação. O primeiro simula a entrada dos funcionários na primeira 1 hora do expediente, e o segundo simula o início do expediente, uma vez que o sistema é energizado às seis horas da manhã e o expediente se inicia às oito da manhã. Os valores das atividades temporizadas encontram-se em minutos.

Observa-se que as *transições* são, em sua maioria, imediatas e deste modo, para evitar que se “entre” no andar um número exagerado de “pessoas” (*marcas*), foi

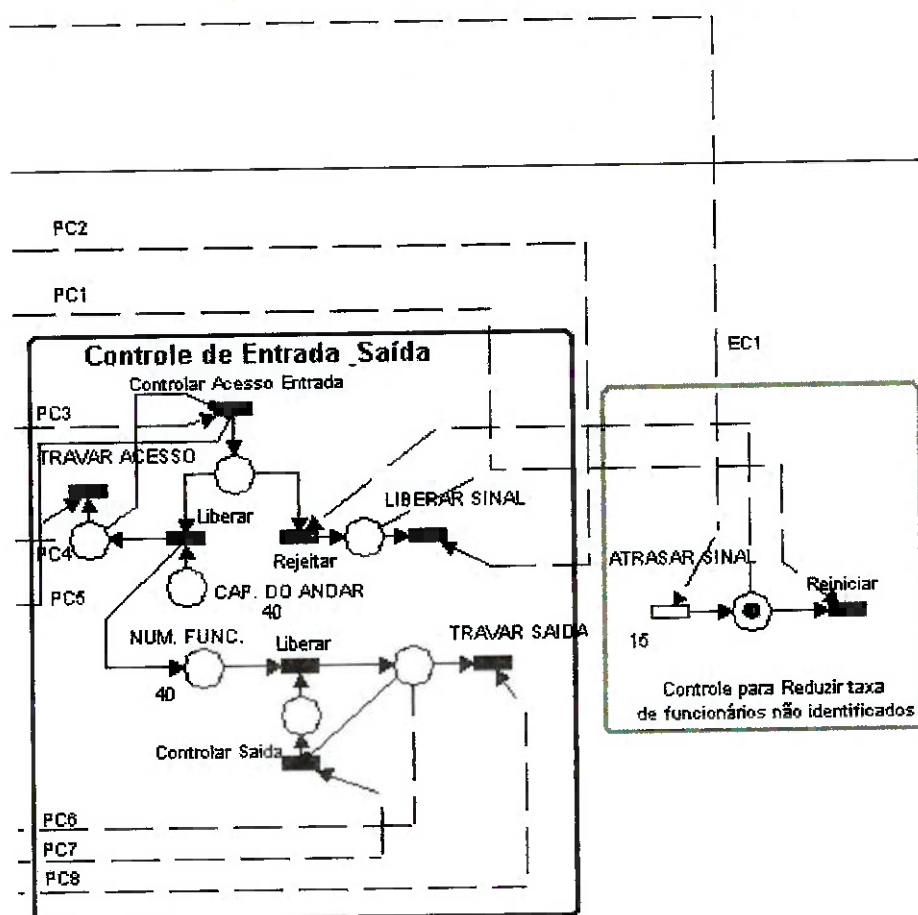


figura 5-6 – Modelo em rede de Petri do controle de acesso.

O *buffer Cap. do Andar* é um limitador do sistema. Sua utilidade neste modelo se baseia no fato de que em um escritório comercial a quantidade de pessoas que entram e saem é limitada. Sem este recurso, o modelo poderia gerar infinitas *marcas* para entrar no andar, não sendo condizente com a realidade. Em uma estatística levantada, foi possível notar que normalmente entram no andar os funcionários e poucas visitas, que não ultrapassam a quantidade de sete pessoas.

O subsistema apresentado na figura, *controle para reduzir taxa de funcionários não identificados*, foi desenvolvido com o intuito de tornar a simulação mais realística, pois em testes prévios observou-se que a taxa de acessos negados eram muito maiores que a taxa de acessos liberados, o que contradiz a situação real. Desde modo acrescentou-se um atraso para a *atividade Rejeitar* (rejeitar pedido).

A integração dos dois sistemas é apresentado na figura 5-7 e na figura 5-8.

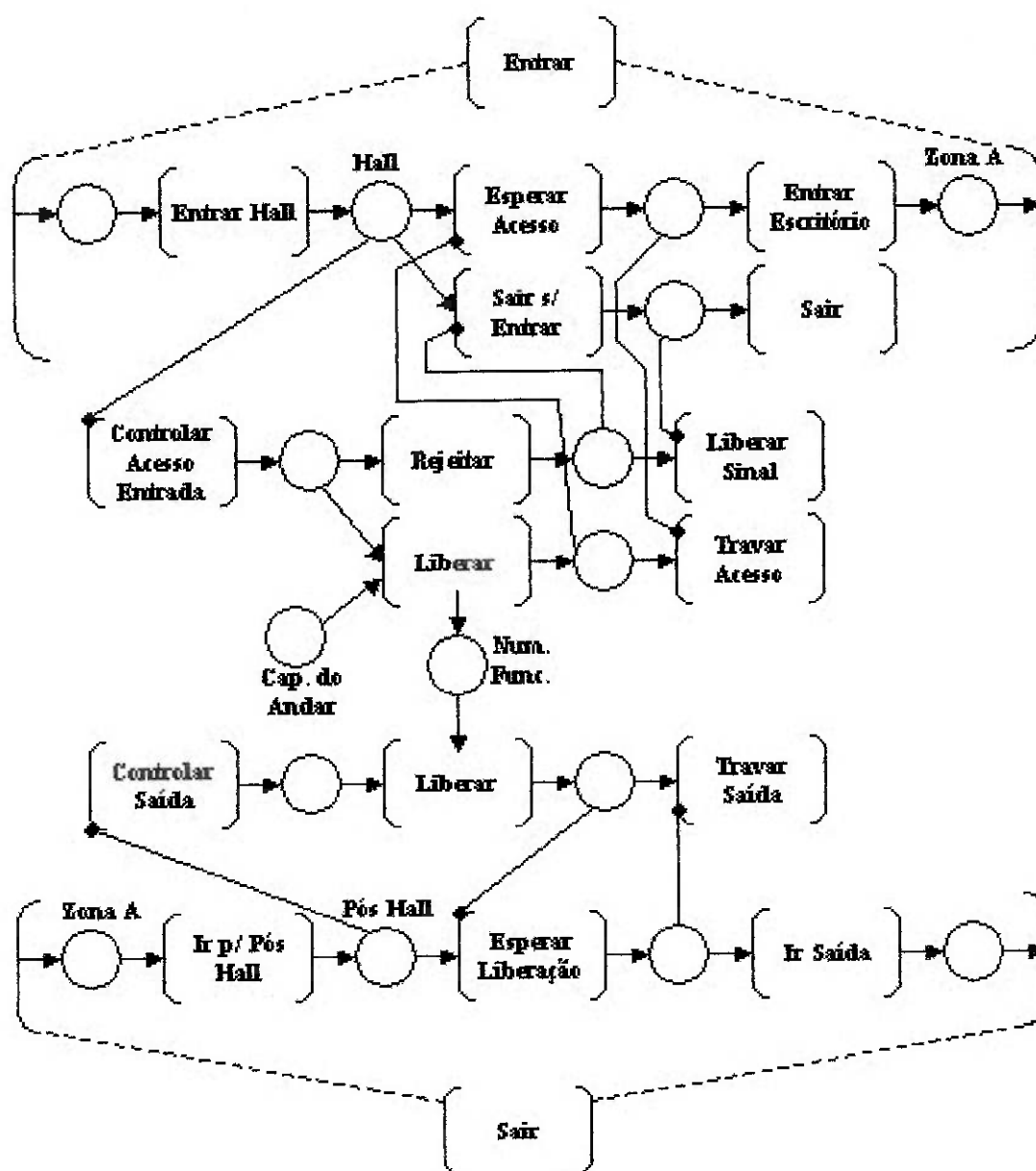


figura 5-7 – Modelo conceitual da integração dos Sistema de Entrada/Saída e Sistema de Controle de Acesso.

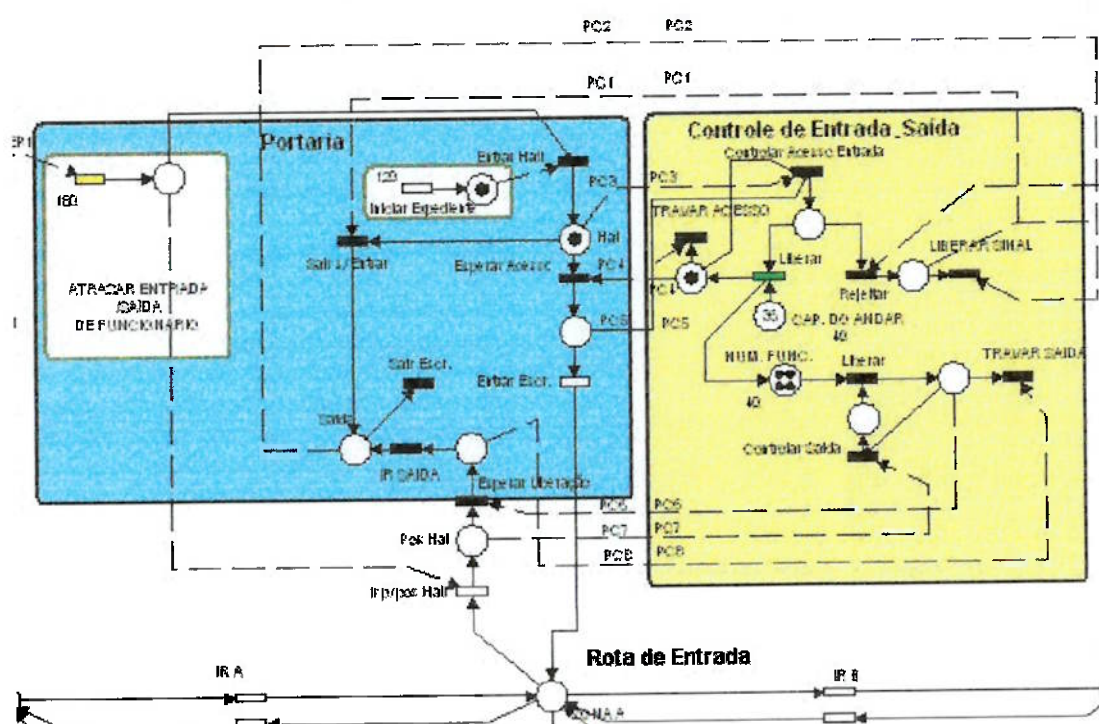


figura 5-8 – Modelo de integração entre a entrada do andar e o Sistema de Controle de Acesso.

Após entrar no escritório, o funcionário se encaminha para a sua estação de trabalho. Considera-se que cada funcionário possui estação própria e, portanto, não existe a possibilidade de trabalhar em outra estação.

Por comodidade, decidiu-se dividir o andar em seis zonas baseadas na distribuição de funcionários de modo que cada zona tivesse entre cinco ou seis funcionários, conforme diagrama da figura 5-9.

A configuração de cada zona é apresentada a seguir:

- Zona A: 3 estações de trabalho e 3 salas individuais;
- Zona B: 4 estações de trabalho e 1 sala individual;
- Zona C: 6 estações de trabalho;
- Zona D: 4 estações de trabalho e 2 salas individuais
- Zona E: 5 estações de trabalho;
- Zona F: 3 estações de trabalho e 3 salas individuais.

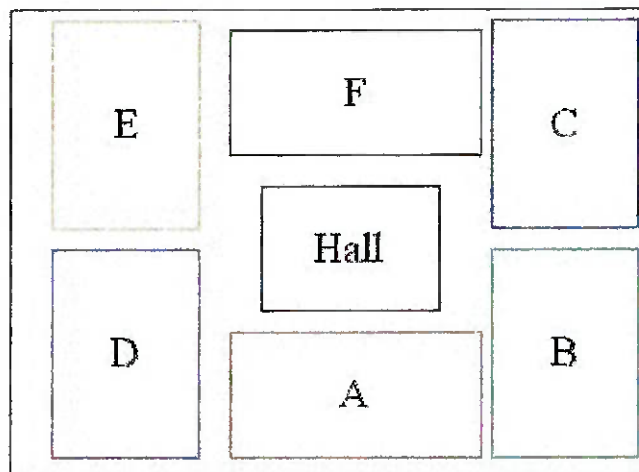


figura 5-9 – Demarcação das zonas do andar.

O modelo de uma zona pode ser visto na figura 5-10 e seus detalhes na figura 5-11. Aqui é possível verificar que o usuário pode realizar algumas das seguintes ações:

1. Se for de área individual, o funcionário pode acender as lâmpadas e ligar o microcomputador;
2. Se for da área central do andar, pode apenas ligar o microcomputador.

Isso se deve ao fato de que o sistema de iluminação do andar ser controlado pela administradora do prédio (CB Richards Ellis)

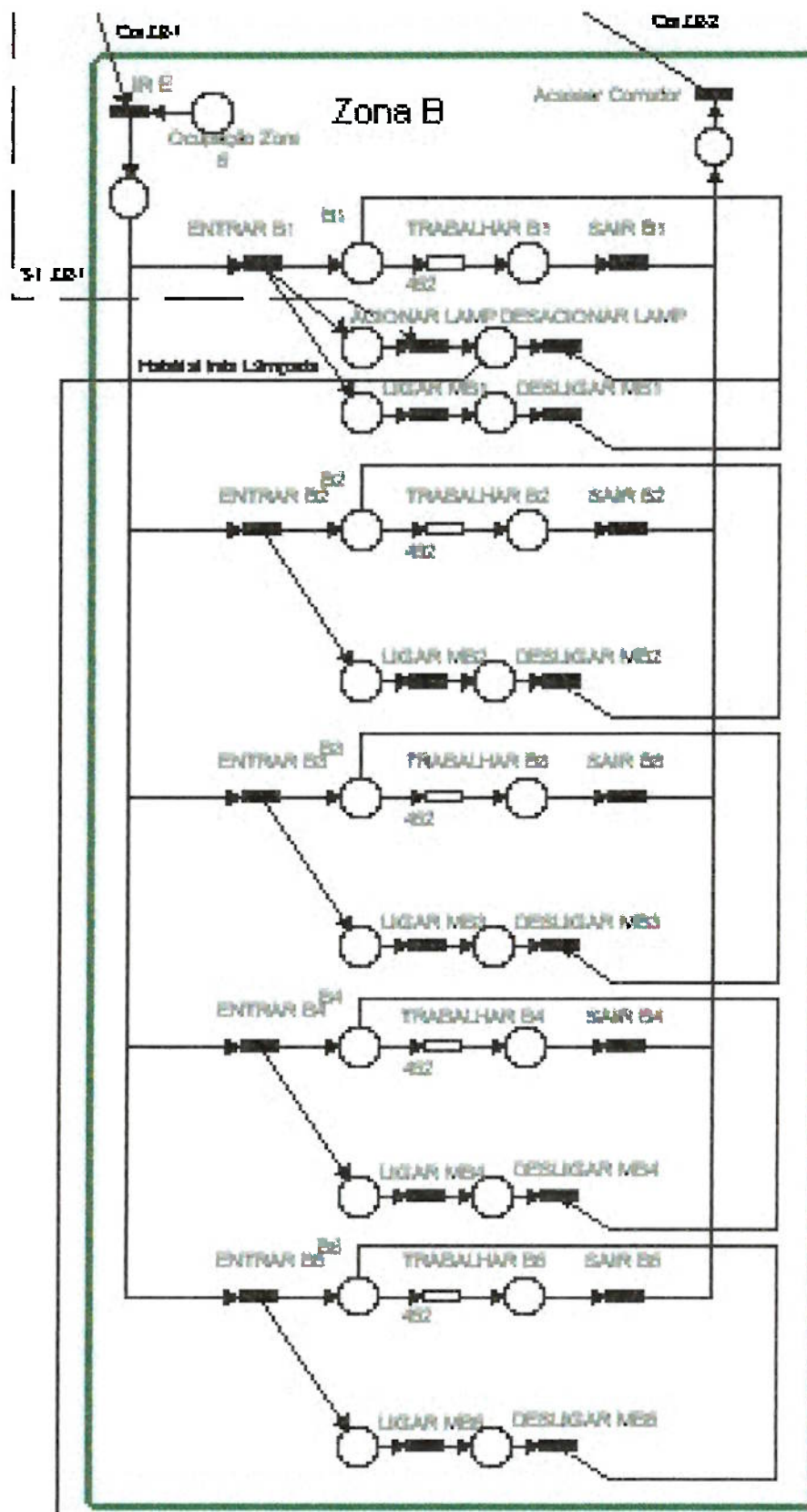


figura 5-10 – Diagrama da zona B

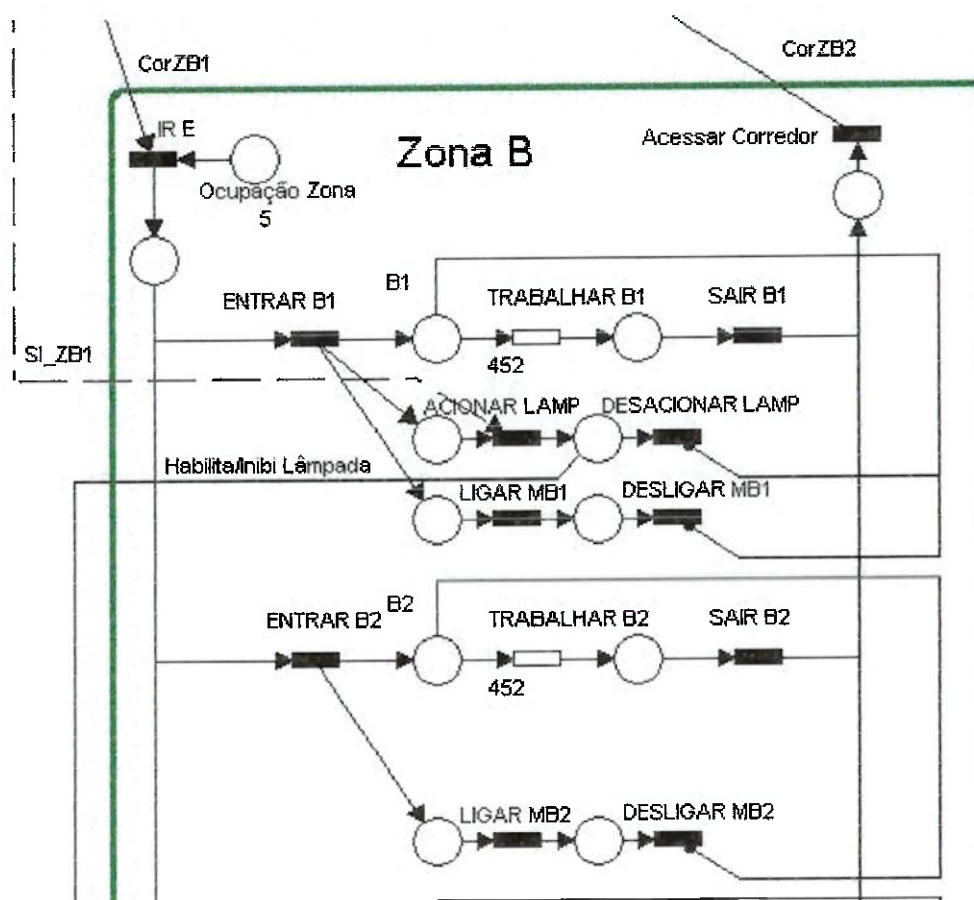


figura 5-11 – Detalhe da zona B.

Na figura 5-11 é possível verificar a existência de um *buffer* que limita a entrada de funcionários na zona. Isto é feito baseado na idéia, já apresentada, de que cada funcionário tem sua estação de trabalho própria. Portanto, mesmo que o empregado trabalhe meio-período, a sua estação de trabalho não é utilizada no período seguinte.

Na mesma figura, no *lugar B1*, referente a estação de trabalho 1 da zona B, verifica-se que se trata de uma sala individual. Quando o funcionário aciona a lâmpada, como por exemplo, através de um interruptor, um sinal é enviado ao sistema de iluminação local (figura 5-20) através de um *arco* habilitador.

A *transição Trabalhar* é estocástica e está ajustada com a média de 452 minutos, o equivalente a sete horas e trinta e dois minutos, a média de tempo de permanência de um funcionário dentro do escritório. Após passar um tempo aleatório

(definido pelo ponto médio da curva de Gauss), o funcionário vai embora, desacionando as luminárias e desligando o microcomputador.

Modelagem do sistema de energização do andar

Como já ressaltado anteriormente, tanto o sistema de iluminação da área central como o ar condicionado, são acionados pela administração do prédio. O modelo conceitual é apresentado na figura 5-12, e os modelos funcionais na figura 5-13, figura 5-14 e figura 5-15.

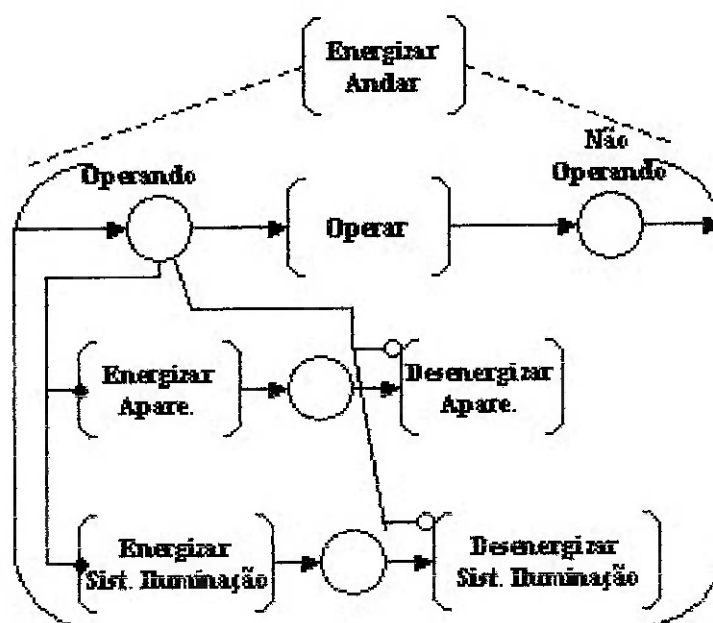


figura 5-12 – Modelo conceitual do Sistema de Energização do andar.

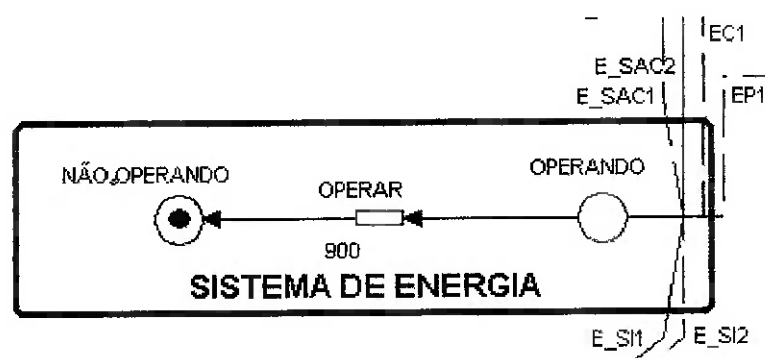


figura 5-13 – Modelo em redes de Petri do sistema de energização do andar.

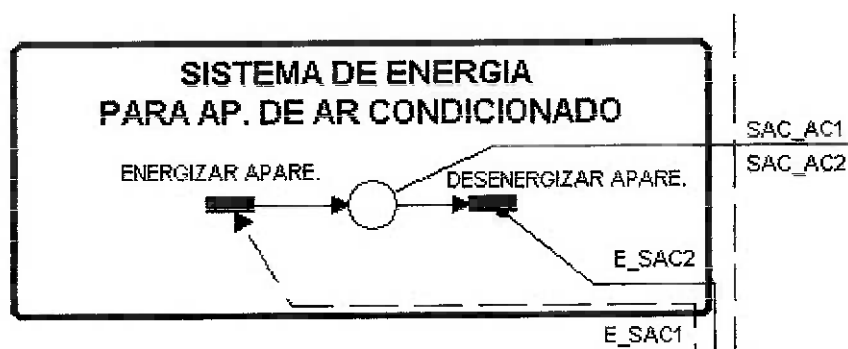


figura 5-14 – Sistema de energização do aparelho de ar condicionado.

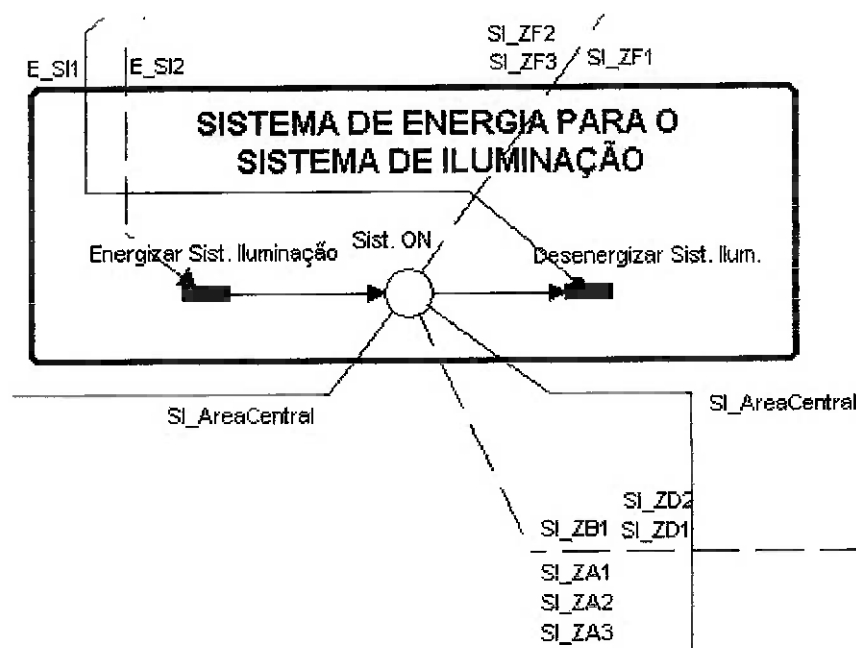


figura 5-15 – Sistema de energização do sistema de iluminação.

O *Sistema de Energia* é o sistema que energiza tanto o *Sistema de Iluminação* como o *Sistema de Ar Condicionado*. Além disso, é responsável pelo início da simulação. Este sistema opera durante quinze horas (900 minutos) sendo controlado pela equipe de manutenção do condomínio (vide figura 5-13)

Quando a operação inicia, através dos *arcos* habilitadores, o *Sistema de Energia* energiza os outros dois sistemas e quando sai de operação os *arcos* inibidores desacionam os mesmos.

Arcos habilitadores e inibidores também são utilizados neste sistema para dar início e fim à entrada de funcionários no andar (entrada até 180 minutos de operação) e também para iniciar o subsistema que realiza o atraso do sinal para a

rejeição de entrada do *Sistema de Controle* (vide figura 5-3 e figura 5-6 os arcos *ECl* e *EPI*).

Modelagem do sistema de iluminação

Para o sistema de iluminação, são considerados dois casos:

1. Iluminação da área central do andar;
2. Iluminação das áreas individuais.

Os modelos deste sistema, para os dois casos, são apresentados a seguir.

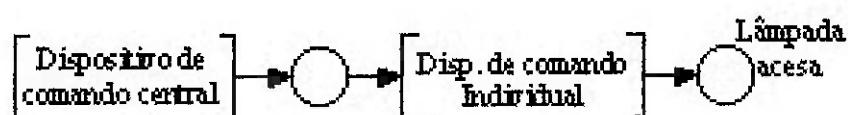


figura 5-16 – Modelo conceitual do sistema de iluminação da área individual.



figura 5-17 - Modelo conceitual do sistema de iluminação da área central.

Baseando-se nos modelos apresentados em PFS (alto nível), desenvolveu-se um modelo mais detalhado em redes LT e estocásticas. O sistema de iluminação, conforme mencionado anteriormente é acionado às seis horas e desacionado às vinte horas, totalizando quinze horas de operação.

O acionamento e o desacionamento são feitos pela administração do prédio sem nenhuma interferência dos funcionários do escritório, exceto pela área individual. O *Sistema de Iluminação* é acionado imediatamente após o *Sistema de Energia* ser acionado. E também de modo imediato do a iluminação da área central é acionada.

Os modelos representados na figura 5-18 e na figura 5-19 representam a energização do sistema de iluminação do andar, que automaticamente habilitada o acionamento das 60 lâmpadas da área central do escritório. Quando o sistema é desenergizado, as lâmpadas são desacionadas automaticamente.

Nota-se na figura 5-18 que apenas uma parte do sistema está representado, porém sem perdas de informação, pois as demais lâmpadas da área central são acionadas da mesma maneira.

O modelo para a área individual, como pode ser visto no modelo conceitual, se difere deste apresentado na figura 5-18 pelo fato de ter o acionamento feito pelo funcionário da sala.

Na figura 5-20 observa-se que o acionamento da lâmpada depende de uma habilitação que é dada quando o funcionário entra na sala e pressiona o interruptor da mesma. O desacionamento é feito quando o funcionário sai da sala pressionando novamente o interruptor. Este fato está representado por um *arco* inibidor.

Observa-se ainda na mesma figura que existem, no caso, duas salas individuais e que ambas estão com suas lâmpadas apagadas. Os códigos *LD2 ACESA* e *ACESA LD112* significam “*lâmpada 2 da zona D central acesa*” e “*lâmpada 2 da sala individual 1 da zona D acesa*”.

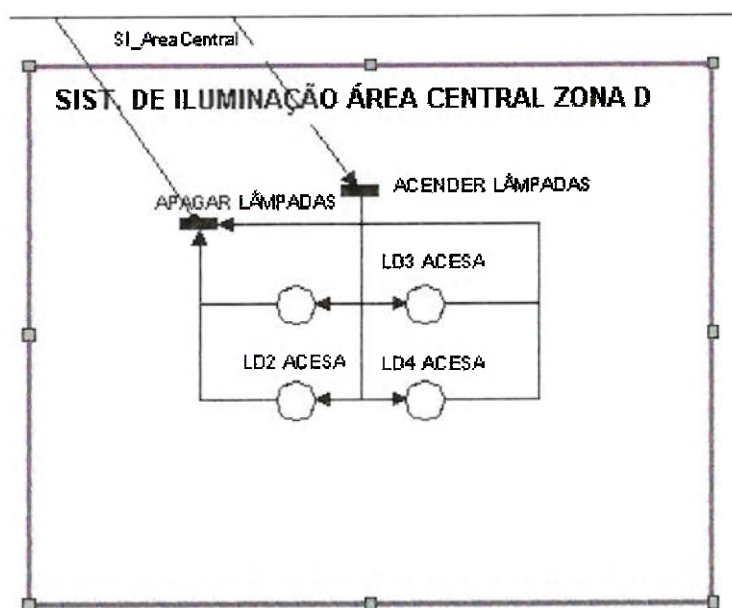


figura 5-18 – Modelo em redes de Petri de parte do sistema de iluminação da área central.

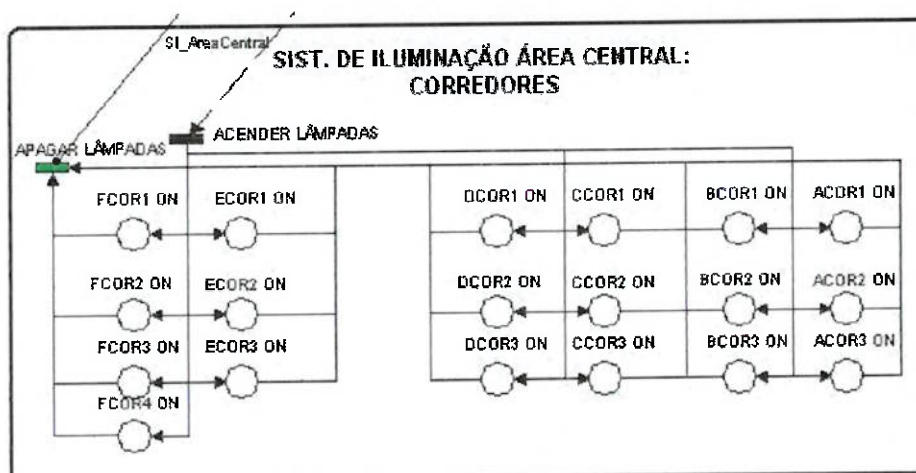


figura 5-19 - Modelo em redes de Petri de parte do sistema de iluminação da área central (área dos corredores).

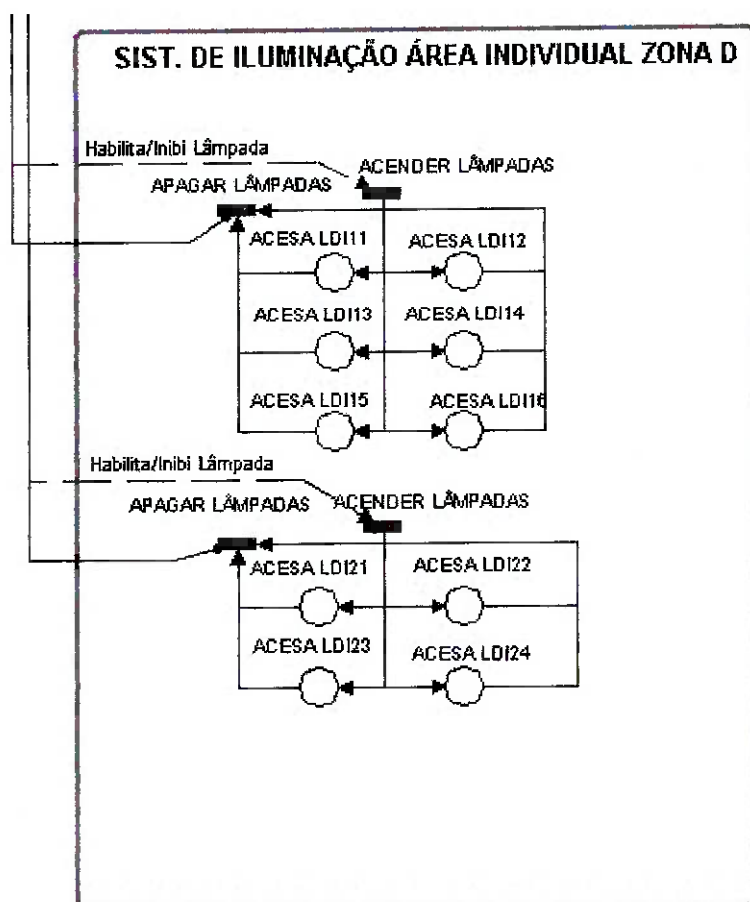


figura 5-20 - Modelo funcional do sistema de iluminação para a área individual.

Modelagem do sistema de ar condicionado

O acionamento do ar condicionado ocorre da mesma maneira que o acionamento do sistema de iluminação da área central. Quando acionado, o primeiro estágio da máquina é ligar a ventilação com uma determinada vazão mássica constante. Deste modo, o ar que está no ambiente é sugado para o retorno do aparelho onde um sensor faz a leitura da temperatura. Quando esta ultrapassa o valor de pré *set*, aciona-se o segundo estágio que é do compressor. Este estágio permanece em funcionamento até que a temperatura seja reduzida abaixo do valor configurado.

O modelo conceitual do ar condicionado pode ser visto na figura 5-21.

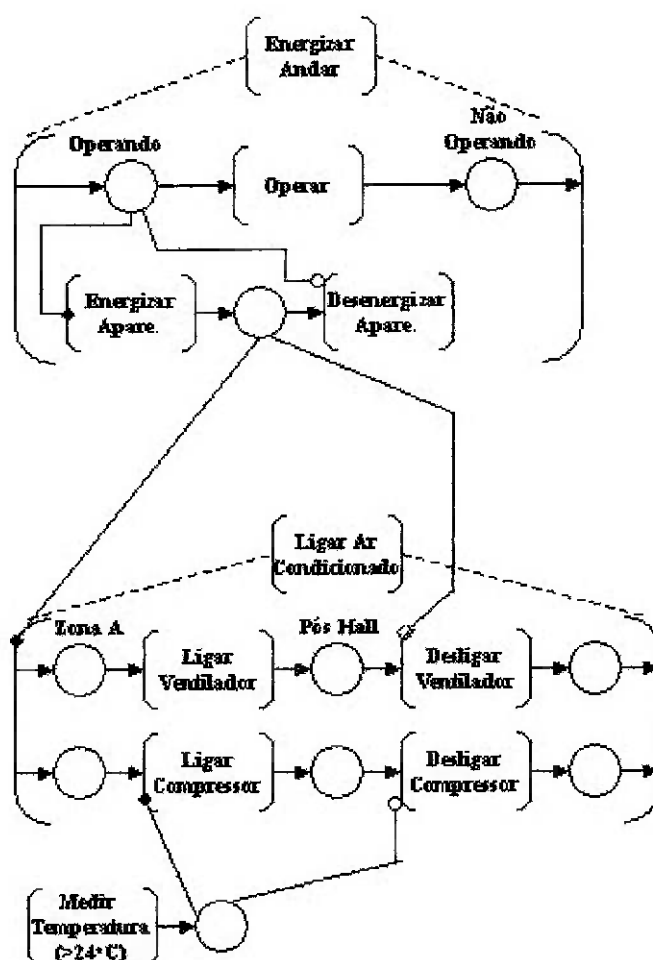


figura 5-21 – Modelo conceitual do aparelho de ar condicionado integrado com o Sistema de Energia do andar.

2. Com relação ao consumo energético, considera-se que o rendimento da máquina seja linear:

$$COP = \frac{Q_L}{W}$$

COP = eficiência da máquina

Q_L = Energia retirada

W = Energia gasta

3. O equacionamento é feito baseado na conservação da energia (1ª lei da termodinâmica).
4. Baseando-se na hipótese dois, a energia elétrica consumida será proporcional à potência dissipada no meio devido a carga térmica das pessoas, luminárias, microcomputadores e o ambiente externo. O cálculo da energia consumida é feito baseado no rendimento da máquina.
5. A carga térmica gerada por pessoa é constante ao longo do tempo.
6. As cargas térmicas geradas pelas pessoas, equipamentos são proporcionais ao número de pessoas dentro do escritório:

$$\dot{Q}_{\text{pessoas+equipamento}} = n \cdot (\dot{Q}_{\text{pessoa}} + \dot{Q}_{\text{equipamentos}})$$

$\dot{Q}_{\text{pessoas+equipamento}}$ = carga térmica de pessoas e equipamentos;

\dot{Q}_{pessoas} = carga térmica de pessoas;

$\dot{Q}_{\text{equipamentos}}$ = carga térmica de equipamentos;

n = número de pessoas.

7. As cargas térmicas geradas pelas lâmpadas são proporcionais ao número de lâmpadas acionadas.
8. A carga térmica do ambiente externo é constante ao longo do tempo.

Deste modo a equação diferencial do ar condicionado é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m} \cdot c_p \cdot (T - T_{ref}) + n \cdot (\dot{q}_p + \dot{q}_e) + nI \cdot \dot{q}_l + \dot{q}_{amb} \quad \text{eq. 5-1}$$

$$E = M_{ar} \cdot c_p \cdot (T - T_{ref}) \quad \text{eq. 5-2}$$

Onde:

E = Energia total do sistema (J);

\dot{m} = vazão mássica do ar (kg/s);

c_p = calor específico do ar ($T=25^\circ\text{C}$, $p=1\text{atm}$) (KJ/kgK);

T_{in} = temperatura do ar de saída do aparelho de ar condicionado (K);

T_{ref} = temperatura de referência qualquer (K);

T = temperatura do ambiente interno do escritório (K);

n = número de pessoas dentro do escritório;

\dot{q}_p = carga térmica gerada por uma pessoa (W);

\dot{q}_e = carga térmica gerada por um microcomputador (W);

nI = número de lâmpadas acionadas;

\dot{q}_l = carga térmica gerada por uma lâmpada fluorescente (W);

\dot{q}_{amb} = carga térmica do ambiente externo ao escritório (W);

M_{ar} = massa total de ar dentro do escritório (kg).

Observa-se que \dot{q}_{amb} é uma função da temperatura interna do escritório ($\dot{q}_{amb}(T)$), portanto é necessário analisar esta função antes de manipular as equações eq. 5-1 e eq. 5-2.

Para o cálculo da carga térmica do ambiente foi seguido o modelo sugerido por [Netto, 2002]:

$$\dot{q}_{amb} = \dot{q}_{paredes} + \dot{q}_{teto} + \dot{q}_{piso} + \dot{q}_{serviço} \quad \text{eq. 5-3}$$

$$\dot{q}_{paredes} = \dot{q}_{norte} + \dot{q}_{sul} + \dot{q}_{leste} + \dot{q}_{oeste} \quad \text{eq. 5-4}$$

$$\dot{q}_{serviço} = \dot{q}_{paredes} \cdot 0.2 \quad (\text{carga de serviço leve}) \quad \text{eq. 5-5}$$

Onde:

$\dot{q}_{paredes}$ = carga de penetração das paredes (W);

\dot{q}_{teto} = carga de penetração do teto (W);

\dot{q}_{piso} = carga de penetração do piso (W);

\dot{q}_{norte} = carga de penetração da parede norte (W);

\dot{q}_{sul} = carga de penetração parede sul (W);

\dot{q}_{leste} = carga de penetração da parede leste (W);

\dot{q}_{oeste} = carga de penetração da parede oeste (W);

$\dot{q}_{serviço}$ = carga de serviço devido a abertura de portas e outras infiltrações de ar (W).

A carga de penetração por cada parede, piso e teto podem ser calculados por:

$$\dot{q}_{paredes} = A_{parede} \cdot (T_{projeto} - T_{escritório}) \cdot \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot k_{parede}}{k_{parede} \cdot h_2 + \Delta x_{parede} \cdot h_1 \cdot h_2 + k_{parede} \cdot h_1} \quad \text{eq. 5-6}$$

Para as janelas de vidro a equação é semelhante a eq. 5-6:

$$\dot{q}_{vidro} = A_{vidro} \cdot (T_{projeto} - T_{escritório}) \cdot \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot k_{vidro}}{k_{vidro} \cdot h_2 + \Delta x_{vidro} \cdot h_1 \cdot h_2 + k_{vidro} \cdot h_1} \quad \text{eq. 5-7}$$

Onde:

A_{vidro} e A_{parede} = área lateral de parede e de vidro onde há contato com o meio externo (m²);

$T_{projeto}$ e $T_{escritório}$ = temperatura do ar externo de projeto e temperatura do ar dentro do escritório respectivamente (K);

h_1 e h_2 = coeficiente de troca de calor por convecção do lado externo e interno ao escritório (W/m².K);

Δx_{vidro} e Δx_{parede} = espessura do vidro e da parede (m);

k_{vidro} e k_{parede} = condutividade térmica do material (W/mK).

Definindo-se as constantes v, p , como:

$$p = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot k_{parede}}{k_{parede} \cdot h_2 + \Delta x_{parede} \cdot h_1 \cdot h_2 + k_{parede} \cdot h_1} \quad \text{eq. 5-8}$$

$$v = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot k_{vidro}}{k_{vidro} \cdot h_2 + \Delta x_{vidro} \cdot h_1 \cdot h_2 + k_{vidro} \cdot h_1} \quad \text{eq. 5-9}$$

E resolvendo as equações eq. 5-6 e eq. 5-7 para cada lateral do andar, resulta que:

$$\dot{q}_W = (T_{projeto}^W - T) \cdot (A_p^W \cdot p + A_v^W \cdot v) \quad \text{eq. 5-10}$$

$$\dot{q}_E = (T_{projeto}^E - T) \cdot (A_p^E \cdot p + A_v^E \cdot v) \quad \text{eq. 5-11}$$

$$\dot{q}_N = (T_{projeto}^N - T) \cdot (A_p^N \cdot p + A_v^N \cdot v) \quad \text{eq. 5-12}$$

$$\dot{q}_S = (T_{projeto}^S - T) \cdot (A_p^S \cdot p + A_v^S \cdot v) \quad \text{eq. 5-13}$$

$$\dot{q}_P = (T_{projeto}^P - T) \cdot A_p^P \cdot p \quad \text{eq. 5-14}$$

$$\dot{q}_T = (T_{projeto}^T - T) \cdot A_p^T \cdot p \quad \text{eq. 5-15}$$

Onde:

$T_{projeto}^W, T_{projeto}^E, T_{projeto}^N, T_{projeto}^S, T_{projeto}^P, T_{projeto}^T$ = Temperatura de projeto para cada face do andar;

$A_p^W, A_p^E, A_p^N, A_p^S, A_p^P, A_p^T$ = área das paredes das faces oeste, leste, norte, sul, piso e teto;

$A_v^W, A_v^E, A_v^N, A_v^S$ = área dos vidros das janelas das faces oeste, leste, norte e sul.

Somando as equações eq. 5-10, eq. 5-11, eq. 5-12, eq. 5-13, eq. 5-14 e eq. 5-15, pode-se escrever a eq. 5-16:

$$\dot{q}_{amb} = \dot{q}_{amb}^1 - Y \cdot T \quad \text{eq. 5-16}$$

Onde:

\dot{q}_{amb}^1 = função de $T_{projeto}$, A_{parede} , A_{vidro} , p e v de cada face do andar;

Y = função A_{parede} , A_{vidro} , p e v .

Substituindo a eq. 5-16 na eq. 5-1, tem-se que a equação diferencial do ar condicionado é:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m} \cdot c_p \cdot (T - T_{ref}) + n \cdot (\dot{q}_p + \dot{q}_e) + n l \cdot \dot{q}_c + \dot{q}_{amb}^1 - RT \quad \text{eq. 5-17}$$

$$E = M_{ar} \cdot c_p \cdot (T - T_{ref}) \quad \text{eq. 5-2}$$

Deste modo, o modelo em redes PTD pode ser observado na figura 5-23.

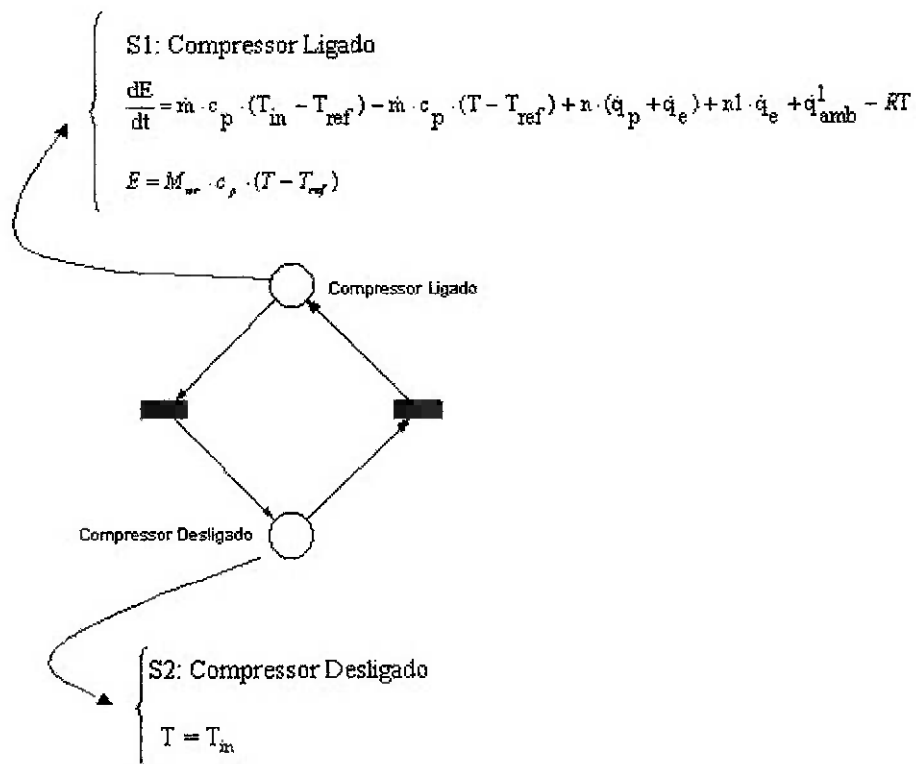


figura 5-23 – Modelo em rede PDT do compressor.

Porém, como espera-se que a temperatura interna do escritório seja de 24°C constante, ou seja, com uma variação pequena em torno deste valor, pode-se considerar que a $T=T_{in}$, e deste modo a eq. 5-17 pode ser simplificada na equação 5-18.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m} \cdot c_p \cdot (T - T_{ref}) + n \cdot (\dot{q}_p + \dot{q}_e) + n l \cdot \dot{q}_e + \dot{q}_{amb} \quad \text{eq. 5-18}$$

A simulação contínua do modelo apresentado foi feita através do *Simulink*, um recurso do *software* Matlab, cujo diagrama encontra-se no anexo 1.

Modelagem do ar condicionado do CPD

O modelo do ar condicionado do CPD é o mesmo apresentado anteriormente. Porém, a carga térmica envolvida deve-se somente a carga gerada pelos equipamentos lá instalados.

Ressalta-se aqui que, devido às condições de operações desta máquina (24 horas/dia) e também pelo fato de que não há grandes variações das cargas térmicas geradas dentro do ambiente em que opera (somente maquinário), não será feito o estudo detalhado do mesmo. Isso pode ser adotado, pois o consumo energético dele não é muito alterado, não influenciando na análise deste trabalho.

Modelagem do sistema de energia elétrica para os microcomputadores

Os microcomputadores somente são ligados quando o funcionário chega em sua estação de trabalho e permanecem ligados enquanto o funcionário se mantiver por lá. Observa-se que no sistema atual o recurso de *Energy Saving* disponível para o monitor não está sendo utilizado. Deste modo, pode-se afirmar que os microcomputadores ficam acionados durante todo o tempo de permanência do funcionário.

O acionamento do aparelho pode ser visto no *modelo conceitual* apresentado na figura 5-24.



figura 5-24 – Modelo conceitual do acionamento do microcomputador

Integração dos modelos

A integração dos modelos deve ser feita com uso dos *arcos* habilitadores e inibidores. O diagrama da figura 5-25 mostra as relações entre os sistemas mencionados.

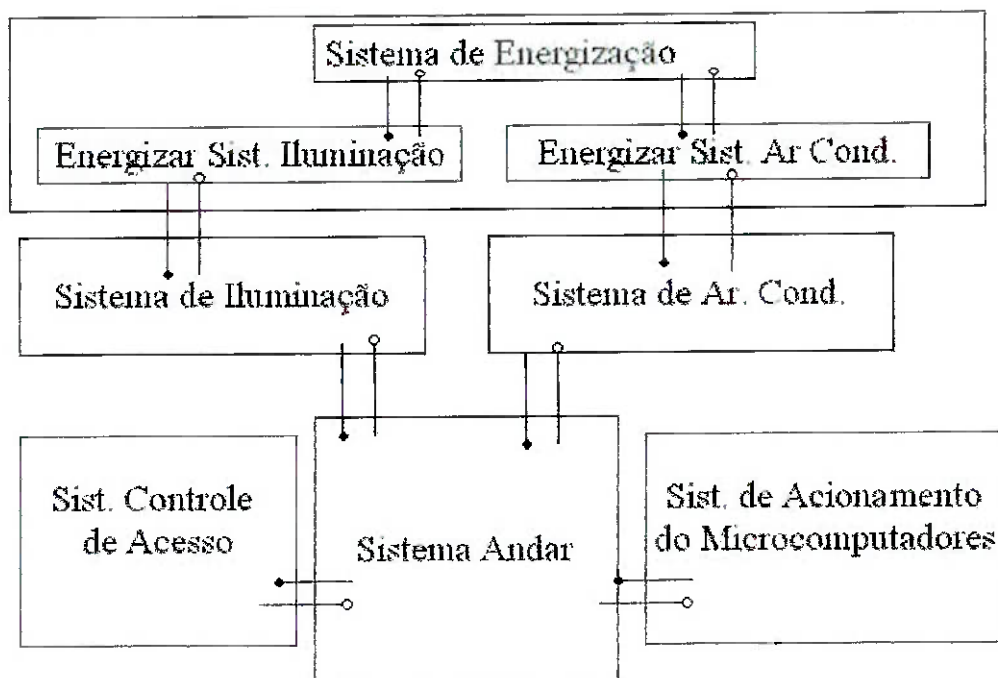


figura 5-25 – Diagrama da integração dos sistemas apresentados

5.2 Análise da Simulação dos Modelos do Sistema Atual

Nesta etapa é realizada a validação dos modelos criados anteriormente. Para tanto, foram simulados apenas dez dias, devido a capacidade limitada de processamento de dados do *software Hpsim*.

Ressalta-se que devido a capacidade limitada do relatório emitido por este *software*, alguns dos dados desta simulação serão interpretados de forma indireta, como por exemplo no caso do uso das luminárias em que a análise é baseada no estudo dos *lugares* referentes às estações de trabalho, uma vez que existe um vínculo físico entre eles (posição).

Sistema de Iluminação

Conforme exposto anteriormente, existem dois casos para análise. O primeiro diz respeito à área central, cujo acionamento é feito pela administração do edifício. O segundo diz respeito à área individual.

Para a área central, a análise é simples, uma vez que as luminárias são acionadas durante quinze horas por dia. Deste modo, sabendo-se que existem 60 luminárias com duas lâmpadas fluorescentes e cada uma com potência de 30W, o cálculo do consumo fica simplificado à equação:

$$E = nI \cdot P \cdot t \quad \text{eq. 5-19}$$

E = energia em kWh

nI = número de lâmpadas (120 lâmpadas)

P = potência de cada lâmpada (30 W)

t – tempo em horas (15 horas)

Portanto o consumo de energia elétrica para a área central é de 54 kWh.

Para o caso das luminárias que ficam dentro das salas individuais, deve-se fazer uma análise referente ao tempo que cada funcionário permanece trabalhando dentro de sua respectiva sala. Através do relatório emitido pelo *HPsim*, foi possível calcular a média de permanência de cada funcionário em sua sala, sendo o resultado apresentado na tabela 5-1.

tabela 5-1 – Média de uso das salas individuais e número de luminárias.

| | B1 | A1 | A2 | A3 | D1 | D2 | F3 | F2 | F1 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Média (min) | 586,44 | 496,44 | 460,84 | 545,84 | 447,54 | 482,28 | 407,65 | 434,26 | 451,33 |
| Média (horas) | 9,77 | 8,27 | 7,68 | 9,10 | 7,46 | 8,04 | 6,79 | 7,24 | 7,52 |
| Nº luminárias | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 2,00 | 6,00 | 4,00 | 6,00 | 4,00 | 4,00 |

Portanto, o consumo de energia pode ser calculado para cada sala e o resultado é apresentado na tabela 5-2.

tabela 5-2 – Consumo de energia das luminárias das salas individuais.

| | B1 | A1 | A2 | A3 | D1 | D2 | F3 | F2 | F1 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Média (horas) | 9,77 | 8,27 | 7,68 | 9,10 | 7,46 | 8,04 | 6,79 | 7,24 | 7,52 |
| Nº luminárias | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 2,00 | 6,00 | 4,00 | 6,00 | 4,00 | 4,00 |
| Energia (kWh) | 2,35 | 1,99 | 1,84 | 1,09 | 2,69 | 1,93 | 2,45 | 1,74 | 1,81 |

Assim, o consumo total da área individual é de 17,87 kWh por dia. E no total, se consome 71,87 kWh por dia com o sistema de iluminação. Valor este que está de acordo com a tabela 4-7, no qual foi estimado um consumo de 74,82 kWh, uma diferença de 4%.

O consumo energético obtido podem ser vistos nos gráficos das figura 5-26 e figura 5-27.

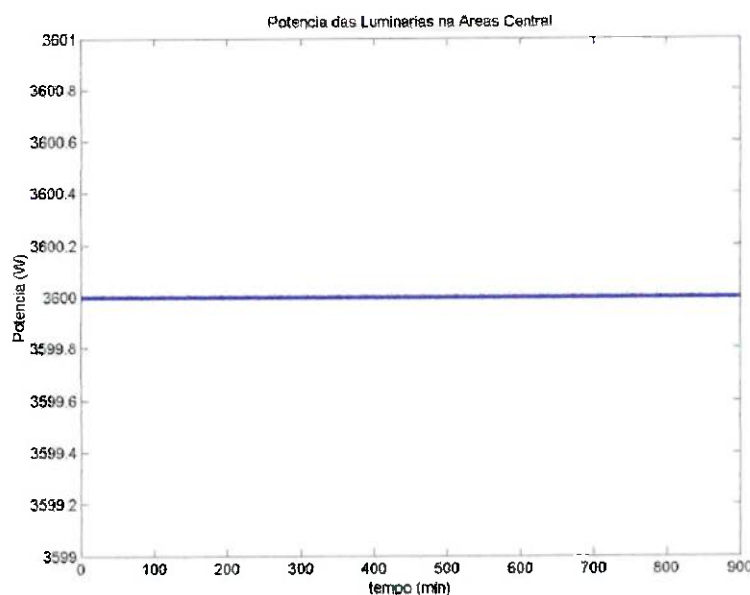


figura 5-26 – Potência consumida referente às lâmpadas da área central.

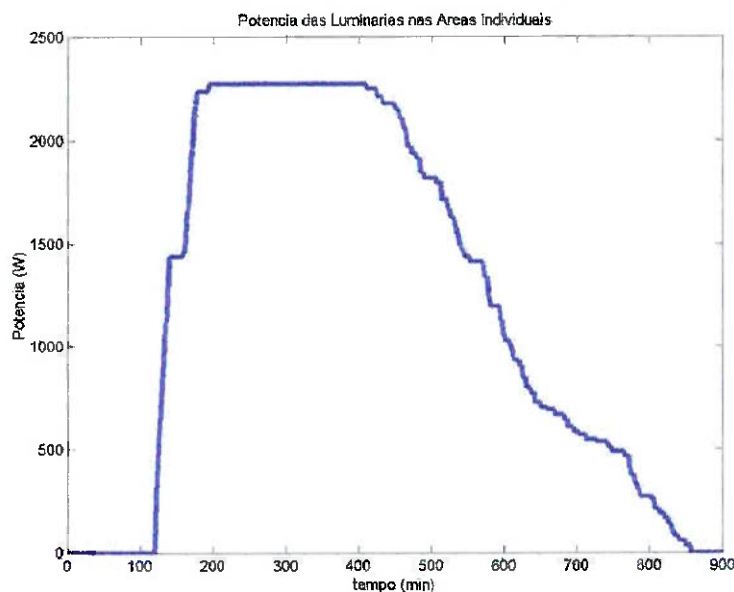


figura 5-27 – Potência consumida referente às lâmpadas das salas individuais.

Sistema de energia para equipamentos eletrônicos (microcomputador)

No caso dos equipamentos eletrônicos, aquele que apresentou maior consumo de energia foi o microcomputador. Para se fazer a análise do consumo de energia associado a este equipamento, pode-se adotar que o tempo de uso do microcomputador é o mesmo que o tempo de ocupação de uma estação de trabalho ou sala individual. Observa-se que, apesar do modelo contemplar o uso dos microcomputadores, devido as limitações do relatório do *Hpsim*, não é possível utilizar os dados referentes a eles, uma vez que nem todos os microcomputadores estão presentes neste relatório.

A tabela 5-3 mostra os valores obtidos para o consumo dos monitores.

Conforme estudo apresentado anteriormente, para o caso dos monitores, o consumo diário calculado foi de 21,6 kW e o simulado apresentado na tabela 5-3 foi de 20,4 kW, isto é, uma diferença de 6% que é um valor aceitável.

A figura 5-28 mostra o consumo médio por estação de trabalho.

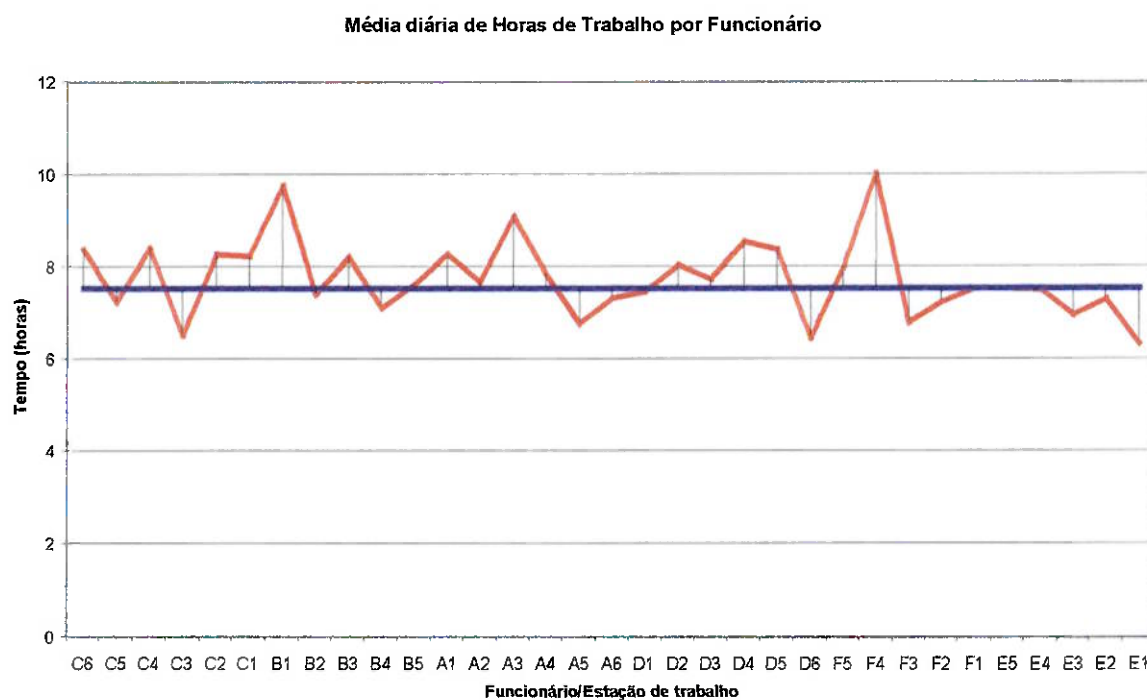


figura 5-28 – Consumo energético médio diário por monitores de microcomputador.

tabela 5-3 – Tempo de uso de cada estação e consumo de energia dos monitores.

| | Local | Tempo (min) | tempo (horas) | consumo (Wh) |
|--|-------|-------------|---------------|--------------|
| | C6 | 502,04 | 8,37 | 669,383 |
| | C5 | 434,64 | 7,24 | 579,516 |
| | C4 | 503,63 | 8,39 | 671,508 |
| | C3 | 391,51 | 6,53 | 522,009 |
| | C2 | 495,91 | 8,27 | 661,22 |
| | C1 | 492,94 | 8,22 | 657,256 |
| | B1 | 586,44 | 9,77 | 781,919 |
| | B2 | 444,24 | 7,40 | 592,32 |
| | B3 | 492,44 | 8,21 | 656,586 |
| | B4 | 425,85 | 7,10 | 567,805 |
| | B5 | 457,18 | 7,62 | 609,567 |
| | A1 | 496,44 | 8,27 | 661,919 |
| | A2 | 460,84 | 7,68 | 614,452 |
| | A3 | 545,84 | 9,10 | 727,786 |
| | A4 | 471,19 | 7,85 | 628,25 |
| | A5 | 406,14 | 6,77 | 541,521 |
| | A6 | 438,99 | 7,32 | 585,317 |
| | D1 | 447,54 | 7,46 | 596,719 |
| | D2 | 482,28 | 8,04 | 643,033 |
| | D3 | 463,97 | 7,73 | 618,631 |
| | D4 | 511,98 | 8,53 | 682,636 |
| | D5 | 502,04 | 8,37 | 669,383 |
| | D6 | 387,36 | 6,46 | 516,478 |
| | F5 | 479,19 | 7,99 | 638,92 |
| | F4 | 407,65 | 6,79 | 543,529 |
| | F3 | 600,99 | 10,02 | 801,314 |
| | F2 | 434,26 | 7,24 | 579,017 |
| | F1 | 451,33 | 7,52 | 601,774 |
| | E5 | 452,09 | 7,53 | 602,785 |
| | E4 | 450,58 | 7,51 | 600,773 |
| | E3 | 417,79 | 6,96 | 557,05 |
| | E2 | 437,82 | 7,30 | 583,759 |
| | E1 | 379,57 | 6,33 | 506,092 |
| | média | 465,23 | 7,75 | |
| | total | | | 20470,2 |

Sistema de ar condicionado

Para simular o comportamento do ar condicionado, os seguintes valores foram adotados para a solução das equações apresentadas no item 5.

$$\dot{q}_{\text{pessoas}} = 151 \text{ W} \quad [\text{Stoecker, 1985}]$$

$$\dot{q}_{\text{equipamento}} = 300 \text{ W} \quad [\text{Cavalcanti, 2002}]$$

$$\dot{q}_{amb} = 98,9 \text{ kW} \quad (\text{calculado pelo método apresentado por [Netto, 2002]})$$

$$c_p = 1,036 \text{ kJ/kgK} \quad [\text{Van Wiley, 1998}]$$

$$\dot{m} = 3000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_{in} = 297 \text{ K}$$

$$T = 299 \text{ K}$$

$$A_p^W = A_p^O = 20 \text{ m}^2$$

$$A_p^N = A_p^S = 25 \text{ m}^2$$

$$A_v^W = A_v^O = 40 \text{ m}^2$$

$$A_v^N = A_v^S = 50 \text{ m}^2$$

$$A_{piso} = A_{teto} = 500 \text{ m}^2$$

$$altura = 3 \text{ m}$$

$$h_1 = 100 \text{ W/m}^2.\text{K} \quad [\text{Incropera, 1998}]$$

$$h_2 = 25 \text{ W/m}^2.\text{K} \quad [\text{Incropera, 1998}]$$

$$k_{vidro} = 1,4 \text{ W/m.K} \quad [\text{Incropera, 1998}]$$

$$k_{parede} = 1,3 \text{ W/m.K} \quad [\text{Incropera, 1998}]$$

$$\Delta x_{vidro} = 0,004 \text{ m}$$

$$\Delta x_{parede} = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{densidade do ar} = 1,1614 \text{ kg/m}^3 \quad [\text{Incropera, 1998}].$$

O diagrama de blocos feito no *Simulink* é apresentado no anexo 1.

As perturbações deste sistema são as cargas térmicas geradas pelas pessoas, equipamentos eletrônicos (microcomputador), lâmpadas e o ambiente externo. As cargas térmicas referentes às pessoas e equipamentos são variáveis no tempo e aproximadamente proporcionais ao número de pessoas que se encontram no escritório. A carga térmica das lâmpadas é variável no tempo e depende da

quantidade de lâmpadas acionadas. A carga do ambiente externo também é variável no tempo, porém será considerado constante para os cálculos.

As variações das cargas térmicas mencionadas podem ser traçadas com base nos dados do relatório gerado pelo *HPsim*. A curva para “equipamento e pessoas” é aproximadamente a mesma, conforme já mencionado anteriormente, e é apresentada na figura 5-29.

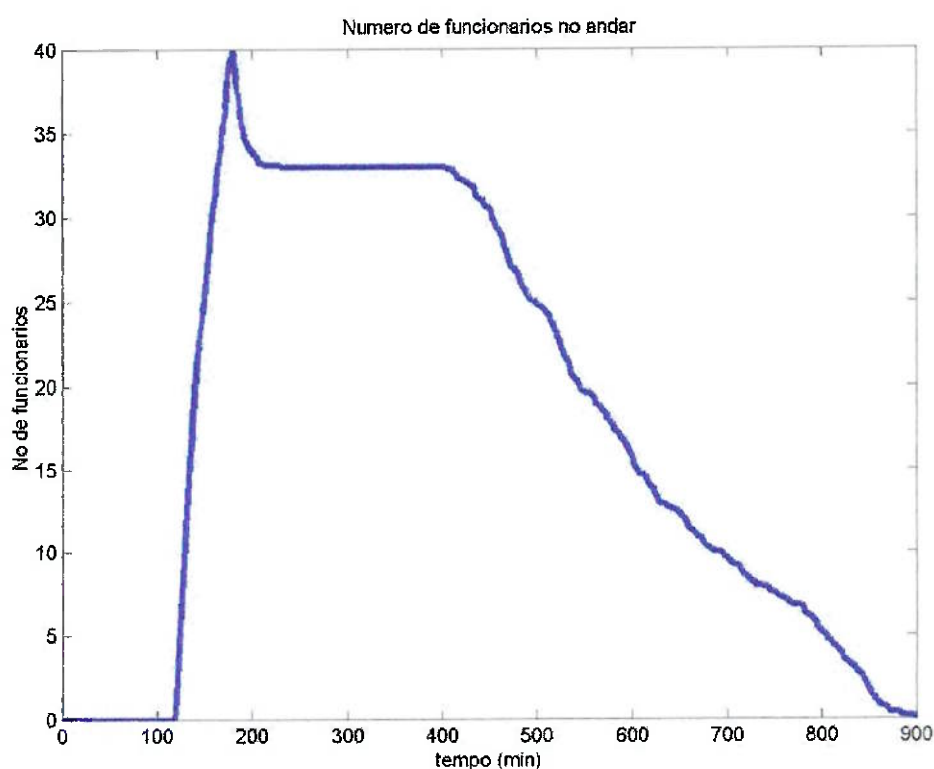


figura 5-29 – Número de funcionários durante o expediente.

A perturbação térmica gerada pelas lâmpadas é proporcional ao número de lâmpadas acessas e será considerado como a soma das duas curvas apresentadas na figura 5-30 e figura 5-31.

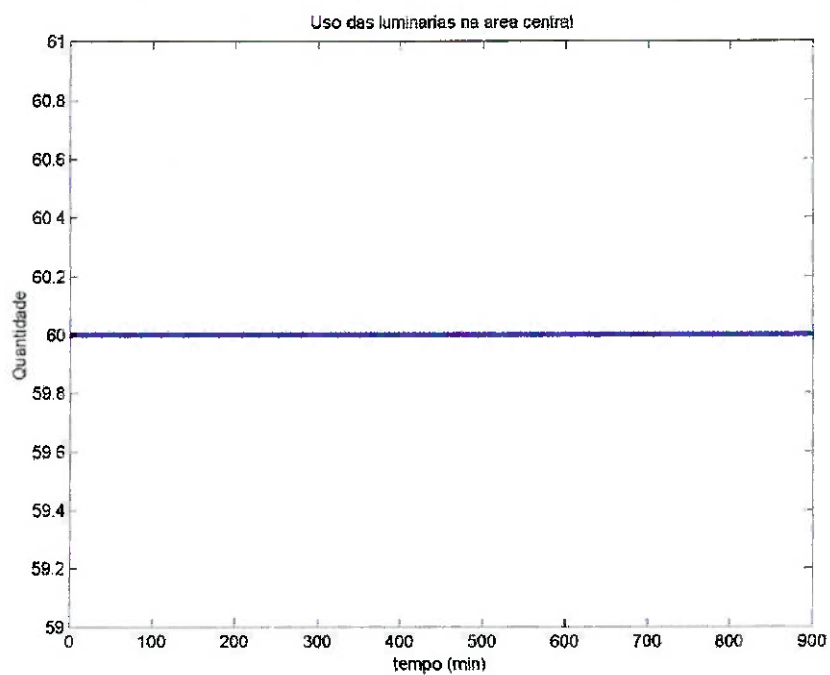


figura 5-30 – Quantidade de lâmpadas acesas na área central.

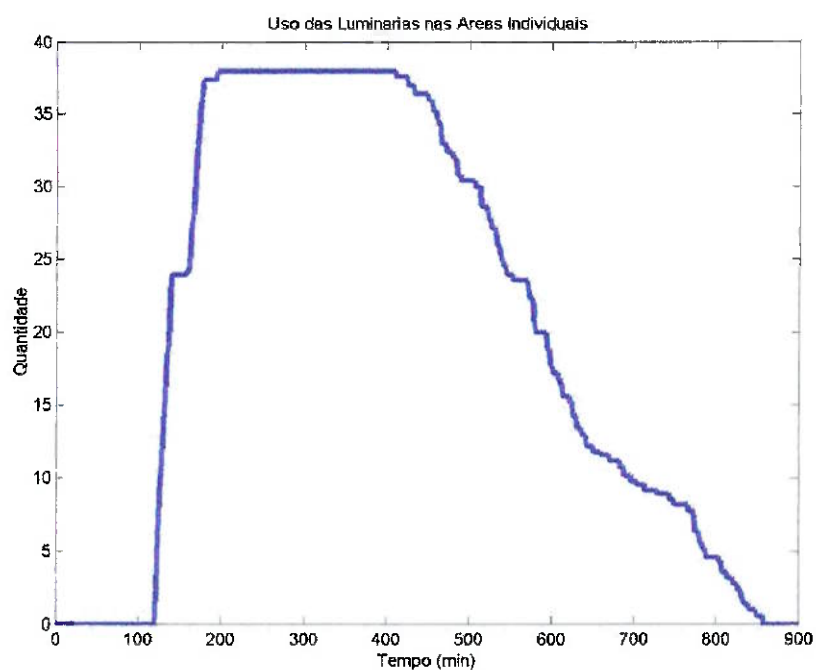


figura 5-31 – Quantidade de lâmpadas acesas nas áreas individuais.

Através dos blocos *"From File"* do *Simulink* é possível acrescentar tais perturbações em função do tempo.

A resposta do sistema pode ser verificado em termos de energia e também em termos da temperatura na figura 5-32 e figura 5-33. Observa-se que o início do expediente começa no instante $t=200$ minutos. Isto se deve pelo fato do *Simulink* interpretar a constante de referência utilizada ($T=297K$) como uma entrada degrau e deste modo nos primeiros 200 minutos ocorre a estabilização do sistema.

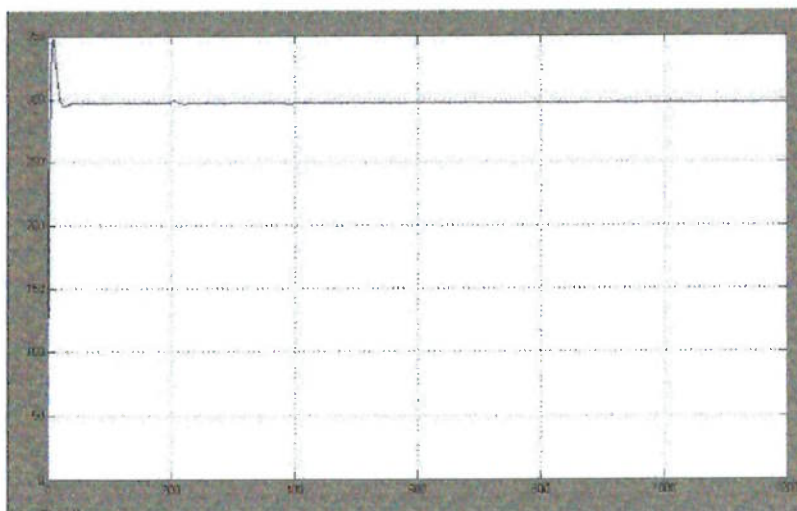


figura 5-32 – Temperatura do ambiente a partir do início do expediente.

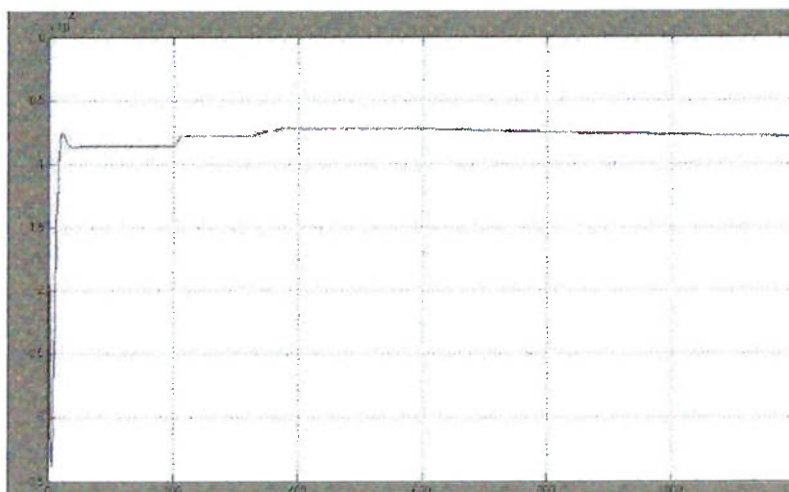


figura 5-33 – Variação da energia interna do escritório.

Nota-se que no instante de 320 minutos aproximadamente se inicia o expediente do escritório e a energia vai aumentando conforme vai aumentando o número de funcionários e posteriormente esta energia decai ao final do expediente.

Para uma melhor visualização do comportamento da temperatura, é apresentado um “*zoom in*” no instante em que os sistemas de iluminação e ar condicionados são energizados, conforme a figura 5-34.

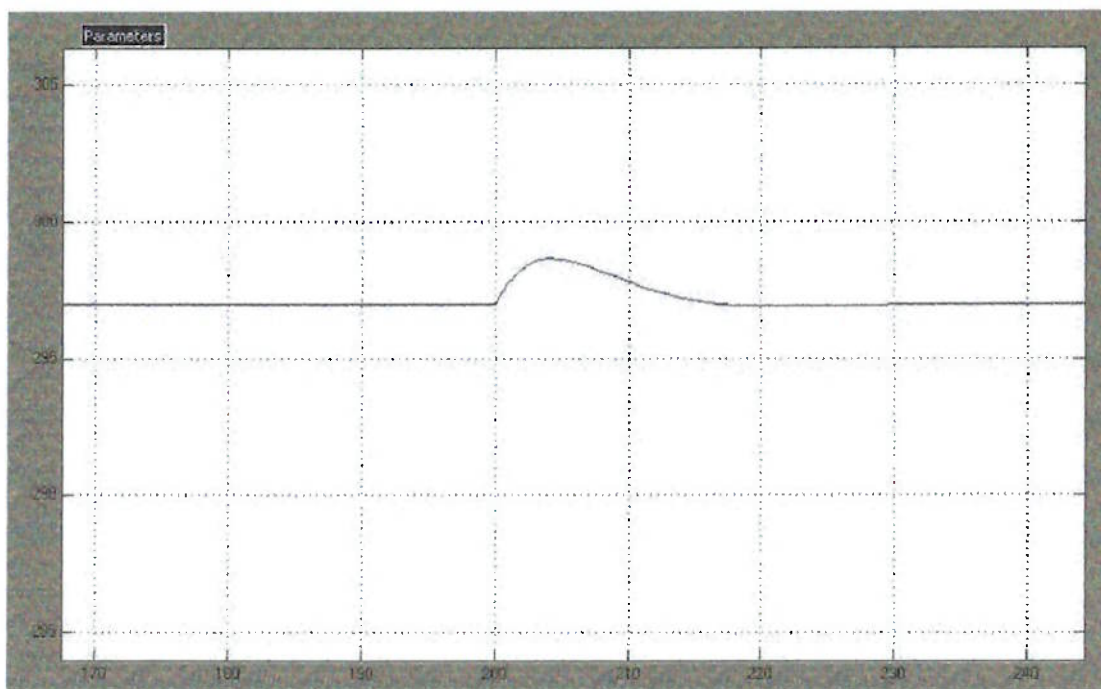


figura 5-34 – *Zoom in* em $t=200$ min.

A variação de temperatura é causada pela carga térmica do ambiente externo. Note que existe uma variação de aproximadamente 1,5 K e que o aparelho de ar condicionado consegue estabilizar a temperatura em 297 K em aproximadamente 15 minutos.

Devido ao “fundo de escala” ser muito grande, não é possível visualizar as variações de temperatura provocadas pelas cargas térmicas. Porém, se for transladada a referência do gráfico para a linha zero, pode-se ver claramente os efeitos, conforme figura 5-35.

O cálculo da energia do sistema pode ser feito através do cálculo da área do gráfico apresentado na figura 5-33 ou figura 5-36. Através de uma rotina em Matlab, pode-se aplicar o método dos trapézios e calcular a área.

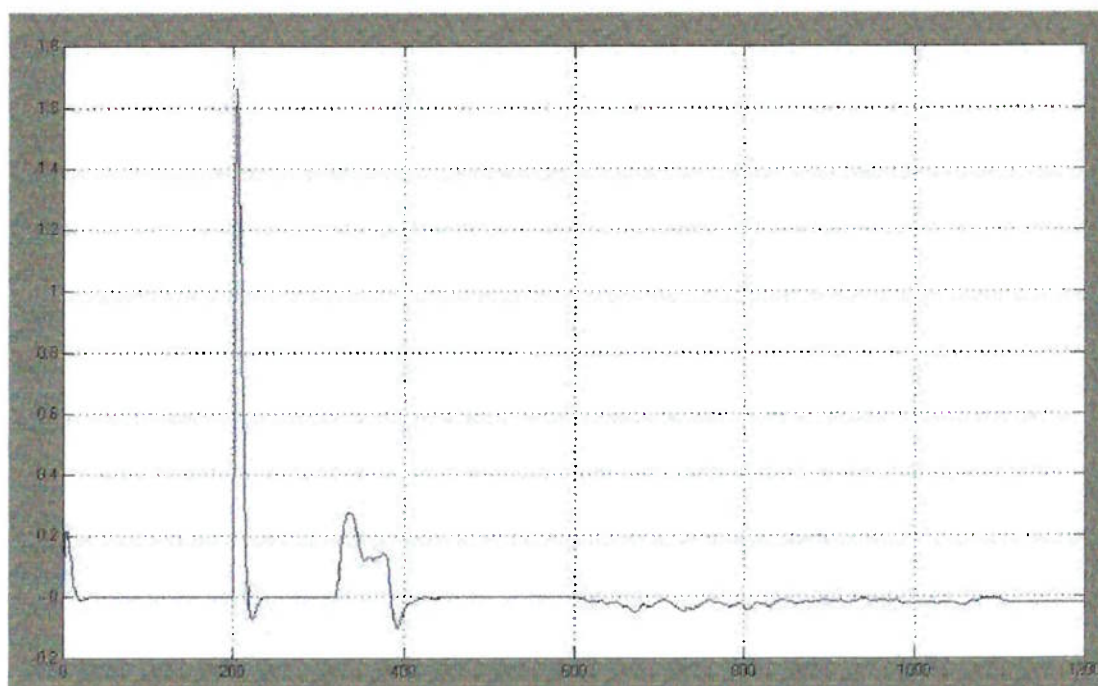


figura 5-35 - Variação de temperatura devido as cargas térmicas.

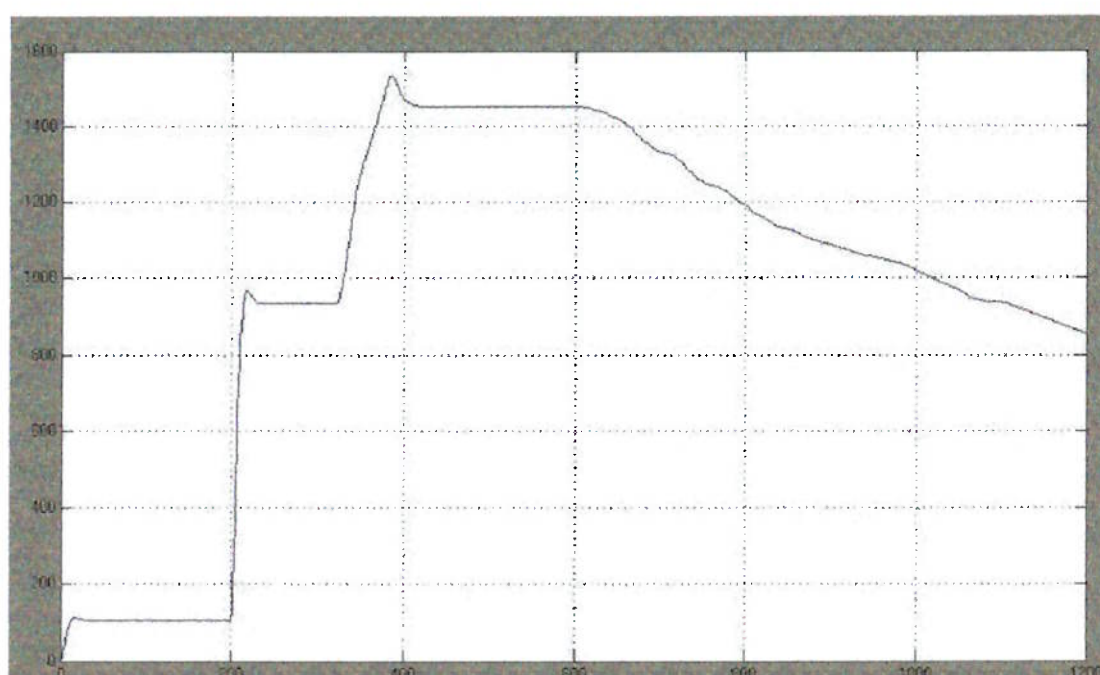


figura 5-36- Variação da energia com deslocamento do eixo de referência.

A energia total calculada foi de 2.193.700 J/min, o equivalente a 36,5 kW. Utilizando a eficiência da máquina ($COP=3$), pode-se calcular, pela eq. 5-20, a potência consumida que é de 12 kW.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad \text{eq. 5-20}$$

Para o cálculo da energia consumida diariamente, foi considerado que o aparelho fica funcionando durante as quinze horas de operação. Isto foi feito, pois não é possível identificar nas saídas do *Simulink* o tempo total de operação do equipamento, uma vez que este *software* faz o cálculo interpolando os pontos das curvas de perturbação, ou seja, a qualquer acréscimo infinitesimal de temperatura o controle PID já é acionado para corrigir o erro. Isto seria equivalente a ter um sensor “super” sensível de temperatura na entrada da máquina, o que não é real.

Deste modo, considerando a potência nominal da máquina instalada de 11245W (tabela 4-7) e que opera por 15 horas, o consumo total será de 168.675Wh. Para os dados da simulação, a potência nominal calculada foi de 12745W (incluindo o motor do ventilador de 1HP) e, portanto o consumo durante 15 horas é de 191.175Wh. Ocorrendo uma diferença de 13%, porém tais desvios podem ser justificados pelas simplificações adotadas e mencionadas anteriormente.

6. MODELAGEM DE UM SISTEMA OTIMIZADO

6.1 Definição das Estratégias do Modelo Otimizado

A seguir serão apresentadas as estratégias utilizadas para a modelagem de um sistema otimizado em relação ao sistema estudado.

Ressalta-se que para a concepção desta otimização levou-se em conta que não há problemas em se instalar determinados equipamentos de pequeno porte como sensores. Porém, foi considerada proibitiva a troca de aparelhos como o de ar condicionado, pois isto acarretaria mudanças estruturais no comportamento do sistema e também envolveria um custo significativo.

Estratégia para locais ocupados

Esta estratégia é utilizada nas áreas em que são detectadas as ocupações. Através dela procura-se disponibilizar os recursos daquela área para o funcionário, como por exemplo, o sistema de iluminação, abastecimento de energia e ar condicionado. Durante o período de uso as seguintes medidas devem ocorrer:

- O sistema de iluminação deve ser acionado, iluminando o local de uso.
- Em uma área restrita a uma estação de trabalho é indesejável que a energia elétrica seja desativada toda vez que o funcionário se ausenta, deste modo, é aplicado o recurso *Energy Saving* do sistema *Windows* para economizar energia dos monitores dos microcomputadores.

O acionamento das luminárias é feito somente quando é detectada a presença de pessoas pelo sensor de presença. O seu desacionamento é feito após 30 minutos sem o ocupante (área central e salas individuais). Este tempo foi configurado

visando evitar um desgaste do equipamento, uma vez que se trata de lâmpadas eletrônicas.

Estratégia para locais desocupados

Esta estratégia é aplicada quando a condição da estratégia para locais ocupados não for mais verdadeira. Neste caso, os todos os sistemas localizados naquela determinada área devem retornar para seu estado inicial. Os seguintes procedimentos devem ser executados:

- O sistema de iluminação local deve ser desacionado.
- Para o caso de uma estação de trabalho, somente o terminal elétrico que atende o monitor deve ser desernegizado.

Estratégia para condicionamento do ar

Esta estratégia deve ser executada para energizar o sistema de VAC. Deste modo o seguinte procedimento deve ser adotado:

- Quando a primeira pessoa entra no andar o sistema deve ser habilitado.
- Quando a última pessoa deixa o escritório, o sistema deve ser desacionado.

Uma maneira de se fazer este controle é através do sistema de controle de acesso. O mesmo pode gravar a informação de que existe ou não pessoas no escritório.

Para o sistema de ar condicionado, foi considerado na seguinte estratégia: quando algum funcionário chega em sua estação de trabalho, os *dampers* localizados nos dutos do sistema de ar condicionado são abertos na região em que o funcionário se encontra e as demais áreas vazias permanecem com os seus *dampers* fechados e retornado o ar refrigerado para a máquina.

Isto acarreta em um menor tempo de utilização da máquina, pois a temperatura do ar gelado ponderaria com maior peso na “caixa de mistura”⁴ da entrada do aparelho fazendo com que o sensor de temperatura desativasse a máquina. Entretanto, isto somente é possível de ser feito se cada *zona* estiver isolada das demais, ou seja, não podem trocar ar, pois caso contrário, o equilíbrio térmico não seria a uma temperatura de 24°C, por exemplo, e estaria mais próxima da temperatura da maior massa de ar ($m.c.\Delta T = M.c.\Delta T$).

6.2 Modelagem do Sistema Otimizado

Os modelos desenvolvidos nesta parte do trabalho referem se apenas àqueles que sofreram alguma alteração em relação aos desenvolvidos anteriormente.

Sistema de acionamento do aparelho de ar condicionado

Como mencionado anteriormente, o aparelho de ar devem ser acionado somente quando o primeiro funcionário entrar no andar e devem ser desativado somente quando o último funcionário deixar o andar.

Isto é feito através de *arcos* habilitadores e inibidores saindo do *buffer* do controle de acesso (figura 6-1 e figura 6-2) até a *transição* que aciona o aparelho de ar condicionado. Nota-se que a condição do sistema estar já energizado é fundamental para o acionamento.

⁴ “caixa de mistura” é o local da máquina de ar condicionado onde ocorre a mistura do ar que é succinado do andar com o ar que é succionado do ambiente externo.

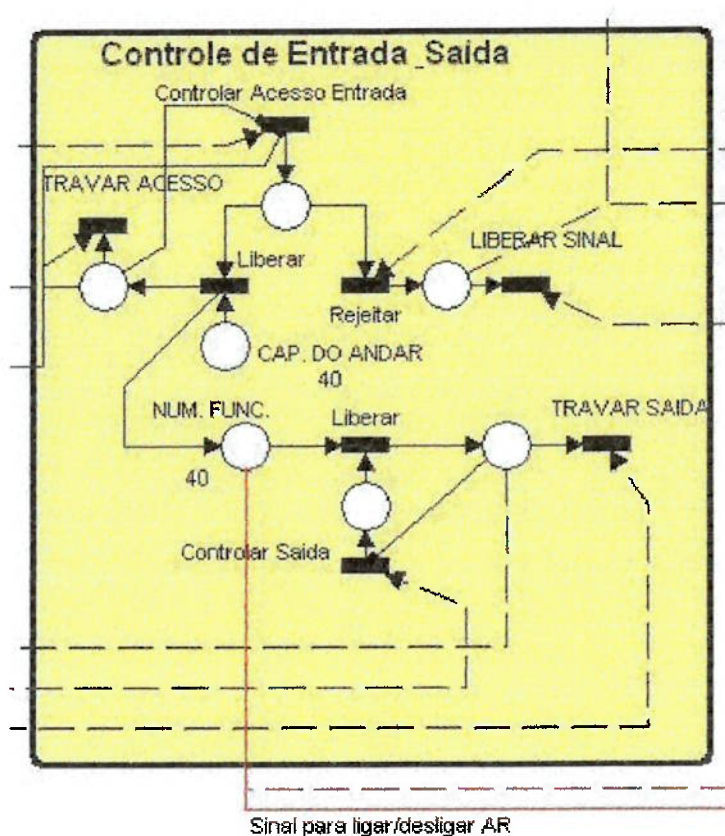


figura 6-1 – Arcos habilitadores e inibidores para acionamento/desacionamento do aparelho de ar condicionado.

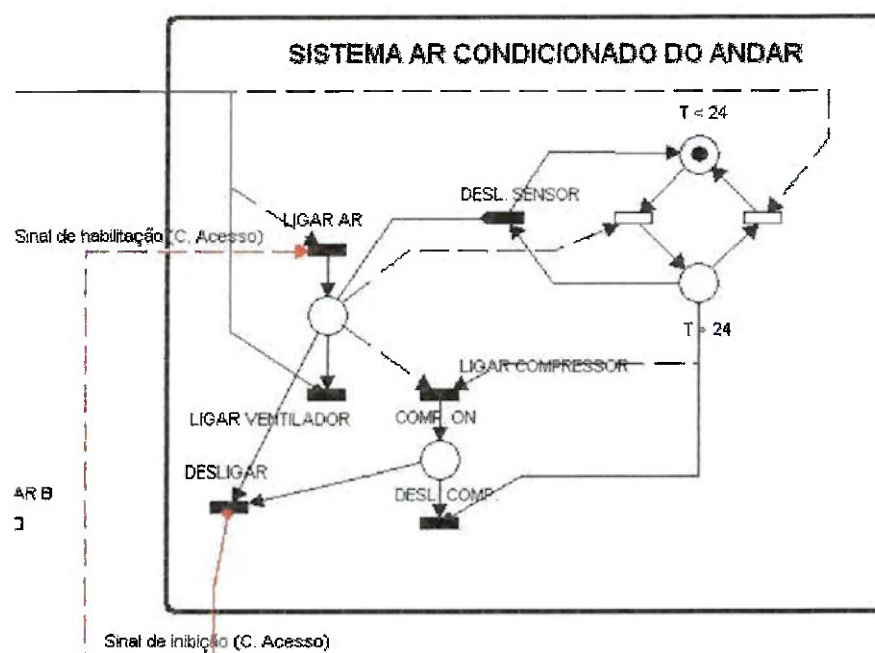


figura 6-2 – Sinal de habilitação e inibição do Controle de Acesso.

Nota-se que este modelo se aplica a todas as lâmpadas do escritório, inclusive aquelas do corredor, cujo acionamento é através de *arcos* habilitadores e inibidores dos *lugares Zona A, Zona B, Zona C, Zona D, Zona E e Zona F*.

Sistema de uso dos monitores dos microcomputadores

Na figura figura 6-3 é possível verificar o modelo para simular a situação em que o microcomputador opera em *sleep mode*, operação econômica. Quando o funcionário aciona o microcomputador, uma *transição (Entrar SM – entrar em sleep mode)* é iniciada para determinar quando o monitor entrar neste modo de operação. A seguir, a segunda *transição (Sair SM – sair do modo sleep mode)* determina tempo o monitor irá operar deste modo.

Os valores médios de *setting* são meramente ilustrativos, uma vez que se tem dados sobre o período em que o computador opera neste estado.

6.3 Análise da Simulação do Modelo Otimizado

Sistema de Iluminação

Para o sistema de iluminação, levou-se em conta que após a saída do funcionário do local, a luz permanece acesa por um período de 30 minutos. Isto é feito para preservar o equipamento, pois por ser eletrônico não é recomendável que elas não operem no sistema “*on/off*”. Este período é suficientemente grande para que a pessoa saia e volte por períodos curtos de tempo.

Na tabela 6-2 encontram-se os valores de consumo médio para cada local de cada zona, e ao final o valor total de consumo.

Para a área dos corredores, os dados gerados foram insuficientes para ter uma média de funcionamento das lâmpadas de cada corredor. Isto ocorreu devido a capacidade limitada do *HPsim*. Contudo, o uso das lâmpadas de um dos corredores de umas das zonas foram registradas e o seu resultado será propagado para as lâmpadas localizadas nos demais corredores.

A média do período em que as lâmpadas dos corredores da Zona F foram acionadas foi de 271,4 minutos. Utilizando este valor para as demais áreas, pode-se montar a tabela 6-1 e

tabela 6-2.

tabela 6-1 – Consumo de energia estimado para as lâmpadas dos corredores

| Zonas | A | B | C | D | E | F | Total |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| Tempo (h) | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | |
| nº de lâmpadas | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | |
| Consumo (Wh) | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 1200 | 5700 |

tabela 6-2 – Consumo de energia do modelo otimizado sem corredores

| | Local | tempo | acrécimo | No Luminárias | W | Consumo Wh |
|-------|-------|-------|----------|---------------|----|------------|
| | C6 | 9,24 | 0,50 | 2 | 30 | 1168,94 |
| | C5 | 8,20 | 0,50 | 2 | 30 | 1044,11 |
| | C4 | 6,28 | 0,50 | 2 | 30 | 813,38 |
| | C3 | 7,83 | 0,50 | 2 | 30 | 1000,14 |
| | C2 | 6,77 | 0,50 | 2 | 30 | 872,98 |
| | C1 | 9,24 | 0,50 | 2 | 30 | 1168,94 |
| | B1 | 6,75 | 0,50 | 4 | 30 | 1738,91 |
| | B2 | 8,79 | 0,50 | 3 | 30 | 1671,41 |
| | B3 | 8,34 | 0,50 | 1 | 30 | 530,32 |
| | B4 | 7,67 | 0,50 | 1 | 30 | 489,94 |
| | B5 | 6,49 | 0,50 | 1 | 30 | 419,36 |
| | A1 | 8,44 | 0,50 | 4 | 30 | 2145,36 |
| | A2 | 7,57 | 0,50 | 4 | 30 | 1937,40 |
| | A3 | 7,76 | 0,50 | 2 | 30 | 991,10 |
| | A4 | 6,76 | 0,50 | 3 | 30 | 1307,20 |
| | A5 | 8,58 | 0,50 | 2 | 30 | 1089,10 |
| | A6 | 8,12 | 0,50 | 1 | 30 | 517,17 |
| | D1 | 8,24 | 0,50 | 6 | 30 | 3147,12 |
| | D2 | 6,56 | 0,50 | 4 | 30 | 1694,97 |
| | D3 | 6,22 | 0,50 | 1 | 30 | 403,15 |
| | D4 | 6,57 | 0,50 | 1 | 30 | 424,36 |
| | D5 | 8,88 | 0,50 | 1 | 30 | 562,78 |
| | D6 | 7,33 | 0,50 | 1 | 30 | 469,74 |
| | F5 | 9,00 | 0,50 | 2 | 30 | 1140,22 |
| | F4 | 6,79 | 0,50 | 5 | 30 | 2188,23 |
| | F3 | 8,52 | 0,50 | 4 | 30 | 2163,91 |
| | F2 | 7,91 | 0,50 | 4 | 30 | 2018,77 |
| | F1 | 7,76 | 0,50 | 6 | 30 | 2975,34 |
| | E5 | 9,29 | 0,50 | 1 | 30 | 587,11 |
| | E4 | 9,48 | 0,50 | 1 | 30 | 598,91 |
| | E3 | 7,84 | 0,50 | 1 | 30 | 500,15 |
| | E2 | 6,38 | 0,50 | 1 | 30 | 412,87 |
| | E1 | 6,99 | 0,50 | 2 | 30 | 899,40 |
| Média | | 7,78 | | | | |
| Total | | | | 79 | | 39092,80 |

Portanto, o total de energia consumida pelo sistema de iluminação é de aproximadamente 44.792,8 Wh.

O uso das lâmpadas pode ser visto na figura 6-5.

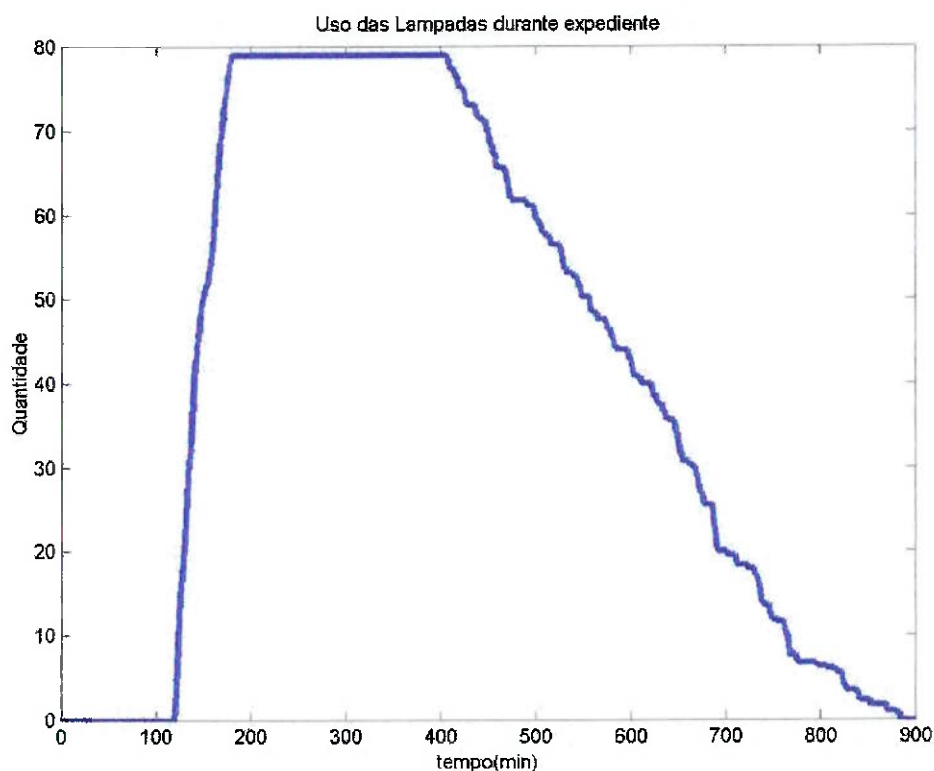


figura 6-5 – Uso das lâmpadas no escritório (sem corredores)

Uso dos monitores dos microcomputadores

Quanto ao uso dos computadores, mais especificamente em relação ao uso dos monitores, a simulação foi feita tendo como base o horário de almoço e mais o período em que o funcionário exerce outras atividades não correlatas ao uso de microcomputadores. Estima-se que o funcionário fique pelo menos 1,5 horas sem usar o aparelho.

E segundo a [COMPAQ, 1999], o consumo energético quando o monitor opera em *sleep mode* é 91% menor. No caso, quando os monitores típicos considerados operam neste estado, o consumo é de 8 W.

Desse modo, tem-se a tabela 6-3.

tabela 6-3 – Consumo de energia dos monitores com a utilização do recurso *sleep mode*.

| | | Tempo (min) | tempo (horas) | t. ocioso (h) | consumo (Wh) - Monitores | | |
|-------|----|-------------|---------------|---------------|--------------------------|-------|-----------|
| | C6 | 554,47 | 9,24 | 1,50 | 619,30 | 12,00 | 631,30 |
| | C5 | 492,05 | 8,20 | 1,50 | 536,07 | 12,00 | 548,07 |
| | C4 | 376,69 | 6,28 | 1,50 | 382,25 | 12,00 | 394,25 |
| | C3 | 470,07 | 7,83 | 1,50 | 506,76 | 12,00 | 518,76 |
| | C2 | 406,49 | 6,77 | 1,50 | 421,99 | 12,00 | 433,99 |
| | C1 | 554,47 | 9,24 | 1,50 | 619,30 | 12,00 | 631,30 |
| | B1 | 404,73 | 6,75 | 1,50 | 419,64 | 12,00 | 431,64 |
| | B2 | 527,14 | 8,79 | 1,50 | 582,85 | 12,00 | 594,85 |
| | B3 | 500,32 | 8,34 | 1,50 | 547,09 | 12,00 | 559,09 |
| | B4 | 459,94 | 7,67 | 1,50 | 493,25 | 12,00 | 505,25 |
| | B5 | 389,36 | 6,49 | 1,50 | 399,14 | 12,00 | 411,14 |
| | A1 | 506,34 | 8,44 | 1,50 | 555,12 | 12,00 | 567,12 |
| | A2 | 454,35 | 7,57 | 1,50 | 485,80 | 12,00 | 497,80 |
| | A3 | 465,55 | 7,76 | 1,50 | 500,73 | 12,00 | 512,73 |
| | A4 | 405,73 | 6,76 | 1,50 | 420,98 | 12,00 | 432,98 |
| | A5 | 514,55 | 8,58 | 1,50 | 566,06 | 12,00 | 578,06 |
| | A6 | 487,17 | 8,12 | 1,50 | 529,56 | 12,00 | 541,56 |
| | D1 | 494,52 | 8,24 | 1,50 | 539,36 | 12,00 | 551,36 |
| | D2 | 393,74 | 6,56 | 1,50 | 404,99 | 12,00 | 416,99 |
| | D3 | 373,15 | 6,22 | 1,50 | 377,53 | 12,00 | 389,53 |
| | D4 | 394,36 | 6,57 | 1,50 | 405,82 | 12,00 | 417,82 |
| | D5 | 532,78 | 8,88 | 1,50 | 590,38 | 12,00 | 602,38 |
| | D6 | 439,74 | 7,33 | 1,50 | 466,32 | 12,00 | 478,32 |
| | F5 | 540,11 | 9,00 | 1,50 | 600,15 | 12,00 | 612,15 |
| | F4 | 407,65 | 6,79 | 1,50 | 423,53 | 12,00 | 435,53 |
| | F3 | 510,98 | 8,52 | 1,50 | 561,30 | 12,00 | 573,30 |
| | F2 | 474,69 | 7,91 | 1,50 | 512,92 | 12,00 | 524,92 |
| | F1 | 465,89 | 7,76 | 1,50 | 501,19 | 12,00 | 513,19 |
| | E5 | 557,11 | 9,29 | 1,50 | 622,81 | 12,00 | 634,81 |
| | E4 | 568,91 | 9,48 | 1,50 | 638,55 | 12,00 | 650,55 |
| | E3 | 470,15 | 7,84 | 1,50 | 506,86 | 12,00 | 518,86 |
| | E2 | 382,87 | 6,38 | 1,50 | 390,50 | 12,00 | 402,50 |
| | E1 | 419,70 | 6,99 | 1,50 | 439,60 | 12,00 | 451,60 |
| MÉDIA | | 466,54 | 7,78 | | | | |
| TOTAL | | | | | | | 16.963,70 |

Sistema de Ar Condicionado

Para o ar condicionado, as influências do modelo otimizado são diretas pela estratégia de funcionamento (no pior caso: duas horas a menos de operação) e também de forma indireta com a diminuição da carga térmica gerada pelas lâmpadas.

A variação da temperatura (figura 6-6) não é muito alterada, pois ocorre apenas um deslocamento temporal dela devido ao atraso do início de funcionamento do aparelho (2 horas mais tarde).

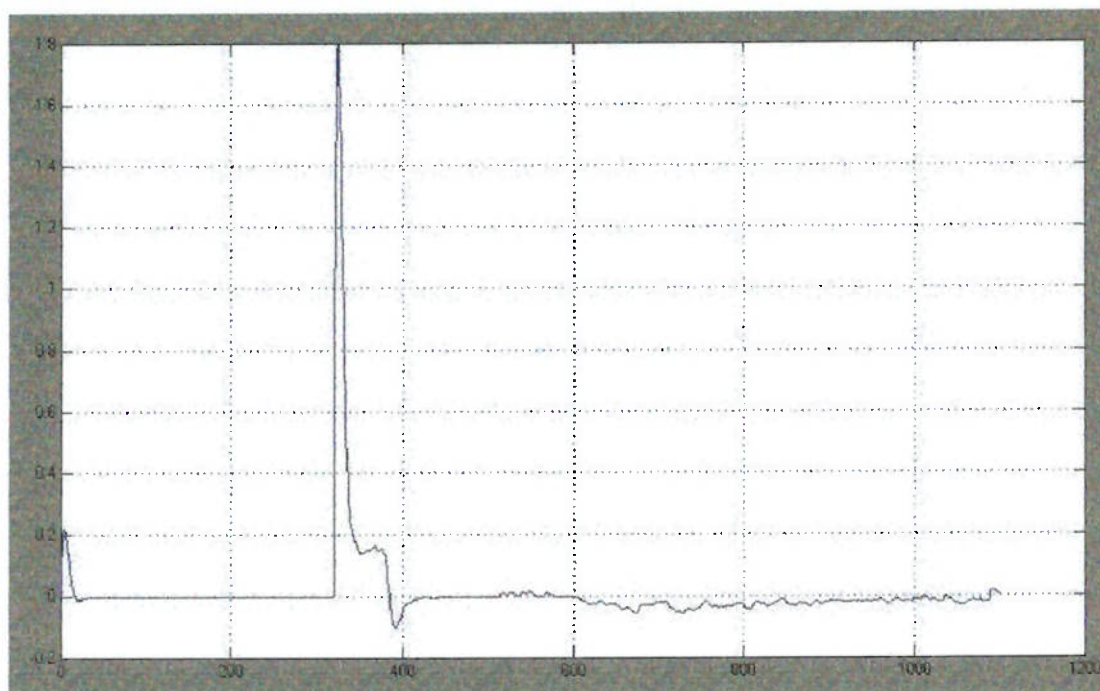


figura 6-6 – Variação da temperatura com referência em zero.

Porém, a energia interna do escritório é modificada, pois o aparelho de ar condicionado é acionado apenas quando a diferença de temperatura, havendo portanto, um período de duas horas a menos em sua operação (figura 6-7).

O cálculo da energia pode ser feito novamente com a utilização do métodos dos trapézios através de um algoritmo do *Matlab*. O valor calculado foi de 2.102.500 J/min, ou seja, 35 kW.

Analisando o relatório emitido pelo *Hpsim* que o primeiro funcionário entra em média às sete horas da manhã (120 minutos) após o *Sistema de Energia* ser acionado e o último funcionário sai em média às 19 horas (864,8 minutos), existe uma diferença de 12 horas de uso do equipamento. Deste modo o consumo energético é de 152.940 Wh (assumindo que a máquina fica ligada durante o expediente inteiro).

Como dito anteriormente, a simulação da saída dos funcionários não é realística, uma vez que a curva real tende a zero mais rapidamente. Deste modo, a economia pode ser maior na prática.

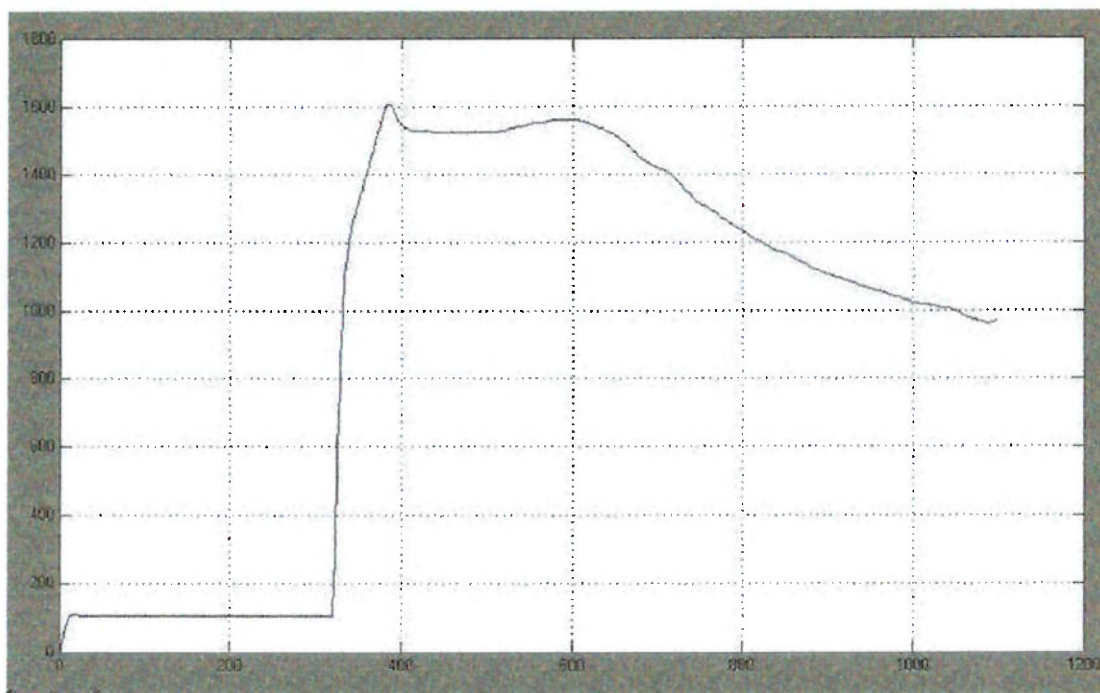


figura 6-7 – Variação da energia com o sistema otimizado.

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DESENVOLVIDOS

Com relação ao consumo energético devido ao uso do sistema de iluminação, observa-se que o sistema otimizado teve um consumo de 44,8 kWh diário contra um consumo de 71,9 kWh diário do sistema atual, o que representa uma economia de 27,1 kWh diário, ou seja, 38% de economia.

Quanto ao uso dos monitores, o recurso *sleep mode* se mostra bem atrativo para a economia de energia (91%). No caso estudado, com o uso deste recurso a economia do consumo energético relacionado com o monitor foi de 4,6 kWh diário, ou seja, 21% de economia.

Em relação ao ar condicionado, a economia estará diretamente relacionada com o tempo de operação. Supondo que a máquina opere durante todo o período que estiver ligada, para o caso do modelo atual, o consumo seria de 191 kWh diário (15 horas de operação), e no sistema otimizado, o consumo seria de 152,9 kWh diário (12 horas de operação). O que representa uma economia de 20%.

No entanto, faz-se aqui uma ressalva quanto ao período de operação do sistema otimizado. A saída dos funcionários foi determinada estocasticamente pelo *HPsim*, que não permite alterar o desvio padrão que determina a distribuição de tempos. Desde modo, observa-se que a distribuição simulada não é realística, uma vez que na realidade a curva de saída dos funcionários, após o expediente, é muito mais acentuada do que a apresentada, e normalmente o expediente de um escritório típico é encerrado às 18:00, com um período de no máximo 8 horas de expediente, e não doze conforme sugere a simulação. Assim, a economia na prática pode ser bem maior.

8. CONCLUSÕES

A implementação do conceito de sistemas integrados em um ambiente de trabalho ajuda a diminuir os custos e aumenta o conforto do usuário e por consequência o seu rendimento.

No entanto, para automatizar e assim buscar a máxima eficiência dos recursos disponíveis, é necessário antes entender o funcionamento do sistema para então construir o modelo usado na análise das soluções propostas. Nesse sentido, trabalhou-se no estudo do sistema (levantamento de dados) e levantamento de dados a serem utilizados.

Com relação ao levantamento de dados, pode-se dizer que apesar de certas limitações, como o próprio acesso às informações, o sistema estudado possui peculiaridades que resultaram em simplificações na modelagem e hipóteses para evitar que o estudo saia do foco principal proposto neste trabalho. Um exemplo foi considerar que os funcionários *home-office* ou aqueles que realizam o trabalho fora do ambiente de escritório e que eventualmente entram no andar, como sendo equivalente a “meio funcionário” de escritório.

Quanto aos modelos desenvolvidos com base no levantamento de dados verificou-se que os dados obtidos são próximos aos valores extraídos dos registros a não ser por dois aspectos: a curva de saída dos funcionários não é próxima do real e o modelo do ar condicionado não permite visualizar o tempo de operação, uma vez que qualquer acréscimo ou decréscimo infinitesimal da energia faz com que o PID atue para corrigir os erros. Deste modo não foi possível verificar os momentos em que o compressor estava desligado ou ligado.

Contudo, a modelagem de um sistema otimizado foi possível de ser feito e o mesmo apresentou-se adequado para a redução do consumo energético. Obteve-se

uma economia de 38% com o sistema de iluminação, 21% no uso dos monitores e 20% no uso do sistema de ar condicionado. No total, a economia gerada foi de aproximadamente 20%.

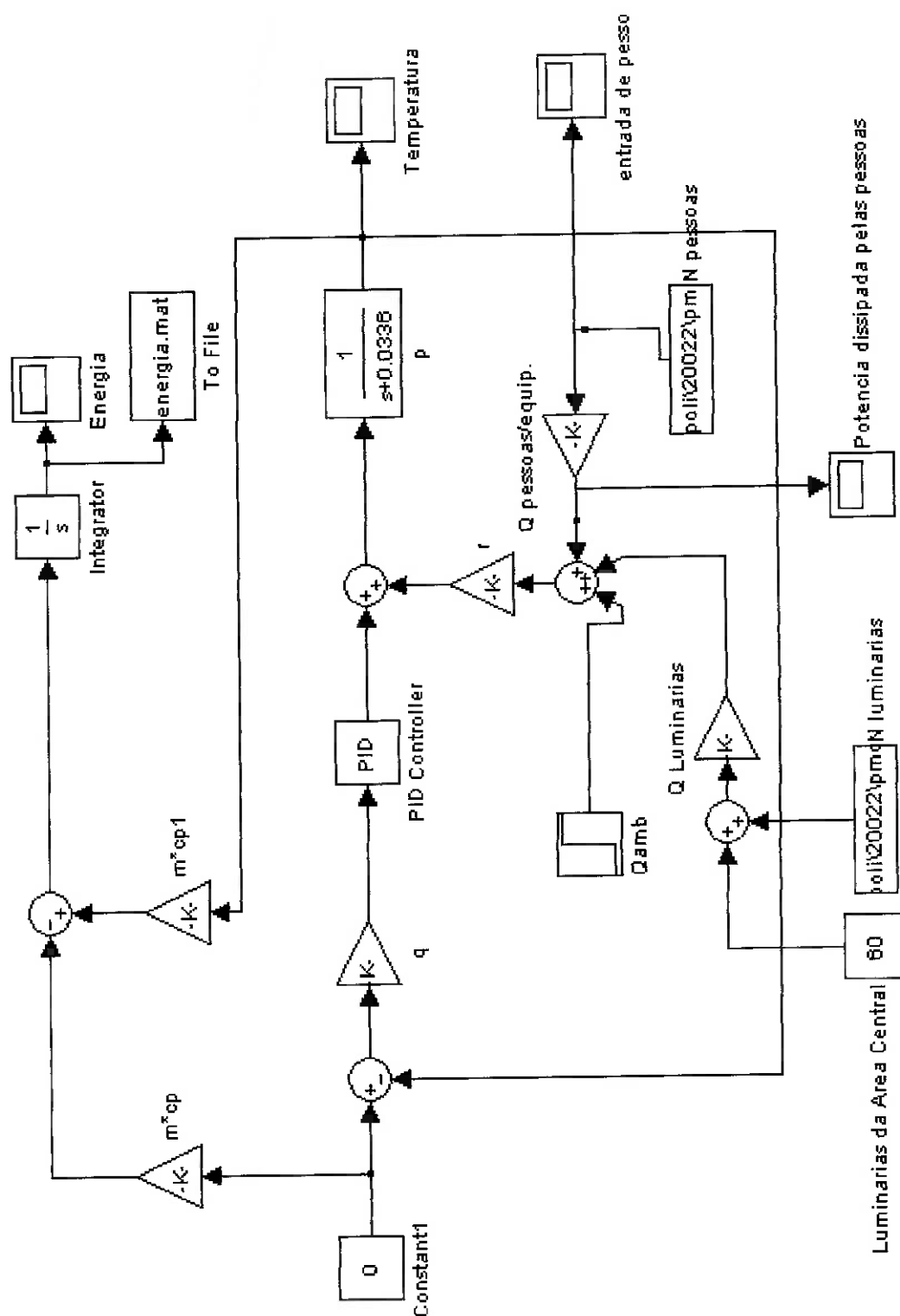
9. BIBLIOGRAFIA

- ANTSAKLIS, P. J. & NERODE, A. **Hybrid Control Systems: An Introductory Discussion to the Special Issue**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, n. 4, pp 457-459, 1998.
- ALLA, H & DAVID, R. **Continuous and hybrid Petri nets**. Journal of Circuits, Systems and Computers, vol 8, n. 1., pp159-188, 1998.
- ABRAMSON, A. B. The intelligent Building Evolution. In: INTELLIGENT BUILDING CONGRESS. **Proceeding**. p.309-318. Tel-Aviv, 1995.
- CANADA. **National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction**. U. S. 20-year plan will lead to healthier, more energy-efficient commercial buildings.. Volume 6, number 1, winter 2001.
- CAVALCANTI, S. **Relatório de Operação de Aparelhos de Ar Condicionado**, BHP Engenharia Térmica, 20p, São Paulo, 2002.
- COMPAQ. **B520 Monitor User's Guide**, 43p, April 1999.
- CHAMPAGNAT, R. **Petri Net Based Modeling of Hybrid System**. Computers in Industry, vol. 36, n. 1-2, pp 139-146, 1998.
- FETTERS, J. L. Take Control of Lighting Costs. Often overlooked, control technology helps maximize system and energy investments, **Maintenance Solutions**, http://www.facilitiesnet.com/fn/NS/NS2iart.html?ticket=1234567890123456789114500830#building_automation, December, 1998.
- FINLEY, M. R.; KARAKURA, A.; NBOGNI, R. **Survey of Intelligent Buildings Concepts**. IEEE Communications Magazine. April, 1991. p. 50-57.
- GALASIU, A. D., ATIF, M.R. Project to improve understanding of daylight-linked lighting systems, **CABA Home & Building Quarterly**, pg 18, Summer 2000.
- GOSTEMAN, M. & BENITEZ, N. L. **Petri Net-Based Modeling of Hybrid and Dynamics Systems**, 34th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing'96, Illinois, 1996.
- GOMES, L. F. **Redes de Petri Reactivas e Hierárquicas – integração de formalismos no projeto de sistemas reativos de tempo-real**. Lisboa, 1997. 240p. Tesis (Doctorado) – Universidade Nova Lisboa.
- GUSTIN, G. **Aplicação de redes de Petri interpretadas na modelagem de sistemas de elevadores em edifícios inteligentes**. 139p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- INCROPERA, F.P, DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, LTC, 4^a ed., Rio de Janeiro, 1998.
- LANG, V. P. **Principles of air conditioning**, Delmar Publishers Inc., Albany, New York, 1968.

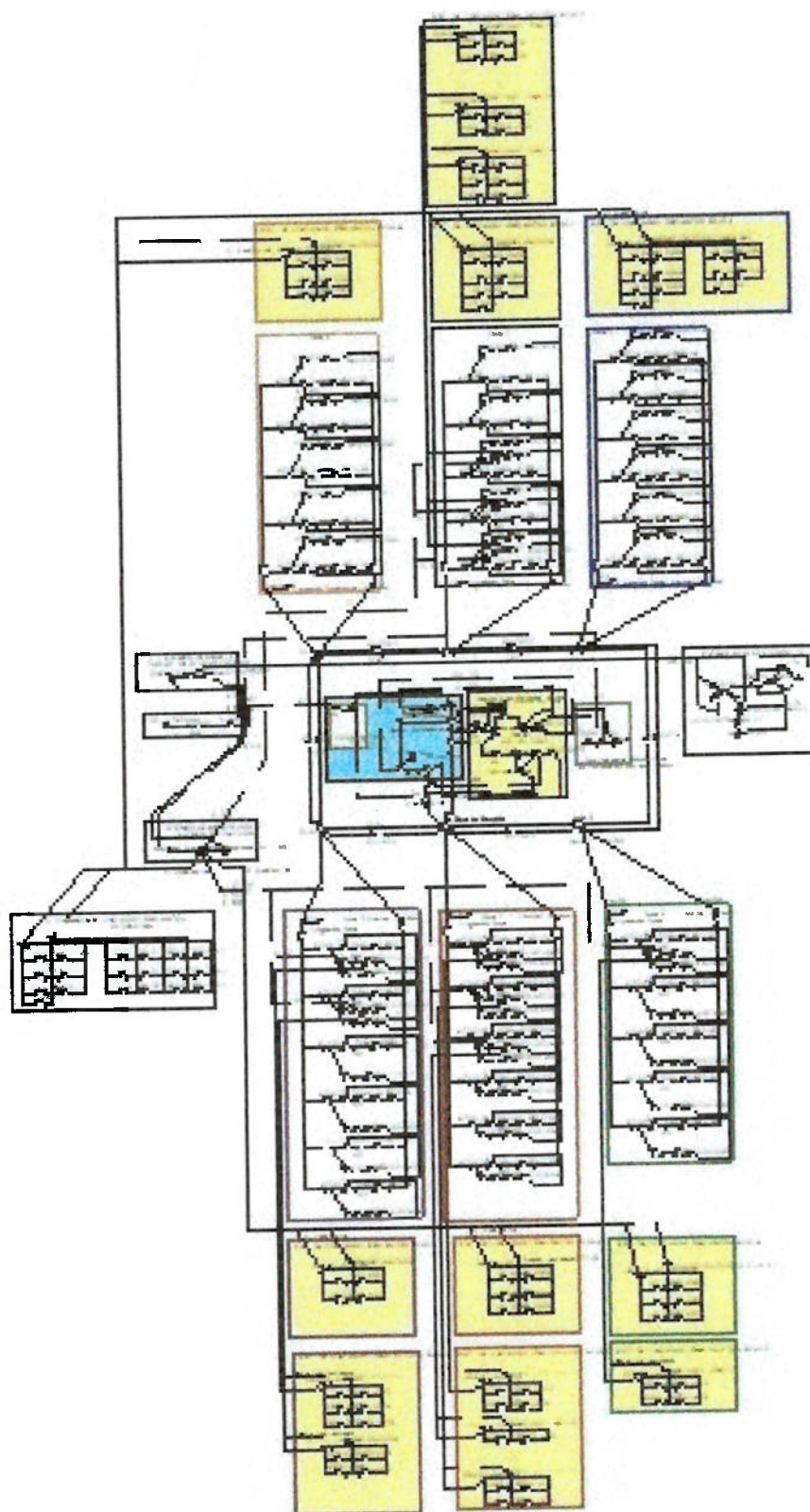
- LUDIN, B. L. V. Controlling Energy Costs. **Energy Decisions**. Integrated Building System. http://www.facilitiesnet.com/fn/NS/NS2iart.html|ticket=1234567890123456789114500830#building_automation. March 2000
- MACIEL, P. I **Brazilian Petri Net Meeting**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. <http://www.cin.ufpe.br/~bpmn/portugues.html>. Abril 2002.
- MIYAGI, P. E. **Controle Programável**. Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos, editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1997.
- MIYAGI, P. E. **PMR 2460 Modelagem e Controle de Sistemas Discretos – Introdução a Simulação Discreta**. 56p. Apostila de aula – Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- MOORE, T. Let the sun shine in. Advances in lighting controls are helping facility professionals discover how daylighting can aid in energy cost savings, **Energy Decisions**, http://www.facilitiesnet.com/fn/NS/NS2iart.html|ticket=1234567890123456789114500830#building_automation. January/February 2000.
- NETTO, A. C. **Tópicos de Refrigeração**, Departamento de Engenharia Mecânica EPUSP, São Paulo, 2002
- PALOMINO, R. C. **Uma Abordagem para a Modelagem, Análise e Controle de Sistemas de Produção Utilizando Redes de Petri**. 148p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.
- PIPER, J. The search for savings – Systematic inspections of HVAC components can generate bottom-line benefits. **Maintenance Solutions**, <http://www.facilitiesnet.com/MS/Feb02/feb02hvac.shtml>, February 2002a.
- PIPER, J. Routes to Energy Savings – Facility executives must take advantage of both efficient technologies and energy rate structures to maximize savings. **Building Operating Management**. <http://www.facilitiesnet.com/BOM/Apr02/apr02energys.shtml>, April 2002b.
- PIPER, J. Finding the Right BAS -Today's building automation systems give facilities the power to boost efficiency and cut energy costs. **Maintenance Solutions**, November 1998c
- QAYOUMI, M. A New Era for Power Monitoring - Facility demands for reliable quality power prompt managers to create more robust monitoring programs. **Maintenance Solutions**, January, 2000.
- RAMADGE, P. J.; WONHAM, W.M. **The control of Discret Event Systems**. Proceedings of the IEEE, v. 77, n.1, 1989.
- REINHART, C. Project to establish realistic expectations about benefits of daylighting in office building, **Indoor Environment**, 2000.
- SHAW, C.Y. Research Viewpoints from IRC – Guidelines for Better IAQ. **CABA Home & Building Quarterly**, pg 17-18, Winter 1996.
- STOECKER, W. F. JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. Ed. Brochura, 2ed., São Paulo, 1985.
- SIEMENS BUILDING TECHNOLOGIES, Understanding The Benefits Of Integration, **Magazines Online – Building Operating** – <http://www.facilitiesnet.com/bom/Apr01/apr01automationb.shtml>, April, 200

- VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**, Edgar Blücher, 5a ed., São Paulo, 1998.
- VILLANI, E. **Abordagem Híbrida para Modelagem de Sistemas de Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes**. p154 Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- WIETING, R. **Hybrid High-Level Nets**. Procceding of the 1996 Winter Simulation Conference, Colorado, 1996.

ANEXO 1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO DE AR CONDICIONADO EM *SIMULINK*



ANEXO 2 – MODELO DA INTEGRAÇÃO DO SISTEMA ATUAL



ANEXO 3 – MODELO DA INTEGRAÇÃO DO SISTEMA OTIMIZADO

